

SEMARNAT

SECRETARÍA DE

MEDIO AMBIENTE

Y RECURSOS NATURALES



XIXIMI FASE I: ESTABLECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO EN RESPUESTA AL DERRAME PETROLERO ASOCIADO A LA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON

Reporte Final



2012

Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático



Coordinado por:

Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático

Elaborado por:

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Sharon Z. Herzka Juan Carlos Herguera Alexei Licea Julio Sheinbaum Vicente Ferreira

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, 2° piso. Col. Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan C.p. 4210 Ciudad de México Tel. +52 (55) 54246400.

<u>www.inecc.gob.mx</u>

Enero 2012

ESTABLECIMIENTO DE LÍNEA DE BASE EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO EN RESPUESTA AL DERRAME PETROLERO ASOCIADO A LA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON

Fecha de entrega: 31 Enero 2012

Sometido por:

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) Baja California, México



Autores:

Sharon Z. Herzka¹, Juan Carlos Herguera¹, Alexei Licea¹, Julio Sheinbaum¹, Vicente Ferreira¹

(en orden alfabético):

Víctor Camacho², Walter Daessle², Victoria Díaz¹, Jaime Farber¹, Joaquín García¹, Martín Hernández Ayón², Miguel Ángel Huerta², Rubén Lara¹, Lucila Lares¹, Leonardo Lizárraga¹, Vinicio Macías², Meritxell Riquelme¹ y Axayacatl Rocha¹.

¹ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

² Universidad Autónoma de Baja California

LISTADO DE CUADROS	7
LISTADO DE FIGURAS	9
RESUMEN EJECUTIVO	19
EXECUTIVE SUMMARY	27
INTRODUCCIÓN	34
ANTECEDENTES	
Descripción general del derrame	
Oceanografía del Golfo de México	
Patrones de Circulación Oceánica	
OBJETIVOS GENERALES	
Objetivos específicos	
METODOLOGÍA	
Estrategia General de Muestreo	53
RESULTADOS	62
Temperatura, salinidad, LADCP	
Introducción	
Metodología	
Descripción del sistema CTD	
Adquisición de los datos	
Calibración	
Identificación de errores	
Lompactación de los datos	
Resultados	
Conclusiones	
Referencias	00
Oxigeno disuello	
Antecedentes	
ODJEUVOS	
Metouologia	
Diaguaián	
Conclusiones	
Deferencies	
Concentración de nutrientes	
Concentracion de nutrientes	
Antecedentes	
Objetivos	
Metouologia	
Conclusiones	
Conclusiones	
Reconnended	
Agradagimientog	
Agraueuiiieiiuos	
Antocodontos	
Anteleuentes	
UUJEUVUS Matadalagía	
พะเบนบาบgia	

Resultados	
Referencias	
Concentración de carbono orgánico disuelto	
Antecedentes	
Objetivos	
Metodología	
Preparación de las muestras a bordo del barco	
Métodos de laboratorio	
Resultados	
Análisis de calidad de los datos	
Anomalía de COD a 1500 m	
Transectos estándar	
Conclusiones	
Recomendaciones	
Referencias	
Glosario de Términos	
Créditos	
Composición isotópica del carbono inorgánico	
Composición isotópica de la materia orgánica particulada	
Metales Traza	
Antecedentes	
Ohietivos	135
Metodología	135
Estrategia de muestreo	135
Métodos de laboratorio y análisis	
Resultados	
Conclusiones	
Referencias	141
Hidrocarburos derivados del petróleo	
Antecedentes	
Ohietivos	145
Métodos de Laboratorio	145
Resultados	147
Conclusiones	156
Becomendaciones	157
Poforonciac	
Closario de Términos	
Gréditog	
Desteriología	100
Antegodonteg	
Antecedentes	
Metodologia	
Estrategia de muestreo	
Métodos de Laboratorio	
Metuuus ue Allalisis	
Resultantificación de Euboctorias y Argues hactorias	
Identificación de Alfa Reta Cama y Dolta Drotachastorias	
Sedimentos	1/4 1QN
Conclusiones	
Recomendaciones	183
	105

Referencias	183
Fitoplancton	185
Antecedentes	185
Objetivos	
Metodología	186
Resultados	192
Identificación de taxones	192
Perfiles horizontales	197
Discusión	198
Conclusiones	200
Recomendaciones	200
Referencias	201
Zooplancton	203
Antecedentes	203
Objetivos	203
Metodología	203
Resultados	204
Conclusiones	212
Recomendaciones	212
Referencias	212
Créditos	
Composición elemental de C v N orgánico e inorgánico, composiciones isotópicas,	tasas de
acumulación v propiedades texturales de los sedimentos	
Metales traza e isótopos de Ph en sedimentos profundos	
Antecedentes	
Ohietivos	217
Metodología	217
Resultados	219
Metales traza en sedimentos	
Conclusiones	
Recomendaciones	
Referencias	
Glosario de términos	
Créditos	243
Estudio faunístico de la meiofauna	
Antecedentes	2.44
Ohietivos	245
Métodos	245
La extracción de meiofauna	245
Cuantificación e identificación al microscopio	
Métodos de Análisis	
Resultados	
Conclusiones	
Recomendaciones	251
Referencias	
Créditos	
Estudio faunístico de la macrofauna de mar profundo	254
Antecedentes	254
Ohietivos	255
Métodos	255
Fieldud	

Resultados	256
Conclusiones	259
Referencias	259
Monitoreo de hongos en sedimentos marinos	
Antecedentes	
Objetivos	
Métodos	
Extracción de ADN de muestras de sedimentos	
Amplificación por PCR del ADNr de hongos	
Clonación de amplicones y análisis de transformantes	
Metodos de analisis	
Resultados	
Conclusiones	
Recomendaciones	
Closerio de Términee	
Giosario de la basa da datas da VIVIMI 1	
Estructura de la base de datos de AIAIMI-1	
Dase de datos: Excel	
Metadatos	
Variables determinadas nor sossión	202 202
Variables determinadas por seccion	202 202
Dase de datos: Ocean Data view (ODV)	203 295
Palametros de calidad	
	205
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS	
GLOSARIO DE TÉRMINOS	
CRÉDITOS	
ANEXOS	

LISTADO DE CUADROS

Tabla 1. Tabla de parámetros a evaluar dentro del contexto del proyecto
"Establecimiento de línea de base en aguas profundas del Golfo de México en
respuesta al derrame petrolero asociado a la plataforma Deepwater Horizon". La
lista de parámetros y el compartimiento o matriz en la cual se medirían se
especifican dentro del convenio. Los asteríscos indican parámetros cuya medición
se comprometieron en el convenio. Las mediciones que se resaltan en negro se
llegaron a completar o se presentan de forma parcial según lo especificado. Se
describe el estatus de cada tipo de análisis en la última columna. NO: No se
comprometió a llevar a cabo esos análisis. IMP: Instituto Mexicano del Petróleo.
N/A: no aplica
Tabla 2. Lista de investigadores participantes en el proyecto, adscripción y línea de
investigación
Tabla 3. Nombre, coordenadas, fechas de muestreo (GMT) y profundidad de las 46
estaciones que se cubrieron durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 a bordo
del BO Justo Sierra. El tipo de lance se refiere a la profundidad máxima en la cual
se recolectaron muestras de agua (1000m en el caso de estaciones someras y
3000m en estaciones profundas)
Tabla 4. Profundidades nominales de la recolecta de muestras de agua con una roseta
equipada con 12 botellas (6 Niskin + 6 GoFlo) de 10 L. En negrillas se indican las
profundidades en las cuales se tomaron muestras de agua para el análisis de para
metales traza
Tabla 5. Nombre de identificación, coordenadas, fechas de muestreo (GMT) y
profundidad de las 10 estaciones en las cuales se recuperaron núcleos durante la
campaña oceanográfica XIXIMI-1 a bordo del BO Justo Sierra.
Tabla 6. Especificaciones técnicas de los sensores del CTD
Tabla 7. Coeficientes de calibración de los sensores de presión y temperatura utilizados
en XIXIMI-1
Tabla 8. Coeficientes de calibración de los sensores de conductividad utilizados en
XIXIMI-1
Tabla 9. Coeficientes de calibración de los sensores de oxígeno disuelto y
fluorescencia utilizados en XIXIMI-166
Tabla 10. Coeficientes de calibración de los sensores utilizados en XIXIMI-1 obtenidos
posterior a la campaña oceanográfica68
Tabla 11. Cálculo de presición analítica y límites de detección
Tabla 12. Clasificación de muestras de COD XIXIMI-1. Quality Flag (QF): 0Buena
calidad, 1Calidad desconocida, 4Calidad Cuestionable y 8Mala calidad 123
Tabla 13. Grupos bacterianos a identificar empleando oligonucleótidos específicos. 165
Tabla 14. Profundidades en las cuales se tomaron muestras de agua para el análisis de
la composición específica de diatomeas y dinoflagelados de la zona profunda del
Golfo de México. En algunas estaciones se recolectaron muestras a varias
profundidades
Tabla 15. Recomendaciones para el tiempo de sedimentación para las muestras
preservadas con lugol (Edler 1979)189

- Tabla 21. Límites de detección para los diferentes metales traza en las fracciones HCl y pirita medidos en absorción atómica a la flama. Para el caso especial del V, los límites de detección fueron obtenidos en absorción atómica por horno de grafito. 218

- Tabla 24. Concentraciones promedio (± una desviación estándar) de metales traza asociados a la fracción pirita para los sedimentos de las diferentes estaciones..223
- Tabla 26. Condiciones de la PCR para los distintos conjuntos de oligonucleótidos utilizados.
- Tabla 28. Filotipos según el porcentaje de cobertura, similitud y valor de E, así como elnúmero de repeticiones del patrón de restricción por estación.275

LISTADO DE FIGURAS

- Figura 6. Volumen diario y cumulativos de dispersantes (principalmente de Corexit 9500) empleado durante el derrame asociado a la plataforma Deepwater Horizon. 41
- Figura 8. Transporte en Sverdrups (millones de metros cúbicos por segundo) en el Atlántico Norte por arriba de la isoterma de 7°C, donde se muestran las contribuciones del Giro Subtropical (verde) y la Celda de Circulación Meridional (rojo) a las corrientes en el Caribe y Golfo de México (Tomado de Schmitz, 1996).
- Figura 10. Circulación superficial en el Golfo de México estimada mediante derivadores superficiales (amarillo y azul) y subsuperficiales (negro). Los derivadores azules (amarillos) se lanzaron al este (oeste) de 89° Oeste. Notar la gran variabilidad del flujo profundo. (Fuente: Wetherly *et al.*, 2005. Intermediate-Depth Circulation in the Gulf of Mexico Estimated from Direct Measurements. Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models. Geophysical Monograph Series 161. AGU)....46

Figura 19. Diagrama TS de los datos de bajada......73 Figura 19. Diagrama TS de los datos de subida......74

- Figura 22. Diagrama T-S de datos de NODC del mes de noviembre (puntos negros) y de la campaña XIXIMI-1 (puntos azules). Los perfiles con aguas más salinas de la SUW a 22 grados C y menos saladas a 7 grados C, de la AIW corresponden Golfo Este y al Caribe. Los perfiles con salinidad casi homogénea del agua arriba de los 18 grados C, corresponden a perfiles en el Golfo central y noroccidental. El perfil de XIXIMI-1 es similar al climatológico de la parte sur del Golfo y "cuasi-intermedio" entre los antes descritos.

- Figura 27. Mapa de las estaciones de la campaña XIXIMI-1, en el que las esferas rojas muestran las estaciones de muestreo de la campaña y las esferas grises muestran estaciones ocupadas del registro instrumental de la NOAA's National Oceanographic Data Center (NODC) (1960-2010). A la derecha perfil de oxígeno disuelto con la temperatura ^oC para todas las muestras colectadas (esferas rojas) sobre los valores de OD medidos instrumentalmente durante las pasadas 5 décadas del WODB (esferas grises) para el período comprendido entre octubre a diciembre para hacerlos equivalentes en el tiempo con las mediciones realizadas en XIXIMI-1.
- Figura 29. Sección paralela a la plataforma de Yucatán en la que se muestra el gradiente en las concentraciones de OD entre el canal de Yucatán a la derecha y

- Figura 37 Mapa de Norte América que ilustra las zonas en las que se han realizado mediciones de pCO₂ mediante cruceros oceanográficos y barcos de oportunidad. Nótese la falta de información en el Golfo de México. Cortesía del Dr. Takahashi. Por lo tanto, la oportunidad que se generó por iniciativa de INE, será transcendente y de gran aportación en lo referente a la línea base de la biogeoquímica del carbono de esta región y a proveer también elementos que contribuyan junto con el resto de las mediciones a generar un diagnóstico en relación al tema del derrame.
- Figura 38. Transecto A22 del programa WOCE realizado en 1997. Los datos generados de temperatura, salinidad, CID y TA de estas estaciones se utilizaron para fines de comparación con los valores obtenidos durante;a campaña oceanográfica XIXIMI-1. 113
- Figura 39. Perfiles comparativos de salinidad y temperatura. Los datos en círculos negros corresponden a los datos del XIXIMI-I y en color a los del WOCE (Los colores en datos del WOCE corresponden a diferentes latitudes). El corchete derecho en azul en el gráfico de salinidad enmarca las latitudes de 10 a 20°N del agua que se encontró como fuente y que fue la misma en el interior del GoM....114

- Figura 42. Diagramas T-S y CID-S del GoM. Los colores indican la profundidad. En el grafico izquierdo se indican las masas de agua como: Agua Subsuperficial Subtropical (ASsT); Agua Central Tropical (ACT); Agua Intermedia del Atlántico y Agua Profunda del Atlántico. Notar que el agua superficial, el ASsT y ACT tienen una misma estructura tanto la relación T-S, como la CID-S. Sin embargo, es diferente la estructura en las masas de agua profundas (AIA y APA). Lo anterior se

debe a que en ambas masas de agua la salinidad básicamente es la misma y lo Figura 43. Perfil de la concentración de carbono orgánico disuelto en una estación del Figura 44. Histogramas de concentración de COD en XIXIMI-1. Muestras con QF de 0, Figura 45. Perfiles promedio de COD en el Golfo de México bajo diferentes criterios de calidad. QF: Quality Flag. Las líneas horizontales en rojo representan el error Figura 46. Clasificación de perfiles verticales de COD de acuerdo con su forma: clásico (izquierda), máximos profundos (centro) y tipo zigzag (derecha). Únicamente se utilizaron datos con QF 0 y 1. 125 Figura 47. Perfil promedio (línea base) de COD para el Golfo de México obtenido con Figura 48. Anomalías de COD en el Golfo de México. Izquierda.- Comparación entre perfil promedio de COD correspondiente a la línea base y perfil promedio de 7 estaciones (mostradas en mapa) con máximos profundos de COD en el Golfo de México. Derecha.- Mapa de isosuperficie de COD a 1500 metros de profundidad Figura 49. Distribución vertical de las concentraciones de COD a lo largo de los paralelos 24 y 25 °N durante el crucero XIXIMI-I.....127 Figura 50. Distribución vertical de las concentraciones de COD a lo largo de las líneas Figura 51. Distribución vertical de las concentraciones de COD a lo largo de un transecto de la bahía de Campeche al canal de Yucatán durante el crucero XIXIMI-Ι. 128 Figura 52. Comparación de perfiles promedio de COD en el Golfo de México 44 estaciones de XIXIMI-1 vs 2 perfiles de XIXIMI-2......130 Figura 53. Distribución vertical de las concentraciones promedio de vanadio (nM) para Figura 54. Distribución vertical de salinidad comparada con datos históricos del Golfo Figura 55. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona Figura 56. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona Figura 57. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona profunda del Golfo de México a 600m.140 Figura 58. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona Figura 59. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona Figura 60. Distribución vertical de la suma de hidrocarburos alifáticos medidos en la columna de agua en 2010 en la zona profunda del Golfo de México para el sector

- Figura 62. Relación entre los cuatro compuestos pristano, fitano, C17 y C18 como ha sido propuesto para distinguir orígenes potenciales de los compuestos. Los puntos negros son re-digitalizados del autor original (Makki, et al., 2010). Los triángulos en azul pertenece a niveles de la estación 19 de XIXIMI-1. Los valores en rojo, son reportados por Wade et al., (2011) para el petróleo en sitios cercanos al derrame. 151
- Figura 63. Concentración y tipo de hidrocarburos alifáticos presentes en la Estación 24 a 1500 y a 1200 m de profundidad. Varias fuentes de hidrocarburos pueden ser observadas en su composición. Serie 1 es a 1500 m y serie 2 es a 1200 m...... 152
- Figura 65. Concentraciones y tipos de aromáticos poli-nucleares reportados para el hidrocarburo del derrame del pozo Macondo en 2010 encontrado en sedimentos. 154

- Figura 70. En las gráficas observadas en esta figura, se observa un comportamiento no esperado respecto a la relación y presencia de Archeobacterias respecto a las Eubacterias, en estos ejemplos predominaron las bacterias del tipo Eubacteria. 171

Figura 77. Abundancia relativa del género Vibrio y bacterias hidrocarbonoclásticas. . 179

- Figura 85. Concentración de clorofila *a* en aguas superficiales del Golfo de México durante noviembre del 2010 (promedio mensual). La imagen fue generada con datos del satélite Aqua MODIS (resolución 4 x 4km). Fuente: NASA (<u>http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=ocean_month</u>). 208

- Figura 88. Abundancia de eufásidos (superior). Abundancia de larvas de peces (medio). Abundancia de huevos de peces (inferior), (miles de individuos 1000 m⁻³). 211
- Figura 89. Perfiles de las concentraciones de metales asociados a la fracción HCl (Me_{HCl}) para sedimentos de las diferentes estaciones del Golfo de México........220

- Figura 96. Valores promedio de las concentraciones metales traza en las fracciones HCI y pirita correspondientes a las diferentes estaciones del Golfo de México. Nótese la escala logarítmica en ambos ejes de la gráfica......231
- Figura 97 Valores máximos de las concentraciones de Fe pirítico en diferentes ambientes sedimentarios: Offatts Bayou, Port Aransas, plataforma de Galveston Bay, Orca Basin, plataforma GM (Golfo de Mexico), Skan Bay, Sitio FOAM, Delta Mississippi, Baffin Bay, Cape Lookout Bight, Saanich Inlet, Tidal Creek (Cooper y Morse 1996), Guerrero Negro Fosa 5, (Huerta-Diaz et al. 2011); Green Canyon (derrame crónico de petróleo; Huerta-Diaz y Morse 1992); St. Lawrence (Morse y Cornwell, 1987); Sedimentos profundos del GM (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, hypersalino; Henneke et al. 1997); Effingham Inlet (sitio óxico, Hurtgen et al. 1999); Delta del Danubio (Wijsman et al. 2001); Bannock Basin (Mar Mediterráneo, sulfídico, hypersalino; Henneke et al. 1997); Effingham Inlet (sitio anóxico; Hurtgen et al. 1999); Carmen Basin (Golfo de California; Goldhaber y Kaplan 1980); Mar Negro

- (2001), respectivamente.
 235
 Figura 100. Razones isotópicas de ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb para los diferentes núcleos sedimentarios del Golfo de México. Las razones para los sedimentos del Caribe (Antillas Menores), el Atlántico Oriental y petróleo crudo (Mar de Bohai) fueron tomados de White et al. (1985), Hamelin et al. (1990) y Bin-Quan et al. (2001), respectivamente.

Figura 104. Abundancia de la meiofauna expresada como el número total de organismos contabilizados 50 cm⁻² en las 7 estaciones del crucero XIXIMI-1.....246

Figura 105. Perfiles de abundancia en el sedimento de organismos totales de la meiofauna. La abundancia representa el número de organismos por 50 cm².....247

abundancia representa el número de organismos por 50 cm²......249 Figura 109. Análisis de escalamiento multi-dimensional (MDS) basado en similitudes de

Figura 113. Ejemplo del gel de agarosa de las muestras de la estación 19 en el que las bandas de ADN total no se alcanzan a percibir debido a su baja concentración. 270

Figura 114. Promedio de la concentración de ADN genómico total en las 5 submuestras
Figura 115, Ejemplo de del de electroforesis de las muestras E15, E19 y E3 en donde
se observa que las amplificaciones no fueron exitosas con los ITS universales 272
Figura 116 Ejemplo de gel de electroforesis de las muestras E15 E19 y E3 en donde
se observa que las amplificaciones fueron exitosas para E19 y E3 y no exitosas
para E15 con los ITS Dikarva
Figura 117. Esquema de los patrones de restricción obtenidos después de la digestión
con la enzima Rsal de los plásmidos de la estación E19. Sobre cada carril se
observa la clave para cada patrón de restricción. El marcador de peso molecular
indica los tamaños de banda desde 100 hasta 10,000 pb273
Figura 118. Esquema de los patrones de restricción obtenidos después de la digestión
con la enzima Rsal de los plásmidos de la estación E3. Sobre cada carril se
observa la clave para cada patrón de restricción. El marcador de peso molecular
indica los tamaños de banda desde 100 hasta 10,000 pb274
Figura 119. Esquema de los patrones de restricción obtenidos después de la digestión
con la enzima Rsal de los plásmidos de la estación E35. Sobre cada carril se
observa la clave para cada patrón de restricción. El marcador de peso molecular
indica los tamaños de banda desde 100 hasta 10,000 pb274
Figura 120. Abundancia de los filotipos encontrados en E19
Figura 121. Abundancia de los filotipos encontrados en E35
Figura 122. Abundancia de los filotipos encontrados en E3
Figura 123. Distribución de los afloramientos naturales de hidrocarburos en el Golfo de
México (imagen tomada de Tunnell 2011)278
Figura 124. Participantes científicos de la campana XIXIMI-1 (de izquierda superior a
derecha interior). Dr. Juan Carlos Herguera (JEFE DE CRUCERO, CICESE), Dra.
Sharon Herzka (CICESE), Marco Antonio Tenorio (IMP), Miguel Ojeda (CICESE), Folino Cooco (CICESE), Vicento Formairo (CICESE), Dra Lucilo Loros (CICESE)
Felipe Gasca (CICESE), Vicente Ferreira (CICESE), Dra. Lucita Lares (CICESE),
Adriana Romara (UARC/CICESE), Dr. Diago Lánaz Vanarani (IMD), Angélian
Podraza (LIABC) Povoa Barradas (CICESE), Erika Gutiárroz (CICESE), losá Luis
Abella (CICESE), Daniela Rabiela (CICESE), Edwina Nieto (INE), Carlos Elores
(CICESE) Ricardo Solís (CICESE) Arturo Sigueiros (LIARC) Jairo Fuentes
(CICESE)

RESUMEN EJECUTIVO

Entre el 20 de abril y 15 de julio del 2010, ocurrió el mayor derrame accidental de la historia de la explotación petrolera del mundo en la región noroeste del Golfo de México. El derrame ocurrió luego de la explosión y pérdida de la plataforma Deepwater Horizon, cuya consecuencia fue que se vertieron casi 5 millones barriles a 1500m de profundidad. Desde que comenzó el derrame, hubo un muy alto nivel de incertidumbre sobre el destino y persistencia del petróleo que emanó del pozo Macondo.

El Convenio de Colaboración "ESTABLECIMIENTO DE LÍNEA DE BASE EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO EN RESPUESTA AL DERRAME PETROLERO ASOCIADO A LA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON" fue firmado entre el Instituto Nacional de Ecología de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) con la Intervención de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) a los 22 días del mes de noviembre del 2010. En el convenio se establece que el CICESE y sus colaboradores del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California (IIO-UABC), el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y del Instituto Nacional de Ecología llevarían a cabo una expedición oceanográfica entre el 6-22 de noviembre del 2010 a bordo del *Buque Oceanográfico Justo Sierra* de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El proyecto tuvo como objetivos (1) establecer una línea de base de las características oceanográficas, geoquímicas y ecológicas de la zona profunda de las aguas territoriales mexicanas del Golfo de México (GM) durante condiciones de otoño, (2) evaluar si había evidencia de hidrocarburos provenientes del derrame de petróleo del pozo Macondo, y (3) sentar las bases para llevar a cabo esfuerzos de monitoreo posteriores con el objetivo de evaluar los posibles impactos del derrame sobre los ecosistemas marinos a corto, mediano y largo plazo.

La campaña oceanográfica XIXIMI-1 (*xiximi* es el término Nahuatl equivalente a derramar) se llevó a cabo con el objetivo de caracterizar diversos parámetros hidrográficos, biogeoquímicos y ecológicos en la zona de aguas profundas (>1000m) del GM. Se estableció un plan de muestreo que abarcó toda la región de aguas profundas (19 a 25°N; 87 a 95°O) y diferentes profundidades de la columna de agua de manera sistemática y estratificada. Se recolectaron muestras de agua en 46 estaciones y se recuperaron núcleos de sedimentos en 10 estaciones.

Cabe resaltar que el plan de muestreo que se describe en el convenio y que se empleó durante la campaña estuvo diseñado para el establecimiento de una línea de base en toda la región de aguas profundas de la Zona Económica Exclusiva mexicana, optimizando los recursos que teníamos disponibles y con el fin de evaluar los posibles impactos del derrame en el caso de que estos abarcaran grandes escalas espaciales. El plan de muestreo no estaba diseñado con el fin específico de localizar los hidrocarburos y gases asociados al derrame. Este informe incluye los resultados de mediciones llevadas a cabo a bordo de *BO Justo Sierra* durante el crucero y de análisis posteriores que se llevaron a cabo en laboratorios del CICESE, el IIO-UABC y externos. Se anexa al informe una base de datos en formato Excel que contiene todos los datos y una base de datos en formato Ocean Data View (ODV) que puede utilizarse para visualizar los datos.

Resultados sobre parámetros físicos de la columna de agua

Los datos de **temperatura** y **salinidad** recolectados durante XIXIMI-1 muestran las mismas características que los datos climatológicos anuales contenidos en la base de datos del National Oceanographic Data Center (NODC) de EUA. Sin embargo, la base de datos NODC no cuenta con observaciones históricas para noviembre debajo del paralelo 25°N, por lo que a menos que se obtengan (si es que existen) mediciones de otras fuentes, los datos de XIXIMI-1 son únicos.

En noviembre, pueden apreciarse las características de las masas de agua de las diferentes regiones del Golfo, con el agua más salada de la SUW (Subtropical Under-Water) y el mínimo más marcado de la AIW (Antarctic Intermidiate Water) del agua del Caribe, el agua más homogénea en salinidad del golfo central y noroccidental y el perfil "cuasi-promedio" entre estos dos, representado por los datos de XIXIMI-1 y los datos climatológicos del golfo sur.

La comparación de la distribución especial y en profundidad de la isoterma de 20°C calculada a partir de los datos de XIXIMI-1 con una mapa satelital de nivel del mar producido por el *Colorado Center for Aerodynamics Research (CCAR)* de la Universidad de Colorado indica consistencia entre ambos campos. Valores someros (profundos) de la isoterma coinciden con la presencia de ciclones (anticiclones) en el mapa de altimetría. Sabemos que la dinámica del golfo está dominada por remolinos y la actividad de meso-escala, por lo que la interpretación de una "fotografía" del estado del GM profundo en su parte mexicana (que es lo que representan las observaciones de XIXIMI-1), debe realizarse y será en gran medida explicada a partir de empatar las diversas observaciones con datos de satélite que permiten ubicar geográficamente a dichos remolinos

Con respecto a los valores de **oxígeno disuelto** (OD), éstos fueron relativamente altos en los primeros 200 m de la columna de agua y muestran la importancia del intercambio océano-atmósfera de O_2 , así como de la producción de oxígeno por fotosíntesis.

Las concentraciones de OD decrecen hasta un mínimo localizado entre los 350 a los 500 m de profundidad hasta llegar a valores de 2.45 ml/L. Este mínimo de oxígeno es debido a que: (1) las aguas a estas profundidades entran por el Canal de Yucatán procedentes del Caribe ya empobrecidas en O₂, y son parte de una masa de agua denominada Agua del Atlántico Tropical Central (AATC, o TACW en la literatura anglosajona), (2) este empobrecimiento en oxígeno varía dentro del GM debido a la oxidación de la materia orgánica que procede fundamentalmente de la zona fótica, pero también la de origen continental que es arrastrada por los ríos estacionalmente y en menor medida a las fugas de hidrocarburos de las chapopoteras naturales comunes en la plataforma, talud y cañones submarinos del GM y (3) al tiempo de residencia de estas agua intermedias que aún desconocemos de una forma precisa.

Por debajo de este mínimo relativo, las concentraciones de O₂ aumentan de forma monótona hasta los 1300m de profundidad, por debajo de la cual permanecen prácticamente constantes (4.95-5 ml/L) hasta las profundidades abisales. Para esta región más profunda del GM, el transporte y la mezcla de aguas mas frías y ricas en oxígeno procedentes del Caribe a través del Canal de Yucatán (profundidad máxima de 2000m) son la única fuente de oxígeno. Este enriquecimiento relativo en OD en las aguas más profundas se debe a su origen en las latitudes altas del Atlántico norte y al relativamente corto tiempo que transcurre desde que se sumergen hasta llegar al GM. La cuasi constancia de los valores de OD por debajo de los 1500m de profundidad se puede explicar por los procesos de circulación de estas aguas profundas, las tasas bajas de oxidación de la materia orgánica y a una tasa alta de ventilación mediada por un alto flujo de agua profunda a través del Canal de Yucatán.

La distribución espacial del OD a las profundidades coincidentes con las isopicnas de 27.7 y 27.725 en estructuras ondulantes y concéntricas a escalas de cientos de km revelan la existencia de giros o remolinos de mesoescala que periódicamente se liberan de la Corriente del Lazo y que se mueven a lo largo de los paralelos 25-24°N hacia el oeste hasta el talud de Tamaulipas, donde finalmente se disipan. La distribución del OD en la Bahía de Campeche es consistente con la existencia de un giro semipermanente en esta región.

No se encontraron anomalías en el DO que no pudiesen ser explicadas por los procesos físicos y biológicos típicos del golfo.

Resultados de los análisis biogeoquímicos en la columna de agua

Con respecto a las concentraciones de **nutrientes**, son similares a aquellas reportadas para el Golfo de México entre los 22º y 29º N. Se observa la señal de agua del Océano Atlántico a profundidades similares. También se observa el enriquecimiento de fosfatos y nitratos en la zona de mínimo oxígeno. La distribución espacial de nutrientes es consistente en el área de estudio y comparable con agua adyacente del Atlántico y estudios previos en agua de hasta 1700m en el Golfo de México.

La distribución vertical de **carbono orgánico disuelto** (COD) en el Golfo de México indica que únicamente en los transectos mas norteños, los paralelos 24°N y 25°N, existieron valores elevados en aguas profundas, específicamente a 1500m de profundidad. Esta anomalía no se presentó en todas las muestras recolectadas a 1500m en dichas latitudes, sino que se presentó específicamente en las estaciones E8, E10, E12, E17, E18, E22, E23 y E24.

La concentración de COD por sí sola no permite especular sobre la fuente posible del carbono orgánico. Sin embargo, es poco probable que se generen máximos de COD a 1500m de profundidad por procesos naturales.

Con respecto a las concentraciones de **carbono inorgánico disuelto** (CID) las obtenidas en XIXIMI-1 se compararon con la base de datos generados por el programa World Ocean Circulation Experiment (WOCE) en aguas del Atlántico Norte durante 1997 por no existir datos para el Golfo de México. Se observaron valores muy similares cuando se hizo la comparación entre las estaciones comprendidas entre los 10° a 14°N en aguas del Caribe durante el programa WOCE y los datos medidos en XIXIMI-I, tanto en las aguas superficiales (valores bajos), así como en las aguas subsuperficiales donde se encuentra el máximo de CID y el mínimo de oxígeno, así como en las aguas profundas donde los valores permanecieron estables alrededor de ~ 2200 µmol kg⁻¹.

Con respecto a las concentraciones de **hidrocarburos** se encontró que las concentraciones más altas se localizan en la región cercana a la Corriente de Yucatán.

En relación a la composición de los hidrocarburos, no existe evidencia de que se hayan detectado residuos del derrame que ocurrió en el pozo Macondo en aguas norteamericanas, aunque aún se están haciendo análisis. Sin embargo, hemos podido determinar la presencia de diferentes fuentes de alifáticos, entre ellas dos fuentes biogénicas y una que parece provenir de petróleo. En relación a las concentraciones totales de n-hidrocarburos alifáticos, los valores obtenidos de XIXIMI-1 se encuentran dentro de los rangos reportados para otras áreas del océano.

Con respecto a la distribución vertical del **vanadio** (V) disuelto, un metal traza que se encuentra en el petróleo, en la región profunda del Golfo de México esta fue similar a las distribuciones reportadas para al Atlántico Norte. Sin embargo, estos resultados deben ser considerados preliminares ya que se tuvo problemas con el espectrofotómetro y en la actualidad estos datos están siendo corroborados.

Resultados de los análisis biológicos en la columna de agua

Para la composición taxonómica del **fitoplancton**, se evaluaron las familias Bacillariophyta (diatomeas), Dinophyta (dinoflagelados) y Dictyochophyceae (silicoflagelados). Se recolectaron muestras a 10, 20, 50, 100 y 150m en estaciones y profundidades selectas. Se identificaron 81 taxones que incluyen 18 géneros de diatomeas y 23 géneros (52 especies identificadas) de dinoflagelados. Los dinoflagelados fueron el grupo más diverso, mientras que las diatomeas fueron el grupo más abundante. En general, la mayor abundancia del fitoplancton se presentó a los 50 m de profundidad, lo que probablemente indica que es a esa profundidad en donde se encontraron las condiciones ambientales (luz y nutrientes) más apropiadas para el crecimiento del fitoplancton. La región noreste de Golfo de México presentó mayor abundancia en comparación con la región central y el borde de la plataforma continental.

La concentración y distribución de **clorofila** *a* evaluada usando una imagen obtenidas por satélite (MODIS Aqua) para noviembre del 2010 indica que fue sumamente baja (< 0.1 mg m⁻³) en la región central del Golfo de México. Esto es consistente con la naturaleza oligotrófica de la zona de estudio. Los valores más altos (≈ 0.4 mg m⁻³) se observan en la región sureste de la Bahía de Campeche. Como es de esperarse, la concentración de clorofila *a* fue mucho más alta sobre la plataforma continental que no se cubrió durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1.

La caracterización de los grupos **bacterianos** presentes en la columna de agua se hizo por medio de tres juegos de evaluaciones: (1) se comparó el porcentaje de abundancia del ADN amplificado de Arqueobacterias vs. Eubacterias, (2) el porcentaje de abundancia de los grupos alfa, beta, gama y delta pertenecientes al grupo de las Proteobacterias (clasificadas dentro de las Eubacterias), y (3) se evaluó la presencia de bacterias del género *Vibrio* y bacterias con capacidad de degradar hidrocarburos (específicamente bacterias que contienen el gen de la alcano monooxigenasa).

Las Arqueobacterias suelen encontrase en zonas con condiciones ambientales extremas. Los grupos gamma y delta de las Proteobacterias contienen géneros que son degradadores de hidrocarburos, a diferencia de las bacterias de los grupos alfa y beta. El grupo delta se encuentra principalmente en ambientes aeróbico, pero existe un grupo anaeróbico que contiene la mayor parte de las bacterias degradadoras de sulfatos, o reductoras de azufre, por lo cual podría esperarse un incremento de este grupo ante una posible emanación de hidrocarburos. Dentro del grupo de las gamma, se encuentran las bacterias del genero *Vibrio*, al cual algunos autores han atribuido la capacidad de degradación de petróleo.

Por razones analíticas y considerando los intereses de este proyecto, se analizó la comunidad bacteriana solo en muestras de profundidades mayores a los 150m. En la gran mayoría de los muestras predominaron las Arqueobacterias. En el 72% de las muestras, las Arqueobacterias representaron un porcentaje de abundancia relativa arriba del 65%. Sin embargo, conforme aumentó la profundidad, se incrementó el porcentaje de Eubacterias con respecto a las Arqueobacterias. Este dato es de suma importancia, ya que dentro del grupo de las Eubacterias se encuentran las bacterias degradadoras del petróleo. En algunas estaciones cerca de zonas para las cuales se han reportado emanaciones naturales de petróleo, la presencia de Eubacterias fue mayoritaria y excluyente de las Arqueobacterias. En la E36, que está cerca de la boca del Cañón de Campeche predominó la presencia de Eubacterias en todas las profundidades.

Los grupos de las proteobacterias que predominaron en aguas de profundidades mayores a los 150m fueron las alfas y las beta, seguidos por las gama y delta. Las bacterias del grupo beta predominaron en 60% de las estaciones. En cuanto a las bacterias del genero *Vibrio* y a las que poseen genes codificantes de proteínas con capacidad para degradar el petróleo (gen de la alcano monooxigenasa), se encontró una correlación positiva entre estos dos tipos de bacterias. Es evidente que ciertos grupos de bacterias pueden verse favorecidas ante la presencia de hidrocarburos del petróleo. Sin embargo, en este momento no es posible determinar, solo con base en resultados bacteriológicos, si su presencia es debido a emanaciones naturales de petróleo de estas zonas, o si es debido a la presencia de petróleo proveniente del Pozo Macondo.

En general, los biovolumenes del zooplancton capturado con red bongo de 333µm fueron relativamente bajos (< 70 ml 1000 m⁻³), aunque fueron un poco más altos en algunas estaciones cercanas a la plataforma en la Bahía de Campeche (70-100 ml m⁻³). En esta zona se registraron temperaturas relativamente bajas, salinidad baja y las más altas concentraciones de clorofila *a*.

Se cuantificaron los organismos de 30 taxones. Tan solo 6 taxones conformaron el 88% de los individuos capturados. Los copépodos fueron los más abundantes (53.5%), seguidos por los quetognatos (13.4%), ostrácodos (11.2%), pterópodos (3.89), sifonóforos (3.2%) y eufásidos (3.1%). Las larvas de peces constituyeron el 1% del total.

Química de sedimentos

Las concentraciones medidas de **Fe** asociado a la fracción pirita son sumamente bajas en los sedimentos abisales del Golfo de México cuando se las compara con otras regiones sedimentarias oceánicas.

Los resultados para las fracciones **HCI**, **pirita** y los valores de DOP (porcentaje de Fe reactivo que se ecuentra en forma de pirita, o grado de piritización) y DTMP (grado de metal traza reactivo que se encuentra asociado a la pirita) sugieren dos tipos de limitaciones en la formación de pirita en los sedimentos: la disponibilidad de Fe lábil (Fe_{HCI} en los sedimentos de las estaciones E33, E31 y E27) y la disponibilidad de materia orgánica lábil en el caso del resto de los núcleos de la llanura abisal del GM. Los análisis de carbono orgánico pendientes de ser realizados podrían ayudar a dirimir entre ambas limitaciones. Encontrar altos valores de C orgánico asociado a los núcleos E33, E31 y E27 revelaría la presencia de materia orgánica lábil que podría explicar los valores relativamente más altos en la concentración de metales traza y Fe atrapados en el reservorio pirítico en estos tres lugares.

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. De manera similar a los resultados observados para los metales de las fracciones HCl y pirita, la dispersión en las razones isotópicas de Pb también indica que los ambientes sedimentarios profundos del Golfo de México presentan una gran heterogeneidad. En este estudio las relaciones isotópicas de Pb no pueden usarse para evaluar posibles impactos por el derrame de hidrocarburos debido a la falta de información de la composición isotópica de los hidrocarburos y al desconocimiento del origen y procesos de mezcla que controlan estas relaciones en los sedimentos abisales del GM.

Resultados de biología en sedimentos

La presencia de **bacterias** en los sedimentos fue baja en algunas estaciones (E3, E15 y E19). Estas tres estaciones no se encuentran en zonas para las cuales se hayan reportado emanaciones naturales de hidrocarburos. Suponemos que la baja presencia de bacterias es debido a la escases de nutrientes.

Por otro lado, hubo estaciones en las cuales los bacterias asociadas a los sedimentos tuvieron una alta abundancia y diversidad (por ejemplo, E35 y E40). Estas estaciones sí están en zonas de emanaciones naturales de hidrocarburos, también cerca de la zona de explotación petrolera de nuestro país y se encuentran sobre el talud continental donde la cantidad de alimento en los sedimentos puede ser mayor que en la zona abisal.

Son pocos los trabajos que se han realizado sobre la comunidad **meiofáunica** (45 a 500µm) de la zona profunda del Golfo de México. Se contabilizaron un total de 2,596 organismos de muestras de sedimentos recolectadas en 7 estaciones. Los patrones de distribución vertical corresponde a los perfiles de distribución típicos; la mayor parte de la biomasa se encontró en los primeros 6 cm aunque hubo variabilidad considerable entre estaciones. La comunidad meiofáunica estuvo dominada por nemátodos de vida libre que representaron el 81% de los organismos contabilizados. La muestra de la estación E15 frente a las costas de Tamaulipas destacó por poseer una biomasa mucho mayor que las de la Bahía de Campeche y cerca de la plataforma de Yucatán, mientras que la E3 presentó una predominancia de foraminíferos. La región del Banco de Campeche posee una comunidad característica que es similar a la de la Península de Yucatán (E27).

En general se recolectó poca **macrofauna** (organismos retenidos en un tamiz de 0.5 mm) en los sedimentos. Esto se debe a que solo se pudo recolectar una muestra de volumen limitado por estación de muestreo, a que los organismos más abundantes son de talla relativamente pequeña (< 0.5 mm) y a la naturaleza oligotrófica y profunda de la zona de estudio. Se recolectaron únicamente algunos poliquetos, nemátodos, oligoquetos, crustáceos peracáridos y un molusco.

En el caso de **hongos**, existe muy poca información sobre la composición de la comunidad fúngica marina, por lo que los impactos ambientales a dicha comunidad no han sido estudiados extensivamente. Sin embargo, se ha reportado que especies del género *Candida* poseen el potencial de degradar hidrocarburos y que algunas especies del género *Penicillium*, específicamente *Penicillium citrinum*, puede bioconvertir carbono orgánico incuyendo algunos compuestos típicos del petróleo.

En la evaluación molecular de hongos en los sedimentos, se logró amplificar ADN de tres estaciones. En E3, la diversidad observada fue típica de los océanos, mientras que la diversidad correspondiente a E19 y E35 no lo fue. La estación E19 (en el paralelo 25°N) presentó diversidad alta de especies de los géneros *Candida* y

Penicillum. La estación E35 (en la boca del Cañon de Campeche) también presentó una especie de *Candida*, además de otras.

Debido a la falta de caracterización de la diversidad fúngica durante las condiciones previas al derrame de la plataforma Deepwater Horizon, no es posible concluir si lo observado se debe a consecuencias del derrame petrolero o si corresponde a la diversidad natural y a las adaptaciones de estos hongos a las concentraciones altas de hidrocarburos provenientes de "chapopoteras" naturales o si se desarrollaron bajo la ausencia de alguna otra comunidad microbiana.

En resumen, las anomalías detectadas hasta ahora, específicamente en las mediciones de la concentración del carbono orgánico disuelto y en ciertos hidrocarburos que se observaron en solo algunas profundidades de varias de las estaciones visitadas durante XIXIMI-1, no muestran indicios claros o unívocos de estar asociadas con el derrame de gran escala de hidrocarburos del pozo Macondo. Debemos recordar que el diseño y ejecución de la red de observaciones y la recolecta de muestras de agua de profundidades discretas estuvo fundamentalmente enfocada a establecer una línea base de parámetros físicos, biogeoquímicos y ecológicos selectos de la zona de aguas profundas. No se pretendía localizar ni cartografiar la extensión especial de filamentos de hidrocarburos originarios del derrame del pozo Macondo.

También es importante resaltar que los resultados de este informe abarcan solo un corto intervalo de tiempo de muestreo y que el crucero se llevó a cabo 6 meses después del derrame y durante condiciones de otoño. Considerando la variabilidad física, geoquímica y ecológica de la zona de estudio, y y el área tan extensa que abarcan sus zonas profundas, es imposible hacer una caracterización integral adecuada (establecer la línea de base) considerando una sola temporada de muestreo.

El interés primordial de las observaciones que reportamos en este informe es precisamente el comenzar a establecer la línea base del sistema oceanográfico de la región de aguas profundas del Golfo de México. Es urgente y perentorio continuar con el esfuerzo de establecimiento de la línea de base de condiciones físicas, geoquímicas y ecológicas de esta región relativamente desconocida de las aguas patrimoniales Mexicanas.

EXECUTIVE SUMMARY

The worst accidental spill in the history of offshore oil exploitation occurred in the northwestern Gulf of Mexico (GoM) between April 20th and July 15th 2010. The spill from the Macondo Well began following the explosion and loss of the Deepwater Horizon platform. During the spill, about 5 million barrels of crude oil entered the Gulf of Mexico at a depth of 1500m. Since the beginning of the spill, there was a high degree of uncertainty regarding the fate and persistence of the oil.

On the 22nd of November 2010, the Collaboration Agreement: "**Characterization** of the baseline conditions in the deep waters of the Gulf of Mexico in response to the oil spill associated to the Deepwater Horizon Platform" was signed between the National Institute of Ecology (INE) of the Ministry for the Environment and Natural Resources (SEMARNAT) and the Center for Scientific Research and Higher Education of Ensenada (CICESE) with the intervention of the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO). The agreement established that CICESE and its collaborators from the Institute for Oceanographic Studies of the Autonomous University of Baja California (IIO-UABC), the Mexican Petroleum Institute (IMP) and INE would conduct an oceanographic expedition during November.

The project objectives were (1) to characterize the physical, geochemical and ecological baseline conditions in the deep water region of the Gulf of Mexico within Mexico's Exclusive Economic Zone (EEZ) during fall conditions, (2) evaluate whether or not there was evidence of the presence of hydrocarbons from the Macondo Well within the study region and, if so, to assess its effects, and (3) set the basis for future monitoring efforts to evaluate the impact of the oil spill on the short, medium and long terms.

The oceanographic cruise XIXIMI-1 (xiximi is the Nahuatl term for spill) was conducted between the 6th and 22^{nd} of November 2010. Its aim was to characterize various hydrographic, biogeochemical and ecological parameters in the deep waters (areas with depths > 1000m) of the GoM. The cruise plan encompassed the entire region of deep water within the GoM Mexican waters (19 to $25^{\circ}N$; 87 to $95^{\circ}W$). The sampling design was systematic and stratified and established equally spaced stations and sampling at fixed depths in the water column. Water samples were collected at 46 stations and sediment samples were recovered at 10 locations throughout the study region.

It is important to bear in mind that the sampling scheme described in the agreement and used during the cruise was designed for the primary purpose of characterizing the baseline conditions throughout the entre deep region of Mexico's EEZ, while employing all available resources in the most efficient way possible. The cruise sampling network would be conducive to the detection of impacts from the spill only if they occurred over large spatial scales. It was not designed for the specific goal of searching for oil from the Macondo Well within the study region.

This report presents the results of the measurements conducted during XIXIMI-1 as well as the laboratory analyses that were carried out in CICESE, IIO-UABC and external laboratories after the cruise ended. We include a database in Excel format that provides all the data generated to date, as well as a database in Ocean Data View (ODV) format that can be used to visualize the results.

Physical characteristics of the water column

The **temperature** and **salinity** data collected during XIXIMI-1 are consistent with the annual climatology generated using the United States' National Oceanographic Data Center (NODC) database. However, the NODC database does not include any data collected south of 25°N in the GOM during November. Unless other data exist for the study region -which we are unaware of-, the data generated during XIXIMI-1 is unique.

During November, water masses with distinct temperature and salinity characteristics can be observed throughout the GOM, including the higher salinity water typical of the SUW (Subtropical Under-Water) and the low salinity water of the Antarctic Intermediate Water (AIW). Both water masses, which differ in their depth location in the water column, enter the GOM from the Caribbean. Water masses with similar properties but colder and more homogenous upper ocean salinity structures are present in the central and northwestern gulf; these water masses mix to form the Gulf Common Water mass found in the southern gulf and also observed in the NODC-derived climatology.

Comparison of the spatial and depth distribution of the 20°C isotherm generated using data collected during XIXIMI-1 with a sea surface height map generated by the Colorado Center for Aerodynamics Research (CCAR) of the University of Colorado for the time period corresponding to the cruise indicates agreement between data sets. A shallow (deep) isotherm coincides with the presence of cyclones (anticyclones) on the altimetry map. It is well recognized that the dynamics of the GoM are dominated by eddies and meso-scale processes. The data from the XIXIMI-1 cruise can be interpreted within the context of the mesoscale features present during the period of study.

Dissolved oxygen (DO) concentrations were relatively high in the top 200 m of the water column, reflecting the importance of exchange of O_2 between the surface ocean and the atmosphere as well as O_2 production from photosynthetic processes.

Below the "surface" layer, DO concentrations decreased to a minimum of 2.45 ml/L at depths of 350 to 500m. The minimum in DO concentration is attributed to (1) the entrance of water low in DO through the Yucatan Channel that corresponds to the Tropical Atlantic Central Waters (TACW), (2) oxygen consumption within the GOM due to the oxidation of organic matter in the upper water column from phytoplankton production, land-based runoff and to a lesser extent hydrocarbons from natural seeps and (3) the residence time of the intermediate water within the gulf/

Below the oxygen minimum zone, DO concentrations increase monotonically to a depth of 1300m, below which they remain almost constant (4.95-5 ml/L). The water that enters the system through the Yucatan Channel (maximum depth of 2040 m) is the sole

source of the cold, high-oxygen water to the deep waters of the GOM. These high OD levels result from their formation in the north Atlantic and the short time that elapses before their transport into the gulf. The consistent levels of DO found below 1500 m can be explained by the known circulation processes of these waters, low oxidation rates of organic matter and the high flow of TACW though the Yucatan Channel.

The spatial distribution of OD at the 27.7 and 27.725 isopycnals is consistent with the presence eddies released from the Loop Current, and which are known to drive mesoscale processes in the gulf. These eddies detach from the Loop Current and travel westward along 25-24°N until they dissipate along the platform of Tamaulipas. The vertical and temporal distribution of DO in the Bay of Campeche is consistent with the presence of a semi-permanent gyre in the region.

There were no anomalies in the DO that cannot be explained through the physical and biological processes that characterize the GOM.

Nutrient concentrations measured in GOM waters are similar to those reported previously for waters between 22° and 29° N. Nutrient levels are similar to those of Atlantic Ocean when similar depths are compared. Enrichment in phosphates and nitrates concentrations in the oxygen minimum zone is also observed.

The vertical distribution of **dissolved organic carbon** (DOC) in the GOM indicates in some stations of the northernmost transects (24°N and 25°N) there were higher tan expected levels at depth, particularly at 1500 m. These anomalies were not present in all the samples collected at 1500m, but were found specifically at E8, E10, E12, E17, E18, E22, E23 and E24.

DOC concentrations alone cannot be used to infer the source of the organic carbon. However, it is unlikely that natural processes are responsible for the high levels of DOC that were measured at 1500m.

With regard to the concentration of **dissolved inorganic carbon** (DIC), the data collected during XIXIMI-1 were compared to those contained in the World Ocean Circulation Experiment (WOCE). The WOCE data were collected in the Atlantic during 1997, and were used for comparison because there are no data available for the GOM. Comparison of DIC concentrations measured between 10° to 14°N in the Caribbean with those from XIXIMI-1 indicate they are very similar. Relatively low values were found in surface waters, the highest DIC concentrations were found in the oxygen minimum layer and were consistent in the deeper waters of the GOM (~ 2200 μ mol kg⁻¹).

The highest **hydrocarbon** concentrations were found near the Yucatan Current in the northeastern study region. With regards to their composition, there is no evidence of residual oil from the Macondo Well, although analyses are still being conducted. However, aliphatic compounds from various sources were identified, including two biogenic sources and one potential petroleum source. The total concentrations of aliphatic hydrocarbons are within the range of those reported for other areas of the world's oceans. The concentration and vertical distribution of dissolved **vanadium** (V), a trace metal found in petroleum, is similar to previous reports for the north Atlantic. However, these results should be considered preliminary due to problems with the spectrophotometer used in the analysis. The data are in the process of being corroborated.

Results of biological parameters measured in the water column

The taxonomic composition of **phytoplankton**, specifically the Bacillariophyta (diatoms), Dinophyta (dinoflagellates) and Dictyochophyceae (silicoflagellates), was evaluated in samples collected at selected stations and depths. A total of 81 taxa were identified, including 18 genera of diatoms and 23 genera of dinoflagellates (which included 51 species). The dinoflagellates were the most diverse group, while diatoms were the most abundant. The highest cell densities were found at 50m. This suggests the conditions most conducive to phytoplankton growth are found at that depth. The northeastern part of the study area had higher densities of phytoplankton in comparison with the central GOM and the sites closet to the continental platform.

The concentration and distribution of **chlorophyll** *a* during November of 2010 were examined using a satellite image (MODIS Aqua). Chlorophyll concentrations were very low (< 0.1 mg m⁻³) in the central GOM, which is consistent with its oligotrophic nature. The highest values (≈ 0.4 mg m⁻³) were found in the southeastern Bay of Campeche. As is to be expected, **chlorophyll a** concentrations were much higher over the continental shelf, an area not sampled during the XIXIMI-1 cruise.

The community structure of **bacteria** in the water column was evaluated using three strategies: (1) comparing the percent abundance of amplified DNA corresponding to Archeobacteria and Eubacteria, (2) comparing the percent of alpha, beta, gamma and delta Proteobacteria (which are classified within the Eubacteria), and (3) the presence of *Vibrio* as well as bacteria capable of degrading hydrocarbons (as inferred from the presence of those that contain the alkane monooxygenase gene).

Archeobacteria are usually found under extreme environmental conditions. The gamma and delta groups of the Proteobacteria contain genera that are known degraders or capable of degrading hydrocarbons, which is not the case of the alpha and beta groups. Delta Proteobacteria are mostly found in aerobic environments, but some can reduce sulfate-containing compounds under anaerobic conditions and may thus degrade petroleum. *Vibrio* species are found within the gamma group; some authors have proposed that some *Vibrio* species are capable of degrading petroleum compounds.

Based on analytical considerations and the objectives of this study, we only characterized the bacterial community at depths > 150m. Archeobacteria were more abundant in most of the samples than Eubacteria (72% of samples contained more than 65% of amplified Archeobacterial DNA). However, the percent abundance of Eubacteria increased as a function of depth. This is important because petroleum-degrading bacteria are found within the Eubacteria. For some of the stations that are located in the proximity of areas in which natural hydrocarbon seeps are found, Eubacterial DNA was

much more abundant than that of Archeobacteria. At station E36, which is located at the mouth of the Campeche Canyon (an area well-known for natural petroleum seeps) Eubacteria predominated at all the depths examined.

Alpha and beta Proteobacteria were predominant, followed by the gamma and delta groups. Beta Proteobacteria predominated in 60% of stations and depths. With respect to *Vibrio* bacteria and those that contain the alkane monooxydase gene, there was a positive correlation between the relative abundance of these two groups of bacteria.

It is well known that bacterial communities have the ability to respond to the presence of petroleum hydrocarbons. However, based solely on the bacterial community structure, it is not possible to determine whether the presence of bacterial groups that include taxa that degrade petroleum hydrocarbons is due to the natural seepage of oil into the GOM or to the transport of oil from the Macondo Well into Mexican waters.

The biovolumes of **zooplankton** captured with a 333µm mesh bongo net were generally low (< 70 ml 1000 m⁻³). However, they were somewhat higher at stations close to the continental platform in the Bay of Campeche (70-100 ml m⁻³). The Bay of Campeche had relatively lower temperature and salinity as well as higher concentrations of chlorophyll *a*, all of which are consistent with higher biovolumes of zooplankton.

The abundance of 30 zooplankton taxa was evaluated. Six taxa comprised 80% of the zooplankton captured throughout the study. Copepods were the most abundant taxa (53.5%), followed by chaetognaths (13.4%), ostracos (11.2%), pteropods (3.89%), siphonophores (3.2%) and euphasids (3.1%). Larval fish comprised only 1% of the zooplancton.

Sediment chemistry

Measurements of concentration of **Fe** associated with the pyrite fraction of the deep-sea sediments of the GOM indicate they are very low when compared to other sedimentary regions of the world's oceans. The data suggest two types of limitations for the formation of pyrite: the availability of labile Fe, and the low abundance of labile organic matter. Pending measurements of the concentration of organic matter will help to distinguish between these two mechanisms. The variability that was observed between sediment cores in the concentration of various trace metals is consistent with sedimentary environments of different types.

Similarly, there was a high level of variability in the isotopic composition of lead. However, these data cannot be used to evaluate whether or not crude oil from the Macondo Well may be present in the sediments sampled during XIXIMI-1 due to a lack of published values from the spill as well as the lack of knowledge regarding the origin and mixing processes that influebce of the distribution of lead isotopes in the deep-sea sediments of the GOM.

Sediment biology

There was a low abundance of bacteria in the sediments of some stations that are not located near areas for which natural hydrocarbon seeps have been reported (E3, E15 and E19). The relatively low abundance of bacteria at these stations may be due to low levels of labile organic matter that fuels bacterial metabolism.

In contrast, some stations (for example, E35 and E40) did exhibit a high bacterial abundance as well as a diverse community structure. These stations are either in the vicinity of natural hydrocarbon seeps, near areas of oil exploitation or the continental slope. This suggests that the food sources available to bacteria may be more abundant and diverse than in the stations with low abundances.

There are very few studies of the **meiofauna** (45 to 500µm) in deep-sea sediments of the GoM. A total of 2,596 organisms were counted and identified from sediments collected at seven stations. The vertical distribution patterns of the meiofauna were similar to those reported previously; most of the biomass was found in the top 6 cm although there was considerable variation between stations. The meiofaunal community was dominated by free-living nematodes, which comprised 81% of the total. The sample from station E15, which is located on the slope in front of Tamaulipas, had a higher biomass than the stations from the Bay of Campeche and those that are near the Yucatan Platform. Stations E3 had a distinct community structure that was dominated by foraminifera, and the stations near the Bank of Campeche and the Yucatan Peninsula shared a similar community structure.

Very few organisms classified as macrofauna (organisms retained using a 0.5 mm mesh) were collected. This is due to variety of reasons, including the small volume of sediments that were processed, that the most abundant organisms in deep-sea sediments are usually quite small (< 0.5 mm) and that the study area is deep and oligotrophic in nature, providing little organic matter to the sediments. Some polychaetes, nematodes, oligochaetes, crustaceans and a single mollusc were collected.

There is very little information regarding the **fungal** communities in marine systems, which implies that the impact of disturbances to those communities is not well known. However, species of the *Candida* genera have the potential to degrade hydrocarbons, and some species of the genera *Penicillium*, specifically *Penicillium citrinum*, is capable of degrading some organic carbon compounds contained in petroleum.

Molecular analysis of the fungal community yielded amplifications of DNA in three of the deep-sea cores. At E3, the fungal diversity and community composition was similar to that reported for other marine systems. However, the community structure of stations E19 and E35 were different. Station 19, located at 25°N, had a high diversity of speies of the genera *Candida* and *Penicillum*. Station E35, localed at the mouth of the Campeche Canyon, also had a species of *Candida*, among other genera. The last two stations are located near areas in which natural hydrocarbon seeps have been documented. Since the community structure of fungii from deep-sea sediments of the GOM not been characterized previous to the Deepwater Horizon oil spill, it is impossible to discern whether the differences we observed among stations are a consequence of the spill, the proximity to natural seeps or the interaction with other microbial communities found in the sediments.

In summary, the anomalies detected in the results presented to date, particularly in the concentration of dissolved organic carbon and some hydrocarbon compounds at specific depths and stations, do not indicate a clear link to the oil spill that occurred in the northeastern Gulf of Mexico in 2010. It is important to note that the cruise plan was designed to establish the baseline conditions of specific physical, biogeochemical and ecological parameters in the region of deep waters of the GOM within Mexico's EEZ. The sampling design was not geared toward finding or charting the spatial extent of hydrocarbons from the Deep-water Horizon oil spill.

The results of this study encompass a relatively short amount of time within the gulf's natural annual cycle and might represent fall conditions. In addition, the samples were collected 6 months after the spill started. Considering the physical, geophysical and ecological variability that is intrinsic to the system and the immense spatial extent of our study region, it is impossible to adequately characterize the baseline conditions based on just a single sampling period. This makes it ever more pressing to continue the characterization of baseline conditions in order to be able to evaluate impacts from disturbances such as the Deep-water Horizon oil spill.

INTRODUCCIÓN

Entre el 20 de abril y 15 de julio del 2010, ocurrió el mayor derrame accidental de la historia de la explotación petrolera en el mundo como consecuencia de la explosión de la plataforma Deepwater Horizon de British Petroleum. El derrame ocurrió en la región noroeste del Golfo de México, y se vertieron cerca de 5,000,000 de barriles de crudo.

El Convenio de Colaboración "ESTABLECIMIENTO DE LÍNEA DE BASE EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO EN RESPUESTA AL DERRAME PETROLERO ASOCIADO A LA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON" fue firmado entre el INE-SEMARNAT y el CICESE con la intervención de la CONABIO a los 22 días del mes de noviembre del 2010. En el convenio se establece que el CICESE y sus colaboradores se encargarían de establecer una línea de base de las condiciones físicas, geoquímicas y ecológicas de la región central del Golfo de México en respuesta al desastre. De manera complementaria, el proyecto evaluaría si había evidencia de le presencia de hidrocarburos asociados al derrame en la zona de trabajo, y de ser el caso, de tratar de evaluar sus posibles impactos.

En noviembre del 2010, el CICESE realizó una expedición a la zona profunda del Golfo de México a bordo del *Buque Oceanográfico Justo Sierra* de la Universidad Nacional Autónoma de México. Conforme a lo establecido en el convenio, esta expedición incluyó colaboradores del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California (IIO-UABC), el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y del INE.

La campaña oceanográfica XIXIMI-1 (*xiximi* es el término Nahuatl equivalente a derramar) se llevó a cabo con el objetivo de caracterizar la hidrografía, biogeoquímica y ecología en las aguas profundas del Golfo de México. El crucero XIXIMI-1 se llevó a cabo entre el 6 y 22 de noviembre en aguas profundas (mayores a los 1000m) que corresponden a los tonos azules más oscuros en la

La zona de estudio abarca una parte importante de la Zona Económica Exclusiva de México las en la región central del Golfo de México, y se considera poco estudiada.

La estrategia de muestreo para el establecimiento de la línea de base de las condiciones físicas, geoquímicas y ecológicas de la zona de aguas profundas se desarrolló considerando:

- (1) las necesidades planteadas por el Instituto Nacional de Ecología,
- (2) la necesidad de caracterizar una región sumamente extensa,
- (3) la profundidad en la cual ocurrió el derrame,

(4) el desconocimiento que prevalecía durante y después del derrame sobre la dirección del transporte del petróleo derramado, su permanencia y su destino geoquímico,

(5) consideraciones físicas y geoquímicas de la oceanografía del Golfo de México,

(6) la capacidad de muestreo y análisis con la cual contaba el grupo de trabajo bajo los tiempos y circunstancias bajo las cuales se desarrolló el proyecto, y

(7) las características de la plataforma de trabajo, el *Buque Oceanográfico Justo Sierra,* de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Figura 1. Mapa batimétrico del Golfo de México.

Además de la profundidad en la cual ocurrió el derrame, las consideraciones técnicas que se emplearon para diseñar el programa de muestreo y establecer el derrotero (plan de crucero) incluyeron los patrones promedio de circulación, las profundidades de masas de agua de diferentes propiedades físicoquímicas y ecológicas, así como la necesidad de tener una mayor resolución de muestreo cerca de la superficie y en el mínimo de oxígeno, que constituyen los estratos más dinámicos de la columna de agua.
Dadas estas consideraciones, se estableció un plan de muestreo que abracara toda la región de aguas profundas y diferentes profundidades de la columna de agua de manera estandarizada y estratificada (Figura 2).



Figura 2. Red de estaciones que se cubrirían en el crucero XIXIMI-1 según lo establecido en el convenio. El zarpe fue desde Tuxpan, Veracruz. Las estaciones están conectadas por líneas verdes. Las estaciones someras (puntos negros) son en las cuales se recolectarían muestras de agua desde la superficie hasta los 1000m, mientras que en las profundas (puntos negros rodeados de círculos rojos) se recolectarían muestras de agua desde la superficie hasta los 3000m de profundidad.

Cabe resaltar que el plan de muestreo que se describe en el convenio y que se empleó durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 no estaba diseñado con el fin de específico de llevar a cabo la búsqueda del petróleo asociado al derrame, si no más bien al establecimiento de una línea de base. El punto lineal más cercano entre nuestra región de estudio y la localización del Pozo Macondo es de 410 km al sur.

Por último, como se escribe de manera exhaustiva en el informe, este proyecto estuvo enfocado a la caracterización de diversos parámetros físicos, geoquímicos y ecológicos. No se recolectaron muestras de organismos de niveles tróficos superiores como peces juveniles y adultos o mamíferos y tortugas marinas. Por lo tanto, la evaluación de impactos sobre organismos de importancia pesquera o de conservación está fuera del alcancé de este informe.

ANTECEDENTES

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DERRAME

El derrame del pozo Macondo ocurrió como consecuencia de la explosión de la plataforma Deepwater Horizon. Empezó el 20 de abril del 2010, y continuó por 84 días, hasta el 15 de julio. El pozo está localizado a 1500 m de profundidad y a unos 60 km de la costa de Louisiana, EUA (28°44'12.01"N y 88°23'13.78"W). Durante el transcurso del derrame, fue evidente que una gran cantidad de petróleo y gases asociados llegaron hasta la superficie en el Golfo de México (Figura 3).

Dada la profundidad de 1500m en la cual ocurrió el derrame y la falta de precedente en cuanto a sus características, desde el principio del incidente el mayor nivel de incertidumbre fue el destino y persistencia del petróleo que permaneció bajó la superficie (Deep Water: The Gulf Oil Distater and the Future of Offshore Drilling 2011). Esto se debe a una serie de factores, incluyendo la incertidumbre sobre la dirección y velocidad de corrientes profundas (que son mucho más difíciles de estimar y medir que las corrientes superficiales), un inmenso desconocimiento sobre la capacidad de degradación de las diferentes fracciones del petróleo por medio de procesos físicos y biológicos, y la inexperiencia generalizada de los sectores públicos, académicos y privados con respecto a derrames en aguas profundas. Una parte de la incertidumbre también se debió al uso extensivo de dispersantes sobre la superficie y en profundidad. En particular, el uso de cantidades altas de dispersantes bajo condiciones de temperatura baja y alta presión no tenía precedente y se desconocía tanto su efectividad como las consecuencias sobre el ecosistema.



Figura 3. Imagen capturada por el satélite *Terra* de la NASA el 24 de mayo del 2010, poco después de un mes de iniciarse el derrame del Pozo Macondo.

En el documento técnico "Oil Budget Calculator" publicado en noviembre del 2010 y elaborador por *The Federal Interagency Solutions Group, Oil Budget Calculator Science and Engineering Team*, se presentan estimaciones de los flujos y la cantidad de crudo que se liberó durante el derrame. El documento es una descripción técnica de cómo se calculó el volumen de crudo, e incluye estimaciones altas y bajas del volumen que dependen de diversos parámetros y supuestos. Se describe cómo se estimó el volumen durante el transcurso del derrame, y se considera el efecto de diversos procesos sobre el destino del crudo. Los procesos que se examinan en el informe incluyen la de tasa de flujo del crudo en la boca del pozo, el volumen recuperado mediante el uso de tuberías o directamente de la superficie, la cantidad que se evaporó y quemó y la que se disolvió en la superficie o el agua bajo la presencia o ausencia de los dispersantes y surfactantes. Las estimaciones que se presentan en el informe no consideran ni la foto-oxidación ni la biodegradación del petróleo.

Conforme se menciona en el informe, el objetivo de estimar el volumen del derrame tuvo como fin contribuir al plan de respuesta para facilitar las tareas de recuperación y mitigación. Es importante especificar que las estimaciones que se presentan en el informe no se hicieron para fines de investigación, ni para apoyar en la evaluación de daños, ni para trazar el destino del petróleo. Por lo tanto, en este informe presentamos estimaciones del flujo del derrame a través del tiempo, el volumen total y

la cantidad de dispersante que se usó para poner en contexto el derrame del Pozo Macondo.



Figura 4. Estimación de flujo diario de petróleo liberado del Pozo Mancondo en barriles por día. Fuente: Oil Budget Calculator (2010). Un barril EUA es equivalente a 24 galones o 159 L.

Según el documento, el flujo diario de petróleo cambió a través del tiempo, pero se estima que varió entre 52,000 y 62,000 barriles diarios (Figura 4). Según las estimaciones descritas en el Oil Budget Calculator (2010), en total se liberaron alrededor de 5,000,000 de barriles de crudo (Figura 5).



Figura 5. Estimación del volumen (en barriles) de petróleo que se recuperó directamente del pozo o de la superficie mecánicamente, que se dispersó por procesos naturales o tras el uso de químicos (dispersantes), o que se evaporó o disolvió. El rubro de "otro petróleo" incluye bolas de alquitrán, manchas superficiales, sedimentación o arriba a la zona costera, y se estimaron como la diferencia entre el volumen total del derrame y las estimaciones de las cantidades recuperadas directamente. Fuente: Oil Budget Calculator (2010).



Figura 6. Volumen diario y cumulativos de dispersantes (principalmente de Corexit 9500) empleado durante el derrame asociado a la plataforma Deepwater Horizon.

Como se mencionó anteriormente, una de las características que más resaltan de este derrame es el altísimo volumen de dispersantes que se introdujeron al sistema con el fin de incrementar la dispersión y potencial de degradación del petróleo. El dispersante principal que se usó fue Corexit 9500. En total se estima que en total se emplearon 1.8 millones de galones de dispersantes (equivalente a 43,994 barriles; Figura 6). De esto, el 42% se aplicó bajo la superficie directamente en la emanación y el resto en la superficie por medio de dispersión desde aviones o embarcaciones. Según el informe, se desconoce qué tan efectivo fue el uso del dispersante, especialmente en el caso del que se inyectó en profundidad.

La presencia de petróleo en la superficie y luego a lo largo de la costa del noroeste del Golfo de México fue evidente. Desde junio y hasta noviembre, una parte de este petróleo arribó a las costas Louisiana, Mississippi, Alabama y Florida, EUA (Figura 7). Como es de esperarse, durante el derrame en no hubo "mapas" de la distribución de diferentes fracciones de los hidrocarburos en profundidad.



Shoreline Oiling: Most severe oiling observed through November

Map courtesy of National Geographic (surface oil) and modified by Commission staff, NOAA/Coast Guard SCAT map (shoreline oiling)

Figura 7. Distribución máxima de petróleo en la superficie del Golfo de México y zonas de arribo de petróleo y bolas de alquitrán en la costa de Louisiana, Mississippi, Alabama y Florida, EUA. Fuente: Deep Water: The Gulf Oil Distater and the Future of Offshore Drilling, Report to the President, National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling (2011).

OCEANOGRAFÍA DEL GOLFO DE MÉXICO

El Golfo de México junto con el Mar Caribe, forman una cuenca semicerrada con una fenomenología muy particular debido a su posición geográfica, características batimétricas, la influencia de las corrientes de gran escala, y por la influencia de la descarga de los ríos en la región. La circulación y el clima marítimo del Golfo de México no puede verse en forma aislada por lo que es necesario explicar primero las características de los patrones de circulación general en el Océano Atlántico, para particularizar posteriormente en el Golfo de México, área donde la fenomenología está caracterizada por la influencia principal de dos factores: el viento que sopla sobre el área de la cuenca y la entrada por el estrecho de Yucatán de la corriente de Yucatán la cual al entrar al Golfo de México recibe el nombre de Corriente del Lazo.

La Corriente del Lazo ejerce una influencia fundamental en la dinámica de todo el Golfo, debido a los remolinos anticiclónicos que se separan de ella en forma irregular y viajan por su interior hasta disiparse. Se han dado diversas explicaciones del por qué se producen estos remolinos, una de ellas es la entrada de anomalías desde el Caribe. Debido a esta conexión entre el Golfo de México y el Mar Caribe, es esencial considerar ambas cuencas en conjunto si se quiere comprender cabalmente la dinámica del sistema. La profundidad de los umbrales en el Estrecho de Yucatán (2040 m) y Estrecho de Florida (800 m) restringe la comunicación con las cuencas adyacentes y determina las características del agua profunda en el interior del Golfo de México.Todas las aguas de profundidad mayor que el umbral del Estrecho de Florida sólo tienen intercambios importantes con el Mar Caribe.

Patrones de Circulación Oceánica

La circulación en el Mar Caribe y Golfo de México se ve influenciada principalmente por entradas o salidas de flujo por sus diferentes pasajes: el agua proveniente del Giro Subtropical del Atlántico Norte penetra al Mar Caribe principalmente a través de las Antillas Menores con un gasto adicional que se introduce a través del paso de los vientos. El agua Intermedia de la Antártica fluye por advección del sur del hemisferio y penetra al Mar Caribe exclusivamente a través de los pasajes orientales. El agua del Atlántico central confluye con la Corriente Ecuatorial del Norte (NEC) y penetra al Caribe por los pasajes del norte y del este al Caribe. El agua profunda del Atlántico Norte entra al Caribe a través de los umbrales más profundos. La Figura 8 muestra en forma esquemática las contribuciones del Giro Subtropical y de la Celda de Circulación Meridional al flujo en el Caribe que luego entra al Golfo de México.



Figura 8. Transporte en Sverdrups (millones de metros cúbicos por segundo) en el Atlántico Norte por arriba de la isoterma de 7°C, donde se muestran las contribuciones del Giro Subtropical (verde) y la Celda de Circulación Meridional (rojo) a las corrientes en el Caribe y Golfo de México (Tomado de Schmitz, 1996).

En conjunto estas masas de agua confluyen en el Estrecho de Yucatán, como precursoras de la Corriente del Lazo en el Golfo de México y más adelante como la Corriente del Golfo en las costas del este de los Estados Unidos. El transporte promedio de la Corriente del Lazo medido por anclajes durante 1999-2001 es de 24 Sv \pm 1 Sv (Sheinbaum et al., 2002). La Corriente del Lazo presenta características muy especiales, ya que la corriente limítrofe occidental que se desprende de la península de Yucatán, se separa al norte del talud continental adquiriendo una circulación en forma de herradura que frecuentemente pero irregularmente desprende giros anticiclónicos de mesoescala.

En la Figura 9 se presenta una "fotografía instantánea" del nivel del mar y corrientes geostróficas superficiales con las características típicas asociadas a la circulación generada por la Corriente del Lazo. En general la corriente presenta una velocidad promedio en el Estrecho de Yucatán de 1 m s⁻¹ en la superficie con máximos de hasta 3 m s⁻¹. Diversos remolinos –ciclónicos (azules) y anticiclónicos (rojos)-pueden verse cerca de la Corriente del Lazo que está en proceso de separar un anticiclón, pero en el interior del Golfo también se observan estas estructuras, remanentes de remolinos formados anteriormente en la Corriente del Lazo o formados por inestabilidades al paso de los anticiclones más grandes.



Figura 9. Nivel del mar y corrientes superficiales geostróficas para el 15 de agosto de 2007 donde se puede apreciar la Corriente del Lazo, la separación de uno de sus remolinos y la presencia de remolinos en todo el interior del Golfo de México (Cortesía del Dr. Julio Candela, realizada usando datos de AVISO: "The altimeter products were produced by Ssalto/Duacs and distributed by Aviso, with support from Cnes" <u>http://www.aviso.oceanobs.com/duacs</u>

A mayor profundidad la intensidad del flujo disminuye pero no su alta variabilidad. La rapidez de la corriente decae alcanzando un promedio de 0.05 m s⁻¹ a los 1000 m, pero el flujo es altamente variable y dominado también por remolinos como lo muestra la Figura 10 donde se grafican trayectorias de derivadores superficiales (amarillo y azul) y profundos (1000m, negro) y pueden verse trayectorias bastante caóticas. Notar que en este experimento no aparece una conexión clara entre el Golfo oeste y el este (flotadores amarillos y azules quedan del mismo lado que fueron lanzados). A pesar de que exceptuando a la Corriente del Lazo, la variabilidad es mucho mayor que la media en casi toda la columna de agua dentro del Golfo, las restricciones topográficas de los umbrales y la estructura termohalina del Golfo profundo sugieren la presencia de una debil irculación ciclónica promedio en el Golfo de México profundo (debajo de 1000m de profundidad, De Haan & Sturges, 2005). En el Estrecho de Yucatán se han detectado contra flujos sobre la pendiente de la Península de Yucatán y la de Cuba (Sheinbaum et al. 2002), además de un flujo en ambos sentidos cerca del umbral del estrecho, con una rapidez promedio de 0.02 m s⁻¹, e intensificaciones máximas de 0.15 m s⁻¹ (Rivas et al., 2005)



Figura 10. Circulación superficial en el Golfo de México estimada mediante derivadores superficiales (amarillo y azul) y subsuperficiales (negro). Los derivadores azules (amarillos) se lanzaron al este (oeste) de 89° Oeste. Notar la gran variabilidad del flujo profundo. (Fuente: Wetherly *et al.*, 2005. Intermediate-Depth Circulation in the Gulf of Mexico Estimated from Direct Measurements. Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models. Geophysical Monograph Series 161. AGU).

La separación de remolinos ocurre en promedio cada 11 meses, pero puede variar entre los 6 y los 17 meses (Vukovich, 2007). Los giros producto del desprendimiento de la Corriente del Lazo son de tipo anticiclónico y núcleo cálido. Estos vórtices tienen la tendencia a desplazarse hacia el oeste durante varios meses, con una trayectoria más o menos rectilínea hasta chocar con el talud occidental del Golfo de México en un área localizada en la parte sur de Texas y el estado de Tamaulipas. En dicha región los vórtices se fracturan o disipan generando una fenomenología aun poco entendida y que es motivo de varios estudios científicos. Otra fuente de movimientos la constituyen, en aguas profundas, las llamadas ondas topográficas de Rossby, que son ondas generadas por la interacción de la Corriente del Lazo con las irregularidades topográficas frente a las costas de la Florida y el Banco de Louisiana, aunque puede haber otras zonas de generación también. Estas ondas se propagan manteniendo a la pendiente del talud continental a su derecha, lo que implica que llegan a costas mexicanas desde Texas y se propagan hacia el sur frente a las costas de Tamaulipas y Veracruz.

La Figura 11muestra las curvas isotérmicas de una sección vertical que pasa por el núcleo de un remolino desprendido de la Corriente del Lazo pero que también cruza por encima de un giro ciclónico. Se puede apreciar claramente las diferencias en curvatura que sufren las isotérmas en los vórtices ciclónicos y anticiclónicos, hacia arriba y hacia abajo, respectivamente. Puede verse también que entre los 400 y 500 metros de profundidad puede haber diferencias de hasta 6-8° C entre los remolinos. Dichos gradientes térmicos generan corrientes muy intensas.



Figura 11. Estructura térmica en una sección vertical a través de un remolino de la Corriente del Lazo en el que hay una intrusión de un remolino ciclónico. Los fuertes gradientes horizontales de temperatura están asociados a corrientes muy intensas a grandes profundidades. (Fuente: Schmitz W.J., Jr., On the Circulation In and Around the Gulf of Mexico, <u>http://www.serf.tamus.edu/gomcirculation/</u>)

Una vez que se desprende un remolino de la Corriente del Lazo, éste se desplaza al oeste con una velocidad de 3 – 4 km por día. En promedio esta clase de vórtices presentan un diámetro de 200 a 300 km y velocidades en la superficie de 1 – 1.3 m s⁻¹ dependiendo de su edad. Cuando los vórtices arriban al talud continental en el oeste del Golfo de México, se inicia un proceso de interacción con la topografía del fondo durante el cual se pueden generar corrientes en la plataforma continental con velocidades de hasta 0.7 m s⁻¹. Las trayectoria promedio de esta clase de vórtices (y su desviación estandar) se muestra en la Figura 5 donde se puede apreciar los remolinos no entran a la parte sur del Golfo (por debajo de 22 °N) lo cual tiene implicaciones importantes para la dinámica y termodinámica de la región.



Figura 12. Trayectoria promedio de los anticiclones que se liberan de la Corriente del Lazo. Notar que no penetran por debajo de los 22 °N (Vukovich, 2007).

Debido a la tasa de generación de vórtices, su velocidad de desplazamiento y duración, es común encontrar la existencia simultánea de uno a tres de ellos en el Golfo de México. La Figura 13 muestra una síntesis de imágenes térmicas obtenidas con sensores infrarrojos tipo AVHRR montados en los satélites GOES de la NOAA. Dichos sensores miden la temperatura en la superficie del mar utilizando radiómetros, con los que resulta posible observar la trayectoria principal de la corriente del Lazo así como la firma térmica de vórtices fríos o calientes. En esta imagen, obtenida el 5 de Marzo de 1998, puede observarse un giro desprendiéndose (etiquetado con las iniciales LCR) y otros remolinos ciclónicos además de meandros que se cree son importantes en el fenómeno.



Figura 13: Temperatura de la superficie del mar en el Golfo de México obtenida con el uso de imágenes infrarrojas de sensores tipo AVHRR montados en satélites de la NOAA. La imagen muestra la trayectoria de la Corriente del Lazo, en una configuración que muestra la ocurrencia de un desprendimiento de remolino. La imagen también muestra la existencia de ciclones que se cree juegan un papel importante en el proceso de separación.

Además de imágenes térmicas y de altimetría que permiten una mejor interpretación de la cantidad, magnitud e intensidad de vórtices y su desplazamiento. La Figura 14 muestra para su comparación, el mapa compuesto semanal de imágenes satelitales de color del océano de la tercera semana de noviembre de 2010 y el mapa de las elevaciones de la superficie del mar del 21 de noviembre de 2010. Puede apreciarse que las zonas mas oscuras en el mapa de color (panel inferior izquierdo) y por tanto de menor productividad, coinciden con algunas estructuras anticiclónicas (colores amarillo-rojo, panel superior derecho). Sin embargo, también es evidente que la presencia de ciclones no es sinónimo de alta productividad. La lengüeta de alta productividad en 20-21°N, 95°W, muestra como remolinos cercanos a la costa, al interactuar con la circulación costera, puede transportar nutrientes hacia el Golfo profundo. La alta productividad costera es debida a las surgencias provocadas por los vientos Alisios.



Figura 14. Mapa compuesto semanal de color del océano de la tercera semana de noviembre de 2010 (izquierda) y elevación de la superficie del mar obtenida de satélite correspondiente al 21 de noviembre de 2010. Altimetría, temperatura superficial y color del océano son herramientas indispensables para interpretar las observaciones insitu. (Fuente: Institute of Marine Remote Sensing, University of South Florida (<u>http://imars.usf.edu</u>), Leben, R., CCAR Universidad de Colorado, EUA (<u>http://argo.colorado.edu/%7Erealtime/gsfc_gom-real-time_ssh</u>).

Otros sistemas involucrados en la circulación en el Golfo de México lo constituyen vórtices de tipo ciclónico o de núcleo frío, cuya existencia no está directamente asociada a los remolinos de la Corriente del Lazo. Tal es el caso del ciclón que se ubica en la Bahía de Campeche y que puede apreciarse en los contornos de altimetría y las trayectorias de flotadores superficiales a la deriva (imagen cortesía de Paula Pérez Brunius, Proyecto Pemex-Cicese). Este es un remolino semipermanete fuertemente constreñido por la topografía de la zona, -pues está confinado a la parte profunda de la Bahía de Campeche-, y aunque su estructura se ve fuertemente influenciada por remolinos que arriban a la zona, el rotacional del viento (ciclónico la mayor parte del tiempo), la topografía y la estructura termohalina de la zona, se combinan para generar esta estructura de manera "natural". desnivel entre 20 y 30 cm con respecto al nivel de referencia. En general los vórtices (ciclónicos o anticiclónicos) al interactuar con el talud continental generan durante su dispersión otros fenómenos, como sub-vórtices, o en corrientes de fondo que se propagan en forma de ondas paralelas al talud continental y que pueden generar ondas topográficas u ondas internas.



Figura 15. Promedios mensuales de nivel del mar y trayectorias de derivadores superficiales que muestran la presencia de una estructura ciclónica semi-permanente en la Bahía de Campeche producto de las características termohalinas y topográficas de la región y del forzamiento del viento en la zona. El ciclón de Campeche interactúa con remolinos que entran a la zona, pero no son los responsables de su generación.

Con este breve resumen hemos intentado dar un panorama muy general de las características principales de la circulación en la zona profunda del Golfo de México. Deliberadamente hemos omitido explicar las características de la circulación costera, lo cual es un tema fundamental que amerita una discusión per se, pero está fuera del objetivo de este reporte.

OBJETIVOS GENERALES

(1) Establecer una línea de base de las características oceanográficas, geoquímicas y biológicas de la zona profunda de las aguas territoriales mexicanas del Golfo de México durante condiciones de otoño

(2) Evaluar si hay evidencia de hidrocarburos provenientes del derrame de petróleo del pozo profundo asociado a la plataforma Deepwater Horizon.

(3) Llevar a cabo esfuerzos de monitoreo posteriores con el objetivo de evaluar los posibles impactos del derrame sobre los ecosistemas marinos a corto, mediano y largo plazo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1. Colectar información oceanográfica, incluyendo temperatura, salinidad, oxígeno, disuelto, y la velocidad y dirección de las corrientes.
- 2. Tomar muestras de aguas a diferentes profundidades en la columna de agua para análisis biogeoquímicos, microbiológicos, y biológicos.
- 3. Medir las condiciones de nutrientes (nitritos, nitratos, amonio, fosfato y silicato) y clorofila a para establecer los procesos geoquímicos predominantes y relacionarlos con los patrones de circulación.
- 4. Recuperar muestras de sedimentos en estaciones distribuidas en aguas profundas, con diferentes objetivos biogeoquímicos, microbiológicos, biológicos.
- Cuantificar la concentración de hidrocarburos aromáticos y policíclicos y metales pesados indicativos de presencia de hidrocarburos provenientes de petróleo en agua y sedimentos.
- 6. Evaluar la composición isotópica del carbono inorgánico disuelto, el material orgánico particulado y el zooplancton para establecer relaciones tróficas.
- 7. Recolectar muestras de zooplancton con red Bongo de arrastre.

METODOLOGÍA

ESTRATEGIA GENERAL DE MUESTREO

Las metas del crucero, y los parámetros específicos a evaluar en la columna de agua y en los sedimentos, se establecieron por mutuo acuerdo con diversas instancias del Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAT y se establecen en el Convenio de Colaboración. Se consideró (1) la relevancia e importancia de cada parámetro físico, químico y biológico dentro del contexto y objetivos del proyecto y del derrame petrolero, (2) la capacidad técnica y analítica del CICESE y sus colaboradores, que incluye el grupo de trabajo con mayor conocimiento de la circulación del Golfo de México en el país, (3) la necesidad de establecer las condiciones oceanográficas características de una región muy poco estudiada de las aguas patrimoniales de México, y (4) la importancia de evaluar si había evidencia de la presencia de hidrocarburos provenientes del derrame del pozo Macondo en aguas mexicanas.

La lista de parámetros que se evaluaron, la matriz en la cual se midieron (*agua, sedimentos, materia orgánica particulada, biota, fuente*) y el estatus de los resultados (completo, parcial, o no se cumplió y justificación) se presenta en la Tabla 1. Esta lista de adecuó de la tabla del Anexo 1 del Convenio de Colaboración. En la Tabla 2 se presenta el listado de los investigadores involucrados en el proyecto, su línea de investigación dentro del proyecto y su adscripción.

Tabla 1. Tabla de parámetros a evaluar dentro del contexto del proyecto "Establecimiento de línea de base en aguas profundas del Golfo de México en respuesta al derrame petrolero asociado a la plataforma Deepwater Horizon". La lista de parámetros y el compartimiento o matriz en la cual se medirían se especifican dentro del convenio. Los asteríscos indican parámetros cuya medición se comprometieron en el convenio. Las mediciones que se resaltan en negro se llegaron a completar o se presentan de forma parcial según lo especificado. Se describe el estatus de cada tipo de análisis en la última columna. NO: No se comprometió a llevar a cabo esos análisis. IMP: Instituto Mexicano del Petróleo. N/A: no aplica.

						Comentarios sobre
						obtención de datos,
Medición	(Compa	rtimien	to/Matr	iz	muestras y análisis
	Agua	Materia orgánica	Seds	Biológico s	Fuente	
Fluorometria p/detección de aromáticos	*					No se contó con un fluorómetro de las características adecuadas durante el crucero ni se pudieron recolectar muestras para mediciones en el laboratorio.
Velocidad y dirección de masas de agua	*					Sí, aunque hubo problemas con los sensores en algunas estaciones.
Temperatura	*					
Salinidad	*					Sí, aunque hubo problemas con los
Oxígeno disuelto	*					sensores en algunas estaciones.
рН	*					Se calculará a partir de DIC y Alcalinidad
Amonio	*					Completo
% Nitrógeno	*					N/A
Nitrato	*					Completo
Fósforo reactivo	*					Completo
Fósforo total	*					No
Silicatos	*					Completo
Clorofila-a	*					Mediciones indirectas a través del análisis de imagines de satélite
Carbono Orgánico Disuelto	*					Completo
Carbono Orgánico Particulado		*				Pendiente de recibir resultados de UC Davis (fecha de entrega principios de febrero).
Carbono Inorgánico Disuelto	*					Completo
Radiocarbono-14		*				Pendiente de recibir resultados de la Universidad de Arizona
Composición isotópica de C	*	*	*	N/A		Pendiente de recibir resultados de UC Davis (fecha de entrega principios de febrero).
Composición isotópica de N		*	*	N/A		Pendiente de recibir resultados de UC Davis (fecha de entrega principios de febrero).

Tabla 1. Continuación

						Comentarios sobre obtención de datos,
Medición	Com	oartimi	ento/M	atriz		muestras y análisis
	Agua	Materia orgánica	Sedimentos	Biológicos	Fuente	
Hidrocarburos Totales del Petróleo e individuales	*	NO	IMP	NO	NO	Resultados parciales (muestras de agua).
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	*	NO	IMP	NO	*	Resultados parciales (muestras de agua).
Marcadores Moleculares del Petróleo	*	NO	IMP		NO	En proceso (muestras de agua).
Metales (Ni, Pb, V, Cd)	*		*	NO	*	Resultados parciales en muestra de agua (V); resultados completos de las muestras de sedimentos
Composición de la comunidad de fitoplancton	*					Completo, aunque solo se reporta sobre diatomeas, dinoflagelados y silicoflagelados. No se contó con la capacidad analítica de caracterizar comunidades de células pequeñas
Composición de la comunidad de zooplancton	*					Completo
Composición de la comunidad del bentos			*			Completo (excepto el B-IBI, que no aplica a zonas de aguas profundas)
Análisis de la comunidad de bacterias hidrocarbonoclasticas		*	*			Completo (caracterización de varios grupos bacterianos)
	1	1		1	1	

Responsable	Institución	Línea de investigación dentro del provecto	Correo electrónico
Dr. Víctor Camacho	IIO-UABC	Carbono orgánico disuelto	vcamacho@uabc.edu.mx
Dr. Julio Candela	DO-CICESE	Oceanografía física	candela@cicese.mx
Dr. Walter Daesslé	IIO-UABC	Nutrientes	walter@uabc.edu.mx
Dra. Victoria Díaz	DO-CICESE	Bentos macrofauna	vidiaz@cicese.mx
Dr. Jaime Farber	DO-CICESE	Zooplancton	jfarber@cicese.mx
M en C Vicente Ferreira	DO-CICESE	Paleoceanografía/base de datos	paleoc@cicese.mx
M en C Joaquín García	DO-CICESE	Oceanografía física/datos CTD	<u>joaquin@cicese.mx</u>
Dr. Martín Hernández Ayón	IIO-UABC	Carbono inorgánico disuelto, pH,	jmartin@uabc.edu.mx
		alcalinidad	
Dr. Juan Carlos Herguera	DO-CICESE	Determinaciones isotópicas,	herguera@cicese.mx
		geoquímica	
Dra. Sharon Herzka	DO-CICESE	Determinaciones isotópicas,	<u>sherzka@cicese.mx</u>
		ictioplancton	
Dr. Miguel Angel Huerta	IIO-UABC	Metales traza sedimentos	mhuerta@uabc.edu.mx
Dr. Rubén Lara	DO-CICESE	Fitoplancton	<u>rlara@cicese.mx</u>
Dra. Lucila Lares	DO-CICESE	Metales traza columna de agua	llares@cicese.mx
Dr. Alexei Licea	CICESE	Biología molecular/bacteriología	alicea@cicese.mx
Dr. Leonardo Lizárraga	DBEA-CICESE	Bacteriología	lizarra@cicese.mx
Dr. Vinicio Macías	IIO-UABC	Hidrocarburos	vmacias@uabc.edu.mx
Dr. José Ochoa	DO-CICESE	Oceanografía física	jochoa@cicese.mx
Dra. Meritxell Riquelme	DBEA-CICESE	Bentos hongos	riquelme@cicese.mx
Dr. Axayácatl Rocha	DO-CICESE	Bentos meiofauna	arocha@cicese.mx
Dr. Julio Sheinbaum	DO-CICESE	Oceanografía física	julios@cicese.mx

Tabla 2. Lista de investigadores participantes en el proyecto, adscripción y línea de investigación.

CICESE: Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada

DO: División de Oceanología

DBEA: División de Biología Expertimental y Aplicada

UABC: Universidad Autónoma de Baja California

Según el convenio, se estableció que el crucero se llevaría a cabo dentro de la Zona Económica Exclusiva de México y en las zonas de aguas profundas (regiones con profundidades desde los 1000 m hasta una profundidad de aproximadamente 3500m). La campaña estuvo constituida por una red de 46 estaciones cuya distribución abarcó toda la zona profunda del golfo de una manera sistemática y estratificada (Figura 16, Tabla 3 y Tabla 4). El crucero XIXIMI-1 duró 16 días. *Es importante considerar que el punto lineal más cercano entre nuestra región de estudio y la localización del pozo Macondo es de 410 km al sur.*



Figura 16. Mapa de las estaciones de la campaña XIXIMI-1 en las que se realizaron lances hidrográficos. Puntos: estaciones someras (muestreos en 12 profundidades predeterminadas desde la superficie hasta los 1000 m), cuadros azules (muestreos en 12 profundidades predeterminadas desde la superficie hasta los 3000 m). Equis roja: estaciones en las cuales se obtuvieron muestras de sedimentos con un nucleador de caja tipo Soutar. En todas las estaciones (excepto la E48) se realizaron arrastres con red Bongo para la colecta de zooplancton.

Tabla 3. Nombre, coordenadas, fechas de muestreo (GMT) y profundidad de las 46 estaciones que se cubrieron durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 a bordo del *BO Justo Sierra*. El tipo de lance se refiere a la profundidad máxima en la cual se recolectaron muestras de agua (1000m en el caso de estaciones someras y 3000m en estaciones profundas).

Crucero	Estación	yyyy-mm- ddThh:mm	Longitud [gradoseste]	Latitud [gradosnorte]	Prof. Fondo [m]	Tipo de lance
XIXIMI-1	1	2010-11-06T22:48	-97.1032	21.991	1036	Somero
XIXIMI-1	2	2010-11-07T06:40	-96.6951	22.996	1792	Somero
XIXIMI-1	3B	2010-11-16T04:03	-95.9982	23.000	2338	Profundo
XIXIMI-1	3	2010-11-16T10:54	-95.0053	23.008	3569	Somero
XIXIMI-1	4	2010-11-19T09:15	-96.0051	21.989	2720	Profundo
XIXIMI-1	5	2010-11-19T02:11	-95.0015	22.003	3364	Somero
XIXIMI-1	6	2010-11-16T19:51	-94.0046	22.988	2355	Profundo
XIXIMI-1	7	2010-11-18T20:17	-94.0169	21.986	3559	Somero
XIXIMI-1	8	2010-11-14T10:06	-92.0101	24.000	3691	Profundo
XIXIMI-1	9	2010-11-14T16:33	-93.0058	24.003	3736	Somero
XIXIMI-1	10	2010-11-14T22:45	-93.9899	23.997	3757	Profundo
XIXIMI-1	11	2010-11-15T07:56	-94.9952	24.026	3577	Somero
XIXIMI-1	12	2010-11-15T18:32	-96.0039	24.016	2667	Profundo
XIXIMI-1	13	2010-11-07T14:14	-96.7187	24.003	1591	Somero
XIXIMI-1	15	2010-11-08T00:35	-95.601	25.008	2416	Profundo
XIXIMI-1	16	2010-11-08T08:25	-94.7898	24.999	3613	Profundo
XIXIMI-1	17	2010-11-08T15:42	-93.9933	24.996	3698	Profundo
XIXIMI-1	18	2010-11-09T00:34	-93.004	25.011	3631	Profundo
XIXIMI-1	19	2010-11-09T07:07	-91.9698	25.006	3526	Profundo
XIXIMI-1	20	2010-11-09T19:22	-91.0066	24.998	3538	Profundo
XIXIMI-1	21	2010-11-10T01:22	-90.0169	25.005	3526	Profundo
XIXIMI-1	22	2010-11-10T09:12	-89.0039	25.043	3486	Profundo
XIXIMI-1	23	2010-11-10T19:12	-88.0018	24.998	3420	Profundo
XIXIMI-1	24	2010-11-11T02:42	-87.0101	24.840	3374	Profundo
XIXIMI-1	27	2010-11-11T12:22	-86.7578	23.988	1233	Somero
XIXIMI-1	29	2010-11-13T04:20	-87.9473	24.482	1330	Somero
XIXIMI-1	30	2010-11-13T12:09	-89.0051	24.000	2982	Somero
XIXIMI-1	31	2010-11-13T17:26	-90.006	24.002	3628	Profundo
XIXIMI-1	32	2010-11-14T03:18	-90.999	24.000	3709	Somero
XIXIMI-1	33	2010-11-17T18:58	-91.0094	23.014	3712	Profundo
XIXIMI-1	34	2010-11-17T11:51	-92.0149	23.000	3737	Somero
XIXIMI-1	35	2010-11-20T22:43	-92.6754	20.496	2464	Somero

Crucero	Estación	yyyy-mm- ddThh:mm	Longitud [gradoseste]	Latitud [gradosnorte]	Prof. Fondo [m]	Tipo de lance
XIXIMI-1	36	2010-11-20T14:53	-92.998	21.007	2549	Profundo
XIXIMI-1	37	2010-11-20T08:04	-94.0165	21.004	2799	Somero
XIXIMI-1	38	2010-11-19T23:48	-95.0119	20.997	3140	Profundo
XIXIMI-1	39	2010-11-19T16:53	-95.9952	20.999	2179	Somero
XIXIMI-1	40	2010-11-21T16:30	-95.0045	20.011	2758	Profundo
XIXIMI-1	41	2010-11-21T10:27	-94.0103	20.007	1401	Somero
XIXIMI-1	42	2010-11-21T04:16	-93.0111	19.996	1307	Somero
XIXIMI-1	43	2010-11-18T11:37	-93.0091	21.991	3297	Profundo
XIXIMI-1	44	2010-11-17T04:40	-93.0111	22.994	3739	Somero
XIXIMI-1	45	2010-11-22T00:56	-94.9961	19.269	1955	Somero
XIXIMI-1	46	2010-11-22T11:06	-95.9967	20.003	1818	Somero
XIXIMI-1	47	2010-11-18T04:58	-92.0137	22.496	3562	Somero

Tabla 3. Continuación

En cada estación, se obtuvieron datos de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, fluorescencia y dirección y velocidad de las corrientes, y muestras para caracterizar las condiciones biogeoquímicas y ecológicas en cada una de 12 profundidades pre-establecidas. Estas profundidades se seleccionaron antes del la campaña con base en conocimiento sobre la hidrografía y circulación de la región y la profundidad a la cual ocurrió el derrame (1500m).

En 22 de las 46 estaciones, la caracterización se llevó a cabo desde la superficie hasta una profundidad de 3000 m (denominadas como estaciones profundas), mientras que en las 20 estaciones restantes se colectaron muestras desde la superficie hasta los 1000 m (denominadas como estaciones someras; Tabla 4). Este esquema de muestreo se diseñó sopesando la necesidad de caracterizar toda la columna de agua y tomando en cuenta las escalas de variabilidad de diversos parámetros en función de la profundidad. En las estaciones profundas, se obtuvo una menor resolución en la escala vertical para caracterizar la columna de agua en profundidad. En las estaciones someras, se caracterizó en mayor detalle las región donde se esperaba un mayor nivel de variación como consecuencia del alto nivel de actividad biológica. Tabla 4. Profundidades nominales de la recolecta de muestras de agua con una roseta equipada con 12 botellas (6 Niskin + 6 GoFlo) de 10 L. En negrillas se indican las profundidades en las cuales se tomaron muestras de agua para el análisis de para metales traza.

ESTACIONES P Superficie a 300	ROFUNDAS 0 m	ESTACIONES S Superficie a 100	OMERAS 10 m
Masa de agua	Profundidad (m)	Masa de agua	Profundidad (m)
Superficial	5-10	Superficial	5-10
	50		20
	150		50
Intermedia	400		75
	600		100
	800		150
Antártica	1000		200
	1200		300
	1500	Intermedia	400
	2000		600
	2500		800
	3000	Antártica	1000

La recolecta de muestras de la columna de agua se complementó con la extracción de núcleos de sedimentos en 10 estaciones a lo largo de la zona de estudio (Figura 16, Tabla 5). Se utilizó un nucleador de caja tipo Soutar para recuperar sedimentos. De cada núcleo, se insertaron y recuperaron cuatro cilindros de acrílico con sedimentos intactos (tres cilindros de trabajo y uno de archivo) y posteriormente se recolectaron muestras pequeñas con jeringas para los análisis microbiológico y de hongos.

Para los muestreos de geoquímica, metales, carbono y nitrógeno y sus contenidos isotópicos, así como de granulometría, contenido de agua, y evaluación de la composición de la meiofauna y macrofauna, los sedimentos se cortaron en rodajas de 1 o 2 cm de espesor dependiendo de los requerimientos de cada tipo de muestra. El cuarto subnúcleo, el archivo, se refrigeró a 5-7°C.

Crucero	Estación	yyyy-mm-ddThh:mm	Longitud [grados_este]	Latitud [grados_norte]	Prof. Fondo [m]
XIXIMI-1	3	2010-11-16T01:25	-95.028	23.021	3547
XIXIMI-1	15	2010-11-07T02:15	-95.603	25.023	2391
XIXIMI-1	19	2010-11-09T09:28	-91.981	25.007	3513
XIXIMI-1	27	2010-11-11T01:35	-86.752	23.999	1234
XIXIMI-1	31	2010-11-13T20:56	-90.000	24.006	3631
XIXIMI-1	33	2010-11-17T22:14	-91.015	23.018	3717
XIXIMI-1	35	2010-11-21T12:49	-92.689	20.492	2240
XIXIMI-1	36	2010-11-20T18:41	-92.927	21.017	2821
XIXIMI-1	40	2010-11-21T19:31	-95.010	20.022	2784
XIXIMI-1	43	2010-11-18T14:33	-93.033	21.972	3284

Tabla 5. Nombre de identificación, coordenadas, fechas de muestreo (GMT) y profundidad de las 10 estaciones en las cuales se recuperaron núcleos durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 a bordo del *BO Justo Sierra*.

El informe de las actividades que se llevaron a cabo durante el crucero oceanográfico XIXIMI-1, los protocolos que se emplearon y de los logros del crucero se presentaron en el Reporte de la Campaña Oceanográfica XIXIMI-1 que fue sometido al INE en diciembre del 2010.

RESULTADOS

TEMPERATURA, SALINIDAD, LADCP

(Dr. Julio Sheinbaum, M. en C. Joaquín García)

Introducción

En este informe se presentan los datos de CTD (SBE 9-11 *plus*) de la campaña oceanográfica (XIXIMI-1) realizada a bordo del B/O Justo Sierra del 6 al 22 de noviembre de 2010. En esta campaña se ocuparon las 46 estaciones propuestas. En la Figura 17 se muestra a la red de estaciones como fue ocupada en XIXIMI-1. La numeración indica la secuencia de ocupación en la estaciones y de los lances de CTD y los símbolos denotan la denominación de la estación, somera si se caracterizó hasta los 1000 m de profundidad (•) y profunda si fue hasta los 3500 m de profundidad (•). En el Anexo 1 se muestra el número secuencial del lance de CTD, el nombre, la posición geográfica y profundidad de las estaciones, y la presión (db), hora y fecha a la profundidad máxima del lance de CTD.



Figura 17. Localización del área de estudio y de las estaciones ocupadas durante XIXIMI-1. Se hace referencia a cada estación empleando el número de lance con la roseta (valores secuenciales y únicos) y el nombre de la estación (EX) que se usa en a lo largo de este informe.

Cada lance de CTD se hizo conjuntamente con un multimuestreador de agua (Roseta SBE) para 12 botellas (6 Niskin y 6 Go-Flo) de 10 litros cada una y un perfilador de corrientes LADCP (Lowering Acoustic Doppler Current Profiler, RDI BB-WH300). A continuación se resumen los muestreos efectuados en estaciones (ver el Apéndice A para mayor información al respecto):

Temperatura, conductividad (salinidad), oxígeno disuelto y clorofila con CTD y corrientes con LADCP en 46 estaciones.

Muestras de agua con Roseta en 46 estaciones y hasta en 12 profundidades discretas.

Temperatura y salinidad superficiales y observaciones meteorológicas. Se obtuvieron de equipo de registro continuo a barco parado en cada estación, mientras se hacía el lance de CTD, como se indica en el tema 3a de este informe. Se presentan en el encabezado de los datos tabulados y perfiles de CTD, junto con los datos de identificación de cada lance de CTD.

Metodología

Este capítulo está dividido en varias secciones organizadas en el orden en el cual fueron adquiridos y procesados los datos: descripción del sistema CTD, calibración, adquisición, identificación de errores y procesamiento. El software utilizado en todas las secciones es el distribuido por el fabricante del CTD que se utilizó: CTD Real Time Acquisition Software (SEASAVE for Win32, Sea-Bird Electronics, INC, 2008), versión 7, marzo de 2008 y SBE Data Processing (Sea-Bird Electronics, INC, 2011), versión 7.21f, enero de 2011.

Descripción del sistema CTD

Durante el crucero XIXIMI-1 se utilizó un sistema CTD modelo SBE 9-11 *plus*, fabricado por Sea-Bird Electronics, INC, el cual consiste de una unidad submarina (SBE-9 plus) y una unidad de control en cubierta (SBE-11 plus). La unidad SBE-9 consta de una caja de presión (con capacidad hasta 3400 m de profundidad), conteniendo en su interior fuentes de poder y la electrónica para adquisición y telemetría de datos, además del sensor de presión. En su exterior tiene sensores modulares, los cuales son alimentados con flujo controlado de agua de mar por una bomba de velocidad constante (30 ml s⁻¹). La unidad provee hasta ocho canales de entrada para conectar sensores opcionales. Durante XIXIMI-1 se emplearon sensores duplicados (primarios y secundarios) de temperatura y conductividad, además de un sensor de oxígeno, dos sensores de fluorescencia y un altímetro sónico.

Adquisición de los datos

La unidad SBE-11 permite la comunicación, control de la operación y monitoreo de la señal de los sensores en la unidad SBE-9 con una computadora personal vía cable conductor eléctrico en el malacate del de CTD. Dichos sensores son: SBE4, celda de resistencia, el de conductividad (COND); SBE3, termistor, el de temperatura (TEMP); Paroscientific Digiquartz el de presión (PRES); SBE43 el de oxígeno disuelto (OXI) y sensor Seapoint el de Clorofila *a* (CLOR). Las especificaciones técnicas para cada sensor, dadas por el fabricante, se muestran en la Tabla 6. Las características principales del sistema, así como la manera en que se obtienen los datos, están dadas en García *et al.* (1995).

SENSOR	RANGO	PRECISIÓN	RESOLUCIÓN (a 24 Hz)	ESTABILIDAD	TIEMPO DE RESPUESTA
COND: SBE4	0-70 mmho cm ⁻¹	0.003 mmho cm ⁻¹	0.0004 mmho cm ⁻	0.002 mmho cm ⁻¹ por mes	0.040 s
TEMP: SBE 3	-5 a 35 °C	0.002 °C	0.0002 °C	0.0003 °C por mes	0.060 s
PRES : Paroscientific Digiquartz	0–15000 psia	0.015 % de la escala completa	0.001 % de la escala completa	0.0015 % de la escala completa por mes	0.001 s
OXI: SBE 43	120 % de saturación superficial	2% de saturación	0.2 % de saturación	2% por 1000 horas	3 s a 28 ⁰C y 28 s a 2 ⁰C
CLOR: Fluorómetro Seapoint	0-150 μg l ⁻¹	0.02 μg l ⁻¹	0.033 µg l ⁻¹	10% por 5000 horas	0.1 s

Tabla 6. Especificaciones técnicas de los sensores del CTD.

Calibración

La manera en que se calibran en laboratorio los sensores de presión, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto se muestra en García *et al.* (1995). En las Tablas 7-10 se presentan los coeficientes que resultaron de la última calibración de los sensores usados en la campaña XIXIMI-1, la que fue realizada por el fabricante de abril-mayo de 2009 para el sensor de presión (P), los sensores de temperatura y conductividad primaria (T0 y C0) y temperatura y conductividad secundaria (T1 y C1), mayo de 2008, el sensor de oxígeno disuelto, marzo de 2006 para el sensor de fluorescencia (F1) y el sensor de conductividad (C2) y diciembre de 2007 para el sensor de fluorescencia (F2).

Tabla 7. Coeficientes de calibración de los sensores de presión y temperatura utilizados en XIXIMI-1.

Coeficiente	P # 0544	T0 # 2704	T1 # 2725
AD590M	1.1440E-02		
AD590B	- 8.5762E+00		
Slope	1.0000E+00		
Offset	- 2.0157E+00		
G		4.41783855E-03	4.84462569E-03
Н		6.45422141E-04	6.75354890E-04
I		2.26637946E-05	2.62624688E-05
J		1.91107595E-06	2.08474223E-06
F0		1.0000000E+03	1.0000000E+03

Coeficiente	C0 # 2260	C1 # 2253	C2 # 3280
G	-9.74543311E+00	-4.08064368E+00	-9.74543311E+00
н	1.44620792E-01	5.11135404E-01	1.44620792E-01
I	-9.64205491E-04	1.96444957E-04	-9.64205491E-04
J	1.41525807E-04	1.85761554E-05	1.41525807E-04
Cpcor	-9.57000000E-08	-9.57000000E-08	-9.57000000E-08
Ctcor	3.25000000E-06	3.25000000E-06	3.25000000E-06

Tabla 8. Coeficientes de calibración de los sensores de conductividad utilizados en XIXIMI-1.

Tabla 9. Coeficientes de calibración de los sensores de oxígeno disuelto y fluorescencia utilizados en XIXIMI-1.

Coeficiente	P # 0305	T0 # 4189	T1 # 1510	C0 # 2720	C1 # 1195	O ₂ # 0846	F 2470	#
AD590M	1.1440E-02							
AD590B	- 8.5762E+00							
Slope	1.0000E+00							
Offset	- 2.0157E+00							
G		4.41783855E-03	4.84462569E-03	-9.74543311	-4.08064368			
Н		6.45422141E-04	6.75354890E-04	1.44620792E-01	5.11135404E-01			
		2.26637946E-05	2.62624688E-05	-9.64205491E-4	1.96444957E-04			
J		1.91107595E-06	2.08474223E-06	1.41525807E-4	1.85761554E-05			
F0		1.0000000E+03	1.00000000E+03					
Cpcor				-9.57000000E-8	-9.57000000E-08			
Ctcor				3.25000000E-06	3.25000000E-06			
Soc						0.3593		
Voffset						-0.5101		
$ au_{20}$						1.54 s		
А						4.9984E-04		
В						8.37210E-05		
С						-6.1052E-07		
E						0.036		
D1						1.92634E-04		
D2						-4.64803E-2		
H1						-3.3E-02		
H2						5.0E+03		
Gain Setting							1X	
Offset							0	

Estos coeficientes fueron utilizados para actualizar el archivo de configuración del CTD antes del zarpe de la campaña XIXIMI-1. Los sensores y canales se alternaron a lo largo de la campaña para corregir los errores y anomalías que detectábamos a bordo.

Como se dijo en el informe técnico parcial (junio, 2010), colectamos agua a distintas profundidades en cada lance, para la calibración de la salinidad y del oxígeno disuelto. Decidimos no realizar tal calibración y utilizar los coeficientes obtenidos de la calibración realizada en los laboratorios del fabricante.

En la Tabla 10 se presentan los coeficientes de calibración que resultaron posterior a la campaña XIXIMI-1, la que fue realizada por los fabricantes en abril de 2011 para el sensor de presión (P), los sensores de temperatura y conductividad primaria (T0 y C0) y temperatura y conductividad secundaria (T1 y C1) y el sensor de oxígeno disuelto y en junio de 2011 para el sensor de fluorescencia (F1).

Desafortunadamente el sensor de temperatura # de serie 2725 presentó daños permanentes y no se pudo calibrar, este sensor fue utilizado como sensor secundario en los lances 1 al 31 y como sensor primario en los lances 32 al 46. El sensor de conductividad # de serie 3280 no fue facilitado para su calibración posterior. Debido a esto, únicamente se corrigió su deriva temporal.

A finales de abril de 2008, Sea-Bird modificó la ecuación para el cálculo de oxígeno disuelto en mll⁻¹ a partir del voltaje del sensor de oxígeno SBE43 (Sea-Bird, 2008, Murphy, et al., 2008). El algoritmo utilizado por Sea-Bird, es similar al dado por Owens y Millard (1985), solamente que incluye cambios importantes en Tau, TCor, PCor, and OxSat, en García et al (2010) se muestra la ecuación con los cambios realizados por Sea-Bird. El algoritmo de Sea-Bird incorpora además la corrección por histéresis causada por errores dinámicos (a partir de octubre de 2008), es decir, corrige los valores de voltaje por cambios en la permeabilidad de la membrana de teflón por cambios en la presión de muestreo (Sea-Bird, 2008).

Coeficiente	P # 0544	T0 # 2704	C0 # 2260	C1 # 2253	O ₂ # 0271	F # 2202
AD590M	1.28246e-2					
AD590B	-8.79219					
Slope	0.99992018					
Offset	-3.67872					
G		4.31811515e-03	-9.74543311	-9.97918053		
Н		6.39711727e-04	1.44620792e-1	1.31705040		
I		2.31741350e-05	-9.64205491e-4	-8.33041851e-04		
J		2.29539540e-06	1.41525807E-4	1.19563393e-04		
F0		1000.0				
Cpcor			-9.570000E-8	-9.5700000e-08		
Ctcor			3.250000E-6	3.2500e-006		
Soc					0.3716	
Voffset					-0.6146	
$ au_{20}$					0.99 s	
А					-1.4576e-03	
В					1.4809e-04	
С					-2.9427e-06	
E					0.036	
D1					1.92634e-4	
D2					-4.64803e-2	
H1					-3.3e-02	
H2					5.0e+03	
Gain Setting						1X
Offset						20%

Tabla 10. Coeficientes de calibración de los sensores utilizados en XIXIMI-1 obtenidos posterior a la campaña oceanográfica.

Identificación de errores

Durante la adquisición de datos de CTD el software provisto por el fabricante permite monitorear, por medio de gráficos, el funcionamiento del equipo. Una vez que el lance termina los datos se pueden procesar con el software SBE Data Processing para obtener los perfiles de propiedades medidas como presión, temperatura y conductividad, o propiedades derivadas como salinidad, densidad y oxígeno disuelto. Durante el procesamiento se disminuye el ruido y se eliminan errores, para obtener finalmente valores a cada metro o decibar en la vertical. En el procesamiento se utilizan todos los datos crudos registrados por el CTD durante el lance y convertidos a unidades convencionales por medio del módulo DATCNV. Se utilizó el módulo WILDEDIT para editar los datos del CTD, etiquetando con un valor centinela los datos que caen fuera de los rangos de temperatura, conductividad, presión y oxígeno especificados por el fabricante (Tabla 6).

Después, el mismo módulo elimina a dichos "errores etiquetados". Los pasos que utiliza el algoritmo son:

1º. Lectura de un bloque de N datos, en este caso el bloque escogido fue de 48 datos correspondiente a dos segundos de muestreo.

2º. Se calcula la media para cada conjunto de N datos consecutivos y los valores que difieran de la media por más de dos veces la desviación estándar, son etiquetados con un valor centinela.

3º. Se calcula la media para el mismo número de datos, excluyendo los datos etiquetados en el paso anterior, y los valores que difieran de la media por 5 veces la desviación estándar son también etiquetados con un valor centinela. Si la diferencia entre el valor y la media es menor que 0.001, el valor no se etiqueta con el valor centinela. Así sucesivamente el siguiente bloque de N datos, hasta terminar con el archivo de datos.

Reducción del ruido de alta frecuencia en la señal de presión

El siguiente paso en el procesamiento de los datos fue reducir el ruido no deseable de alta frecuencia que registra el sensor de presión del CTD. Esto fue efectuado por medio de la aplicación de un filtro de paso bajo con una constante de tiempo de 0.17 s (4 muestras) a las series de tiempo de presión. El módulo FILTER permite aplicar éste filtro en las series de tiempo.

Corrección por diferencias en tiempos de medición y de respuesta de los sensores de temperatura, conductividad, oxígeno disuelto y presión

Temperatura vs. Presión: Debido a que el sensor de temperatura SBE3 utilizado en el CTD es de respuesta rápida, aproximadamente 0.06 s (sensores típicos lentos tienen un tiempo de respuesta de ~0.6 s) no es necesario avanzar la medición de temperatura con respecto a la medición de presión (sensor con tiempo de respuesta de 0.001 s).

Conductividad vs. Temperatura: El sensor de conductividad SBE4 en el CTD mide con un retraso respecto al sensor de temperatura SBE3 debido a la posición de estos sensores en el conducto TC (Seabird, 1992). Este retraso es fijo e independiente del movimiento del CTD pues la rapidez de bombeo es constante (Seabird, 1992). Este retraso, considerando la separación entre sensores y la velocidad del bombeo, debe ser de 0.073 s. Un retraso de 0.073 s, se rescata automáticamente configurando la unidad de control SBE11 del sistema para el sensor primario, mientras que el sensor secundario fue adelantado por 0.073 s con respecto a la presión por medio del módulo ALIGNCTD. Para realizar una reducción adicional en el error introducido por las

diferentes respuestas de los sensores, se filtró la temperatura con un filtro paso bajo de polo sencillo, con una constante de tiempo de 0.015 s. Este último filtrado se basa en el criterio de minimizar visualmente los picos en el perfil de salinidad (Morison et al., 1994). En García y Ochoa (1997), se muestran las pruebas efectuadas con diferentes constantes de tiempo para el mismo sistema CTD. Estas pruebas se realizaron con el propósito de que las mediciones de temperatura y conductividad queden lo mejor sincronizadas posible, usando algoritmos simples y basados en la física fundamental de los sensores (Lueck, 1991). El filtro fue aplicado por medio del módulo FILTER.

Oxígeno disuelto vs. Presión: La medida de oxígeno también es sistemáticamente retrasada con respecto a la presión, debido a la constante de tiempo de respuesta del sensor de oxígeno (de 2 s a 28 °C hasta cerca de 28 s a 2 °C, para alcanzar el equilibrio) y al retraso adicional por el tiempo que transcurre en el bombeo de agua hacia el sensor. En García et al. (2000) se muestran las pruebas efectuadas para diversos avances del oxígeno con respecto a la presión. La señal de oxígeno fue adelantada por 5 s con respecto a la presión por medio del módulo ALIGNCTD.

Compensación numérica de la anomalía térmica de la celda de conductividad

El problema debido a la capa límite térmica en el interior de la celda de conductividad es descrito en detalle por Lueck (1991). Esta anomalía térmica requiere, para un mejor cálculo de la salinidad, la estimación de dos parámetros, uno asociado al volumen fraccional de la capa límite (α) y otro asociado con la rapidez con que la anomalía térmica desaparece (τ). El fabricante establece que valores típicos de α deben estar entre 0.03 y 0.04, nunca mayor de 0.1 y los típicos de τ fluctúan entre 7 y 9 s. Para su estimación se evalúa la serie $\delta s=\delta s(T;\alpha,\tau)$, que es la diferencia de la salinidad de bajada menos la salinidad de subida como función de la temperatura para diferentes valores de α y τ . Si se muestrea el mismo tipo de aguas de subida y de bajada y el algoritmo de corrección es el exacto, δs es nula. Como el algoritmo de corrección es sólo una aproximación al comportamiento de la capa límite y no se muestrea el mismo tipo de agua de bajada y de subida, se buscan los valores de α y τ que producen un promedio (que llamamos μ cercano a cero y que reducen la desviación estándar (σ) de δs .

En García *et al.* (2000) se muestran diversas pruebas para estimar el promedio y la varianza de δ s para diferentes valores de α y τ y se explica que es difícil obtener la situación ideal de $\mu=\sigma=0$. Una segunda opción a la ideal es encontrar el mínimo σ para $\mu=0$, concluyendo que el promedio es cero y la varianza es mínima para los valores de $\alpha=0.035$ y $\tau=7.8$ s ($\beta=\tau^{-1}=0.1282$ s⁻¹). Estas pruebas se realizaron a los datos obtenidos en esta campaña. Para corregir los datos de CTD por anomalía térmica en la celda de conductividad, se aplicó el módulo CELLTM utilizando los valores $\alpha=0.03$ y $\tau=7.0$ s ($\beta=\tau^{-1}=0.1429$ s⁻¹) a todos los lances de XIXIMI-1. Esto es para los sensores primarios y secundarios de conductividad (n/s 2720 y 1195) y de temperatura (n/s 4189 y 1510) y para todas las mediciones aquí reportadas.

Corrección por cambios en la velocidad del lance de CTD

Durante el lance de CTD se produce una estela, con propiedades térmicas ajenas a procesos oceánicos, por el cabeceo del barco (u otras razones), lo que invierte el sentido del movimiento general de ascenso o descenso y se muestrea agua de la estela alterada por el CTD mismo. También ocurre lo anterior cuando el CTD desciende o asciende con interrupciones bruscas y cuando se encuentra en estación suspendido a "malacate parado". El módulo utilizado para eliminar situaciones susceptibles a estos errores es LOOPEDIT. En este módulo se eliminan los datos en que el CTD tenga una rapidez menor a un límite; el mínimo aquí utilizado fue de 25 m min⁻¹.

Compactación de los datos

Después de la calibración y corrección del desfase entre los sensores de presión, temperatura, conductividad y oxígeno, siguió el cálculo de la salinidad y del oxígeno disuelto. Las series de datos fueron suavizados por medio de un filtro paso bajo, con una constante de tiempo de un segundo para las series de presión, temperatura, salinidad y dos segundos para la series de oxígeno disuelto. Enseguida, los datos fueron promediados en bloques centrados de 1 db usando el módulo BINAVG.

La temperatura reportada y utilizada para derivar variables es IPTS-68, siguiendo la recomendación de JPOTS, T_{68} =1.00024 T_{90} . La salinidad es PSS-78 y la densidad es calculada a partir de la ecuación de estado para agua de mar (EOS80). Las fórmulas para el cálculo de la salinidad y densidad fueron las dadas por Fofonoff y Millard (1983) y Millard (1982). El algoritmo utilizado para el cálculo de la concentración de oxígeno disuelto utiliza una ecuación modificada a la descrita por Owens y Millard (1985), la cual incorpora el factor de corrección por la presión. Todos estos algoritmos son internos en el software proporcionado por Sea-Bird Electronics, Inc.

Después de que el procesado ha terminado se verifican los datos visualmente, para localizar errores no eliminados con los procedimientos anteriormente descritos. La mayoría de los errores son por falla en la comunicación entre la unidad de control SBE 11, interfase del CTD y la Computadora Personal, o debido a un mal funcionamiento de algún sensor o a que no se dejaron estabilizar los sensores en la superficie del mar al inicio del lance. Estos errores son eliminados mediante edición de los archivos originales y rehaciendo el proceso completo o mediante edición de los archivos promediados a 1 db. En general, los datos de oxígeno disuelto fueron los que presentaron mayores anomalías, estos datos fueron eliminados y en su mayoría no se pudieron interpolar.

De las series resultantes se calculó la densidad (σ_t), la expresión σ_t = σ -1000, donde σ = $\sigma_{s,t,0}$ en kg m⁻³ (EOS80).
Las series resultantes de bajada de los sensores primarios (lances 1-17, 25, 35, 37-46) y secundarios (lances 18-24, 26-34 y 36) se usaron para la elaboración de los archivos de datos tabulados y de perfiles verticales que se presentan en este informe. En los lances 3, 4, 44 y 45 los datos de oxígeno disuelto resultaron anómalos, tanto en el lance de bajada como de subida para todo el perfil, solamente en un lance se presentaron datos anómalos de salinidad y fluorescencia para todo el perfil, lances 3 y 45 respectivamente.

Como un seguimiento de la calidad de los datos, en la Figura 18 y Figura 19 se presentan los diagramas T-S de bajada y subida respectivamente de todos los lances efectuados en XIXIMI-1, excepto donde hubo malfuncionamiento de la bomba de flujo constante o mal funcionamiento de algún sensor.



Figura 18. Diagrama TS de los datos de bajada.



Figura 19. Diagrama TS de los datos de subida.

Los datos procesados de cada lance de CTD se presentan en forma electrónica, mostrando en cada caso datos del encabezado y datos tabulados (Anexo 2, formato digital, Anexo2_datos_CTD_termosal.xlsx). En el Anexo 3 se presentan los perfiles verticales (Anexo3_perfiles.pdf).

a) <u>Datos del encabezado del Anexo 2</u>. Incluyendo datos de la identificación de la estación y del lance de CTD, observaciones meteorológicas rutinarias y de la temperatura, salinidad cerca de la superficie del mar. Las observaciones meteorológicas (presión barométrica, temperatura del aire, humedad relativa, magnitud y dirección del viento) fueron adquiridas por una estación meteorológica portátil marca **Coastal Environmental systems, INC.**, montada en el mástil sobre el buque, aproximadamente a 15 m sobre el nivel del mar. Los datos de temperatura y salinidad son adquiridos con un termosalinómetro marca **Sea-Bird Electronics.** La toma de agua en el casco del buque aproximadamente a 4 m de profundidad. El valor mostrado para cada parámetro es el promedio de los datos medidos desde que se inició el lance de CTD hasta su finalización. El intervalo de muestreo de los datos fue de 10 s para el termosalinómetro y para la estación meteorológica. El lance más profundo (3658 decibares) se efectuó en poco más de dos horas y el lance más somero (202 decibares) en 17 minutos.

A continuación se describe el significado de los títulos del encabezado:

ESTACIÓN: Nombre de la estación oceanográfica donde se efectuó el lance.

LANCE: Número consecutivo del lance de CTD desde el inicio de la campaña.

LATITUD Y LONGITUD: Posición geográfica de la estación, grados y minutos de latitud norte y longitud oeste.

DDMMAA: Fecha en que se efectuó el lance.

H[GMT]: Hora en que se efectuó el lance expresada en tiempo universal. PROFTOT: Profundidad del fondo en metros.

PROFLAN: Presión máxima del lance de CTD en decibares.

TAIRE: Temperatura del aire en °C.

HUM: Humedad relativa en %.

V-DIR: Dirección relativa del viento expresada en grados.

V-MAG: Magnitud relativa del viento expresada en m s⁻¹.

BAROM: Presión barométrica en milibares.

TSUP: Temperatura del agua de mar en °C cerca de la superficie.

SSUP: Salinidad del agua de mar en ups cerca de la superficie.

Donde se encuentra un valor centinela de 99.99 o 999.9 indicará que no se obtuvo la medición o cálculo correspondiente.

b) <u>Datos tabulados.</u> Los datos de CTD observados (temperatura y clorofila *a*) y calculados (salinidad, oxígeno disuelto y densidad se muestran tabulados a ciertos niveles de presión preseleccionados (datos submuestreados de las series completas de datos a intervalos de un decibar). Dependiendo del nivel de muestreo más somero y de la profundidad máxima de cada lance. Los niveles preseleccionados fueron: Superficie (3, 4 ó 5), 10, 20, 30,...., 90, 100, 120, 140, 150, 160, 180, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 y 3500 decibares; también se reporta el máximo nivel de muestreo cuando éste fue mayor que el nivel preseleccionado más profundo del lance. Donde se encuentra un valor centinela de 99.999 o 999.9 indicará que no se obtuvo la medición o cálculo correspondiente; en el caso de la clorofila *a*, se asignó el valor de 0.01 cuando la medición realizada por el

sensor fue menor a 0.02 µgl⁻¹, el cual corresponde al valor mínimo que puede medir el sensor.

Los datos submuestreados de cada variable se presentan en columnas como sigue:

PRES: Presión en decibares.

TEMP: Temperatura en ºC.

SALI: Salinidad en ups.

OXI: Oxígeno disuelto en ml l⁻¹.

SIG-T: Densidad (σ_t) en kg m⁻³.

CLOR: Clorofila *a* en $\mu g l^{-1}$.

c) Perfiles verticales (Anexo 3). Además de los datos tabulados también se muestran perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, densidad (σ_t) y clorofila *a*, los cuales fueron construidos usando las series completas de datos de cada lance CTD, a intervalos de 5 decibares. Cada perfil es etiquetado con T el de temperatura (línea azul), S el de salinidad (línea roja), O el de oxígeno disuelto (línea negra), σ_t el de densidad (línea verde) y C el de clorofila *a* (línea magenta).

Resultados

El agua del Golfo de México se origina a partir de masas de agua claramente identificadas y definidas por su composición y origen. Entre las más importantes destaca el máximo de sal del agua sub-tropical sub-superficial (Subtropical Under-Water, SUW por sus siglas en inglés) ubicada entre los 150-250 metros de profundidad. Esta agua se origina en el giro subtropical del Atlántico norte donde la evaporación es mayor que la precipitación. Entre los 700-900 m de profundidad se encuentra el agua intermedia de la antártica caracterizada por su mínimo de sal (Antartic Intermidate Water, AIW). Debajo de esta, y ocupando el mayor volumen dentro del Caribe y el Golfo de México, se encuentra el agua profunda del Atlántico Norte, que se forma principalmente en el Mar del Labrador (North Atlantic Deeps Water, NADW). Entre la SUW y la AIW, encontramos agua del trópico (Tropical Antlantic Central Water, TACW) con contribuciones tanto del hemisferio sur como del norte. Esta aguas sufren transformaciones importantes dentro del Golfo de México, particularmente la SUW, AIW y NADW, dando lugar a la formación de la llamada masa de agua común del Golfo de México (Gulf Common Water, GCW). Esta se identifica generalmente por la importante transformación de las aguas originales que ocurre en los primeros 300 m de profundidad dentro del Golfo de México debido a procesos convectivos durante el invierno y la interacción de los remolinos anticiclónicos de la Corriente del Lazo al interaccionar con otras aguas y disiparse en la costa occidental del Golfo (Vidal et al. 1994).

La Figura 20 es el diagrama T-S de las aguas del Golfo de México y regiones cercanas, obtenidos a partir de datos históricos del National Oceanographic Data Center (NODC) y muestra claramente lo antes mencionado. Utilizando colores para distinguir las características de las masas de agua de las diferentes zonas, puede verse claramente que las aguas del Caribe y Canal de Yucatán (colores beige y azul respectivamente) muestran los valores extremos -máximo y mínimo de sal- de la SUW y la AIW. En la región de la Corriente del Lazo (puntos amarillos) se puede ver la interacción de las aguas Caribeñas con el agua común del Golfo que empieza a degradar estos valores extremos. Mayor variabilidad se aprecia en esta zona y en la región central y noroccidental del Golfo (puntos verdes) en los 300 m superficiales, con la continua degradación de los valores extremos de salinidad de la SUW y AIW. Destaca en esta figura la poca dispersión del diagrama T-S en la parte sur (puntos rojos) del Golfo de México representando "casi el promedio" de todos los perfiles. Es claro en este diagrama la presencia de valores bajos de salinidad a temperaturas mayores de 20 °C debido a la descarga de ríos y por otro lado la poca dispersión que ocurre en el diagrama T-S por debaio de los 17ºC.



Figura 20. Diagrama T-S de datos históricos tomados del National Oceanographic Data Center (NODC) de los Estados Unidos. Se utilizan diferentes colores para las hidrocalas de regiones diferentes, lo que permite identificar el proceso de transformación de las masas de agua principales dentro del Golfo de México, (ver texto).

La Figura 21 muestra una comparación del diagrama T-S de los datos de CTD obtenidos durante la campaña XIXIMI-1 (puntos azules) y los datos de NODC (puntos negros). Como se puede apreciar, los datos de XIXIMI-1 muestran las mismas características que los datos climatológicos de la Figura 20.



Figura 21. Diagrama T-S de los datos de la campaña XIXIMI-1 (puntos azules) sobrepuestos sobre todos los datos de la base climática NODC donde se aprecia la misma estructura que en la Figura 20.

La Figura 22 es similar a la Figura 21 pero sólo considerando datos de NODC tomados durante noviembre. De nuevo la estructura es similar a la climatológica, pero en esta figura pueden apreciarse mejor las características de las masas de agua de las diferentes regiones del Golfo, con el agua mas salada de la SUW y el mínimo mas marcado de la AIW del agua del Caribe, el agua más homogénea en salinidad del Golfo central y noroccidental y el perfil "cuasi-promedio" entre estos, dos representado por los datos de XIXIMI-1 y los datos climatológicos del Golfo sur.



Figura 22. Diagrama T-S de datos de NODC del mes de noviembre (puntos negros) y de la campaña XIXIMI-1 (puntos azules). Los perfiles con aguas más salinas de la SUW a 22 grados C y menos saladas a 7 grados C, de la AIW corresponden Golfo Este y al Caribe. Los perfiles con salinidad casi homogénea del agua arriba de los 18 grados C, corresponden a perfiles en el Golfo central y noroccidental. El perfil de XIXIMI-1 es similar al climatológico de la parte sur del Golfo y "cuasi-intermedio" entre los antes descritos.

Las diferencias entre regiones pueden apreciarse mejor en la Figura 23 que muestra el diagrama T-S de noviembre de los datos de la parte superficial (temperaturas mayores a 18 grados C), con los colores indicando diferentes regiones. Los valores más altos de salinidad de los puntos rojos entre 20-24 grados corresponden a la parte oriental del Golfo sur muestreados durante XIXIMI-1.



Figura 23 Diagrama T-S para el mes de noviembre utilizando los datos disponibles de NODC y los de XIXIMI-1. La utilización de colores para denotar el origen geográfico de los perfiles permite apreciar mejor las diferencias regionales de las masas de agua del Golfo de México.

En la Figura 24 se grafican perfiles de temperatura potencial contra profundidad para los primeros mil metros. Se puede ver claramente como el agua del Caribe y el Canal de Yucatán (puntos beige y azules) es mucho mas cálida que las aguas del interior del Golfo (puntos verdes y rojos). Los puntos amarillos de la región de la Corriente del Lazo abarcan el rango definido entre estas dos aguas. Esta gráfica ilustra claramente la diferencia entre el agua común del Golfo GCW definida por los puntos verdes y rojos, y el agua de la Corriente del Lazo y sus remolinos, (Loop Current Water, LCW). Estudios recientes (Herring, 2010) muestran que en cualquier momento y posición, el agua del Golfo puede definirse como una combinación de estas dos masas de agua. Pero notar que ello no significa que el perfil observado mas frecuentemente sea el promedio entre estos dos; de hecho, ocurre lo contrario: Lo mas común, donde sea que midamos, es encontrar agua de un tipo u otro más que una mezcla de los dos.

Estos perfiles medios enmascaran parcialmente la variabilidad debida a los procesos de meso-escala (remolinos). En el Golfo ocurre una variabilidad estacional importante en los primeros 150-200 m de profundidad (i.e. en la capa de mezcla y tal vez un poco mas abajo) debido a las variaciones del forzamiento atmosférico superficial. Pero por debajo de esta capa y hasta los mil metros, la variabilidad se debe principalmente a la presencia/ausencia de remolinos de meso-escala. Por ello las mediciones satelitales de nivel del mar y temperatura proveen una información

fundamental para saber el estado dinámico y termodinámico del Golfo a un tiempo dado. Consideremos por ejemplo el mapa de altimetría del 11 de noviembre de 2010 producido por el laboratorio CCAR de la Universidad de Colorado que se muestra en el recuadro inferior derecho de la

Figura 25 dentro del mapa de la profundidad de la isoterma de 20 grados C obtenida a partir de los datos de la campaña XIXIMI-1. Ambos mapas nos muestran la presencia de estructuras de meso-escala (remolinos) y son muy consistentes entre si, ya que valores someros (profundos) de la isoterma coinciden con la presencia de ciclones (anticiclones) en el mapa de altimetría, indicados por colores azules y amarillonaranja respectivamente. La presencia ubicua de remolinos en el Golfo no sólo explica las observaciones de temperatura y salinidad a un tiempo dado, estos también permiten dar coherencia a mediciones de nutrientes y otras propiedades químicobiológicas dentro del Golfo de México lejos de la costa.



Figura 24. Perfiles de temperatura potencial vs profundidad en los primeros mil metros donde se puede apreciar claramente las diferencias entre el agua común del Golfo (GCW, puntos verdes y rojos)) y la del Caribe a Corriente del Lazo (beige y azul). Notar que el Golfo es mas frío que el Caribe, empatándose ambos perfiles hasta después de los 1000 m de profundidad. Los puntos amarillos corresponden a la zona de la Corriente del Lazo donde las aguas se mezclan.



Figura 25. Profundidad de la isoterma de 20 grados C calculada a partir de los datos de XIXIMI-1. El recuadro inferior derecho muestra el mapa satelital de nivel del mar producido por el laboratorio CCAR de la Universidad de Colorado. Puede apreciarse la consistencia entre ambos campos, ya que valores someros (profundos) de la isoterma coinciden con la presencia de ciclones (anticiclones) en el mapa de altimetría, indicados por colores azules y amarillo-naranja respectivamente.

Mediciones de velocidad en la columna de agua con un L-ADCP

Además de las mediciones hidrográficas con CTD, se hicieron mediciones de velocidad del agua en cada estación utilizando un corrientómetro acústico L-ADCP (Lowered-Acoustic Doppler Current Profiler, RDI-TELEDYNE) de 300 khz utilizando celdas de 8 metros. El L-ADCP se coloca a un lado del CTD en el paquete que se envía al agua y dependiendo de la cantidad de partículas reflectoras en la columna, el instrumento es capaz de perfilar entre 40 y 100 metros de profundidad con cada pulso acústico. El L-ADCP se programa para que el muestreo sea cuasi-contínuo, por lo que se obtiene un gran número de mediciones de velocidad en cada tramo de 8 metros de la columna. Sin embargo, dichas mediciones son de la velocidad del agua respecto al paquete, y obtener la velocidad absoluta (respecto a la Tierra) requiere de un procesamiento intensivo que depende de la medición precisa de la posición y tiempo inicial y final de la hidrocala. Si el paquete de instrumentos llega a 50-60 m arriba del fondo marino, el L-ADCP puede estimar velocidades absolutas cerca del fondo que pueden usarse como referencia para la estimación en toda la columna de agua. Por desgracia el paquete de instrumentos no siempre puede llegar hasta la profunidad necesaria. Los datos también se comparan y/o procesan junto con los datos del ADCP montado en el casco del buque para mayor confiabilidad cerca de la superficie. El software que se utiliza para el procesamiento fue elaborado en el Lamont Doherty Earth Observatory (LEDO, <u>A. Thurnherr, M. Visbeck, E. Firing, B. King, J. Hummon, G. Krahman, B. Huber (2009):</u> *A Manual for Acquiring Lowered Doppler Current Profiler Data*).

La Figura 26 muestra un ejemplo del perfil de velocidades obtenido en una estación en que el aparato logra ver el fondo. La linea gruesa roja es la componente zonal de la velocidad (oeste-este) y la verde la meridional (sur-norte) como función de la profundidad, que resultan del procesamiento. Las líneas delgadas son los perfiles obtenidos al bajar y subir el aparato, las cuales son bastante consistentes entre sí en este caso (porque no siempre ocurre así).

Después de procesar los datos encontramos que debido a que en varias estaciones el paquete CTD-LADCP no alcanzó a ver el fondo, el procesamiento de las velocidades absolutas se complica fuertemente y requerirá de intentar obtener referencias a partir de velocidades geostróficas de satélite o del ADCP del barco. Sin embargo esto tomará mucho mas tiempo (si se decide intentarlo) y no hay garantía de obtener resultados con niveles de incertidumbre aceptables.



Figura 26. Perfil de velocidades obtenido del procesamiento de datos de L-ADCP obtenido en una estación donde el instrumento logra ver el fondo y pueden estimarse velocidades absolutas con mayor precisión. No en todas las estaciones pudo el aparato ver el fondo y procesamiento es mas complejo.

Conclusiones

La base de datos NODC no cuenta con observaciones históricas debajo del paralelo 25 por lo que a menos que so obtengan (si es que existen) mediciones de otras fuentes, los datos de XIXIMI-1 son únicos. No podemos por lo tanto saber si las condiciones medidas fueron muy diferentes a las de otros noviembres. Sin embargo, el análisis de los datos históricos nos muestra claras diferencias regionales en la estructura termohalina del Golfo, en la que resalta lo bien definida y la poca dispersión (varianza) que tiene el diagrama T-S en la zona sur del Golfo de México. Teniendo menos influencia de remolinos de la Corriente del Lazo, las masas de agua de esta zona presentan mayormente las características del agua común del Golfo (GCW). Sin embargo, sabemos que la dinámica del Golfo está dominada por remolinos y la actividad de meso-escala, por lo que la interpretación de una "fotografía" del estado del Golfo de México profundo en su parte mexicana (que es lo que representan las observaciones de XIXIMI-1), debe realizarse y será en gran medida explicada a partir de empatar las diversas observaciones con datos de satélite que permiten ubicar geográficamente a dichos remolinos.

Referencias

- Fofonoff, N. P. y R. C. Millard. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO Theonical Papers in Marine Science, 44, 53 pp, 1983.
- García, C. J., J. M. Robles P. y C. F. Flores C. Datos de CTD obtenidos en la Bahía de Todos Santos, B.C., Campaña BATOS 4. B/O Francisco de Ulloa. Marzo 22-24 de 1994. *Comunicaciones Académicas*, CICESE. Informe Técnico CTOFT9506, 75 pp, 1995.
 - y J. Ochoa. Hidrografía en el estrecho de Yucatán. Campaña CANEK. B/O Justo Sierra. Diciembre 11-18 de 1996. Informe Técnico, CTOFT9702. *Comunicaciones Académicas, Serie Oceanografía Física*, CICESE. 93 pp. ,1997.
 - J. Ochoa, J. Candela, A. Badán, J. Sheinbaum y J. I. González. Hidrografía en el estrecho de Yucatán, Campaña CANEK IV. B/O Justo Sierra. Agosto 25-Septiembre 14 de 1999. *Comunicaciones Académicas*, CICESE. Informe Técnico CTOFT20009, 125 pp, 2000.
 - P. Pérez, E. García, M. P. García. Datos de CTD de la región frente a la Bahía de Todos Santos. Campaña BTS8. Abril 24 a 27 de 2010. B/O Francisco de Ulloa. *Comunicaciones Académicas*, CICESE. Informe Técnico. PA99748, 106 pp, 2010.
- Lueck, R. G. Thermal inertia of conductivity cells: Theory. *Jour. Atmos. and Ocean. Technol.*, 7, 741-755, 1991.

- Millard, R. C., Jr. CTD Calibration and data processing techniques at WHOI using the 1978 practical salinity scale. *Proc. Int. STD conference and Workshop, La Jolla, Mar. Tech. Soc.,* 19 pp, 1982.
- Morison, J., R. Anderson, N. Larson, E. D'Asaro y T. Boyd. The Correction for thermallag effects in Sea-bird CTD data. *Jour. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. II, no. 4 (part 2), 1151-1164, 1994.
- Murphy, D. J., Larson, N. G., and Edwards, B. C. Improvements to the SBE 43 Oxygen Calibration Algorithm, Poster Presentation 2008 Ocean Sciences Meeting, Orlando, Florida, 2 - 7 March 2008. 2008
- Owens, W. B. y R. C. Millard Jr. A new algorithm for CTD oxygen calibration. *Jour. Phys. Oceanogr.*, **15**,621-631, 1985.
- Sea-Bird Electronics, INC. Application note no. 38, Fundamentals of the TC duct and pump-controlled flow used on Sea-Bird CTDs, 3 pp., 1992.

_____ CTD Real Time Acquisition Software, SEASAVE v. 7. Manual, 132 pp, 2008.

_____ Application note no. 64-2 (Rev. apr. 2008), SBE 43 Dissolved Oxygen Sensor Calibration using Winkler Titrations, 10 pp, 2008.

_____ Application note no. 64 (Rev. nov. 2008) SBE 43 Dissolved Oxygen Sensor – Background Information, Deployment Recommendations, and Cleaning and Storage, 8 pp, 2008.

_ SBE Data Processing Software, v. 7.18c. 2009.

OXÍGENO DISUELTO

(Dr. Juan Carlos Herguera, M. en C. Vicente Ferreira Bartrina, Daniela Rabiela)

Antecedentes

El oxígeno disuelto (OD) en las aguas oceánicas es el resultado del balance entre las interacciones océano-atmósfera y de la fotosíntesis como fuentes en la superficie con los procesos de mezcla y de la oxidación de la materia orgánica en profundidad. Su medición rutinaria y contínua en los lances de instrumentos e hidrocalas y su calibración sobre muestras de agua discretas le dan el valor indicativo que esta variable tiene para evaluar procesos de oxidación de la materia orgánica en la columna de agua, independientemente de su procedencia en la zona fótica o en reservorios de hidrocarburos y gases en el mar. Razón que le confiere una gran utilidad a esta variable relativamente fácil de medir en el océano.

Para poder evaluar los efectos de un derrame sobre el ciclo biogeoquímico del OD en el agua primero debemos entender el control que la circulación y los procesos biológicos ejercen sobre sus patrones de distribución. El Golfo de México es un mar semicerrado comunicado por dos estrechos con el Atlántico Norte hacia el NE y por el Caribe hacia el S. El canal de Yucatán comunica el Caribe con el Golfo de México a través de un estrecho con una profundidad máxima de 2000 m, por donde se produce el mayor flujo de aguas que bañan al Golfo de México. Estas aguas alimentan a la Corriente del Lazo, a las aguas subsuperficiales relativamente pobres en oxígeno del Atlántico central y a las más profundas enriquecidas en oxígeno. El mayor flujo hacia fuera del golfo se produce a través del canal de la Florida, con un umbral de 800 m, que permite la salida de las aguas a mayor profundidad relativamente más ricas en oxígeno, aguas cuya salida solo se produce a través del canal de Yucatán, lo que favorece su recirculación y ayuda a explicar las relativamente altas concentraciones en $[O_2]$ observadas en sus profundidades abisales.

Un estudio del Consejo de Investigación Nacional de EEUU (NRC 2003) estima que anualmente se introducen alrededor de 140,000±60,000 TM de hidrocarburos por fugas naturales, de las que un 10% son debidas a la explotación de hidrocarburos en el GM. A pesar de que estas fugas se han estado produciendo al menos a lo largo de los últimos cien años y que estas potencialmente han podido afectar toda la columna de agua, los valores del OD no han mostrado una perturbación importante de gran escala desde que comenzaron a hacerse determinaciones fiables de OD en el agua.

Sin embargo a pequeña escala y en lugares localizados en las cercanías de las chapopoteras naturales se han llegado a detectar bajas concentraciones en OD a escasos cm de la interfase agua sedimento, como de los estanques de salmuera asociados a algunas de estas chapopoteras, donde se observa la existencia de

comunidades quimiosintéticas específicas asociadas a estos ambientes reductores que dan paso a comunidades oxigénicas típicas del mar profundo a escasos cm de distancia. Estas observaciones proveen una evidencia adicional de las relativamente altas tasas de ventilación de las aguas profundas y el papel aun desconocido de la flora microbiológica hidrocarburoclástica en esta aguas abisales del Golfo de México.

Siguiendo con uno de los objetivos de este trabajo sobre el posible impacto del derrame de hidrocarburos del pozo Macondo por la oxidación de éstos sobre el contenido de oxígeno en las aguas intermedias y profundas del Golfo de México. Las mejores estimaciones de la descarga diaria de hidrocarburos del pozo Macondo durante el período del derrame cifran ésta entre 1,700-5,000 TM de carbono por día, flujo equivalente entre 100 a 200 veces las emanaciones naturales para todo el sistema del Golfo de México de 220-550 TM de carbono en una extensión de 7*10⁵ Km² (NRC 2003). Utilizando las cantidades estimadas por el gobierno federal norteamericano de 4.1 millones de barriles, el total neto de hidrocarbonos C1-C5 liberado a la columna de agua oscila entre 1.7-10¹¹g. Este estimado es la mitad del estimado por Valentine et al. (2010) y ¹/₄ del estimado por Joye et al. (2011) autores que utilizan relaciones entre la fase gas y líquida ligeramente diferentes a la estimación de Reddya et al. (2011). Estos últimos autores estiman que el compuesto mas abundante liberado del pozo Macondo fue el metano con una relación de masas 0.15 g/g, de hidrocarbonos C1-C5 de 0.24 g/g, mientras que los 140 hidrocarbonos restantes suponían 0.24 g/g del total del fluido reconstituido original. Las estimaciones basadas en este método arrojan una cantidad de 17,000-100,000 TM de hidrocarburos gaseosos lo que constituye aproximadamente entre un 25 a un 40% del total de la descarga de hidrocarburos durante el período que el pozo estuvo abierto. Estimaciones reflejadas en parte en las altas concentraciones de metano, entre 10²-10⁴ veces las esperadas en equilibrio con la atmósfera hasta 20 Km de distancia del pozo, concentraciones que se encontraban entre 10 a 10³ veces por encima de las observadas en chapopoteras naturales del Golfo de México. Sin embargo en la vertical el metano prácticamente desaparecía a partir de los 1,100 m de profundidad lo que sugiere que las burbujas de metano se habían disuelto completamente antes de haber llegado a esta profundidad (Solomon et al. 2009; Wankel et al. 2010).

La oxidación de los gases alcanos e hidrocarburos disueltos en columna de agua reduce la concentración de oxígeno disuelto y genera bicarbonatos, agua y protones con implicaciones para la alcalinidad en el sistema del carbono. A partir de las relaciones estequiométricas asociadas con estos procesos de oxidación de los hidrocarburos podemos estimar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar completamente los alcanos de las plumas detectadas alrededor del pozo Macondo. En éstas se llegaron a observar concentraciones de alcanos de [310 μ M] lo que supondría un gasto de [O₂] hasta cuatro veces [725 μ M] por encima de la concentración en columna de agua de [175 μ M]. La implicación de este gasto en el caso extremo de que no hubiera circulación que renovara las aguas en estas zonas o ésta fuera extremadamente lenta es que estas zonas se habrían quedado sin oxígeno en un tiempo dependiente de las tasas de oxidación de estos gases fundamentalmente controladas por las tasas de la actividad bacteriológica. En cualquier caso la predicción

es que ese consumo de $[O_2]$ disuelto en la oxidación de estos gases se podría trazar en las aguas intermedias y profundas del Golfo de México dado que no hay producción de $[O_2]$ disuelto en profundidad (Hazen et al. 2011, Joye et al. 2010, Valentine et al. 2010, Reddya et al. 2011).

Existe una gran discusión sobre el tiempo de residencia de esta fase gaseosa en las aguas profundas, sobre el papel de la microbiología en la oxidación de estos gases y su impacto en el consumo de oxígeno en esta agua así como la tasa de ventilación de estas aguas intermedias. Comprender cual ha sido el destino de estos hidrocarburos en su fase líquida y sólida y su impacto potencial sobre las concentraciones de OD es crítico sobre todo teniendo en cuenta la magnitud del flujo de gases asociados a este ingente derrame.

Objetivos

1. Establecer la línea base de los patrones de la distribución de $[O_2]$ en las aguas profundas del Golfo de México.

2. Evaluar el potencial impacto en el consumo de [O₂] en las aguas intermedias y profundas del Golfo de México como consecuencia de la oxidación de los hidrocarburos en sus fases fluida y gaseosa en la columna de agua en muestras obtenidas durante la campaña XIXIMI-1

Métodología

La colecta de datos de OD se llevó a cabo con dos metodologías diferentes. Por un lado en cada lance, se registraban electrónicamente y de manera contínua junto con la temperatura, salinidad, los valores de oxígeno disuelto con un sensor de oxígeno acoplado a un CTD. Por otro lado en la mayoría de los lances se colectaba agua de cada una de las botellas para las determinaciones químicas abordo descritas en el Reporte de XIXIMI-1, que después se utilizarían para la calibración del instrumento.

En el barco se realizaron estos perfiles con un CTD Seabird 9 plus, equipado con sensores para medir la conductividad, temperatura y presión en función de la profundidad al que había acoplado un sensor de oxígeno (SBE43). Estos instrumentos estaban sujetos en la parte inferior de una roseta, una estructura circular en la que también se acoplan las botellas con las se recolecta agua a distintas profundidades.

Complementariamente durante la campaña XIXIMI-1 analizamos muestras discretas de agua para medir la concentración de oxígeno disuelto en diferentes profundidades usando el método MicroWinkler que se describe en los protocolos de muestreo (Marine Technician's Handbook 1971). Las muestras se tomaron de las botellas Niskin y GoFlo durante el ascenso de cada lance. El principio del método consiste en una solución divalente de manganeso, seguida de una solución

fuertemente alcalina que se añade a la muestra, formando un precipitado de hidróxido de manganeso. En ese momento todo el oxigeno disuelto presente en la muestra se oxida de manera equivalente a los manganesos divalentes en solución. Cuando la solución se acidifica en presencia de yoduro el manganeso oxidado regresa a su estado reducido y se libra el yoduro equivalente al oxígeno contenido en la muestra y éste se titula con tiosulfato de sodio. La precisión de esta metodología durante la campaña XIXIMI-1 fue de ±0.075 ml/L, para una descripción mas detallada de este procedimiento sugerimos consultar el reporte de la campaña XIXIMI-1 (Herguera et al. 2010).

Durante esta campaña tuvimos una serie de problemas eléctricos y electrónicos con los sensores de conductividad y oxígeno prácticamente desde el sexto lance hasta el final. Problemas que se intentaron arreglar abordo en un principio cambiando los canales de los que se recuperaban los datos. Cuando observamos que esto no funcionaba procedimos a sustituir los sensores del CTD que llevábamos del CICESE por otros que llevábamos de repuesto y finalmente con los del barco *BO/Justo Sierra*. También se cambiaron las bombas que alimentan los sensores, llegamos a cambiar de CTD por el del barco, revisar el cable del malacate hidrográfico y su conexión con los cables del CTD. Los problemas de los sensores recurrieron alternadamente entre lances a medida que se les iba sustituyendo, piezas, conectores, bombas y sensores, razón por la que prácticamente la calidad de los datos de cerca de un 15% de todas las muestras discretas no es fiable y no se reportan. Tras la campaña XIXIMI-1 se enviaron el CTD y sensores a reparar y recalibrar a Seabird. Esta recalibración se utilizó para recalcular los valores de salinidad y OD originales.

Posteriormente se utilizaron estos valores del sensor de oxígeno disuelto SBE43 para calibrarlos con las mediciones de oxígeno disuelto hechas a bordo químicamente sobre muestras discretas. Esta calibración sirvió para corregir los coeficientes *Soc* y *Voffset* de calibración que Seabird provee al enviar los sensores a calibración. En García et al. (2005) se describe en detalle la técnica para la obtención de los coeficientes de calibración *Soc* y *Voffset* del sensor de oxígeno disuelto SBE43 para corregir los datos. En la base de datos general se recogen ambos valores en columnas contíguas.

Resultados

Seleccionamos un 85% de un total de 552 muestras discretas de OD correspondientes a las 46 estaciones cubiertas durante el crucero XIXIMI-1 (Figura 27). El criterio que seguimos en la selección fue el de eliminar aquellas muestras que procedían de perfiles en los que habíamos detectado el funcionamiento anómalo de los sensores de conductividad y oxígeno.



valores históricos (oct-dic), XIXIMI1

Figura 27. Mapa de las estaciones de la campaña XIXIMI-1, en el que las esferas rojas muestran las estaciones de muestreo de la campaña y las esferas grises muestran estaciones ocupadas del registro instrumental de la NOAA's National Oceanographic Data Center (NODC) (1960-2010). A la derecha perfil de oxígeno disuelto con la temperatura ^oC para todas las muestras colectadas (esferas rojas) sobre los valores de OD medidos instrumentalmente durante las pasadas 5 décadas del WODB (esferas grises) para el período comprendido entre octubre a diciembre para hacerlos equivalentes en el tiempo con las mediciones realizadas en XIXIMI-1.

Al graficar los valores de OD de la campaña XIXIMI-1 frente a los reportados del registro instrumental para las últimas 5 décadas y obtenidas del NOAA's National Oceanographic Data Center (NODC) apodemos observar como los datos de XIXIMI-1 caen dentro del espacio de los datos históricos. Al tiempo que muestran las características principales de los perfiles de OD en profundidad en el Golfo de México, que muestran consistentemente altos valores en superficie (4.7-5 ml/L), un máximo relativo subsuperficial entre las isotermas entre los 27 a 20°C, para descender hasta los

mínimos valores de OD entre las isotermas de 20 a 7°C (2.5-3 ml/L), para aumentar de nuevo en profundidad hasta valores de 5 ml/L . También se observa una dispersión importante entre los valores de OD entre las isotermas de 20-27°C cuyos valores extremos tienen una marcada distribución espacial, de forma que los mínimos en OD corresponden a las aguas mas cercanas al canal de Yucatán, mientras que los mayores valores corresponden a las aguas superficiales –los primeros 200 m de la columna de agua- del Golfo de México. También en profundidad, entre las isotermas de 20-7 °C -que equivale a profundidades entre los 200 a los 800 m- se observan perfiles con valores mínimos localizados esta vez dentro del Golfo de México y máximos en OD que corresponden a la entrada de aguas por el canal de Yucatán. Por debajo de la isoterma de los 7°C los valores convergen en la misma trayectoria hacia mayores concentraciones de OD en profundidad con una dispersión muy pequeña.

Esta variabilidad observada especialmente en los 800 m de la columna de agua la podemos observar en mayor detalle en una sección E-W a lo largo del paralelo 25ºN en la Figura 28. En esta figura se puede apreciar como se intensifica el mínimo de oxígeno hacia el W a medida que nos acercamos a la plataforma de Tamaulipas al tiempo que se observa una somerización de estos valores relativamente bajos en el OD. En profundidad 1000 a 2000 m se observan ligeros enriquecimientos en OD especialmente en las zonas cercanas a los taludes. Esta intensificación del mínimo de OD se observa aun mas marcadamente a lo largo de un transecto que comienza en el canal de Yucatán hasta el paralelo 91ºW para luego discurrir en dirección NE-SW hasta 22ºN y tomar una dirección N-S hasta el paralelo 19ºN. Este transecto que nos lleva desde la región de intercambio con las aguas del Caribe hasta la Bahía de Campeche el límite meridional del Golfo de México frente a las plataformas de Veracruz, Tabasco y Campeche nos muestra cómo el mínimo en los valores de OD se hacen aun más pronunciados en intensidad y profundidad en la Bahía de Campeche (Figura 29). Figura en la que también se puede apreciar cómo las regiones de aguas profundas colindantes con los taludes en general muestran ligeramente mayores valores de OD que hacia el centro de la Cuenca.



Figura 28. Sección E-W de los valores promedio de OD a lo largo de los paralelos 24-25^oN cuya leyenda se puede observar a la derecha de la sección, el rectángulo enmarcado en el mapa muestra las estaciones que se utilizaron para los promedios graficados.



Figura 29. Sección paralela a la plataforma de Yucatán en la que se muestra el gradiente en las concentraciones de OD entre el canal de Yucatán a la derecha y la Bahía de Campeche a la izquierda de la figura, el polígono enmarcado en el mapa muestra las estaciones que se utilizaron para esta figura.

Para observar el posible impacto del derrame en las aguas intermedias del Golfo de México entre 1000-1500 m de profundidad hicimos una reconstrucción en detalle para estas profundidades del OD. Elegimos estas profundidades debido a las observaciones de anomalías en los contenidos de metano, compuestos C1-C5 de los hidrocarburos los mas solubles y en las concentraciones de OD en las cercanías del pozo Macondo. La expectativa era por un lado que estas anomalías se iban a extender a estas profundidades por el Golfo de México dependiendo del modo dominante de transporte a estas profundidades sobre lo que existía una gran discusión dados los resultados contrapuestos de varios de los modelos de circulación que se utilizaron. Por otro lado los reportes de la columna de agua mostraban como en la vertical el metano prácticamente desaparecía a partir de los 1,100 m de profundidad lo que sugiere que las burbujas de metano se habían disuelto completamente antes de haber llegado a esta profundidad (Solomon et al. 2009, Wankel et al. 2010). Por esta razón hemos representado las concentraciones de OD en dos secciones a favor de dos superficies de densidad que denominamos la isopicna de 27.7 (alrededor de los 1200 m) y la de 27.725 (alrededor de los 1500 m) (Figura 30 y Figura 31).

En la isopicna de los 27.7 (Figura 30) observamos 2 distribuciones importantes: (i) mayores concentraciones relativas de OD al N de esta superficie –a lo largo del paralelo 25° N- que hacia el S y (ii) una estructura ondulante en las concentraciones de E a W y de N a S.



Figura 30. Mapa de las concentraciones de OD en ml/L en la isopicna de los 27.7, profundidad media 1200 m, la escala de las concentraciones se leen en la barra a la derecha del mapa.

Cuando realizamos este mismo ejercicio para la isopicna de 27.725, que sería equivalente a una profundidad media de 1500 m, observamos una estructura muy similar a la que describimos anteriormente con la diferencia de que los valores mínimos de OD ocupan ahora una mayor extensión hacia el S que en la isopicna mas somera (Figura 31), aunque aquí hay que aclarar en las escalas ligeramente diferentes que utilizamos como también en las pequeña diferencias que observamos, menos de 0.1 ml/L, lo que lleva nuestros límites de precisión al margen de lo confiable, aunque la alta coherencia espacial observada justifican parcialmente su realidad.



Figura 31. Mapa de las concentraciones de OD en ml/L en la isopicna de los 27.725, profundidad media 1500 m, la escala de las concentraciones se leen en la barra a la derecha del mapa, observar que la escala es diferente del de la figura anterior aunque los gradientes se vean muy parecidos.

Discusión

El Golfo de México es un mar semicerrado comunicado por dos estrechos con el Atlántico y el Caribe. El canal de Yucatán que comunica el Caribe con el Golfo de México a través de un estrecho con una profundidad máxima de 2000 m, por donde se produce el mayor flujo de aguas que alimentan al Golfo de México que comprende la Corriente del Lazo, las aguas subsuperficiales relativamente pobres en oxígeno del Atlántico central y las más profundas enriquecidas en OD. El mayor flujo hacia fuera del golfo se produce a través del canal de la Florida, a través de un umbral de 800 m, que permiten la salida de las aguas subsuperficiales relativamente empobrecidas en oxígeno e impiden la salida de las aguas más profundas de 800 m relativamente más ricas en OD, lo que a su vez favorece la recirculación de estas agua por debajo de esta profundidad en el GM y explican parcialmente sus relativas altas concentraciones en $[O_2]$.

Los valores de OD son relativamente altos en los primeros 200 m de la columna de agua y muestran la importancia del intercambio de oxígeno océano-atmósfera así como de la producción de oxígeno por fotosíntesis. Las fuentes del oxígeno disuelto en las aguas superficiales, hasta los 200 m, son la atmósfera a través de los vientos y el oleaje y la fotosíntesis del fitoplancton cuya importancia está controlada por la penetración de la luz y los nutrientes. Las concentraciones de OD decrecen por debajo de los 200 m hasta un mínimo localizado entre los 350 a los 500 m de profundidad con valores promedio de 2.45 ml/L. Este mínimo de oxígeno es debido a tres procesos de importancia variable dentro del GM. Por un lado las aguas a estas profundidades entran por el canal de Yucatán procedentes del Caribe, ya empobrecidas en [O₂] en relación a las aguas superficiales y las mas profundas, y son parte de una masa de agua denominada Aguas del Atlántico Tropical Central (AATC, o TACW en la literatura anglosajona). Sin embargo este empobrecimiento en oxígeno varía dentro del Golfo de

México por un lado debido a la oxidación de la materia orgánica que procede fundamentalmente de la zona fótica, así cómo la de origen continental arrastrada estacionalmente por los ríos y en menor medida las fugas de hidrocarburos de las chapopoteras naturales comunes en las zonas e plataforma, talud y cañones submarinos del GM y finalmente al tiempo de residencia de estas agua intermedias que aun desconocemos.

Por debajo de este mínimo relativo las concentraciones de [O₂] se incrementan monótamente hasta los 1300 m de profundidad por debajo de la cual permanecen prácticamente constantes entre 4.95-5 ml/L hasta las profundidades abisales. Para esta región mas profunda del Golfo de México el transporte y la mezcla de aguas mas ricas en oxígeno procedentes del Caribe a través del canal de Yucatán por encima de los 2000 m son la única fuente de oxígeno. La circulación profunda del Golfo de México y sus patrones de mezcla asociados son los únicos mecanismos que pueden reemplazar o enriquecer estas profundidades en oxígeno ante la inexistencia de fuentes de aguas profundas en el Golfo. En contraste con las aguas intermedias estas aguas profundas son más frías y tienen consistentemente mayores valores de OD en gran parte debido a su origen en las altas latitudes del Atlántico Norte, donde las bajas temperaturas superficiales durante el invierno favorecen una mayor solubilidad de [O₂]. Este mayor contenido de OD en su fuente junto con el relativo corto tiempo desde que se sumergieron les confiere a esta aguas las relativamente altas concentraciones de OD observadas. Otra observación importante en esta aguas profundas es la cuasi constancia de los valores de OD en el GM por debajo de los 1500 m de profundidad, fenómeno que podemos explicar debido a que las aguas entre los 1500 a los 4000 m de profundidad proceden todas del umbral entre los 1500 a 2000 m en el canal de Yucatán lo que explica la gran uniformidad en las concentraciones de OD. Los procesos de recirculación de estas aguas profundas junto con las bajas tasas de oxidación de la materia orgánica a estas profundidades consecuencia de las bajas tasas de productividad biológica del GM y una posible alta tasa de ventilación de esta agua profundas a través del canal de Yucatán, explican las altas concentraciones en OD observadas. Una tarea que tenemos pendiente es la de recalcular estas tasas de ventilación en estas profundidades a partir del cruce de datos de OD, nutrientes y carbono inorgánico disuelto conseguidos en esta campaña que esperamos poder realizar en los próximos meses.

Otra observación importante a este respecto es la falta de cambios aparentes en las concentraciones de OD a estas profundidades entre 1500-4000 m al menos durante las últimas cinco décadas, desde que se están realizando determinaciones fiables de las concentraciones de OD en estas aguas. Observación que implica una gran resistencia a los cambios y posiblemente una relativa alta tasa de intercambio con las aguas profundas del Caribe a través del canal de Yucatán, lo que deja la pregunta pendiente sobre el tiempo de residencia de esta aguas en el fondo del GM pero que en cualquier caso no puede ser mayor de unas pocas décadas dados los flujos de carbono en columna de agua. Otra observación por explicar sería la distribución espacial del OD a las profundidades coincidentes con las isopicnas de 27.7 y 27.725, que comprenden las profundidades a las que se observaron los filamentos de hidrocarburos y gases disueltos en el aguas hasta unos pocos de cientos de km del pozo Macondo, en estructuras ondulantes y concéntricas a escalas de cientos de km. Este tipo de estructuras se aprecian también en la alturas dinámicas en superficie que delinean los patrones principales de circulación del GM constituido por los giros remolinos de mesoescala que periódicamente se liberan de la Corriente del Lazo y que se mueven a lo largo de los paralelos 25-24°N hacia el W hasta el talud de Tamaulipas donde finalmente se disipan. Mientras que la distribución del OD en la bahía de Campeche es debido a otro giro de mesoescala característico de esta bahía y descrito en la literatura (Dubranna et al. 2011, Kolodziejczyk et al. 2011).

Todas estas observaciones e interpretaciones pueden explicar los patrones de distribución del OD observados durante la campaña de XIXIMI-1 en términos de procesos físicos y biogeoquímicos en los que no se aprecian indicios del derrame de gran escala acaecido unos meses atrás. A estas observaciones e interpretaciones hay que añadir la falta de diferencias significativas con los patrones históricos lo que en conjunto minimiza la posibilidad de existencia de anomalías en la distribución de OD que pudieran ser indicativos de procesos de oxidación de hidrocarburos y gases asociados del pozo Macondo en las aguas profundas del Golfo de México al S del paralelo 25°N.

Conclusiones

* Los valores de oxígeno disuelto (OD) son relativamente altos en los primeros 200 m de la columna de agua y muestran la importancia del intercambio océanoatmósfera de $[O_2]$ así como de la producción de oxígeno por fotosíntesis.

*Las concentraciones de OD decrecen hasta un mínimo localizado entre los 350 a los 500 m de profundidad hasta llegar a valores de 2.45 ml/L. Este mínimo de oxígeno es debido a que: (i) las aguas a estas profundidades entran por el canal de Yucatán procedentes del Caribe, ya empobrecidas en [O₂], y son parte de una masa de agua denominada Aguas del Atlántico Tropical Central (AATC, o TACW en la literatura anglosajona) (ii) este empobrecimiento en oxígeno varía dentro del Golfo de México debido a la oxidación de la materia orgánica que procede fundamentalmente de la zona fótica, cómo a la de origen continental arrastrada por los ríos estacionalmente y en menor medida las fugas de hidrocarburos de las chapopoteras naturales comunes en las zonas e plataforma, talud y cañones submarinos del GM y (iii) al tiempo de residencia de estas agua intermedias que aun desconocemos de una forma precisa.

*Por debajo de este mínimo relativo las concentraciones de [O₂] se incrementan monótamente hasta los 1300 m de profundidad por debajo de la cual permanecen prácticamente constantes entre 4.95-5 ml/L hasta las profundidades abisales. Para esta región mas profunda del golfo de México el transporte y la mezcla de aguas mas frías y

ricas en oxígeno procedentes del Caribe a través del canal de Yucatán son la única fuente de oxígeno. Este relativo enriquecimiento en OD es debido a su origen en las bajas temperaturas de las altas latitudes del Atlántico Norte y al relativo corto tiempo desde que se sumergieron hasta llegar al GM.

*La cuasi constancia de los valores de OD por debajo de los 1500 m de profundidad se puede explicar debido a la limitación que ejerce el umbral del canal de Yucatán con una profundidad máxima de 2000 m para que entren aguas mas profundas del Caribe, mientras que los procesos de recirculación de estas aguas profundas junto con las bajas tasas de oxidación de la materia orgánica a estas profundidades en el GM y una alta tasa de ventilación explican las altas concentraciones en $[O_2]$ observadas.

* La distribución espacial del OD a las profundidades coincidentes con las isopicnas de 27.7 y 27.725 en estructuras ondulantes y concéntricas a escalas de cientos de km revelan la existencia de giros de mesoescala que periódicamente se liberan de la Corriente del Lazo y que se mueven a lo largo de los paralelos 25-24°N hacia el W hasta el talud de Tamaulipas donde finalmente se disipan. Mientras que la distribución del OD en la bahía de Campeche muestran la existencia de un giro semipermanente en esta región.

* Estas observaciones e interpretaciones pueden explicar los patrones de distribución del OD observados durante la campaña de XIXIMI-1 en términos de procesos físicos y biogeoquímicos en los que no se aprecian indicios claros o unívocos del derrame de gran escala de hidrocarburos y gases asociados del pozo Macondo en las aguas profundas del Golfo de México al S del paralelo 25°N.

Referencias

- Boehm PD & Fiest D (1982) Subsurface distributions of petroleum from an offshore well blowout: The IXTOC Blowout, Bay of Campeche. Environ Sci Technol 16, 67-74.
- Camilli R et al. (2010) Tracking hydrocarbon plume transport and biodegradation at Deepwater Horizon. Science 330:201–204.
- Chen FH & Yapa PD (2003) A model for simulating deepwater oil and gas blowouts_Part II: Comparison of numerical simulations with `DeepSpill' field experiments. J Hydraulic Res 41, 353-365.
- Dubranna J et al. (2011) Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of México. Journal of Geophysical Research Vol. 116 C08009 p. doi:10.1029/2011JC007007 (PA: 101836).

- Hazen TC et al. (2010) Deep-sea oil plume enriches indigenous oil-degrading bacteria. Science 330:204–208.
- Herguera JC, Herzka S, Ferreira-Bartrina V, Siqueiros A (2010) Reporte de la Campaña XIXIMI-1. 6-22 Noviembre 2010; Golfo de México, *BO/ Justo Sierra,* 36 pp.
- Kolodziejczyk N et al. (2011) Deep currents in the bay of Campeche. Journal of Physical Oceanography, Vol 41 10 p doi:10.1175/2011JPO4526.1 (PA: 102390).
- Masutani SM & Adams EE (2001) Experimental Study of Multi-phase Plumes with Application to the Deep Ocean Oil Spills. Contract No. 1435-01-98-CT-30964 (Final Report, US Department of the Interior Minerals Management Service).
- National Research Council, Committee on Oil in the Sea (2003) Oil in the Sea III: Inputs, Fates and Effects. ISBN: 0-309-50551-8.
- Solomon E, Kastner M, MacDonald IR & Leifer I (2009) Considerable methane fluxes to the atmosphere from hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico. Nature Geosci 2, 561-565
- Valentine DL et al. (2010) Propane respiration jump-starts microbial response to a deep oil spill. Science 330:208–211.
- Wankel SD et al. (2010) New constraints on methane fluxes and rates of anaerobic methane oxidation in a Gulf of Mexico brine pool through the use of a deep sea in situ mass spectrometer. Deep Sea Res 57, 2022-2029.

CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES

(Dr. Walter Dassle, UABC)

Antecedentes

En general, los perfiles verticales de nutrientes en el océano presentan valores bajos cercanos a la superficie debido al consumo biológico y un incremento paulatino con la profundidad debido a la remineralización de la materia orgánica en el caso de nitratos y fosfatos, y a la disolución del ópalo biogénico en el caso de los silicatos (Paytan 2007, Gruder 2008, Libes 2009). Los estudios realizados por Morrison et al. (1983) acerca de la distribución de nutrientes en aguas profundas del Golfo de México (hasta 1700 m) muestran distribuciones verticales similares a las reportadas, por ejemplo, en la región de Bermudas y que se emplean aquí para ejemplificar la distribución típica de nutrientes en la cuenca del Atlántico (Figura 32).



Figura 32. Perfiles verticales de nutrientes obtenidos de la serie de tiempo en la estación BATS, aproximadamente a 75 km SE de Bermudas (While y Haines 2010).

Objetivos

El objetivo de los análisis de nitratos, fosfatos y silicatos en las muestras obtenidas durante la campaña XIXIMI-1 es establecer la línea de base para las concentraciones de estas variables en aguas profundas del Golfo de México.

Metodología

Se recibieron en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la UABC, un total de 512 muestras de agua de mar previamente filtradas, correspondientes a 44 estaciones del crucero oceanográfico XIXIMI-1 en el Golfo de México. En la embarcación, una vez que el lance de la roseta llegó a cubierta, se colocaron mangueras de silicón dedicadas para cada profundidad en su correspondiente botella Niskin/GoFlo (12 botellas totales). Frente a cada botella Niskin/Go-Flo se colocó una botella de HDPE de 500 ml y tanto la manguera como la botella se enjuagaron con agua de mar de su profundidad correspondiente. Mediante una jeringa se extrajeron 50 ml de la botella para ser filtrados a través de filtros Whatman GF/F previamente

calcinados (450°C / 2 hrs) y vaciados en un tubo de centrífuga de 50 ml. Cada muestra se transportó congelada hasta el laboratorio. El análisis de los nutrientes: nitratos+nitritos, fosfatos y silicatos en dichas muestras se llevó a cabo utilizando un analizador de nutrientes de flujo segmentado marca Skalar, modelo San-plus. Fue necesario contratar un servicio correctivo y de mantenimiento de dicho equipo, antes de proceder con el análisis de los nutrientes para este crucero.

Para el cálculo de precisión analítica y de límites de detección se empleó el material de referencia certificado para nutrientes en agua de mar MOOS-2 del Consejo Canadiense de Investigación (Tabla 11). Asimismo, el análisis de replicas de dicho material de referencia indica una precisión analítica <10%.

	Nitratos	Fosfatos	Silicatos
Valores Certificados MOOS-2	24.9 ± 1.0	1.58 ± 0.10	28.8 ± 1.0
	μM	μM	μM
Valores Medidos en la Corrida	26.0 µM	1.41 µM	27.5 µM
Diferencia Certificado - Medido	1.1(4.42%)	0.17(10.76 %)	1.9 (6.6 %)
Límites de Detección	0.06	0.09	0.31

Tabla 11. Cálculo de presición analítica y límites de detección.

Resultados

Se anexan al presente los resultados para cada muestra de las diferentes estaciones, incluyendo una etiqueta de control de calidad para cada dato. Las etiquetas 0 y 1 representan datos cuyo control de calidad permite un alto grado de confianza. La etiqueta 4 representa datos que son cuestionables por efectos de contaminación o error de etiquetado, y que han sido excluidos para fines de descripción y graficado. Sin embargo, estos datos con etiqueta 4 deben ser conservados en la base de datos para fines de comparación y discusión en el contexto de otras variables estudiadas, y que potencialmente contengan datos anómalos coincidentes. En la Figura 33 se presentan las distribuciones de los nutrientes de todas las muestras estudiadas una vez eliminadas las muestras con clasificación "4".



Figura 33. Distribución de nutrientes y oxígeno en las muestras clasificadas con un alto grado de confianza para el crucero XIXIMI-1.

La concentraciones máximas de nutrientes son: nitratos 33 µmol/L, fosfatos 2.3 µmol/L y silicatos 35 µmol/L. Para nitratos y fosfatos, los máximos comúnmente se localizan entre los 400 y 1000 m de profundidad. Para silicatos por debajo de los 600 m hasta el fondo.

De común acuerdo con el equipo científico del proyecto y para fines de este reporte, se seleccionaron tres transectos a lo largo y ancho de la zona de estudio: (1) Transecto Este-Oeste a lo largo de 24 y 25°N, (2) transecto Norte-Sur a lo largo de 95 y 96°W y (3) transecto Suroeste-Noreste a partir de 20°N y 96°W con inflexión Oeste-Este a partir de 25°N y 91°W. Los resultados para dichos transectos han sido graficados utilizando el programa Ocean Data View (ODV) para cada uno de los transectos (Figura 34, Figura 35, Figura 36).



Figura 34. Transecto 1.

El transecto que inicia adyacente a la costa de Tamaulipas y termina en el canal de Yucatán, muestra un máximo de nitratos y fosfatos entre los 400 y 1000 metros de profundidad. En las muestras cercanas a la costa (E11, E12, E13, E15 y E16) se observa un incremento en la concentración de nitratos en relación a las muestras de mar adentro. Para las estaciones desde el centro del transecto hacia el canal de Yucatán (E18, E19, E21 y E22), las concentraciones de fosfatos en aguas de 800-1000 metros, muestran valores >1.8 µmol/L, lo cual influye en una mayor dispersión de valores en la razón N:P a aquella esperada para aguas en estas profundidades. Consecuentemente, dichas muestras para fosfatos son cuestionables y han sido

etiquetadas como "4". Los silicatos alcanzan un máximo cerca de los 700 m de profundidad y se mantienen constantes hacia agua más profunda.



Figura 35. Transecto 2.

Probablemente por su cercanía a la costa, este transecto muestra una mayor amplitud en la zona de máxima concentración de nutrientes para nitratos (aprox. 300-1100 m). Frente a la costa de Veracruz y Tabasco se observa una expansión de la zona de máxima concentración para fosfatos y, en menor medida, para nitratos. La distribución de silicatos es similar al transecto 1.



Figura 36. Transecto 3.

A lo largo de este transecto la zona de máxima concentración de nitratos se observa con una continuidad bien definida desde la costa hasta el punto de inflexión E-W (distancia 0-800 m). Esta distribución de nitratos se distingue de los otros transectos, en donde se observan los máximos en forma de lentes. Sin embargo, en la zona de máxima concentración de nitratos y fosfatos, los fosfatos, muestran una disminución en su concentración entre los 200 y 600 m de distancia de este transecto. La distribución de silicatos, si bien similar a los otros transectos, muestra mayor variabilidad a partir de los 800 m hacia el fondo.

Conclusiones

Las concentraciones de nutrientes reportadas para XIXIMI-1 son similares a aquellas reportadas por Morrison et al. (1983) para el Golfo de México entre los 22º y 29º N. Dichos autores reportan máximos de 35 µmol para nitratos, 2.5 µmol para fosfatos y 28 µmol para silicatos. Durante XIXIMI-1 los máximos fueron 33 µmol, 2.3 µmol y 35 µmol respectivamente.
Se observa la señal de agua del Océano Atlántico dado el enriquecimiento de fosfatos y nitratos en la zona de mínimo oxígeno más pronunciada a la que generalmente se observa en el Océano Pacífico.

No existen indicadores específicos de cómo debería notarse una alteración en las concentraciones de nutrientes en el agua del Golfo de México debido a contaminación por derrames de petróleo y la actividad bacteriana potencialmente asociada a éstos. Excepto por la influencia de la costa y el aporte de nutrientes por vía fluvial, no se observan valores anómalos y/o distribuciones en la concentración de nutrientes que pudieran ser explicadas por procesos asociados con eventos de derrame de hidrocarburos. La distribución espacial de nutrientes es consistente en el área de estudio y comparable con agua adyacente del Atlántico y estudios previos en agua de hasta 1700 m en el Golfo de México.

Recomendación

Se sugiere comparar los resultados de fosfato para las estaciones E18, E19, E20 y E21 con otras variables estudiadas, para confirmar su etiqueta cuestionable.

Referencias

- Gruber N (2008) The marine nitrogen cycle: overview and challenges. In: Capone et al. (ed) Nitrogen in the Marine Environment, 2da edición. Academic Press, pp. 1-50.
- Libes S (2009) Introduction to Marine Biogeochemistry. 2da edición. Academic Press, 909 p.
- Morrison JM, Merrell Jr WJ, Key RM, Key TC (1983) Property distributions and deep chemical measurements within the western Gulf of Mexico. Journal of Geophysical Research 88(C4): 2601-2608.
- Paytan A, McLaughlin K (2007) The Oceanic Phosphorus Cycle. Chemical Reviews107: 563-576
- While J, Haines K (2010) A comparison of the variability of biological nutrients against depth and potential density. Biogeosciences 7:1263–1269.

Agradecimientos

Agradecemos a A. Orozco-Durán su apoyo durante la colecta de muestras durante la campaña XIXIMI-1, a E. Ortiz por el análisis de nutrientes y especialmente a V. Ferreira por su valioso apoyo en la elaboración de los gráficos mediante el programa Ocean Data View.

CARBONO INORGÁNICO

(Dr. Martín Hernández-Ayón)

Antecedentes

La iniciativa del 2010 coordinada por el Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), delinearon en una estrategia nacional y multi-institucional con dos objetivos principales: (1) establecer una línea de base de las características oceanográficas, geoquímicas y biológicas de las aguas territoriales mexicanas del Golfo de México, y (2) evaluar si existían evidencias de hidrocarburos provenientes del derrame de petróleo del pozo profundo asociado al trágico accidente de la plataforma Deepwater-Horizon ocurrido entre abril a julio del año pasado frente a las costas de Luisiana EEUU. En esta gran iniciativa, se incluyó al tema del sistema del CO2 como parte de de las variables biogeoquímicas a estudiar en el Golfo de México con relevancia para poder evaluar el posible impacto por el derrame de hidrocarburos de gran escala.

En México el tema del ciclo del carbono en el agua de mar resulta todavía novedoso, y esto ocurre ya que en el país solo en muy pocas regiones se han realizado mediciones del carbono orgánico relacionado a mediciones de productividad primaria, pero en muy pocos casos relacionados con estudios de la química del carbono inorgánico. Desde hace tiempo en distintos foros nacionales e internacionales, en programas como Programa Mexicano del Carbono (PMC: el http://pmcarbono.org/base/index.php) se ha señalado la necesidad de utilizar técnicas de vanguardia que permitan estudiar la dinámica del carbono, la necesidad también de conocer los procesos biogeoquímicos y cuantificar los diferentes reservorios, y sobre todo se han resaltado las áreas prioritarias de nuestras costas Mexicanas donde hace falta realizar estudios. El PMC en su plan científico, destaca al Golfo de México como una de las zonas prioritarias a raíz de los grandes vacíos de información que existen en dicha región en el tema del sistema del CO₂ a pesar de su gran extensión y su importancia en el sector pesquero y comercial. En la búsqueda de información a nivel internacional, es interesante conocer que en el Golfo de México no existen registros históricos de mediciones directas de componentes del sistema de carbono, como por ejemplo de pCO₂, ni por cruceros oceanográficos ni por barcos de oportunidad (Figura 37).



Surface Water pCO₂ Observations

Figura 37 Mapa de Norte América que ilustra las zonas en las que se han realizado mediciones de pCO₂ mediante cruceros oceanográficos y barcos de oportunidad. Nótese la falta de información en el Golfo de México. Cortesía del Dr. Takahashi. Por lo tanto, la oportunidad que se generó por iniciativa de INE, será transcendente y de gran aportación en lo referente a la línea base de la biogeoquímica del carbono de esta región y a proveer también elementos que contribuyan junto con el resto de las mediciones a generar un diagnóstico en relación al tema del derrame.

Objetivos

Objetivo General:

Describir la variabilidad espacial del sistema del CO₂ mediante la medición de Carbono Inorgánico Disuelto y Alcalinidad Total en el Golfo de México (GoM) y evaluar si hay evidencia concitente con impactos asociados al derrame de petróleo sobre el carbono inorgánico disuelto.

Objetivos específicos

Determinar las características de las masas de agua y su CID característico en el GoM mediante comparaciones con datos históricos y diagramas T-S y T-S-CID a escala regional.

Caracterizar la distribución vertical y espacial de las variables químicas de Carbono Inorgánico Disuelto (CID) y Alcalinidad Total (AT).

Metodología

Se tomaron un total de 305 muestras colectadas en botellas Pyrex de 500 ml a las cuales se les adicionaron 100 µl de cloruro de mercurio saturado para prevenir de alteraciones biológicas. Los cuidados en la toma de la muestra de agua de mar para CID, fueron los mismos que se consideran cuando se toman muestras de oxígeno en los cuales se trata de evitar que la muestra forme burbujas durante su colecta. A diferencia de la toma de oxígeno, en cada colecta de agua en la botella se deja un pequeño espacio de aire cerca del cuello (head Space) para finalmente tapar la botella con el tapón con grasa Apiezon para prevenir la evaporación y desgasificación.

Alcalinidad Total

Para la determinación de esta variable, se titularon muestras de agua de mar con ácido clorhídrico (HCI) seguida de mediciones de cambios de potencial medidas en milivoltios utilizando un electrodo de referencia de pH. Todas las muestras fueron analizadas usando ácido clorhídrico ~0.1mol kg⁻¹ HCI con cloruro de sodio 0.6M determinado potenciométricamente. El procedimiento incluye una celda abierta por la que se burbujea la muestra con aire libre de CO₂. Los datos generados durante la titulación son procesados siguiendo la metodología descrita por Dickson et al. (2003). El control de calidad de las mediciones se evaluó utilizando estándares certificados con un valor de alcalinidad total determinado en el laboratorio del Dr. Dickson en Scripps Institution of Oceanography; este laboratorio es el referente internacional de este tipo de estándares.

Carbono Inorgánico Disuelto

El CID se midió coulométricamente siguiendo la técnica descrita por DOE (1994). La técnica consiste en la adición de ácido fosfórico con el propósito de convertir todas las especies del carbono inorgánico contenidas-disueltas en una cantidad de agua de mar conocida a CO_2 gas. Posteriormente el CO_2 es capturado en una solución de etanolamida y es titulada usando un coulómetro IUC. La precisión de este sistema es de ~3 µmol kg⁻¹ mientras que la exactitud se determinó usando estándares de referencia del Dr. A. Dickson.

Control de calidad de las mediciones de CID y AT

En los análisis se utilizó el batch 111 con valores certificados por el Dr. Andrew Dickson (http://andrew.ucsd.edu/co2qc/batches.html#mostrecent). El valor de CID certificado era de 2020.1 μ mol kg⁻¹ y para la AT era de y 2222.8 μ mol kg⁻¹ equivalente. En los análisis de las muestras del GoM se utilizaron un total de 49 mediciones de estándares de CID con una precisión de ±1.9 μ mol kg⁻¹ y de 77 mediciones para TA con una precisión de ±2.4 μ mol kg⁻¹.

Estas dos últimas variables (CID y AT), junto con fosfatos y silicatos, serán utilizadas a futuro para calcular pCO₂, pH in situ y omega de saturación de aragonita y calcita, por medio del programa CO2Sys.xls (Lewis y Wallace 1998). Los datos serán graficados con ayuda de programas como el Ocean Data View y Sigma Plot para su análisis y visualización.

Resultados

Se usaron los datos de 1997 del transecto A22 del programa Word Ocean Circulation Experiments (WOCE) para fines de comparación. El transecto A22 realizado en aguas del Caribe y Atlántico Norte incluye estaciones entre las latitudes 10 a la 30°N de la línea generada entre la longitud 70 y 60°°W. En este ejercicio se usaron los datos de la hidrografía y de mediciones de CID y AT como herramienta indicadora de las características físicas y químicas del agua fuente con dos propósitos (Figura 38):

(1) Estudiar las características químicas y físicas representativas "del agua fuente" procedente del Caribe y compararlas con los datos del XIXIMI-I.

(2) Evaluar/detectar de manera preliminar si hubo o no algún efecto de petróleo observable en la estructura vertical de las variables medidas del carbono.



Figura 38. Transecto A22 del programa WOCE realizado en 1997. Los datos generados de temperatura, salinidad, CID y TA de estas estaciones se utilizaron para fines de comparación con los valores obtenidos durante;a campaña oceanográfica XIXIMI-1.

Los estudios publicados sobre la circulación de la región de los mares Intraamericanos Caribe y Golfo de México sugieren que el flujo neto hacia el interior del Caribe y del GoM deriva de dos fuentes principales: la primera correspondiente a un 45% de agua que proviene del Atlántico sur conun flujo aproximado de ~14 Sv, y la segunda con agua superficial que entran al Caribe y alimenta a la corriente de Florida del Atlántico Norte con un volumen aproximado de 17 Sv (Schmitz y Richardson 1991).

De la comparación entre los perfiles de salinidad y temperatura de los datos del GoM y de los de WOCE, se encontró una similitud entre los perfiles obtenidos entre las latitudes 10 a ~20°N (Figura 39). En la figura comparativa del perfil de salinidad, se resaltan cuatro aspectos de la estructura vertical señalados a lo largo del perfil: en la parte superficial, en (1) se observa la disminución de salinidad de ~36.5 a ~35.2; en la región marcada como (2) la zona de máxima disminución de salinidad localizada entre 400 y 800 m hasta menos de 35 y con una temperatura similar a la observada en aguas costeras del Caribe entre 10° y 15°N; en (3) se observan salinidades similares entre los 2000 y 3000 m; y en (4) se pueden observar valores de salinidad ligeramente mas altos en ~0.1 unidades pero se sobreponen sobre los perfiles generados a los ~20°N. Esto sugiere que la estructura de la columna vertical de temperatura y salinidad en el GoM, coincide con lo señalado por los autores en relación al origen de las fuentes de agua superficial y profunda del Caribe-Atlántico Sur y Atlántico Norte, respectivamente. Pero además, estas no cambian sensiblemente durante su trayecto. Con esto en consideración, se hizo el mismo ejercicio con los datos de CID.



Figura 39. Perfiles comparativos de salinidad y temperatura. Los datos en círculos negros corresponden a los datos del XIXIMI-I y en color a los del WOCE (Los colores en datos del WOCE corresponden a diferentes latitudes). El corchete derecho en azul en el gráfico de salinidad enmarca las latitudes de 10 a 20°N del agua que se encontró como fuente y que fue la misma en el interior del GoM.

El resultado de la comparación entre el CID y AT entre ambos muestreos fue similar al encontrado con salinidad y temperatura (Figura 40). Sin embargo, fueron más

claras las diferencias en la estructura del perfil desde la superficie hasta los 3000 m. Por lo tanto, de esta comparación se resaltan varios aspectos:

1) Las concentraciones de los perfiles de CID entre XIXIMI-1 y WOCE no fueron muy diferentes pesar de la diferencia en el tiempo de muestreo de más de una década. En general las mediciones de los primeros 1000 m de XIXIMI-I se sobreponen a los perfiles de las mismas latitudes antes descritas del WOCE, tanto de CID como de AT. Sin embargo, se observan ligeras diferencias en las concentraciones de CID que son ligeramente mayores en la aguas subsuperficiales subtropicales entre 400 y 800 m, pero ligeramente menores en AT (<10 μ moles). Por debajo de ~2000 m la concentración de CID y AT es ligeramente menor (~20 μ moles) que lo medido en WOCE al sur de los 20°N.

2) La disminución de CID en las aguas superficiales de hasta 2050 µmol kg⁻¹ y el aumento en aguas subsuperficiales entre 400 y 800 m de 2200 µmol kg⁻¹ guarda cierto paralelismo con los cambios de salinidad observados (I por el contrario la AT aumenta hasta ~ 2340 µmol kg⁻¹). Este paralelismo en los patrones de salinidad y CID y AT lo podemos interpretar como producto de la presencia de diferentes masas de agua (Figura 39). Es importante señalar que las concentraciones por debajo de los 1000 m se mantuvieron cuasiconstantes alrededor de ~ 2190 µmol kg⁻¹.

3) Los perfiles de CID y AT del XIXIMI-I en los primeros 1000 m mostraron una estructura similar al perfil de los datos costeros de latitudes al sur de los 15°N, mientras que por debajo de los 1000 m el perfil de CID muestra similitud con las estaciones entre los ~14y 20°N. La AT, por su parte muestra valores intermedios.



Figura 40. Perfiles comparativos de CID. Los datos en círculos negros corresponden a los datos del XIXIMI-I y en color los del WOCE (Los colores corresponden a diferentes latitudes).

Lo anterior resalta la importancia del papel de la advección en el control de las variables químicas del carbono y nutrientes en el GoM. En los diagramas T-S de la Figura 41, se muestra la presencia de agua superficiales del Atlántico, las aguas subsuperficiales, las aguas intermedias y profundas. En la misma figura se seleccionó los datos de 10 a 14°N y se comparó con los observados en el XIXIMI-I.



Figura 41. Diagramas T-S comparativos del GoM vs WOCE. Los colores del XIXIMI-I indican la profundidad. Los datos de WOCE corresponden a los colectados entre las estaciones entre las latitudes 10 a 14°N.

Los resultados de los diagramas T-S muestran que las aguas superficiales del Atlántico presentaron la misma disminución de salinidad de 36.5 a ~35 en los primeros 200 m, mientras que se observa la misma tendencia a disminuir por debajo de los 1000 m. Estos resultados resaltan el papel de la advección de las diferentes masas de agua para explicar la estructura vertical del CID.

Lo anterior puede entenderse más claramente en la Figura 42, en la que se comparan las características de T-S del GoM y de la relación CID-Salinidad. En esta figura se observa que la estructura del CID tanto en la superficie como en el fondo está controlada de manera importante por las masas de agua presentes en el interior del GoM producto de la fuente de las agua del Caribe y del Atlántico Norte. Sin embargo, la estructura en las masas de agua profundas (AIA y APA) es diferente, ya que en ambas la salinidad básicamente es la misma y lo que cambia es la temperatura. Por

ejemplo, APA es mas fría que AIA, y esa masa de agua tiene menos CID, haciendo ver diferente la estructura T-S vs CID-S. Por lo tanto podemos señalar que las relaciones se mantienen directas mientras hay cambios de salinidad y esto se observó en los primeros ~600 m. Por debajo, la relación ya no es directa ya que la salinidad no cambia y lo único que cambia es la temperatura al igual que la concentración de CID.



Figura 42. Diagramas T-S y CID-S del GoM. Los colores indican la profundidad. En el grafico izquierdo se indican las masas de agua como: Agua Subsuperficial Subtropical (ASsT); Agua Central Tropical (ACT); Agua Intermedia del Atlántico y Agua Profunda del Atlántico. Notar que el agua superficial, el ASsT y ACT tienen una misma estructura tanto la relación T-S, como la CID-S. Sin embargo, es diferente la estructura en las masas de agua profundas (AIA y APA). Lo anterior se debe a que en ambas masas de agua la salinidad básicamente es la misma y lo que cambia es la temperatura y el contenido de CID.

¿Evidencias del derrame de petróleo sobre el carbono inorgánico disuelto?

Los resultados de la Figura 40 a la Figura 42 nos permiten generar comentarios en este aspecto, ya que la comparación con los datos de 1997 es una herramienta preliminar para evaluar si hubo anomalías detectadas en la forma de los perfiles del CID. El escenario esperado en el caso de un derrame de petróleo en la columna de agua, sería observar aportes de CO₂ adicionales como producto de la biodegradación del petróleo, las cuales modificarían la estructura del perfil vertical del CID en el caso de que hubiera habido incursión de petróleo en las aguas profundas del GoM a aguas territoriales Mexicanas. En este caso en particular, al traslapar los datos de 1997 de las estaciones 10 a 14°N se observó que los datos medidos en XIXIMI-I siguen la forma del perfil tanto en las aguas superficiales con valores bajos, así como en las aguas subtropicales donde se da el máximo de CID y mínimo de oxígeno y en las aguas profundas donde los valores permanecieron estables en ~ 2200 µmol kg⁻¹.

Referencias

- Dickson AG, Afghan JD, Anderson GC (2003). Reference materials for oceanic CO₂ analysis: a method for the certification of total alkalinity. Marine Chemistry. Mar Chem (80): 185–197
- DOE (1994) En: Dickson AG, Goyet C (eds) Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water, Version 2, ORNL/CDIAC-74.
- Schmitz WJ and Richardson PL (1991) On the sources of the Florida Current. Deep-Sea Research38 (Suppl.) 379-409.

CONCENTRACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO

(Dr. Victor Camacho-Ibar)

Antecedentes

El carbono orgánico disuelto (COD) es el reservorio de carbono orgánico más grande en el océano. Ya que juega un papel central en el ciclo global del carbono, la determinación exacta y precisa del COD en el océano resulta relevante. Sin embargo, la obtención de mediciones altamente precisas de esta variable en las concentraciones típicamente encontradas en aguas oceánicas profundas (>1000 m) del Atlántico (< 50 micromolar; Carlson et al. 2010) no es trivial, ya que el método rutinario para su determinación, i.e., la técnica de combustión catalizada de alta temperatura, presenta algunas incertidumbres relacionadas tanto con blancos instrumentales como con blancos del agua (Sharp et al. 2002).

La fuente primaria del COD en el mar son los productores primarios. Los procesos biológicos involucrados en la producción de COD en ecosistemas oceánicos incluyen: (a) la liberación directa por el fitoplancton vía autólisis y excreciones extracelulares, (b) la liberación indirecta a través de la egestión (expulsión del cuerpo de materiales no digeridos), la excreción y el "sloppy feeding" por los pastoreadores, y (c) la lisis de células fitoplanctónicas inducida por los virus y bacterias (Strom et al. 1997, Mannino y Harvey 2000, Nagata 2000). Las concentraciones de COD en aguas superficiales oceánicas comúnmente son menores de 80 µM (ej. ver Sharp 1997, Hansell y Carlson 2001, Carlson et al. 2010) y suelen presentar variaciones temporales en escala intra-anual en función de la variabilidad en la producción primaria. Sin embargo, en aguas intermedias y profundas las concentraciones de COD son relativamente bajas y constantes en el tiempo, obteniéndose perfiles típicos de esta variable con la forma que se muestra en la Figura 43. Ya que las concentraciones de COD son poco variables en aguas oceánicas profundas (Carlson et al. 2010), se espera que cualquier aporte extraordinario de hidrocarburos en aguas profundas sea evidenciado mediante esta incremento en el valor de esta variable.



Figura 43. Perfil de la concentración de carbono orgánico disuelto en una estación del Golfo de México (tomada de Guo et al. 1995).

Objetivos

El objetivo de los análisis de COD en las muestras obtenidas durante la campaña XIXIMI-1 es establecer la línea de base para las concentraciones de esta variable en aguas profundas del Golfo de México.

Metodología

Las muestras para determinación de COD se recolectaron en todas las estaciones y todas las profundidades, de tal manera que se realizaron un total de 514 determinaciones de esta variable siguiendo el protocolo que a continuación se describe.

Una vez que el lance de la roseta llegó a cubierta, se colocaron mangueras de silicón dedicadas para cada profundidad en su correspondiente botella Niskin/GoFlo (12 botellas totales). Frente a cada botella Niskin/Go-Flo se colocó una botella de HDPE de 500 mL y tanto la manguera como la botella se enjuagaron con agua de mar de su profundidad correspondiente. Se llenó cada botella a la mitad o ³/₄ partes y transportó cerrada al laboratorio en el barco.

Ya que las concentraciones de COD en agua de mar son muy bajas y es relativamente fácil contaminar las muestras, en el protocolo de muestreo se hizo la anotación de realizar el muestreo con cuidado para evitar que las mangueras, las jeringas y todo el material se manejara evitando contacto con superficies potencialmente sucias.

Preparación de las muestras a bordo del barco

En el laboratorio del barco las muestras para análisis de COD se filtraron a través de filtros Whatman GF/F previamente calcinados ($450^{\circ}C / 2$ hrs). El agua de mar filtrada se recolectó en botellas oscuras de HDPE de 125 ml previamente descontaminadas. Cada muestra de agua fue acidificada con H₃PO₄ (50%) e inmediatamente congelada para su análisis en el laboratorio.

Métodos de laboratorio

El método para la determinación de COD en muestras de agua de mar utilizado en el presente estudio es esencialmente el descrito por Hansell (2007). Las muestras de agua de mar se acidifican a pH < 3 con el fin de convertir todas las especies de carbono inorgánico (i.e., del sistema de los carbonatos) en bióxido de carbono (CO₂). Las muestras acidificadas se purgan con aire ultrapuro, libre de CO₂ para eliminar el carbono inorgánico de la muestras. Las muestras son inyectadas en una columna de combustión empacada con un catalizador (perlas de óxido de aluminio revestidas con platino), a una temperatura de 680 °C. Los compuestos de carbono orgánico no purgable son convertidos a CO₂, el cual es medido en un detector de infrarrojo no dispersivo (NDRI por sus siglas en inglés).

El contenido de COD en las muestras se determinó con un analizador de carbono orgánico Shimadzu TOC-5000 que funciona bajo el principio de oxidación catalítica de alta temperatura, después de la descarbonatación de la muestra por una vigorosa agitación con aire "zero" por 5 minutos. El numero de inyecciones de la muestra puede variar entre 3 y 5, lo cual depende de la reproducibilidad del valor en la concentración del COD. El volumen de inyección es de 160 microlitros.

Antes de correr muestras, el equipo se calibra con 8 puntos de calibración en un intervalo de concentraciones de 15 a 240 µM de C, usando como estándar ftalato ácido de potasio en agua desionizada. El equipo utiliza un automuestreador (ASI-5000A) con capacidad para 24 viales. Inmediatamente después de correr la curva de calibración, se analizan lotes de 12 muestras de agua de mar. Para el análisis de muestras de agua de mar profundo es necesario verificar con cuidado el desempeño del método, lo cual se realiza lote a lote. La verificación incluye el análisis de material de referencia conocido como "Consensus Reference Water" (http://www.rsmas.miami.edu/groups/biogeochem/CRM.html), agua acidificada de mar profundo (DSW por sus siglas en inglés) con un valor "consensado" de COD de 41-44 µM. Entre los materiales de referencia se incluye agua baja en carbono (LCW por sus siglas en inglés) con una concentración acordada de 1 a 2 µM que se utiliza para evaluar el blanco del instrumento.

Con cada lote de 12 muestras de agua de mar se incluyen: (a) 2 blancos de reactivos (agua desionizada acidificada) al inicio, en medio y al final de la corrida (total de 6 blancos por lote); (b) agua certificada DSW al inicio, en medio y al final de la corrida (total de 3 muestras de DSW por lote); (c) agua LCW en medio de la corrida (1 muestra por lote).

Resultados

En esta sección se reporta primero un análisis de la calidad de los datos y posteriormente se reportan algunos de los perfiles verticales de la distribución de COD con énfasis en anomalías en las concentraciones de esta variable.

Análisis de calidad de los datos

Se obtuvieron un total de 514 datos de COD correspondientes a las 44 estaciones cubiertas durante el crucero XIXIMI-1. Como es común en campañas oceanográficas, el primer paso del análisis de los resultados correspondió a la "limpieza" de datos, para lo cual se utilizó el criterio de asignación de etiquetas de calidad (Quality Flags) aplicado con el programa Ocean Data View (ODV). En ODV, 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".

Las etiquetas de calidad se asignaron en función del análisis de los histogramas de concentración de COD y de los perfiles verticales de concentración de COD. En general, con base en lo reportado en la literatura, se esperaba que los perfiles de COD tuvieran una forma similar a la observada en la Figura 43, con valores disminuyendo rápidamente en aguas superficiales (0-500 m) y presentando poca variabilidad en aguas profundas.

De las 514 muestras analizadas, únicamente 3 de ellas presentaron concentraciones claramente elevadas (~ 1,000 μ M de C) que se consideraron como de mala calidad (QF 8). En contraste, 96% de los datos se consideraron como de buena calidad (Tabla 12).

QF	No. Muestras	%
0	494	96.1
1	9	1.8
4	8	1.6
8	3	0.6
∑(44 estaciones)	514	100

Tabla 12. Clasificación de muestras de COD XIXIMI-1. Quality Flag (QF): 0.-Buena calidad, 1.-Calidad desconocida, 4.-Calidad Cuestionable y 8.-Mala calidad.

La asignación de etiquetas 1 y 4 fue más complicada. En la Figura 44 se muestran dos histogramas de la concentración de COD. En los histogramas se observa que casi todos los datos se encontraron entre 50 y 200 μ M, y que únicamente 7 muestras estuvieron por encima de dicho intervalo. A esas 7 muestras y a la muestra de 600 m de la E-31 (173 μ M) les fue asignada la etiqueta QF 4.



Figura 44. Histogramas de concentración de COD en XIXIMI-1. Muestras con QF de 0, 1 y 4 (izquierda), muestras con QF de 0 y 1 (derecha).

La "calidad dudosa" (QF = 4) se resalta en los perfiles que se muestran en la Figura 45. En esta figura se grafica el "perfil promedio" de toda la red de muestreo (i.e., el perfil con el valor promedio para cada profundidad) y el error estándar para cada profundidad. Cuando se incluyen todos los datos con QF de 0, 1 y 4 en el promedio (Figura 45-izquierda) se observa un comportamiento errático atípico de los perfiles de COD oceánicos. Cuando únicamente se consideran los datos de "buena calidad" (QF = 0), se observa un comportamiento "clásico" Figura 45-derecha).



Figura 45. Perfiles promedio de COD en el Golfo de México bajo diferentes criterios de calidad. QF: Quality Flag. Las líneas horizontales en rojo representan el error estándar.

Es importante resaltar que en 8 estaciones se observaron máximos "atípicos" de COD a 1500 m de profundidad, y en una estación (E4) se observa un máximo a 2500 m. Estas muestras fueron etiquetadas con QF = 1 ya que pueden representar anomalías reales que se verificarán mediante la comparación con la distribución de otras variables. El perfil promedio incluyendo estas muestras se presenta en la Figura 45-centro.

Línea base: perfil promedio de COD en el Golfo de México durante XIXIMI-I

Los perfiles verticales de COD de las muestras de la campaña XIXIMI-I se pueden catalogar en tres grupos. En la Figura 46 se muestran ejemplos de perfiles en dichos grupos): (a) los perfiles "típicos"; (b) los perfiles con máximo profundo; y (c) los perfiles con forma de zigzag. Los perfiles típicos mostraron el máximo en las muestras cercanas a la superficie, con valores entre 85 y 110 μ M, seguidos de una disminución rápida hasta ~400m, a partir de donde las concentraciones permanecen constantes en un intervalo entre 50 y 70 μ M.



46. Clasificación de perfiles verticales de COD de acuerdo con su forma: clásico (izquierda), máximos profundos (centro) y tipo zigzag (derecha). Únicamente se utilizaron datos con QF 0 y 1.

Los perfiles con máximos profundos a 1500 m se observaron en las líneas 24 y 25 °N (Figura 46 centro). En estos perfiles la concentración superficial varió entre 100 y 130 μ M, y el intervalo de valores "constantes" a partir de los 500 m fue de 55 a 80 μ M, mientras que los máximos a 1500 m oscilaron entre 84 y 175 μ M. Los perfiles tipo zigzag (Figura 46 derecha) no se encuentran en un patrón espacial definido, y la mayoría corresponden a estaciones con perfiles someros.

Con el fin de establecer la línea base de la distribución de concentraciones de COD en aguas profundas del Golfo de México y poder determinar posibles anomalías, se generó él perfil promedio, con errores estándar asociados, excluyendo del cálculo de los promedios los siete perfiles en los que se presentaron máximos a 1500 m de profundidad (Figura 47).



Figura 47. Perfil promedio (línea base) de COD para el Golfo de México obtenido con los datos con QF = 0 para el crucero XIXIMI-I.

El perfil promedio (Figura 47) presenta el valor máximo de 107 μ M en la superficie (10 m) y un rápido decremento con la profundidad hasta un valor ~78 μ M a los 300-400 m, siendo este mas o menos constante hasta los 1000 m. Hacia aguas más profundas se presenta una ligera disminución en la concentración de COD, y entre 1200 y 3000 m las concentraciones promedio son muy estables alrededor de 70 μ M.

Anomalía de COD a 1500 m

Del total de los perfiles que incluyeron muestras a 1500 m (22 perfiles), siete de ellos (el 32%) presentaron un máximo en esta profundidad, contrastando con la distribución oceánica "típica" del COD. Al comparar el perfil promedio de estas siete muestras con la línea base (i.e., el perfil promedio de todo el golfo) se observa que, en general, las concentraciones de COD en todas la profundidades, excepto 1500 m, coinciden con la línea base (Figura 48). El valor promedio de los máximos a 1500 m (125 μ M) es mayor que los valores superficiales, llegando a tener valores de hasta 177 μ M en la estación E12.



Figura 48. Anomalías de COD en el Golfo de México. Izquierda.- Comparación entre perfil promedio de COD correspondiente a la línea base y perfil promedio de 7 estaciones (mostradas en mapa) con máximos profundos de COD en el Golfo de México. Derecha.- Mapa de isosuperficie de COD a 1500 metros de profundidad con QF de 0 y 1.



Transectos estándar

Transecto de este a oeste a lo largo de los paralelos 24-25 °N

Figura 49. Distribución vertical de las concentraciones de COD a lo largo de los paralelos 24 y 25 °N durante el crucero XIXIMI-I.

El rasgo más sobresaliente del transecto a lo largo de las líneas más norteñas del la campaña XIXIMI-I (Figura 49) es el máximo de COD a 1500 m, en las estaciones E8, E10, E12, E17, E18, E22, E23 y E24.



Transecto de sur a norte a lo largo de las líneas 94 y 95 °W

Figura 50. Distribución vertical de las concentraciones de COD a lo largo de las líneas 94 y 95 °W durante el crucero XIXIMI-I.

En el transecto de sur a norte a lo largo de los meridianos 94 y 95 °W (Figura 50), además del máximo de 177 μ M de COD en 1500 m en la E12 (24 °N), el rasgo más sobresaliente es un máximo con valor de 117 μ M de COD en la muestra más profunda de la E4, recolectada a 2685 m, siendo la profundidad del fondo en esta estación de 2720 m.

Transecto diagonal de bahía de Campeche al canal de Yucatán



Figura 51. Distribución vertical de las concentraciones de COD a lo largo de un transecto de la bahía de Campeche al canal de Yucatán durante el crucero XIXIMI-I.

En el transecto de la bahía de Campeche al Canal de Yucatán (Figura 51) no se observa un patrón longitudinal claro en la distribución de las concentraciones de COD ya que, al igual que en los transectos anteriores, los parches con valores elevados son más obvios. Además de los máximos de 114, 141 y 87 μ M de COD observados a 1500 m en las estaciones E22, E23 y E24 respectivamente (máximo centrado a los 1000 km), el rasgo más sobresaliente es un parche en los 600 km con valores de 95 μ M en la muestra de 2500 m de la E33 y 108 μ M en la muestra de 1500 m de la E8.

Nota sobre el valor absoluto de las concentraciones de COD en XIXIMI-I

La forma general del perfil vertical promedio con etiquetas de calidad de 0 (denominado como perfil de línea de base) es la esperada para perfiles verticales de esta variable en aguas oceánicas. Este resultado permite sugerir que el uso de dicho perfil para detectar posibles anomalías en la concentración de COD en aguas del Golfo de México ha sido correcto. Es, sin embargo, importante aclarar que los valores absolutos de concentración de COD son más elevados que lo que podría esperarse con base en lo reportado para las concentraciones de COD en aguas oceánicas profundas. Por ejemplo, en la Figura 43 se puede observar que las concentraciones más elevadas de COD para aguas del Golfo de México reportadas en el estudio de Guo et al. (1995) oscilan entre 70 y 75 µM, mientras que en aguas por debajo de los 1000 m las concentraciones se estabilizan alrededor de 45 µM. Por otro lado, Carlson et al. (2010) reportan concentraciones de COD ~42 µM en aguas entre 1000 y 3000 m en el Atlántico Norte afuera del Golfo de México (alrededor de 25 °N y 66 °W), mientras que Hansell et al. (2004) reportan un valor similar para aguas profundas a lo largo de un transecto en el Atlántico a lo largo de 24.5 °N. En síntesis, los valores de COD que estamos reportando para las muestras recolectadas en el crucero XIXIMI-I se encuentran aproximadamente 25 µM por arriba de lo esperado con base en valores que se pueden considerar "típicos" de aguas profundas en la región del Atlántico Norte.

Aunque pareciera un problema de un blanco constante en las muestras, no se ha podido determinar la causa específica de los valores elevados. Sabemos que no es un problema instrumental (i.e., no es un problema analítico) ya que el agua de referencia "Consensus Reference Water" que estamos analizando de rutina (ver sección de métodos) nos arroja valores dentro del valor certificado de 41-44 μ M con valores ocasionales ligeramente menores (39 μ M). Realizamos el análisis de dos perfiles profundos (E-23 y E-24) con muestras obtenidas del crucero XIXIMI-II y el promedio de estos perfiles se comparó con el perfil promedio de XIXIMI-II (Figura 52). Los perfiles de XIXIMI-II son parecidos a los valores esperados, lo que refuerza la hipótesis que se tuvo un problema de blancos durante el manejo de las muestras de XIXIMI-I.



Figura 52. Comparación de perfiles promedio de COD en el Golfo de México 44 estaciones de XIXIMI-1 vs 2 perfiles de XIXIMI-2.

Conclusiones

La distribución vertical de COD en el Golfo de México durante la campaña XIXIMI-I indica que únicamente en los transectos mas norteños, en 24°N y 25°N, existieron valores elevados en aguas profundas, específicamente a 1500 m de profundidad. Esta anomalía no se presentó en todas las muestras recolectadas a 1500 m en dichas latitudes, sino que se presentó específicamente en las estaciones E8, E10, E12, E17, E18, E22, E23 y E24.

La concentración de COD por sí sola no permite especular sobre la fuente posible del carbono orgánico. Sin embargo, es poco probable que se generen máximos de COD a 1500 m de profundidad por procesos naturales.

Recomendaciones

Para determinar la significancia de la distribución de las concentraciones de COD obtenidas en este estudio, particularmente las anomalías observadas a 1500 m, es necesario cotejar los resultados de COD con los de otras variables que sean indicadoras más específicas de aportes de carbono por derrames de petróleo.

Dadas las dudas sobre los valores absolutos de las concentraciones de COD obtenidas durante este estudio, se plantearon modificaciones para la obtención y manipulación de muestras para COD durante cruceros subsiguientes. Específicamente para XIXIMI-II se extremaron las precauciones para la manipulación de todo el material que pueda entrar en contacto con las muestras para COD, y se eliminó el paso de filtración de las muestras recolectadas a mas de 200 m de profundidad. Se espera que siendo el Golfo de México un mar oligotrófico, a más de 200 m la concentración de partículas sea mínima, de tal manera que solo un porcentaje menor del carbono orgánico total corresponda a carbono particulado.

Referencias

- Carlson CA, Hansell DA, Nelson NB, Siegel DA, Smethie WM, Khatiwala S, Meyers MM, Halewood E (2010) Dissolved organic carbon export and subsequent remineralization in the mesopelagic and bathypelagic realms of the North Atlantic basin. Deep-Sea Research II 57, 1433–1445.
- Guo L, Santschi PH, Warnken KW (1995) Dynamics of dissolved organic carbon (DOC) in oceanic environments. Limnology and Oceanography 45, 1392-1403.
- Hansell DA, Carlson CA (2001) Marine dissolved organic matter and carbon cycle. Oceanography 14, 41-49.
- Hansell DA, Ducklow HW, Macdonald AM, O'Neil Baringer M (2004) Metabolic poise in the North Atlantic Ocean diagnosed from organic matter transports. Limnology and Oceanography 49, 1084-1094.
- Hansell DA (2007) Determination of dissolved organic carbon and total dissolved nitrogen in seawater. In: Dickson, A.G., Sabine, C.L. and Christian, J.R. (eds) Guide to best practices for ocean CO2 measurements. *PICES Science Report* No. 34.
- Mannino A, Harvey HR (2000) Biochemical composition of particles and dissolved organic matter along an estuarine gradient: Sources and implications for DOM reactivity. Limnology and Oceanography 45, 775-788.
- Nagata T (2000) Production mechanisms of dissolved organic matter. In: Kirchman, D.L., (ed) Microbial Ecology of the Ocean. John Wiley, New York, pp. 121-152.
- Sharp JH (1997) Marine dissolved organic carbon: Are the older values correct?. Marine Chemistry 56, 265-277.

- Sharp JH, Carlson CA, Peltzer ET, Castle-Ward DM, Savidge KB, Rinker KR (2002) Final dissolved organic carbon broad community intercalibration and preliminary use of DOC reference materials. Marine Chemistry 77, 239–253.
- Strom SL, Benner R, Ziegler S, Dagg MJ (1997). Planktonic grazers are a potentially important source of marine dissolved organic carbon. Limnology and Oceanography 42, 1364-1374.

Glosario de Términos

COD = carbono orgánico disuelto DSW = Deep Sea Water (agua de mar profundo) LCW = Low Carbon Water (agua baja en carbono) µM = micromoles por litro QF = Quality Flag (etiqueta de calidad bajo el criterio de Ocean Data View)

Créditos

El reporte fue elaborado por Víctor F. Camacho Ibar

Los análisis en laboratorio de COD fueron realizados por el M. en C. Eduardo Ortíz Campos.

Las figuras fueron realizadas por el Ocean. Armando Félix Bermúdez.

COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DEL CARBONO INORGÁNICO

(Dr. Juan Carlos Herguera)

Ver Anexo 4.

COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LA MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA

(Dr. Juan Carlos Herguera, Dra. Sharon Herzka)

Ver Anexo 5.

METALES TRAZA

(Dra. Lucila Lares)

Ver también Anexo 6.

Antecedentes

Dado el derrame de petróleo ocurrido el 22 de abril de 2010 y que fue controlado hasta julio del mismo año se hizo evidente la necesidad de establecer un monitoreo de variables químicas asociadas al petróleo, tanto para establecer las condiciones base, así como para trazar el destino del mismo en el Golfo de México. Dos de los metales más abundantes en el petróleo son el vanadio y el níquel con concentraciones de 3.13-9.4 µg g⁻¹ de Ni y 8.8-13.8 µg g⁻¹ de V medidas en el petróleo de Arabia Saudita (Al-Swaidan 1996). El petróleo derramado por el Prestige en las costas de Galicia en 2002 contenía 97 µg g⁻¹ de Ni y 382 µg g⁻¹ de V (Santos-Echeandía et al. 2005). El plomo también es un metal que se encuentra en el petróleo, por ejemplo en el crudo árabe se han reportado concentraciones 0.30-0.81 μ g g⁻¹ (Al-Swaidan 1996). Las razones isotópicas del Pb han sido ampliamente utilizadas para trazar fuentes de este metal (e.g., Stukas v Wong 1980, Sañudo-Wilhelmv v Flegal 1994, Wang v Sañudo-Wilhelmv 2008). Dado que no existen estudios sobre las concentraciones disueltas de estos metales en la parte profunda del Golfo de México se hace importante el establecer una línea base de las concentraciones de estos metales y el monitorear sus concentraciones por la posible contaminación que puede haber ocurrido después del derrame que duró más de dos meses.

El vanadio es un micronutriente esencial para muchas especies fitoplanctónicas y algunos organismos (e.g. esponjas) que participa en diversas reacciones enzimáticas. Es abundante en el océano y en aguas del Atlántico se han reportado concentraciones medias de 35 ± 3 nM (Jeandel et al. 1987). A pesar de que el V es un elemento esencial su disminución en la superficie del océano, dada su utilización por el fitoplancton, no es muy pronunciada ya que es muy abundante. A pesar de tener una distribución vertical tipo nutriente, como sus diferencias entre superficie y fondo no son muy pronunciadas en el océano abierto, se considera que el V tiene un comportamiento casi conservativo con fuerte relación con la salinidad. El níquel es también un elemento esencial para algunas especies de fitoplancton y es menos abundante en el océano con concentraciones de 3.5 nM en el Noreste del Atlántico (Danielsson et al. 1985) por lo que su disminución en las capas superficiales es más pronunciada y presenta una distribución vertical fuertemente correlacionada con nutrientes inorgánicos. principalmente el fosfato. El plomo, por su parte es un elemento no esencial para la vida con concentraciones disueltas bajas (0.05-0.08 nM en el Atlántico Norte; Wu v Boyle 1997) que se adhiere fácilmente a partículas y cuyo aporte principal es el atmosférico por lo que presenta una distribución vertical tipo remoción (i.e., altas concentraciones en la superficie que disminuyen con la profundidad).

Objetivos

Obtener la distribución de las concentraciones de V y Ni y de las relaciones de los isótopos estables del Pb (206, 207 y 208) disueltos en el agua de mar de la zona profunda del Golfo de México.

Metodología

Estrategia de muestreo

En noviembre de 2010 se realizó un crucero en el cual se tomaron muestras a 6 profundidades (entre 10 y 2500 m) en 44 estaciones. Las muestras fueron tomadas con botellas Go-Flo las cuales fueron previamente lavadas con ácido nítrico 0.1 M y agua destilada y desionizada (ADD) para evitar contaminación. Estas botellas están especialmente diseñadas para el muestreo de agua para elementos traza. El agua fue bombeada de la botella Go-Flo a un cuarto provisto de presión positiva con aire filtrado Clase-100 por medio de la inyección a de gas nitrógeno ultrapuro. Todos los procedimientos para la toma de muestras, manejo y análisis se llevaron a cabo siguiendo procedimientos de técnicas "limpias" para el análisis de metales traza (EPA, 1996). Ahí las muestras fueron filtradas (0.4 µm), acidificadas con HNO₃ grado Ultra (pH < 2) y almacenadas en doble bolsa de plástico en contenedores apropiados para evitar la contaminación. Se tomaron 2 L para el análisis de Ni y Pb y 250 mL para el análisis de V.

Métodos de laboratorio y análisis

Las muestras fueron pre-concentradas por medio de resinas de intercambio iónico (Chelex-100) a pH de 4.5 (Abbasse et al. 2002, Wang y Sañudo-Wilhelmy 2008) para V y 6.5 para Ni y Pb (Yang 1993). Este procedimiento se llevó a cabo en un cuarto "ultralimpio" bajo una campana de flujo vertical laminar Clase 100. La determinación de V se realizó por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (EAA-HG) y la de Ni e isótopos estables de Pb (206, 207 y 208) se llevarán a cabo por espectrometría de masas con plasma de inducción acoplado en el laboratorio del Dr. Sergio Sañudo Wilhelmy de la Universidad del Sur de California (EUA).

Se realizaron pruebas preliminares (blancos de procedimiento, recuperación y análisis de material de referencia) para el análisis de Ni y Pb por espectrofotometría de absorción atómica en el laboratorio del CICESE. Rutinariamente se corrieron blancos de procedimiento y material certificado de referencia para determinar el grado de contaminación de los procedimientos así como la exactitud de los resultados. Los límites de detección para los instrumentos utilizados son: 0.7 ppb para determinación de V por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (GF-AAS, por sus siglas en inglés) y 0.1 ppt para Ni y Pb por espectrometría de masas por plasma de inducción acoplado (ICP-MS, por sus siglas en inglés). Por ello, las muestras fueron concentradas 15 veces para la determinación de V y 150 veces para la determinación de los isótopos de Pb. Dado que la determinación de Ni se hará a partir de la misma

pre-concentración del Pb, las concentraciones obtenidas para el Ni no serán un problema.

Para el V se ha analizado el material de referencia para agua de mar Cass-4 (National Research Council of Canada) con resultados $(1.14 \pm 0.10 \ \mu g \ kg^{-1})$ dentro del intervalo del valor certificado $(1.18 \pm 0.16 \ \mu g \ L^{-1})$ y blancos de procedimiento los cuales no han mostrado problemas de contaminación durante el análisis. El coeficiente de variación en las réplicas de las concentraciones de V ha mostrado estar dentro del 10 % lo cual se considera aceptable.

Resultados

Al momento se han procesado todas las estaciones para la determinación de V. El intervalo de las concentraciones de V disuelto (21.2-39.2 nM) fue más amplio que el reportado para el océano abierto del Atlántico Norte (30.0 - 36.0 nM); Jeandel et al. 1987, Middelburg et al. 1988). Sin embargo el promedio de las concentraciones de V $(29.3 \pm 3.3 \text{ nM})$ fue ligeramente menor al mínimo. En regiones más costeras del este del Atlantico Norte se han reportado concentraciones menores (28 nM; Santos-Echeandía et al. 2008). Dado que se tuvieron algunos problemas con la lámpara del espectrofotómetro y tuvo que cambiarse, los datos están siendo corroborados.

La distribución vertical del V en la columna de agua para toda la región profunda del Golfo de México fue generada a partir de los valores promedio de las concentraciones en cada una de las diferentes profundidades muestreadas y se presenta en la Figura 53. El intervalo de estas concentraciones promedio (28.7-30.0 nM) es pequeño comparado con el obtenido para todas las muestras (mencionado anteriormente), lo que refleja su alta variabilidad en el golfo. Esta distribución vertical del V se puede explicar tanto por su involucramiento en los procesos biológicos como por su comportamiento cuasi-conservativo dado por su alta correlación con la salinidad como se ha reportado en estudios costeros (Wang y Sañudo 2009). Esta alta correlación con la salinidad, a pesar de ser un elemento esencial para la vida, se explica por su abundancia, ya que es el segundo elemento traza más abundante del océano. Por ello, las concentraciones de V menores en la capa superficial (10-50 m) se explican, por un lado, por las bajas salinidades detectadas en la capa superficial del golfo (Figura 54) y por otro, por su utilización por el fitoplancton en las capas superficiales. A las profundidades de 150 y 200 m se ve un incremento en las concentraciones que puede deberse, en parte, a la degradación de la materia orgánica que pone en solución el V que estaba incorporado al fitoplancton, y por el aumento en la salinidad dado el aporte de agua de alta salinidad (36.6) que arriba al Golfo de México (AStSsC - agua subtropical subsuperficial del Caribe). Sin embargo las concentraciones vuelven a disminuir a los 600 y 1000 m posiblemente por la presencia en estas profundidades del Agua Intermedia Antártica la cual tiene la salinidad más baja (34.86-34.89) que se presenta en el golfo (Monreal-Gómez et al. 2004). Esta fuerte disminución no se explica únicamente por el cambio en la salinidad ya que las concentraciones de V vuelven a incrementarse con la profundidad hasta los 2500 m. profundidad a la cual se encuentra el Agua Profunda Noratlántica cuya salinidad es sólo ligeramente mayor. Middelburg et al. (1988) también encontraron una disminución a los 600 m de profundidad en una estación localizada en el centro del Noratlántico. Al momento no se puede determinar el origen del aumento de las concentraciones de vanadio a los 1500 y 2500 m ya que no existen estudios sobre vanadio disuelto en la región cercana al principal aporte de masas de agua al Golfo de México (Mar Caribe).



Figura 53. Distribución vertical de las concentraciones promedio de vanadio (nM) para la zona profunda del Golfo de México.



Historicos (oct-dic, WOD) - XIXIMI1

Figura 54. Distribución vertical de salinidad comparada con datos históricos del Golfo de México.

En la Figura 55 a la Figura 59 se muestran las distribuciones horizontales de las concentraciones de V en el golfo en diferentes niveles. Se puede observar una tendencia de valores altos en los extremos este y oeste alrededor de los paralelos 24°N y 25° N. En el lado este podría significar el aporte de las aguas oceánicas provenientes del Caribe y en el lado oeste los remolinos desprendidos previamente de la corriente del Lazo. Más análisis que relacionen las demás variables medidas (e.g., nutrientes, corrientes, caracterización de las masas de agua) en conjunto con los demás investigadores del proyecto son necesarios para determinar si estos incrementos se deben a esta dinámica.



Figura 55. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona profunda del Golfo de México a 10m.







Figura 57. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona profunda del Golfo de México a 600m.



Figura 58. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona profunda del Golfo de México a 1500m.



Figura 59. Distribución horizontal de las concentraciones de vanadio en la zona profunda del Golfo de México a 2500m.

La preconcentración de las muestras para el análisis de Ni e isótopos de Pb ya ha sido completada. Las muestras ya fueron llevadas al laboratorio del Dr. Sañudo de la Universidad del Sur de California para su determinación, la cual se espera sea completada en el mes de febrero.

Conclusiones

La distribución vertical de V disuelto en la parte profunda del Golfo de México fue similar a las distribuciones reportadas para al Atlántico Norte. Sin embargo estos resultados deben ser considerados preliminares ya que se tuvo problemas con el espectrofotómetro y en la actualidad estos datos están siendo corroborados.

Referencias

- Abbasse G, Ouddane B, Fisher JC (2002) Determination of trace levels of dissolved vanadium in seawater by use of synthetic complexing agents and inductively coupled plasma–atomic emission spectroscopy. Anal Bioanal Chem 374: 873–878. DOI 10.1007/s00216-002-1532-3.
- Al-Swaidan HM (1996) The determination of lead, nickel and vanadium in Saudi Arabian crude oil by sequential injection analysis/inductively-coupled plasma mass spectrometry. Talanta 43: 1313-1319.

- Danielsson LG, Magnusson B, Westerlund S (1985) Cadmium, copper, iron, nickel and zinc in the north-east Atlantic Ocean Mar Chem 17: 23-41.
- Environmental Protection Agency (EPA) (1996) Sampling ambient water for trace metals at EPA water quality criteria levels. Método 1669.
- Jeandel C, Caisso M, Minster JF (1987) Vanadium behaviour in the global ocean and in the Mediterranean Sea. Mar Chem 21: 21–74.
- Middelburg JJ, Hoede D, Van Der Sloot HA, Van Der Weijden CH, Wijkstra J (1988) Arsenic, antimony and vanadium in the North Atlantic Ocean. Geochim Cosmochim Acta 52: 2871-287.
- Monreal-Gómez MA, Salas-del-León DA, Velasco-Mendoza H (2004) La hidrodinámica del Golfo de México. En: Caso M, Pisanty I, Ezcurra E (comp) Diagnóstico ambiental del Golfo de México, INE-SEMARNAT, Vol. I, 47-68 pp.
- Santos-Echeandía J, Prego R, Cobelo-García A (2005) Copper, nickel, and vanadium in the Western Galician Shelf in early spring after the Prestige catastrophe: is there seawater contamination? Anal Bioanal Chem, 382: 360-365.
- Santos-Echeandía J, Prego R, Cobelo-García A (2008) Influence of the heavy fuel spill from the *Prestige* tanker wreckage in the overlying seawater column levels of copper, nickel and vanadium (NE Atlantic ocean). J Mar Syst
- Sañudo-Wilhelmy SA, Flegal AR (1994) Temporal variations in lead concentrations and isotopic composition in the Southern California Bight. Geochim Cosmochim Acta, 58: 3315–3320.
- Schaule BK, Patterson CC (1983) Perturbations of the natural lead depth profile in the Sargasso Sea by industrial lead. En: CS Wong, et al. (eds) Trace Metals in Seawater pp. 487-504. Plenum Press.
- Sherrell R, Boyle EA (1988) Zinc, chromium, vanadium, and iron in the Mediterranean Sea, Deep-Sea Res 35:1319-1334.
- Stukas VJ, Wong CS (1980) Stable lead isotopes as a tracer in coastal waters. Science 194: 179–183.
- Wang D, Sañudo-Wilhelmy SA (2008) Development of an analytical protocol for the determination of V (IV) and V (V) in seawater: Application to coastal environments. Mar Che. 112: 72–80. doi:10.1016/j.marchem.2008.05.011
- Wang D, Sañudo-Wilhelmy SA, (2009) Vanadium speciation and cycling in coastal waters. Mar. Chem. 117: 52–58. doi: 10.1016/j.marchem.2009.06.001

- Wu J, Boyle EA (1997) Lead in the western North Atlantic Ocean: Completed response to leaded gasoline phaseout. Geochim Cosmochim Acta. 61: 3279-3283.
- Yang (1993) Determination of disolved trace metals in the western North Pacific. M.Sc. Thesis dissertation. University of British Columbia. 104 pp.
HIDROCARBUROS DERIVADOS DEL PETRÓLEO

(Dr. Vinicio Macías)

Ver también Anexo 7.

Antecedentes

Existen algunos rasgos característicos que son únicos para el Golfo de México y que han sido reportados en la literatura. Por ejemplo, hay domos salinos masivos que son capaces de producir "fugas" que resultan en "brine pools" o pozas de salinidad alta en depresiones batimétricas del golfo. La existencia de hidratos de metano en el fondo marino es otra característica importante de esta región (Milkov et al. 2000 y referencias citadas ahí). Adicionalmente, existen muchas chapopoteras u "oil seeps" naturales que son relativamente comunes en el Golfo de México y que producen el brillo característico de un derrame de hidrocarburos en la superficie del mar y son detectables desde la atmósfera mediante el uso de satélites (Mitchell et al. 2000).

Se cree que las chapopoteras son responsables de muchas de las bolas de alquitrán que se encuentran en las costas del golfo. Estas chapopoteras proporcionan la energía necesaria para mantener poblaciones grandes de organismos bentónicos que por ejemplo incluyen a mejillones (Bergquist et al. 2005), y que frecuentemente también albergan a organismos simbióticos metanotróficos. Otros organismos asociados a las chapopoteras son los gusanos poliquetos. Los organismos grandes, se asocian a organismos tales como bacterias en una relación simbiótica donde esas bacterias usan las formas reducidas u oxidadas de compuestos tales como H_2S .

En zonas costeras del Golfo de México, sobre todo en la región norte, la fuente predominante de nutrientes es el Río Mississippi. Las "plumas" o lengüetas de aguas cargadas con nutrientes son áreas de una intensa producción nueva que mantiene grandes poblaciones de fitoplancton (Liu et al.1999). El Golfo de México es un ecosistema con una productividad considerada como moderada, con niveles de <300 g cm²/yr⁻¹. Sin embargo, es importante mencionar que la zona de estudio es considerada mas bien como de aguas oligotróficas en la zona profunda del Golfo (Lohrenz et al. 1999).

La presencia de hidrocarburos derivados del petróleo en aguas profundas del Golfo de México puede tener varias fuentes. Las fuentes importantes (sin orden de importancia en cuanto a volumen o temporalidad) incluyen derrames asociados a extracción petrolera y chapopoteras naturales. El incidente más importante por la cantidad de petróleo liberada ocurrió en el pozo Macondo operado por la compañía British Petroleum en el norte del Golfo de México, que ocurrió entre abril y julio del 2010.

Por medio del análisis de imágenes de satélite, se ha logrado identificar muchos sitios donde hay chapopoteras naturales que liberan constantemente petróleo al medio ambiente. Estimaciones realizadas por el National Research Council (2003) y Dagmar Schmidt Etkin (2009) indican que en promedio se liberan de manera natural el equivalente a unos 560,000 a 1,400,000 barriles por año en el golfo. Este es un proceso natural que ha ocurrido durante muchos miles de años. Comparativamente, el derrame del pozo Macondo liberó aproximadamente unas 10 veces más volumen por día de lo que liberan las chapopoteras de manera natural a lo largo del golfo. Por lo tanto, el Golfo de México presenta una gran cantidad de chapopoteras que constantemente liberan una cantidad importante de petróleo que representan lo que puede considerarse como "niveles de fondo" de hidrocarburos en sus sitios de influencia. Estas fuentes naturales deben de distinguirse químicamente del petróleo proveniente de derrames.

Adicionalmente, se debe considerar que también han habido accidentes asociados de embarcaciones que han liberado petróleo en aguas del Golfo de México, aunque estos son de menor volumen que los provenientes del pozo Macondo o de las chapopoteras naturales. Finalmente, los organismos vivos, tanto acuáticos como terrestres, producen y luego liberan, hidrocarburos distintos a los característicos del petróleo. La presencia de materia orgánica de diferentes fuentes, terrígenas, acuáticas y petroleras, hace que el evaluar la presencia y origen de hidrocarburos tanto de origen petrogénico como biogénico sea complicado.

Objetivos

Los objetivos fundamentales del trabajo son dos. Por una parte, se planteó la necesidad de establecer los niveles típicos de la concentración de hidrocarburos, el tipo de estos y su distribución en la zona de aguas profundas del Golfo de México. Por otro lado, se consideró necesario realizar los estudios de monitoreo necesarios para determinar la posible presencia en aguas mexicanas de hidrocarburos derivados del derrame del descontrolado pozo Macondo, que se convirtió en el peor desastre accidental de liberación de hidrocarburos de la historia de la explotación petrolera.

De manera particular, los objetivos específicos incluyen la separación, identificación y cuantificación de los hidrocarburos más importantes para poder realizar el proceso de "fingerprinting" (Wang y Fingas 2003, Raia et al. 2004).

Métodos de Laboratorio

Para lograr la separación, identificación y cuantificación de los hidrocarburos más importantes para poder realizar el proceso de "fingerprinting", se busca en principio separar dos de los principales grupos de compuestos que constituyen el petróleo: los hidrocarburos saturados, normales o alifáticos que son el mayor componente del petróleo, y los compuestos aromáticos policíclicos, mejor conocidos como PAHs por sus siglas en inglés.

En el caso de los hidrocarburos lineales, se identificaron componentes que van desde hidrocarburos de 10 carbones hasta los de 40 carbones. En el caso de los hidrocarburos aromáticos polinucleares, se cuentan con aproximadamente 36 compuestos individuales estándares que son buscados en cada una de las muestras.

Entre los parámetros importantes a determinar se incluyen la traza cromatográfica típica de los hidrocarburos del petróleo, su índice de preferencia del carbono (CPI), la presencia o ausencia de C17, pristano, C18 y fitano, así como las relaciones entre estos compuestos. También se evalúa la presencia o ausencia de lo que se conoce como UCM, o material de carbono sin resolver o sin separar. Cada uno de esos parámetros, y la relación entre la suma de la concentración de hidrocarburos de bajo peso molecular (L) dividida por la sumatoria de los de alto peso molecular (H), o L/H, serán calculadas e interpretadas a la luz de las relaciones que otros autores han reportado en la literatura. Debemos enfatizar que este es un trabajo en progreso y que por lo tanto, un análisis mas detallado y/o mas completo puede hacer que algunas de las primeras indicaciones que se han obtenido a partir de la interpretación de los resultados que se tienen hasta el momento puedan cambiar.

El método analítico implica el proceso de extracción mediante la utilización de embudos de separación para extraer los compuestos orgánicos. La extracción se realiza de manera repetida con tres porciones de 60 mL de cloruro de metileno grado reactivo ACS. Las extracciones repetidas son luego combinadas en un solo recipiente. Se concentra por rota-evaporación hasta aproximadamente unos dos mililitros. El extracto es luego concentrado en tubos de concentración Kuderna-Danish en baño maría, hasta un volumen final de 1 mL. El extracto es procesado a través de una columna cromatográfica de 30 cm de largo por 1 cm de diámetro que contiene silica gel y alúmina desactivadas al 3%. Las proporciones en que se usan son 12 cm de sílica por 6 cm de alúmina. Dos fracciones son obtenidas a partir del extracto. La fracción uno (F1) contiene normalmente los hidrocarburos lineales, saturados o alifáticos, que son extraídos utilizando 20 mL de n-hexano. La segunda fracción (F2), que es extraída con una mezcla de n-hexano-diclorometano (70:30 v:v) contiene, entre otros compuestos, los aromáticos polinucleares.

El petróleo de la columna de agua obtenido de cada muestra es extraído mediante el método líquido-líquido, con la intención de eliminar la matriz acuosa, y tras someterse al proceso de limpieza en columna con sílica y alúmina como se describió previamente, la fracción apropiada (F1 o bien F2) es analizada mediante cromatografía de gases (GC) en columna capilar con detector de ionización de flama (GC-FID). El equipo es marca HP 6890 plus. La columna capilar que utilizamos es la HP-5 de 30 m de longitud con una longitud de 30 m y con un diámetro de 0.32µm y un grosor de capa de 0.25µm. La rampa de temperatura inicia en 60 °C, temperatura que es mantenida durante tres minutos. La rampa de temperatura fue de 8 °C/min con una temperatura final 300 °C, la cual es mantenida durante 40 min. La temperatura del inyector fue de 275 °C y la del detector fue de 315 °C.

Para la separación, identificación y cuantificación de los compuestos aromáticos poli-nucleares que se obtienen en la segunda fracción, se usó un sistema gases masas (GC-MS) marca Agilent modelo 7890 equipado con modo de ionización de impacto electrónico y utilizando la técnica del ión común, o SIM por sus siglas en inglés. En el modo SIM, se analizaron 11 grupos de compuestos en los que se incluyó un ión de cuantificación y dos iones de confirmación para cada compuesto. La columna empleada es la DB-5MS de 30 m de longitud y 0.25µm de diámetro interno y con 0.25µm de grosor de capa. La temperatura inicial fue de 70 °C que fue mantenida durante 3 min con una rampa de temperatura 5 °C/ min hasta alcanzar una temperatura final de 300 °C que se mantiene durante 11 min. Adicionalmente, la temperatura del inyector fue de 280 °C y la de la fuente es de 250 °C y la del cuadrupolo se mantuvo a 150 °C. La inyección se realizó en el modo splittless y se inyectaron 2 μ L.

Para controlar recuperaciones y asegurar la calidad del trabajo, para los hidrocarburos alifáticos se incluyeron dos estándares internos y dos compuestos surrogados. Los estándares internos fueron los alquenos 1-decene y el 1-eicosene. Los surrogados utilizados fueron 1-undecene y el 1-dococene. No sabemos de la existencia de un material estándar de referencia por lo cuál no se incluyó uno en el trabajo. Las calibraciones fueron externas utilizando al menos 5 niveles de concentración diferentes y utilizando estándares verdaderos.

Para los aromáticos polinucleares, se utilizaron los siguientes estándares: compuestos deuterados más el estándar interno • Estándar surrogado: Acenaftenod10, Criseno-d12, 1,4-diclorobenceno-d14, Naftaleno-d8, Perileno-d12, Fenantrenod10; que corresponden a los compuestos Semi Volatiles de la mezcla de estándares internos. Como estándar interno utilizamos al compuesto p-terfenil-d14 que es un material certificado de referencia C.R.M. (Certified Reference Material).

Cada corrida constó de seis muestras y dos blancos. El blanco de procedimiento contiene únicamente el estándar surrogado.

El blanco fortificado contiene estándares con todos los compuestos. Para los hidrocarburos alifáticos son TRPH Standard (Florida) (17 compuestos) y el Fuel Oil Degradation Mixture (4 compuestos). Para PAHs contiene el Standard Reference Material 2260a (32 compuestos) y el Standard Reference Material 1491a (18 compuestos).

Resultados

Hasta el día de hoy, se han analizado en laboratorio alrededor de 140 muestras individuales que corresponden a los sitios de muestreo de la zona profunda del Golfo de México de acuerdo a la distribución mostrada en la Figura 16.

La distribución de las concentraciones totales de hidrocarburos alifáticos (la sumatoria de todos los hidrocarburos alifáticos presentes en cada muestra)

correspondiente a la línea 25 N se muestra en la Figura 60. Esta figura indica que las más altas concentraciones de hidrocarburos se ubicaron cerca a la plataforma de Yucatán, de manera particular, se midieron en las estaciones E22, E23 y E24. Esas estaciones mostraron las concentraciones relativamente más altas en alrededor de los 1500m de profundidad. Esta es una profundidad que pareciera interesante dado que el derrame del pozo Macondo ocurrió a esa profundidad (Wade et al. 2011) y a que se inyectaron grandes cantidades del dispersante Corexit 9500. Se podría plantear la posibilidad de que el petróleo se hubiese mantenido a una profundidad de 1200 a 1500 m en una pluma que pudiera haber sido capturada por la Corriente del Lazo y distribuida dentro del Golfo de México en la zona profunda. Aunque este patrón de transporte es muy poco probable si se considera el patrón de circulación del Golfo de México, este es un escenario que debía de ser considerado por medio de la evaluación de las huellas químicas de los hidrocarburos.



Figura 60. Distribución vertical de la suma de hidrocarburos alifáticos medidos en la columna de agua en 2010 en la zona profunda del Golfo de México para el sector señalado en rojo en el rectángulo de la figura inferior.

Es por esa consideración que los diferentes parámetros ya mencionados, tales como CPI, C17/pristano, C18/fitano, UCM y L/H entre otros, fueron calculados para tratar de comparar con la fuente original supuesta de la que solo se tienen cromatogramas publicados en la red (Zika et al. 2010) así como los valores reportados

por Wade et al. (2011) y poder determinar si existen diferencias importantes entre ellos o si son iguales. Si existen diferencias, entonces se requiere saber si esas diferencias se pueden explicar solamente por procesos de intemperismo y/o degradación por bacterias o si los hidrocarburos provienen de fuentes que no son petróleo. Por ejemplo, altos valores de CPI indican mayores contribuciones de plantas vasculares (Rieley et al. 1991). También se ha reportado que valores de CPI cercanos a 1 son indicativos de mayores contribuciones de microorganismos, materia orgánica reciclada, y/o petróleo (Kennicutt et al. 1987).

En nuestros resultados (Figura 61) de las muestras analizadas hasta hoy, hemos encontrado que si graficamos la relación pristano/fitano contra CPI (Makky et al. 2010) para algunas de las muestras para las que ha sido posible determinar ambos parámetros, entonces encontramos que existe poca similaridad (en los que se han comparado) con los valores que pueden ser inferidos a partir de la información de cromatogramas existentes en la red sobre el pozo Macondo (Zika et al. 2010). De igual manera, si observamos con detenimiento la composición de los hidrocarburos alifáticos encontrados en las muestras de las profundidades de 1500m para las estaciones que muestran las concentraciones más altas, podemos encontrar ciertas particularidades (este análisis aún se encuentra en proceso). De acuerdo con Makky et al. (2010), es posible graficar las relaciones entre pristano/C17 versus fitano/C18 y se pueden encontrar regiones particulares de la figura en las que se distinguen fuentes particulares de los hidrocarburos que permiten inferir por ejemplo, si estos provienen de fuentes terrígenas, acuáticas o si son el resultado de una mezcla de estos orígenes. Nosotros hemos utilizado esos índices publicados por esos autores como guía, y hemos encontrado que al menos para nuestra muestra de 1500 m recolectada en la estación E19 (Figura 62), los orígenes de los hidrocarburos son tanto mezclados (acuático con terrígeno) como principalmente acuáticos. En la misma figura, se encuentran graficados los valores de las relaciones que reporta Wade et al. (2011) para el petróleo derramado cerca de la fuente y que se muestra como círculos rojos.



Figura 61. Comparación entre los atributos de los hdrocarburos alifáticos reportados en la red para el pozo macondo (Zika, et al,2010 y Wade el al., 2011) y algunas de las muestras individuales del muestreo XIXIMI-1. Los puntos azules son valores digitalizados a partir del trabajo original (Makki,et al., 2010). Los puntos rojos son diferentes muestras particulares obtenidas y analizadas en XIXIMI-1. Los puntos de Zika, et al (cruz) y de Wade et al (círculo verde) son los valores reportados sobre el petróleo cerca del pozo.



Figura 62. Relación entre los cuatro compuestos pristano, fitano, C17 y C18 como ha sido propuesto para distinguir orígenes potenciales de los compuestos. Los puntos negros son re-digitalizados del autor original (Makki, et al., 2010). Los triángulos en azul pertenece a niveles de la estación 19 de XIXIMI-1. Los valores en rojo, son reportados por Wade et al., (2011) para el petróleo en sitios cercanos al derrame.

Un análisis un poco mas detallado de los componentes de hidrocarburos alifáticos que se encuentran presentes en las muestras de la estación E24 a dos profundidades (1200 m y 1500 m) donde se encontraron relativamente las más altas concentraciones de hidrocarburos, muestra que existe evidencia de al menos tres fuentes distintas de hidrocarburos (Figura 63). Primero, los hidrocarburos más abundantes (mayores concentraciones) parecen indicar una clara preferencia por los hidrocarburos nones, va que los mas abundantes son el C27, C31, C35 y C39. Dado que para estos hidrocarburos el CPI es diferente de cero, pero >1, su origen posible es biogénico terrígeno. Por otra parte, en la parte central de la Figura 63 se muestra que un grupo de hidrocarburos contienen más o menos concentraciones similares desde el C24 hasta el C31. Por supuesto, tanto el C27 como el C31 están influenciados por esa primera fuente terrígena. De cualquier forma, estos compuestos de peso molecular intermedio parecen tener claramente un CPI igual a 1 o cercano a 1. Esto sugiere una posible influencia de una fuente petrogénica. Finalmente, la misma figura muestra que se determinó la presencia de hidrocarburos de bajo peso molecular, como el C17 y el C15 (en la serie 2 que representa la muestra de 1200 m y que está en rojo). Estos hidrocarburos frecuentemente han sido asociados a fitoplancton como fuente. Sin

embargo, es importante recordar que hace falta analizar muchos otros puntos de muestreo para tener una respuesta mas concluyente sobre las inquietudes señaladas como objetivos del trabajo.



Figura 63. Concentración y tipo de hidrocarburos alifáticos presentes en la Estación 24 a 1500 y a 1200 m de profundidad. Varias fuentes de hidrocarburos pueden ser observadas en su composición. Serie 1 es a 1500 m y serie 2 es a 1200 m.

"Fingerprinting" de los aromáticos poli-nucleares

La distribución de la sumatoria de los compuestos aromáticos poli-nucleares para la línea 25 N se muestra en la Figura 64. Es interesante notar que existe cierta coincidencia con la distribución de los hidrocarburos alifáticos, aunque no a las mismas profundidades. Las máximas concentraciones se observan en la estación E24 principalmente.



Figura 64. Distribución de la sumatoria de las concentraciones de los aromáticos poli-nucleares encontradas durante el muestreo de XIXIMI-1 en la sección indicada en el mapa inferior.

De cualquier manera, una primera comparación debe efectuarse contra lo reportado en cuanto al perfil y composición original de los PAHs del derrame original. Si hacemos esto, vamos a utilizar lo reportado por el Dr. Mitra quien ha puesto la siguiente Figura 65 en su sitio web (http://siddharthamitra.com/) que muestra la composición relativa de los aromáticos poli-nucleares. Si a la traza de la Figura 65 la comparamos en la misma secuencia con las concentraciones de los aromáticos para la zona donde se localizaron las concentraciones mayores y que se muestran en la Figura 66, es claro que las abundancias relativas de los PAHs son totalmente diferentes.



Figura 65. Concentraciones y tipos de aromáticos poli-nucleares reportados para el hidrocarburo del derrame del pozo Macondo en 2010 encontrado en sedimentos.



Figura 66. Concentración de aromáticos poli-nucleares (en ng/ml) en la secuencia propuesta por la Figura 65 con la intención de comparar abundancias relativas de estos compuestos.

Una de las primeras preguntas que debemos intentar responder en el caso de la identidad de las posibles fuentes de hidrocarburos es diferenciar entre un origen petrogénico de uno pirolítico (ver por ejemplo: Budzinski et al. 1997, Macías-Zamora et al. 2002, Bohem y Saba 2008). Una de las diferencias es que durante la formación de estos compuestos, la temperatura de formación es importante. Esta diferencia en temperatura de formación se manifiesta en el grado de alquilación de los anillos. Por ejemplo, ha sido estipulado que existe una relación inversa entre el grado de alquilación (presencia de metilos y etilos) y la temperatura de formación de los compuestos. En otras palabras, entre más alta la temperatura e la cual se formaron los compuestos, menos PAHs alquilados pueden ser encontrados. De esta manera, la cantidad de PAHs con ramificaciones ayuda a identificar las posibles fuentes en muestras con diferentes orígenes de PAHs.

En este caso particular, el análisis de la composición específica de las muestras de la estación E24 que se muestra en la Figura 67 nos sugiere que los aromáticos polinucleares parecen provenir de fuentes pirolíticas principalmente, lo que parece eliminar la presunción de que pudieran provenir de origen petrogénico.



Figura 67. Relación entre las razones Fenantreno/antraceno vs fluoranteno/pireno que ayuda a diferenciar si los aromáticos encontrados provienen de un orígen pirolítico o petrogénico. Los circulos en azul son de la Bahía de

Todos Santos (Macías, et al., 2002) y los diamantes en rojo pertenecen a muestras de PAHs en XIXIMI-1 a las profundidades que se indican.

Se sabe también (Bohem y Saba 2008) que la razón entre los PAHs fenantreno/antraceno y la razón fluoranteno/ pyreno son a veces indicativas de orígenes potenciales. Por ejemplo, una razón fenantreno/antraceno > 10 sugiere un posible origen petrogénico, mientras que por otra parte, un valor de la razón fenantreno/antraceno < 10 sugiere un origen pirogénico. Por desgracia, los valores se encuentran tan cercanos a los límites de detección que para efectos prácticos, no nos es posible diferenciar uno del otro en muchos casos y aún estamos buscando una alternativa para este problema.

Conclusiones

Es claro que esta es solo una primera interpretación y que la base de datos aún está incompleta, por lo que las primeras conclusiones son solo de carácter tentativo y preliminares. Algunas de las cosas sobresalientes son que las concentraciones más altas encontradas hasta hoy, se localizan en la región cercana a la Corriente de Yucatán. Sin embargo, esperamos que existan cambios una vez que se analicen los datos de muestras mas cercanos a las regiones donde operan las torres de PEMEX en la plataforma de Campeche.

En relación a la composición de los hidrocarburos, no existe evidencia de que hayamos detectado residuos del derrame que ocurrió en el pozo Macondo en aguas norteamericanas. Sin embargo, hemos podido determinar la presencia de diferentes fuentes de alifáticos, entre ellas dos fuentes biogénicas y una que parece provenir de petróleo. La composición de aromáticos no sugiere que exista relación con los aromáticos originalmente reportados como abundantes en el petróleo del pozo Macondo. A la pregunta sobre si las composiciones que hemos encontrado sobre todo las de PAHs pueden ser explicables tomando en consideración aquellos procesos que pudieran afectar únicamente las concentraciones relativas, la respuesta es muy complicada en el caso de los PAHs. Esto se debe a que las velocidades de degradación de cada aromático pueden ser diferentes debido a sus diferencias estructurales, lo que los hace diferentes en su degradabilidad. Sin embargo, en el caso de los alifáticos pares y nones, esto es, el CPI no debe de cambiar ni por procesos físicos ni por procesos biológicos.

En relación a las concentraciones totales de n-hidrocarburos alifáticos, podemos ofrecer los siguientes valores reportados para comparación con otras áreas del mundo. Parker et al. (1972) reportan promedios de 0.087 a 0.2 µg/L en aguas superficiales (87 a 200 ng/L). Barbier et al. (1973) reportó valores de 46 a 137 µg/L (46,000 a 137,000 ng/L) en aguas del Mediterráneo y para el mismo Golfo de México desde los 0 a los 500 m de profundidad, Iliffe y Calder (1974) reportaron valores que van desde trazas hasta 75 µg/L (75,000 ng/L). Nuestros valores se encuentran dentro de los rangos reportados por otros.

Recomendaciones

Las recomendaciones generales que podemos hacer hasta este momento son:

La necesidad de conseguir de manera específica, muestra directa del hidrocarburo que fue derramado en el pozo Macondo. Entre más alejadas del derrame, mejor.

Terminar el análisis completo de las muestras del primer muestreo para así poder hacer una evaluación completa de la zona profunda del Golfo de México.

Asegurar el análisis de la segunda campaña de muestreo XIXIMI-2 para determinar si las observaciones realizadas en el primer muestreo son comparables o si existe una alta variabilidad en la estructuración de lo que conformaría la línea base.

Referencias

- Barbier M, Joley D, Saliot A, and Tourres D (1973) Hydrocarbons from seawater. Deep Sea Research 20: 305-314.
- Bergquist DC, Fleckenstein C, Knisel J, Begley B, MacDonald IR and Fisher CR (2005) Variations in seep mussel bed communities along physical and chemical environmental gradients. Marine Ecology Progress Series 293:89–97.
- Boehm P and Saba T (2004) Identification and Allocation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). Environmental Forensic Notes Vol 4:1-5.
- Budzinski H, Jones I, Bellocq J, Pierard C, Garrigues P (1997) Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary. Mar Chem 58, 85-97.
- Cooper JE, Bray EE (1963) A postulated role of fatty acids in petroleum formation. Geochim Cosmochim. Acta 27 1113– 1127.
- Duan F, He K and Liu X (2010) Characteristics and source identification of fine particulate n-alkanes in Beijing, China. Journal of Environmental Sciences 22(7): 998–1005
- Dagmar, DS (2009) Analysis of U.S. Oil Spillage, API Publication 356, American Petroleum Institute, Washington, D.C.
- Iliffe TM and Calder JA (1974) Dissolved hydrocarbons in the Eastern Gulf of Mexico Loop Current and the Caribbean Sea. Deep-Sea Research 21:481-488.

- Kennicutt MC, Barker C, Brooks JM, DeFreitas DA, Zhu GH (1987) Selected organic matter source indicators in the Orinoco, Nile and Changjiang deltas. Organic Geochemistry 11: 41-51.
- Liu H, Landry MR, Vaulot D, Campbell L (1999) Prochlorococcus growth rates in the Central Euatorial Pacific: an application of the fmax approach. J Geophys Res 104: 3391 – 3399
- Lohrenz SE, Wiesenburg DA, Arnone RA and Chen X (1999) What controls primary production in the Gulf of Mexico? p 151 170. In: Kumpf H, Steidinger K and Sherman K (eds) The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem Assessment, Sustainability and Management. Blackwell Science, Malden, U.S.
- Macías-Zamora JV, Mendoza-Vega E, Villaescusa-Celaya JA (2002) PAHs composition of surface marine sediments: a comparison to potential local sources in Todos Santos Bay, B.C., Mexico. Chemosphere 46, 459–468.
- Makky AF, Basta JS, Mousa AS (2010) Genetic origin, maturation, paleoenvironment and classification of some crude oils from the western desert, Egypt, by aid of organic and inorganic geochemistry. International Journal of Academic Research 2(2): 249-263.
- Mitchell R, MacDonald IR, Kvenvolden K (2000) Estimates of Total Hydrocarbon Seepage into the Gulf of Mexico Based on Satellite Remote Sensing Images American Geophysical Union Ocean Sciences Meeting.
- Monreal-Gómez MA, Salas de León DA (1997) Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. En: Lavin MF (ed) Contribuciones a la oceanografía física de México: Unión Geofísica Mexicana, Monografía 3, 183–199.
- National Research Council Committee on Oil in the Sea (2003) Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. National Research Council Ocean Studies Board and Marine Board Divisions of Earth and Life Studies and Transportation Research Board. National Academy Press, Washington, DC, USA 265 pp.
- Parker PL, Behrens EW, Calder JA, and Schultz D (1972) Stable carbon isotope ratio variations in the organic carbon from Gulf of Mexico sediments. Contrib. Mar Sci 16: 139-147.
- Rabalais NN, Turner RE and Wiseman WJ (1999) Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: Linkages with the Mississippi River, p 297-322. In: Kumpf H, Steidinger K and Sherman K. (eds) The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem – Assessment, Sustainability and Management. Blackwell Science, Malden, U.S.

- Raia JC, Blakley CR, Fuex AN, Villalanti DC and Fahrenthold PD (2004) Evaluation of environmental samples containing heavy hydrocarbon components in environmental forensic investigations. Environmental Forensics 5:21–32.
- Rieley G, Collier RJ, Jones DM, Eglinton G, Eakin PA and Fallick AE (1991) Sources of sedimentary lipids inferred from carbon isotopic analysis of individual compounds. Nature 352, 425–427.
- Morey SL, Schroeder WW, O'Brien JJ and Zavala-Hidalgo J (2003) The annual cycle of riverine influence in the eastern Gulf of Mexico basin. Geophysical Research Letters, vol 30, no. 16, 1867.
- Wang Z, Fingas MF (2003) Development of oil hydrocarbon fingerprinting and identification techniques. Mar Pollut Bull 47(9-12):423-52.
- Wade TL, Sweet ST, Sericano JL, Guinasso NL Jr, Diercks AR, Highsmith RC, Asper VL, Joung D, Shiller AM, Lohrenz SE, and Joye SB (2011) Analysis of water samples from the Deepwater Horizon Oil Spill: Documentation of the subsurface plume. Geophysical Monograph Series, VOL. 195, PP. 77-82, 2011.
- Woods JD (1988) Mesoscale upwelling and primary production. In: Rothschild BJ (ed) Towards a theory of biological-physical interactions in the World Ocean, Kluwer Acad Norwell, Mass.

Glosario de Términos

CPI. "Carbon preference index". Índice de preferencia del carbón. Representa una medida de la selectividad en la formación de los hidrocarburos. Normalmente puede calcularse un CPI para compuestos de bajo peso molecular y otro para aquellos de alto peso molecular.

 $CPI_{L} = \frac{1}{2} ([(C15 + C17 + C19)/ (+C14 + C16 + C18)] + [(C15 + C17 + C19)/ (C16 + C18 + C20)].$

 $\label{eq:cpl} \begin{array}{l} \mathsf{CPI}_{\mathsf{H}} = \frac{1}{2} \left(\left[(\mathsf{C25} + \mathsf{C27} + \mathsf{C29} + \mathsf{C31} + \mathsf{C33}) \right] / (\mathsf{C24} + \mathsf{C26} + \mathsf{C28} + \mathsf{C30} + \mathsf{C32}) \right] + (\mathsf{C25} + \mathsf{C27} + \mathsf{C29} + \mathsf{C31} + \mathsf{C33}) \\ + (\mathsf{C29} + \mathsf{C31} + \mathsf{C33}) / (\mathsf{C26} + \mathsf{C28} + \mathsf{C30} + \mathsf{C32} + \mathsf{C34})] \right) (\mathsf{Cooper and Bray}, 1963). \end{array}$

UCM. "Unresolved Complex Mixture". Mezcla compleja sin resolver. Se refiere a compuestos orgánicos generalmente altamente ramificados y/o con anillos aromáticos en sus ramificaciones y que aparecen por debajo de la traza cromatográfica elevando la línea base. Estos compuestos no son separados por el sistema cromatográfico y generalmente se asocia a la presencia de derrames.

L / H. La razón L/H es otra manera de diferenciar orígenes de los hidrocarburos, aunque algunos autores se refieren a este parámetro como una medida de la "frescura"

del derrame. Entonces, L/H menor a la unidad indica entradas biogénicas naturales de orígen terrestre y marino y cerca de la unidad (1) de origen petrogénico. L frecuentemente se ubica desde C11 a C24 y H, normalmente incluye C25 a C35 (Duan, et al. 2010).

TAR. "Terrestrial to Aquatic Ratio". Razón Terrestre vs Acuático. TAR= (C27+C29+C31)/ (C15+C17+C19).

Créditos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a INE (SEMARNAT) y a CONACyT por el soporte económico proporcionado para la realización de este proyecto. De igual manera, deseamos agradecer a la tripulación del B/O Justo Sierra de la UNAM por su tiempo y ayuda. Especial consideración y reconocimiento al Ocean. Arturo Siqueiros por su incansable apoyo durante la colecta de las muestras. Finalmente, nuestro reconocimiento al IIO por todo el apoyo con el equipo analítico con que se cuenta para el desarrollo de esta investigación.

BACTERIOLOGÍA

(Dr. Alexei Licea, Dr. Leonardo Lizárraga)

Antecedentes

Las bacterias son organismos procariontes, es decir, que carecen de núcleo celular. Dentro de los procariontes, tenemos dos grandes grupos, las Eubacterias y las Arqueobacterias. Las Eubacterias, o bacterias verdaderas, son las que encontramos en ambientes idóneos para la sobrevivencia del reino animal. Por otro lado, las Arqueobacterias no poseen paredes celulares con peptidoglicanos, poseen secuencias únicas en su ARN y lípidos de membrana diferentes a las de las eubacterias y los eucariontes. Pueden ser metanogénicas (que crecen en condiciones anaeróbias oxidando el hidrógeno como sustrato) o halófilas (que se desarrollan en ambientes salinos), termófilas (a temperaturas de 80-100 °C) y a niveles de pH extremadamente bajos.

Dentro de las Eubacterias, tenemos a las Gram-Positivas y las Gram-Negativas. Dentro de las Gram-Negativas, encontramos a las proteobacterias; a su vez, este grupo está conformado por proteobacterias alfa, beta, gama, delta y épsilon. Dentro del grupo de las proteobacterias, se han registrado géneros capaces de degradar los hidrocarburos provenientes del petróleo, por lo que resulta de suma importancia el establecer la línea base de los diferentes tipos de bacterias que se encuentran en el Golfo de México. De esta manera, en caso de que se presentase un derrame de petróleo, se podría determinar si alguno de los grupos presentes en la zona es capaz de proliferar sobre los demás grupos al verse favorecido en relación a sus fuentes alimenticias.

El petróleo está compuesto de hidrocarburos que pueden utilizarse como fuente de alimento en el medio marino; incluso existen bacterias que evolucionaron y adquirieron la capacidad de degradarlos. Cada año se vierten aproximadamente 1,300,000 toneladas de petróleo en el mar, la gran mayoría a través de filtraciones naturales y en menor cantidad, como consecuencia del tráfico de embarcaciones marinas. Las filtraciones naturales de petróleo son lentas y permiten que las comunidades microbianas lo degraden conforme entra al ambiente. Sin embargo, cuando ocurren derrames causados por el hombre, el equilibrio se rompe y provoca cambios rápidos en la composición de la flora bacteriana natural, por lo que las bacterias degradadoras de petróleo que eran casi indetectables por su baja abundancia pueden convertirse en dominantes en un tiempo corto. De hecho, en el Golfo de México, los niveles de oxigeno bajos alrededor del petróleo en mar abierto, indican proliferación bacteriana como respuesta a la presencia del crudo.

Se han utilizado distintos métodos para estudiar los mecanismos mediante los cuales las bacterias marinas degradan el petróleo. Uno de ellos consiste en cultivar bacterias directamente en petróleo. Bajo estas condiciones, las bacterias utilizan como

su única fuente de alimento los compuestos orgánicos del petróleo. Kato y Watanabe (2009) observaron que el crudo se emulsificó y los alcanos fueron removidos después de 7 días de cultivo, y además notaron que las cepas predominantes fueron *Alcalinovorax spp.* e identificaron a *Maricaulis spp.* y *Marinobacter spp.* Ese mismo método de cultivo le permitió a Vila et al. (2010) identificar exactamente cuáles sustratos degradaron por completo cada una de las especies mencionadas anteriormente en un período de 60 días. En ese estudio, los autores utilizaron bacterias recolectadas de la arena de la costa española afectada por un derrame de crudo en el 2002.

Para estudiar la degradación de los componentes del petróleo de Túnez (de la zona petrolera de Zarzatine), Zrafi-Nouira et al. (2009) enriquecieron la microbiota indígena del agua costera contaminada aumentando la concentración de petróleo. Cultivaron la microbiota y evaluaron su capacidad biodegradadora y la dinámica poblacional de la microbiota cada semana durante 28 días (7, 14, 21, 28 días). Se demostró que la degradación del petróleo depende de la actividad de un consorcio bacteriano especializado y dinámico que está compuesto de diferentes taxones filogenéticos y que depende de la complejidad del sustrato. El análisis filogenético de la microbiota demostró la presencia de cuatro grupos filogenéticos: Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria y Bacteroidetes, siendo las proteobacterias las predominantes (>80%) durante los días 7, 14 y 21.

Rosano-Hernández et al. (2009) evaluaron la diversidad bacteriana de los sedimentos someros (\leq 100 m) del sur del Golfo de México en zonas de emanaciones naturales de petróleo. Emplearon técnicas moleculares que incluyeron la extracción de DNA bacteriano, amplificación de rDNA 16S-23S, análisis de patrones de bandas mediante RISA (rDNA Intergenic Spacer Region Analysis), y clonación, secuenciación y análisis del rDNA para la identificación taxonómica. Con dichas técnicas, se identificó molecularmente la presencia de los géneros *Marinobacter, Idiomarina, Marinobacterium y Frateuria*, además, se determinó que la identificación de bacterias en sedimentos someros se puede usar como indicador de la presencia de hidrocarburos marinos en el sureste del Golfo de México.

Otra técnica molecular que ha sido utilizada para detectar la presencia de distintos grupos bacterianos en muestras de petróleo y de aguas cercanas a los pozos petroleros, es la llamada DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis). Esta técnica permite caracterizar el rRNA 16S bacteriano, y con esto se ha encontrado que las comunidades bacterianas son mucho más variadas en muestras de agua sin petroleo que en las muestras que contienen petróleo (Liu et al. 2009).

Actualmente, se utiliza PCR en tiempo real (RT-PCR), el cual se emplea para identificar el ADN de una bacteria o célula eucariota. El RT-PCR es una técnica que no es dependiente del cultivo, y que se puede utilizar para identificar genes de interés en muestras ambientales (Pérez-de-Mora et al. 2010). Esta es una técnica molecular basada en la detección de señales fluorescentes emitidas por la síntesis de productos de PCR. Estas señales son monitoreadas utilizando un fluoróforo llamado SYBR Green

que se une al DNA de doble cadena. A diferencia del PCR convencional, la cuantificación por RT-PCR está basada en el incremento continuo de la señal fluorescente, la cual se mide al terminar cada ciclo. Este método se ha utilizado para evaluar la presencia de hidrocarburos, que se consideran los principales contaminantes de suelos como resultado de derrames petroleros y de eliminación de desechos al ambiente. Por ejemplo, mediante su uso se puede identificar y cuantificar los genes involucrados en la degradación de hidrocarburos, tal como el operón Alk, que es de importancia crucial para la degradación de alcanos en diferentes suelos.

La técnica molecular de amplificación de DNA por PCR ha sido utilizada para detectar la presencia de genes específicos de bacterias degradadoras de hidrocarburos, como por ejemplo los genes que codifican la enzima alcano monooxigenasa (Alk). Esta aproximación permite estudiar la dispersión y diversidad de dichos genes en ambientes marinos. Se ha encontrado que hay una distribución diferenciada de bacterias en diferentes sitios de muestreo y se especificó la necesidad de hacer más estudios en el ambiente marino (Kuhn et al. 2009). Otro estudio (Wang et al. 2010) se enfocó en las agua superficiales del Océano Atlántico y demostró una alta diversidad de genes de organismos procariotas capaces de degradar petróleo, así como variación en la distribución geográfica en ambientes marinos. Los autores mencionan la importancia de continuar con análisis que se enfoquen en la detección de las enzimas alcano monooxigenasas, especialmente en las áreas pelágicas.

Un estudio llevado a cabo en la zona costera del sur del Golfo de México destacó aspectos generales de las comunidades de bacterias que tenían la capacidad de degradar petróleo. También se evaluó el efecto que tenía el petróleo sobre la comunidad bacteriana y la respuesta de las bacterias de acuerdo a la magnitud de los aportes recibidos. Se observó que existe un patrón estacional con mayor presencia de dichas bacterias en la temporada de lluvias, no observando dicho patrón en las zonas cercanas a las plataformas petroleras (Lizárraga-Partida 1996). Sin embargo, se sabe que el género *Vibrio* forma parte de las comunidades bacterianas que habitan el Golfo de México, y se cree que se encuentra asociado a la degradación de petróleo (com. pers. Lizárraga y Coldwell).

Objetivos

Establecer la composición de los grupos bacterianos presentes en la zona de aguas profundas del Golfo de México a diferentes profundidades.

Metodología

Estrategia de muestreo

1. Toma de muestras en columna de agua.

Se filtraron 2 litros (L) de agua marina de cada una de las botellas oceanográficas, tanto Niskin como GoFlo. Para esto, se colocaron 2 L de agua marina de cada una de las botellas provenientes de la roseta, dentro de las botellas Nalgene de 2 L para microbiología, el contenido de cada botella fue filtrado mediante una bomba peristáltica Cole aParmer Easy Load Modelo 7518-00, colocando en el extremo de salida un filtro Sterivex de 0.22 µm de Millipore (Cat. No. SVGP01050), Una vez que los 2 L de agua marina de cada botella fueron filtrados, se les removió el agua que quedó dentro del filtro con ayuda de una jeringa cargada con aire. Cada uno de los filtros fue rotulado, se cubrió con parafilm en ambos extremos y se colocó de regreso en su empaque, el cual también fue rotulado. Todos los filtros se almacenaron a -20 °C.

2. Toma de muestras en sedimentos marinos.

En cada uno de los puntos de muestreo se tomaron muestras de sedimento con ayuda de un nucleador. Se tomaron cinco submuestras de cada núcleo, introduciendo cinco cilindros de plástico (jeringas sin punta) de 10 mililitros. Una vez en el laboratorio, se tomó 1 ml de cada uno de los cilindros y se colocó en un tubo eppendorf de 1.5ml, se rotularon y se almacenaron a -20°C.

Métodos de Laboratorio

1. Diseño y síntesis de oligonucleótidos.

Se diseñaron oligonucleótidos específicos para cada uno de los grupos de proteobacterias con base en el gen del 16S ribosomal a excepción de los grupos Vibrio spp. e hidrocarbonoclásticas, cuyas secuencias fueron tomadas de la literatura (Liu et al. 2006 y Kuhn et al. 2009).

Para el diseño de los oligonucleótidos específicos, se utilizaron los programas de cómputo MacVector versión 11.1.2 y CLC DNA Workbench versión 6, para lo cual, se tomaron secuencias consenso de cada grupo de proteobacterias, provenientes de la base de datos de la NCBI. Por último, se mandaron sintetizar las secuencias de cada par de oligonucleótidos específicos para cada grupo de proteobacterias, las cuales se muestran en la Tabla 13.

Grupos bacterianos	Secuencia de oligonucleotidos
Eubacterias	F 5'-CTC CTA CGG GAG GCA GCA-3'
	R 5'-CCG TCA ATT CCT TTR AGT TT-3'
Arquebacterias	F 5'-TTC CGG TTG ATC CYG CCG GA-3'
	R 5'-YCC GGC GTT GAM TCC AAT T-3'
Hidrocarbonoclásticas (alk) alcano	F 5'-GCI CAI GAR ITI RKI CAY AA-3'
monooxigenasa	R 5'-GCI TGI TGI TCI SWR TGI CGY TG-3'
Vibrio spp.	F 5'-GGA TAA CT/TA TTG GAA ACG ATG-3'
	R 5'-CAT ATG AGT GTC AGT G/ATC TG-3'
Alfa proteobacterias	F 5'-ARCGAACGCTGGCGGCA-3'
	R 5'-TACGAATTTYACCTCTACA-3'
Beta proteobacterias	F 5'-GGGGAATTTTGGACAATGGG-3'
	R 5'-ACGCATTTCACTGCTACACG-3'
Gamma proteobacterias	F 5'-CMATGCCGCGTGTGTGAA-3'
	R 5'-ACTCCCCAGGCGGTCDACTTA-3'
Delta proteobacterias	F 5'-TTCCTTGGAAACAGGGAGTG-3'
	R 5'-TTCATGGAGTCGAGTTGCAG-3'

Tabla 13. Grupos bacterianos a identificar empleando oligonucleótidos específicos.

2. Extracción de DNA bacteriano de las muestras de la columna de agua

Para la extracción de DNA se utilizó el "Wizard Genomic DNA Purification Kit" de Promega y para poder realizar la extracción de DNA en el interior de los filtros Sterivex de Millipore de 0.22 µm, se modificó el protocolo de lisis celular de la siguiente manera:

Se añadieron 600 µl de la solución de lisis nuclear (nuclei lisis solution) a los filtros Sterivex, se cubrieron con parafilm ambos extremos de cada filtro y se colocaron dentro de un horno de hibridación con carrusel UVP HL-2000 HybriLinker, a una temperatura de 80°C, durante 10 minutos. Posteriormente, se enfriaron hasta temperatura ambiente (23°C) y el líquido contenido en cada filtro se traspasó a tubos de 1.5 ml con ayuda de una jeringa. Se les añadieron 3 µl de "RNase Solution Mix" y se mantuvieron a 37°C durante 30 minutos en una incubadora SHEL LAB Modelo 1510E. Una vez transcurrido el tiempo de incubación, se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se añadieron 200 µl de la solución precipitadora de proteínas del kit (Protein Precipitation Solution), se mezclaron mediante vórtex (IKA Works Modelo MS1-S1) y se incubaron en hielo durante 5 minutos.

Después, los tubos se centrifugaron a 13000 rpm, durante 3 minutos en una microcentrífuga Eppendorf, modelo 5414D. Se transfirió el sobrenadante a un tubo de 1.5 ml que contenía 600 µl de isopropanol a temperatura ambiente y se mezcló levemente. De nuevo se centrifugaron a 13000 rpm durante 2 minutos, pero esta vez

se descartó el sobrenadante. Se añadieron 600 µl de etanol al 70% a temperatura ambiente y se mezcló levemente, después se volvieron a centrifugar a 13000 rpm durante 2 minutos y el etanol se aspiró con una micropipeta. El pellet de DNA se dejó secar durante toda la noche y a la mañana siguiente fue rehidratado con 80 µl de agua libre de nucleasas. Cada muestra fue congelada y mantenida a -20°C.

Una vez que las muestras se rehidrataron durante mínimo 24 horas, se les midió la concentración de DNA mediante un espectrofotómetro GE Nanovue 28924403 y posteriormente, todas las muestras fueron ajustadas con agua libre de nucleasas para alcanzar una concentración final de 2-3 ng/µl de DNA.

3. Extracción de DNA bacteriano de las muestras de sedimento marino

Para la extracción de DNA se utilizó el "UltraClean Soil DNA Isolation Kit" de MoBio. Se añadieron 60 µl de Solución S1 y se mezcló por vortex, se añadieron 200 µl de Solución removedora de Inhibidores IRS y se colocaron en vortex por 10 minutos con las cuentas de vidrio. Una vez transcurrido el tiempo, se transfirió el sobrenadante a un tubo limpio y se le añadieron 250 µl de la Solución S2, se colocaron en el vortex durante 5 segundos y se incubaron a 4°C durante 5 minutos para después centrifugarlos a 10,000 x g. Se transfirieron 450 µl del sobrenadante a un tubo limpio y se añadieron 900 µl de Solución S3 y se colocaron en el vortex durante 5 segundos. Se tomaron 700 µl de la solución, se colocaron en el filtro y se centrifugó por 1 min a 10,000 x g. Se añadieron 300 µl de la solución S4 y se centrifugó por 30 segundos, se desechó el liquido y se volvió a centrifugar el filtro a 10,000 x g por 1 minuto. Se colocó el filtro en un tubo nuevo y se añadieron 50 µl de agua libre de nucleasas y se centrifugó a 10,000 x g durante 30 segundos. Las muestras se almacenaron a -20 °C.

4. Estandarización de las amplificaciones de DNA por RT-PCR

Para poder llevar a cabo la amplificación del DNA bacteriano por RT-PCR, fue necesario estandarizar la concentración de DNA y de los oligonucleótidos. Se utilizó como estándar para pruebas una muestra de 2 L de agua de mar proveniente de la costa de Ensenada, BC, la cual fue filtrada del mismo modo que a bordo del barco en un filtro Sterivex. Se le extrajo el DNA con la finalidad de simular una de las muestras, sin desperdiciar ninguna muestra de las originales en las pruebas de estandarización.

Se midió la concentración de DNA de la muestra utilizada como estándar, por medio del espectrofotómetro GE Nanovue, empleando una longitud de onda de 230 nm. Se prepararon 5 diluciones de la muestra: 1 ng, 0.1 ng, 0.01 ng, 0.001ng y 0.0001 ng de DNA, cada una de las cuales fue utilizada por triplicado para llevar a cabo reacciones de amplificación de DNA por medio de la técnica de RT-PCR en un StepOnePlus de Applied Biosystems. Posteriormente, se calculó la concentración de DNA en cada una de las muestras estándar con la siguiente fórmula (1) obtenida mediante la ecuación de la recta en el programa de cómputo MatLab (Figura 68).

(1) Concentración de DNA en la muestra= 9.7654E+31*VALOR (CT)^-21.849



Figura 68. Amplificaciones de las diluciones del DNA de proteobacterias de la muestra estándar por triplicado, obtenidas mediante RT-PCR, utilizadas para determinar la concentración de DNA de cada dilución, por medio de la aplicación de la ecuación de la recta.

5. Amplificaciones de DNA de los grupos bacterianos por RT-PCR

Las amplificaciones de DNA de cada grupo bacteriano se llevaron a cabo mediante RT-PCR en placas ópticas de 96 pozos MicroAmp de Applied Biosystems, utilizando 5 µl del reactivo Fast SYBR Green Master Mix, también de Applied Biosystems, 0.3 µl de cada oligonucleótido a una concentración de 20 µM y una concentración de 10 ng de DNA de muestra por cada reacción. Después, cada placa fue centrifugada en una Multifuge 1S-R de Heraeus durante 2 minutos a 4400 rpm, a 23°C y finalmente colocada en el RT-PCR para realizar la reacción de amplificación del DNA.

Las condiciones de amplificación, consistieron en una desnaturalización inicial a 95°C durante 5 minutos y 50 ciclos de 95°C por 30 segundos, 55°C por 1.5 minutos y 72°C por 1 minuto.

Métodos de Análisis

1. Grupos bacterianos presentes en la columna de agua

Para identificar los grupos bacterianos que estuvieron presentes en las muestras de la columna de agua del Golfo de México, el valor de CT obtenido de cada una de las muestras, se sustituyó en la fórmula 1 para calcular la concentración de DNA.

En la primer parte, se normalizaron y graficaron las concentraciones de DNA de las 4 subclases de proteobacterias (alfa, beta, gamma y delta). En la segunda parte, las concentraciones de DNA de los dominios Eubacteria y Archaeabacteria se normalizaron y se graficaron. Finalmente, en la tercer parte, se normalizaron, graficaron y compararon las concentraciones de DNA del gen de la alcano monooxigenasa de las bacterias hidrocarbonoclásticas y el DNA de las bacterias del género *Vibrio*, para determinar si existía una relación entre ellas.

2. Grupos bacterianos presentes en el sedimento marino

Para determinar qué grupos bacterianos están presentes en el sedimento marino del Golfo de México, los valores de CT de cada una de las muestras de sedimento también fueron sustituidos en la fórmula 1. Sin embargo, se analizaron diferente que en el caso de las muestras de agua, ya que en este caso, las concentraciones de DNA de todas las estaciones se normalizaron y graficaron juntas. Únicamente en estas muestras se amplificó DNA mediante los oligonucleótidos diseñados específicamente para detectar a la subclase Deltaproteobacterias y la Clase Proteobacteria.

Resultados

Una vez realizadas las amplificaciones de DNA de cada una de las estaciones a las diferentes profundidades, se procedió a determinar la cantidad de DNA de cada uno de los grupos analizados, tal como se menciona en métodos de laboratorio y de análisis.

Se analizaron todas las profundidades recolectadas. Durante el proceso de análisis, observamos que las muestras que se encontraban por encima de 150 m, contenían algún inhibidor de la reacción de amplificación del material genético, por lo que se decidió solo trabajar con las profundidades de 150 m a 3000 m. Sin embargo, para fines del texto de este informe y simplificar la presentación de los resultados, se decidió graficar solo tres profundidades: 400, 1200 y 2000 m. En esta sección se muestran solo resultados representativos. Sin embargo, en archivos anexos a este documento se pueden encontrar todas las gráficas y los datos empleados para la generación de las mismas.

Se seleccionó la profundidad de 400 m debido a que esta pertenece a la zona mínima de oxigeno y por lo tanto es una zona de un alto nivel de actividad biológica. La profundidad de 1200 m fue seleccionada debido a que es muy cercana a la profundidad en la cual se registró el derrame del pozo Macondo y la profundidad de 2000 m se seleccionó debido a que de existir emanaciones naturales de petróleo en el fondo del Golfo de México, la comunidad bacteriana podría verse afectada por este fenómeno natural.

Identificación de Eubacterias y Arqueobacterias

Como se mencionó en la introducción, dentro de los procariontes encontramos a las Eubacterias y a las Arqueobacterias, por lo que para cada una de las estaciones se calculó el porcentaje de cada uno de estos grupos con respecto al otro. De la misma manera, dentro de las proteobacterias se determinó el porcentaje de las alfa, beta, gama y delta bacterias a diferentes profundidades.

Como era de esperarse, las Arqueobacterias predominan sobre las Eubacterias en el ambiente marino de el Golfo de México; en el 72.34% de las estaciones analizadas, las Arqueobacterias representan un porcentaje de abundancia relativa arriba del 65% (

).





Figura 69. Las gráficas presentes en esta figura de columna de agua nos representan el comportamiento observado en la mayoría de las estaciones analizada, en donde predominan las Arqueobacterias sobre las Eubacterias.

Las gráficas anteriores representan el comportamiento observado en la mayoría de las estaciones analizadas, en donde predominan las Arqueobacterias sobre las Eubacterias. Sin embargo, en algunos casos, se observó un comportamiento no esperado en las cuales predominaron las bacterias del tipo Eubacteria (Figura 70).



Figura 70. En las gráficas observadas en esta figura, se observa un comportamiento no esperado respecto a la relación y presencia de Archeobacterias respecto a las Eubacterias, en estos ejemplos predominaron las bacterias del tipo Eubacteria.

Desafortunadamente para el proyecto, no fue posible colectar muestras de agua profunda (> 1000m) en todas las estaciones, ya que algunas estaciones mostraron un patrón interesante. Conforme aumentaba la profundidad, se iba incrementando el porcentaje de Eubacterias con respecto a las Arqueobacterias. Este dato es de suma importancia, ya que dentro del grupo de las Eubacterias se encuentran las bacterias degradadoras del petróleo. Un dato adicional a tomar en cuenta, es que en las estaciones donde se observó este patrón, se tiene reportado la localización de emanaciones naturales de petróleo (Tunnell 2011). En particular, las estaciones donde se observó este fenómeno son la E3B, E20, E21, E22, E38, E40 y E43. A continuación se muestran dos estaciones como ejemplo (Figura 71):



Figura 71. En esta figura podemos observar el ejemplo de dos estaciones; a) que es la estación 20, y b) que es la estación 40. En ambos casos es claro que al irse incrementando la profundidad de las muestras, la cantidad de las Eubacterias se va incrementando, miestras que las Archeobacterias va disminuyendo conforme se incrementa la profundidad.

Cabe aclarar que aún cuando en la profundidad de 400 m en la E40 se observa un 100% de Arqueobacterias y 0% de Eubacterias, este dato no es preciso, ya que el programa empleado para graficar no emplea décimas ni centésimas y redondea el valor. Aunque hubo una abundancia relativa muy baja de Eubacterias en esa profundidad, ese grupo de bacterias no estuvieron completamente ausentes. Un dato totalmente atípico se presentó en E36 (Figura 72).





Figura 72. En esta figura se observa como en todas las profundidades predomina en su gran mayoría la presencia de las Eubacteria sobre las Archeobacterias, esto en las profundidades de: 400, 1200 y 2000 m.

La E36 se encuentra en la boca del Cañón de Campeche, que es una zona conocida por emanaciones naturales de petróleo.

Identificación de Alfa, Beta, Gama y Delta Proteobacterias

Dentro de los diferentes grupos que conforman a las proteobacterias, se pueden encontrar géneros con capacidad para degradar los hidrocarburos provenientes del petróleo, específicamente en los grupos gama y delta, por lo que en caso de encontrar la presencia de petróleo en alguna de las muestras, se podría esperar que estos dos grupos incrementen su abundancia.

A diferencia de la sección anterior, en la cual se esperaba que las Arqueobacterias predominaran en las diferentes estaciones, para esta sección no se podía predecir cual de los grupos predominaría. Esto se debe a que no existe en la literatura un reporte de cuál de estos grupos es el que predomina en aguas marinas. Como puede apreciarse en las diferentes gráficas que se presentan a continuación, los grupos alfa y beta son los que se encuentraron en mayor proporción en la mayoría de las estaciones y profundidades analizadas.

Las bacterias del grupo beta fueron predominantes en el 60% de las estaciones analizadas (Figura 73).



Figura 73. En esta figura se muestran algunos ejemplos de las estaciones en donde predominaron las proteobacterias del grupo de las Beta, que fueron las más abundantes en todas las estaciones, ya que fueron mayoría en el 60% de las muestras colectadas. Esto después de analizar todas las estaciones y todas las profundidades

En relación a las bacterias del grupo de las alfa, en un 29% de las estaciones predominaron las proteobacterias del grupo alfa (Figura 74).



Figura 74. En esta figura se observan algunos ejemplos de estaciones y profundidades donde predominaron las proteobacterias del grupo alfa, que fue mucho menor en dominancia respecto a las beta, ya que las alfa solo fuern mayoría en el 29% de las estaciones.

El grupo de las gama solo pudo detectarse con absoluta mayoría en la estación 30 (Figura 75).



Figura 75. Esta figura muestra la única estación donde el las proteobacterias del grupo gamma fueron dominantes respecto a los otros grupos de proteobacterias. Solo la estación 30 mostró este comportamiento.

En varias de las estaciones y profundidades, se pudo detectar la presencia de los cuatro grupos en proporciones similares (Figura 76).





Figura 76. Esta figura nos muestra como en varias estaciones y profundidades se encontraron los 4 grupos analizados en proporciones similares, sin embargo, el grupo de las deltas es un poco mayor su presencia en las estaciones E24 y E33 de esta misma figura.

Identificación de Vibrio spp y bacterias hidrocarbonoclásticas

Dentro de las gamma proteobacterias podemos encontrar al género *Vibrio*, al cual se le ha atribuido la capacidad de degradar hidrocarburos. A continuación se muestran algunos ejemplos de estaciones profundas en aguas del Golfo de México en las que se puede observar una relación directa en la presencia de del género *Vibrio* y organismos que tienen la capacidad de degradar hidrocarburos (bacterias hidrocarbonoclasticas) (Figura 77).



Figura 77. Abundancia relativa del género Vibrio y bacterias hidrocarbonoclásticas.
Sedimentos

Una vez analizados los resultados de presencia de los diferentes grupos de bacterias marinas en sedimentos de alta profundidad, observamos que su presencia es baja en las diferentes estaciones, como por ejemplo las estaciones E3, E15 y E19. Estas tres estaciones no se encuentran sobre zonas reportadas con emanación natural de hidrocarburos. Suponemos que la baja presencia de bacterias es debido a la escases de nutrientes que podríamos identificar en estas regiones. Esto no necesariamente debe de coincidir con la presencia de bacterias en la columna de agua de estas mismas estaciones, ya que en la columna de agua existen corrientes que pueden transportar nutrientes a grandes distancias, por lo que podríamos encontrar una gran cantidad de bacterias en zonas de la columna de agua, sin que este sea el caso para el sedimento de una misma estación.

Por otro lado, tenemos sedimentos con gran cantidad de bacterias, tanto en la cantidad per se, como en variedad, este ejemplo podemos observarlo en las estaciones E35 y E40. La localización de estas estaciones está en la zona de emanación natural de hidrocarburos (Tunnell 2011), y por otro lado, también están relativamente cerca de la zona de explotación petrolera de nuestro país. Por otra parte, se encuentran sobre el talud continental, lo que podría favorecer que lleguen nutrientes de zonas más someras, y por consiguiente, que la diversidad bacteriana se incremente considerablemente. Esto puede apreciarse en la figura (Figura 78).



Figura 78. Representación gráfica de la cantidad de ADN de los diferentes grupos bacterianos en las muestras de sedimento. Como puede apreciarse, en la estación 35 y en la estación 40 es donde se ve más enriquecida la presencia de todos los grupos bacterianos; estas dos estaciones están reportadas como zonas cercanas a emanaciones naturales de petróleo.

En esta sección se muestran solo los resultados representativos de lo que se ha comentado, sin embargo, en archivos anexos a este documento se pueden encontrar todas las gráficas y los datos empleados para su generación (Anexo 8).

Conclusiones

El análisis de las muestras de columna de agua para la identificación de los diferentes grupos bacterianos, nos permitió determinar que en la gran mayoría de los puntos analizados predominan las Arqueobacterias. Es interesante notar que para algunas estaciones, la presencia de Arqueobacterias es mutuamente excluyente con la

presencia de las Eubacterias; esto puede ser observado claramente en las estaciones E16 (400 y 1200 m), E13 (400 m), E10 (2000 m) y E9 (400 m). Esto no se observó solo en estas estaciones, y el común denominador es que estas no se encuentran cerca de ninguna emanación natural de petróleo reportada hasta el momento. Sin embargo, si observamos las estaciones que se encuentran cerca de alguna emanación natural de petróleo, podemos ver que existe una relación más equitativa entre la presencia de estos dos grupos (Arqueobacterias y Eubacterias). esto puede ser observado a través de todo el paralelo 25N, donde se encuentra una gran cantidad de emanaciones naturales de petróleo (Tunnell, 2011).

En relación a los grupos alfa, beta, gama y delta pertenecientes a las Eubacterias, podemos observar que los grupos predominantes en las diferentes estaciones de aguas profundas son las alfas y las beta, seguidos por las gama y delta. Las bacterias pertenecientes a los grupos alfa y beta no son degradadoras de hidrocarburos, a diferencia de las bacterias de los grupos gamma y delta. Dentro del grupo de las gamma, se encuentran las bacterias del genero *Vibrio*, al cual algunos autores han atribuido la capacidad de degradación de petróleo. Por otra parte, en el grupo de las bacterias delta que son predominantemente aeróbicas, existe un grupo anaerobio que contiene la mayor parte de las bacterias degradadoras de sulfatos, o reductoras de azufre, por lo cual, es de esperarse un incremento de este grupo ante una posible emanación de hidrocarburos.

Es evidente que ciertos grupos de bacterias pueden verse favorecidos ante la presencia de hidrocaburos del petróleo. Sin embargo, en este momento no es posible determinar, solo con base en resultados bacteriológicos, si su presencia es debido a emanaciones naturales de petróleo de estas zonas, o si es debido a la presencia de petróleo proveniente del pozo Macondo.

En relación a las bacterias del genero *Vibrio* y a las bacterias que poseen genes codificantes de proteínas con capacidad para degradar el petróleo, encontramos una correlación directa entre estos dos tipos de bacterias. Esto se puede observar en las estaciones de la 16 a la 22, en todas estas estaciones se detectó la presencia de bacterias del genero *Vibrio* y de bacterias con capacidad para degradar el petróleo en profundidades comprendidas entre los 1200 y 2500 m de profundidad.

Como lo hemos manifestado anteriormente, basados en el mapa de distribución de emanaciones naturales en el Golfo de México reportado por Tunnell (2011), el incremento de la presencia de estas bacterias en la columna de agua, sí tiene una correlación directa con los puntos reportados por Tunnell. Sin embargo, se documentó la presencia de bacterias del género *Vibrio* e hidrocarbonoclasticas aun en donde no se han reportado emanaciones naturales. Sin embargo, estas estaciones son aledañas a las estaciones donde si existe reporte de emanación. Un ejemplo de esto son las estaciones E3B y E12. Existen reportes de emanación natural cerca de la estación E12 aunque no es el caso para E3B. Sin embargo, en ambas se observa el mismo comportamiento de la presencia de bacterias del género *Vibrio* e hidrocarbonoclasticas

en masas de agua profundas. Esto puede deberse a dos cosas: existe una emanación natural no reportada cerca a la E3B, o bien, las corrientes profundas son las causantes de el arrastre de petróleo (de origen desconocido) de la estación E12 a la E3B.

Es de observarse que si bien, en la mayoría de las estaciones es proporcional el incremento de bacterias hidrocarbonoclásticas con respecto a las del género *Vibrio*, esto no sucede en todas las estaciones, como por ejemplo E34, E29, E24, E23 y E21 por citar algunos ejemplos. Esto es indicativo que si bien es posible que las bacterias del genero *Vibrio* pueden jugar un papel importante en la degradación del petróleo, no son el único grupo con esta capacidad intrínseca.

Recomendaciones

Una vez que se han analizado los resultados de este trabajo, se hacen las siguientes recomendaciones:

Realizar dos cruceros al año por lo menos en los próximos cinco años.

Tomar muestras de aguas profundas en todas las estaciones, no muestrear solo en aguas superficiales (por arriba de 1000m), porque se pierde información valiosa.

Incrementar el volumen de agua de cada profundidad para poder aislar una mayor cantidad de DNA y que no sea un factor limitante para la identificación de los grupos bacterianos.

Ampliar el abanico de genes analizados.

Implementar la pirosecuenciación con el fin de poder llegar al genero de las bacterias analizadas e incluso a la especie.

Referencias

- Kato S y Watanabe K (2009) Analysis of gene transcripts in a crude oil degrading marine microbial community. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry 73:1665-1668.
- Kuhn E, Bellicanta GS y Pellizari VH (2009) New *alk* genes detected in Antartic marine sediments. Environmental MIcrobiology 11(3): 669-673.
- Liu Y, Yang G, Wang H, Chen J, Shi X, Zou G, Wei Q y Sun X (2006) Design of *Vibrio* 16S rRNA gene specific primers and their application in the analysis of seawater *Vibrio* community. Journal of Ocean University of China, Oceanic and coastal sea research 5(2): 157-164.
- Liu YJ, Chen YP, Jin PK y Wang XC (2009). Bacterial communities in a crude oil

gathering and transferring system (China). Anaerobe 15:214-218.

- Lizárraga-Partida ML (1996) Microbiología del petróleo en el sur del Golfo de México. En: Botello AV, Rojas-Galaviz JL, Benítez JA y Zárate-Lomelí D (eds) Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX Serie Científica 5. 666 pp.
- Nature Editorial (2010) Oil spills: microorganisms to the rescue. Nature Reviews Microbiology 8:462-462.
- NCBI (2011) Consultada el 7 de febrero. http://www.ncbi.nlm.nih.gov
- Pérez-de-Mora A, Schulz S y Schloter M (2010) MPN-and real-time-based PCR methods for the quantifications of alkane monooxygenase homologous genes (*alkB*) in environmental samples. Bioremediation, Methods in molecular biology. Ed. S. P. Cummings. Capítulo 4, 59-68 p.
- Rosano-Hernández MC, Fernández-Linares LC y Xoconostle-Cáceres B (2009) Bacterial diversity of marine seeps in the southeastern Gulf of Mexico. Pakistan Journal of Biological Sciences 12(9):683-689.

Seth-Smith H (2010) "Slick" operation. Nature 8:538-538 p.

- Tunnell JW Jr, 2011. An Expert opinion of when the Gulf of Mexico will return to pre-spill harvest status following the BP Deepwater Horizon MC 252 oil spill. Corpus Christi (Texas): Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University.
- Vila J, Nieto JM, Mertens J, Springeal D y Grifoll M (2010). Microbial community structure of a heavy fuel oil-degrading marine consortium: linking microbial dynamics with polycyclic aromatic hidrocarbon utilization. FEMS Microbiology Ecology 73(2):349-362.
- Wang L, Wang W, Lai Q y Shao Z (2010) Gene diversity of CYP153A and AlkB alkane hydroxylases in oil-degrading bacteria isolated from the Atlantic Ocean. Environmental Microbiology 12(5):1230-1242.
- ZrafiNouira I, Guermazi S, Chouari R, Safi NMD, Pelletier E, Bakhrouf A, Saidane-Mosbahi D y Sghir A (2009) Molecular diversity analysis and bacterial population dynamics of an adapted seawater microbiota during the degradation of Tunisian zarzatine oil. Biodegradation 20:467-486.

FITOPLANCTON

(Dr. Ruben Lara Lara)

Antecedentes

El fitoplancton se encuentra en la base de la cadena alimentaria de los sistemas acuáticos, ya que sirve de alimento. Realiza la mayor parte de la producción primaria en los ambientes acuáticos. Debido a la rápida adaptación de las células, las poblaciones de fitoplancton pueden aumentar o disminuir según los cambios en el ambiente de una manera rápida. Esto las convierte en un grupo de interés para muchas áreas de investigación ya que nos brindan información que nos indica las condiciones cambiantes ambientales, ecológicas y biogeoquímicas de océano.

La contaminación marina por el petróleo y sus derivados ha despertado un gran interés de la comunidad científica, especialmente después de los grandes derrames petroleros, como los del "Torrey Canyon" en Inglaterra, el del "Tampico Maru" sobre las costas de Baja California, el del "Amoco Cádiz" en la costa de Bretaña,Francia en 1978, y el del Pozo Ixtoc-1 en el Golfo de México, de varias miles de toneladas de petróleo crudo, por mencionar solo algunos.

México, al ser un país con un alto grado de desarrollo en la industria y explotación de sus recursos petroleros, es susceptible a un evento de baja probabilidad pero de alto riesgo como lo es un derrame de gran escala. Es obvio que el impacto de los derrames en el mar es muy variable, y que la zona costera, con su gran productividad, es la más severamente dañada durante un derrame de petróleo. Por lo tanto, la evaluación posterior a los grandes derrames o accidentes petroleros es una tarea imperativa y es solo con base en estas como puede medirse la magnitud real del accidente y sus efectos posteriores sobre la biota marina, tanto a corto como a mediano y largo plazo (NAS 1975, FAO 1977, Gross and Healy, 1979).

Para el Golfo de México (GM) existe muy poca información previa sobre estudios taxonómicos sobre el fitoplancton, por lo que hasta el momento, no existe un catálogo de organismos, en particular para aguas oceánicas. La parte costera sur del GM está ligeramente más estudiada con respecto a la parte oceánica. Existe una base de datos de los grupos de dinoflagelados y diatomeas en la zona costera desarrollada por Licea (2006). Sin embargo, la carencia de un listado de especies para el GM no nos permite realizar estudios comparativos entre el pasado y el presente, sobre todo para evaluar las posibles consecuencias (cambios en las abundancias y riqueza de especies, por ejemplo) que se hayan podido producir como consecuencia del derrame de petróleo que ocurrió en el 2010.

En este proyecto se desarrolló una base de datos de los grupos de las diatomeas (Bacillariophyceae) y dinoflagelados (Dinophyceae) planctónicos del Golfo de México. Las estaciones corresponden a recolectas realizadas a bordo del BO Justo Sierra en

la región profunda del Golfo de México durante el crucero realizado del 6 al 22 de noviembre del 2010 (Figura 16).

Objetivos

Caracterizar la composición específica del fitoplancton del Golfo de México durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 efectuada del 6 al 22 de noviembre del 2010.

Objetivos particulares:

Determinar la abundancia y distribución espacial de las poblaciones de fitoplancton del Golfo de México.

Describir la composición específica, distribución y abundancia de dinoflagelados y diatomeas en 47 estaciones de la zona de aguas profundas del Golfo de México.

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

Realizar mapas de distribución espacial de dinoflagelados y diatomeas.

Metodología

Se muestrearon 45 estaciones donde se colectaron 112 muestras, tomando la muestra en una botellas de plástico de color ámbar de 125ml directamente de botellas Niskin de 10 litros o de la superficie (10m). Como la recolección de las muestras no fue a la misma profundidad en todas las estaciones con el fin de recolectar muestras en diferentes profundidades de la columna de agua, se especifican las estaciones y las profundidades en las cuales se recolectaron las muestras en la

Línea de base de aguas profundas del Golfo de México

Tabla 14. Profundidades en las cuales se tomaron muestras de agua para el análisis de la composición específica de diatomeas y dinoflagelados de la zona profunda del Golfo de México. En algunas estaciones se recolectaron muestras a varias profundidades.

PROFUNDIDAD	ESTACIÓN
0m	E2,E13,E15, E16,E17, E20,E21,E23,E24,E27
10m	E2,E13,E15,E16,E17,E20,E21,E23,E24,E27,E30,E31,E32,
	E8,E10,E11,E12,E3,E6,E44,E33,E47,E7,E5,E4,E3,
	E9,E38,E37,E36,E42,E41,E45,E46.
20m	E1,E2,E13,E27
50m	E1,E2,E13,E15,E16,E17,E20,E21,E23,E24,E27,E30,E31,
	E32,E8,E10,E11,E12,E3,E6,E33,E47,E7,
	E5,E39,E38,E37,E36,E42,E41,E45
100m	E1,E2, E13,E27
150m	E1,E2,E15,E16,E17,E18

Las muestras de agua se guardaron en botellas de plástico oscuras Nalgene sin llenar completamente (90%) para permitir la homogeneización posterior de la muestra. 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 (Throndsen 1978). Todas las muestras fueron etiquetadas con un código de la muestra, un código de su procedencia (localización), fecha de recolección, fijador utilizado y persona o entidad a cargo de la recolección e identificación. El código de la muestra servirá de enlace con la base de datos. Es importante indicar el tipo de muestra y el método de recolección (por ejemplo: Discreta/Botella hidrográfica/10 m de profundidad). Las muestras se mantuvieron a temperatura ambiente y en oscuridad hasta su análisis en el laboratorio del CICESE.

Homogeneización de la muestra

La homogenización de la muestra tiene como fin la resuspensión y separación de las partículas. Esto puede hacerse manualmente o preferiblemente con un dispositivo de mezcla. Para estandarizar en lo posible la homogenización manual se recomienda que la manipulación la realice una sola persona, combinando giros horizontales y verticales de la botella durante 1 a 3 minutos.

Preparación de submuestras

Se llenó la cámara de sedimentación con la muestra. El volumen de la muestra que se utiliza depende de la densidad de fitoplancton. En este caso utilizamos cámaras de sedimentación de 10 o 50 ml. No obstante, como la cámara se ha de llenar en su totalidad para asegurar que la sedimentación de diferentes muestras se lleven a cabo bajo condiciones similares, en algunos casos se tuvo que añadir agua filtrada (0.45 µm de poro). 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. Durante este proceso la muestra se situó sobre una superficie (mesa) bien nivelada, de modo que la sedimentación se produjo de forma homogénea sobre toda la placa. El tiempo de sedimentación recomendado es de 1-4 horas por centímetro de columna de sedimentación para las muestras fijadas con Lugol.

La cámara de sedimentación se limpió entre usos con agua,ódetergente y etanol (90%), alcohol desnaturalizado cemercial, isopropanol o acetona, y se lavó al final con agua destilada.

Metodos de análisis

El análisis cuantitativo de la comunidad fitoplanctónica se realizó por el método de Utermöhl (1958) utilizando un microscopio invertido Olympus CK-2. Se utilizaron cámaras de sedimentación de 10 y 50 ml considerando un tiempo de sedimentación de 3 horas por cada centímetro de altura de la cámara (Margalef 1969, Tabla 15). Este análisis se debe comenzar con la cuantificación de las células en toda la cámara inferior usando un nivel de aumento bajo. Esto ayuda a dar una visión general de la densidad y distribución del fitoplancton. Si la distribución se considera irregular la muestra debe ser descartada. Durante esta exploración también es conveniente hacer una lista preliminar de especies que puede ayudar a seleccionar la estrategia de cuantificación a implementar.

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

Tabla 15. Recomendaciones para el tiempo de sedimentación para las muestras preservadas con lugol (Edler 1979).

En este trabajo se observó una baja densidad de fitplancton. 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. En la rejilla de uno de los oculares hay una cuadrícula compuesta por dos líneas paralelas horizontales que forman un transecto (también es recomendado disponer de otra línea vertical en el centro). El método consiste en ir moviendo la cámara de arriba-abajo e izquierda-derecha, y viceversa, a la vez que se cuentan los individuos que queden entre las dos líneas de la rejilla del ocular; solo se cuentan cuando se encuentran entre las líneas. Se comenzó a contar las células con el objetivo

más bajo, seguido por el un objetivo con mayor aumento. Para lograr una comparación adecuada entre muestras, es importante hacer los conteos de cada especie específica siempre con los mismos niveles de aumento. En nuestro caso se empezó el conteo con el objetivo 10x y se aumentó al objetivo 20x (Tabla 16).

Es importante mencionar que algunas especies son fáciles de identificar, como el dinoflagelado *Lingulodinium polyedrum*. Sin embargo, las especies más pequeñas se deben de cuantificar con objetivos de mayor magnificación (1000x), como por ejemplo el picoplancton integrado por pequeñas cianobacterias, microalgas autótrofas y heterótrofas, pequeños flagelados (verdes e incoloros) y el bacterioplancton (incluyendo las bacterias fotosintéticas). Por su tamaño, las células pequeñas no se pudieron cuantificar usando el método de Utermöhl. No obstante, hay que reconocer que el picoplancton tiene gran importancia ecológica y funcional en los ecosistemas acuáticos, particularmente en sistemas oligotróficos. En este informe solo se reportan los grupos fitoplanctónicos de diatomeas y dinoflagelados, y no se incluye el grupo del picoplancton ni el de los cocolitofóridos.

Tabla 16. Recomendación del objetivo para cuantificar en número de céluas de 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

La precisión en los conteos del número de células generalmente se expresa como el límite de confianza del 95% en relación a la proporción de la media (Figura 79). Se evalúa la relación entre el número de unidades contadas y la precisión. En muchos estudios se considera que el conteo de 50 unidades de la especie dominante es aceptable para tener el 28%. Aumentar la precisión de por ejemplo, un 20 ó 10% implica la necesidad de un aumento dramático en las unidades de contado, 100 y 400 respectivamente (Edler, 1979).



Figura 79. Gráfica sobre el límite de confianza (%) por número de células contadas.

La precisión es dada por la siguiente ecuación:



Algunas especies de fitoplancton, no fueron lo suficientemente abundantes para contar con 50 células dentro de la muestra por lo que disminuye la precisión. Para contar con una precisión aceptable del total de la muestra se requiere contar al menos 500 células (Edler, 1979).

En este estudio, para el 84% de las muestras se contaron por lo menos 500 células y por lo tanto se cuenta con una precisión aceptable del 28%. El 16% restante no contó con una precisión aceptable ya que hubo menos de 500 células por muestra.

Materiales de referencia para la identificación de grupos de fitoplancton

Dentro de la literatura general y mundial con la cual se cuenta, hay guías taxonómicas para la identificación de diatomeas, dinoflagelados, cianobacterias, clorofíceas, etc. Como se describió anteriormente, no se contó con un microscopio con suficiente aumento como para identificar especies de fitoplancton pequeñas, por lo que solo se reporta la presencia del grupo de diatomeas y dinoflagelados. La identificación de estas células se hizo hasta nivel de género y en algunos casos hasta especie siguiendo la guía taxonómica de Tomas (1997), y las guías de identificación de diatomeas y dinoflagelados para la región sur del Golfo de México 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

En el presente trabajo se reportan los resultados de abundancia y diversidad de las diatomeas y dinoflagelados recolectados en una red de estaciones de muestreo que cubrió gran parte de la zona de aguas profundas del Golfo de México.

Identificación de taxones

Al caracterizar la composición fitoplanctónica del grupo de las diatomeas, se identificaron un total de 81 taxones recolectados en el Golfo de México durante el crucero XIXIMI-1 en noviembre del 2010 (Tabla 17). Se identificaron 18 géneros, estos constituyen el 44% del total de géneros identificados en este estudio. Dentro de las diatomeas, los que presentaron una mayor abundancia de células fueron del grupo de las diatomeas penadas (p. ej., *Navícula*, *Nitzschia*), seguidas por las céntricas (*Coscinodiscus sp*).

En cuanto a los dinoflagelados, se identificaron 52 especies pertenecientes a 23 géneros (56 % del total de géneros identificados de diatomeas y dinoflagelados). Destacan por su abundancia y diversidad los géneros *Gymnodinium* sp. y *Ceratium* sp. Dentro de este último género se identificaron 13 especies Tabla 17. Clasificación taxonómica del grupo de diatomeas recolectadas en el Golfo de México durante el crucero XIXIMI-1 (6 al 22 de Noviembre 2010).

La abundancia total (todas las células que se contaron en el estudio) del grupo de los dinoflagelados fue más baja (49960 cel/L) que las del grupo de las diatomeas (61500 cel/L). El 55% del total de células fueron diatomeas y 45% dinoflagelados (Figura 80).

DIVISIÓN	CLASE	ORDEN	FAMILIA	ESPECIES	
		Centrales	Thalassiosiraceae	Thalassiosira sp.	
			Coscinodiscaceae	Coscinodiscus sp.	
			Biddulphyaceae	Bidulphia sp.	
			Chaetoceraceae	Chaetoceros sp.	
				Synedra sp	
			Fragilariaceae	Thalassionema nitzschioides var. Lanceolata	
D	ae			Gyrosigma sp.	
J A	/ce		Naviculaceae	Navicula sp.	
do	(hc			Navicula directa	
ario	loi	Pennales		Pleurosigma sp.	
cill	Bacillar		Nitzschiaceae	Cylindrotheca closterium	
Ba				Nitzschia sp.	
				Nitzschia longissima	
				Pseudo-nitzschia sp	
			Asterolampraceae	Azterolampra sp.	
			Rhizosoleniaceae	Guinardia sp	
				Rhizosolenia sp	
			Hemiaulaceae	Eucampia sp	
			Stellarimaceae	Azpetia sp	

Tabla 17. Clasificación taxonómica del grupo de diatomeas recolectadas en el Golfo de México durante el crucero XIXIMI-1 (6 al 22 de Noviembre 2010).

Tabla 18. Clasificación taxonómica del grupo dinoflagelados recolectados en el Golfo de México durante el crucero XIXIMI-1 (6 al 22 de noviembre 2010). (*) Quiste de reposo y temporal.

DIVISIÓN	CLASE	ORDEN	FAMILIA	ESPECIES	
Desmophyceae		smophyceae Prorocentrales Prorocentracea		Prorocentrum gracile Prorocentrum mican Prorocentrum triestinum Prorocentrum sp	
		0 inophysiales	Dinophysiaceae	Dinophysis acuta Dinophysis acuminata Dinophysis rotundata Dinophysis sp. Ornithicerus sp Phalacroma rotundatum	
			Oxyphysaceae	Oxyphysis oxitoxoides	
			Gonyaulacaceae	Gonyaulax sp. Lingulodinium polyedrum	
Pyrrophyta Dinophyceae	Gonyaulacales	Ceratiaceae	Ceratium belone Ceratium extensum Ceratium dens Ceratium declinatum Ceratium kofoidii Ceratium furca Ceratium fusus Ceratium lineatum Ceratium minutum Ceratium teres Ceratium tripos Ceratium vultur Ceratium penatogonum Ceratium sp.		
	Dinophy	Dinoph Gymnodinoidales	Gymnodiniaceae	Cochlodinium polykrikoides Gymnodinium sp. Gymnodinium catenatum Gymnodinium mikimotoi Gymnodinium sanguineum Gyrodinium lachrima Gyrodinium spirale Gyrodinium fusiforme Gyrodinium sp Karenia sp	
			Polykrikaceae	Polykrikos schwartzii Bolykrikos op	
			Pyrocystaceae	Pyrocystis sp. Pyrocystis sp. Pyrophacus sp	
		eridiniales	ନ୍ତୁ Protoperidiniacead	Protoperidiniaceae	Protoperidinium sp. Protoperidinium depressum
			Peridiniaceae		Heterocapsa sp. Podolampas palmipes
		Ē.	Oxytoxaceae	Centrodinium sp Oxytoxum sp.	
			Calciodinellaceae	Scripsiella trochoidea	
			Ostreopsidadeae	Ostreopsis ovata	

	Noctiluciphyceae	Noctilucales	Noctilucaceae	Noctiluca scintillans
Heterokont ophyta	Raphidophyceae	Raphidomonadales	Heterosigmataceae	Heterosigma sp.
				Dictyocha fibula
Chrypsoph vta	Chrysophyceae	Dictyochales	Dictyochaceae	Dictyocha octonaria
,				Dictyocha staurodon



Figura 80. Gráficas de: a) Número de células contadas b) la diversidad de taxones fitoplancton en el Golfo de México, ambos en porcentajes.

Distribución espacial de los grupos fitoplanctónicos a 10 y 50 m de profundidad

Las estaciones donde se encontraron las más altas abundancias fueron la E20, E21 y E22 a los 10 y 50 m de profundidad para los dinoflagelados, y para el grupo de las diatomeas fueron las E20, E21, E23 y E24.

En la estación E20 a 10 m, se registró la mayor abundancia de dinoflagelados (1320 cel/L) de todas las muestras colectadas, se identifico principalmente el género *Gymnodinium* sp. Las diatomeas en esta estación tuvieron una baja abundancia (520 cel/L) y estuvo compuesta principalmente por individuos del género *Navícula* sp. La estación con mayor abundancia de diatomeas a 10 m fue la E2 con una abundancia de 2,280 cel/L. En esa estación, el género más abundante fue *Navícula* spp, con un total de 1,720 cel/L. Al sumar la abundancia total de diatomeas y dinoflagelados de los 10 y 50 m la estación que tuvo mayor número de células de dinoflagelados fue la E24 y en el caso de las diatomeas la E20. La E20 también fue la estación donde se cuantificó la mayor abundancia de silicoflagelados.

En cuanto a la distribución espacial de los dinoflagelados, a 10 m se presentó poca variación, con excepción de algunas estaciones del paralelo 25ºN, donde se observó una mayor abundancia estandarizada en la parte central y noreste del Golfo de México. En las estaciones E47, E46, E45, E42, E41 y E36, que están localizadas en la región central del golfo, se presentaron abundancias bajas (intervalo de 40-280cel/L). La distribución espacial de las diatomeas a 10 m de profundidad presentó las más altas abundancias en las estaciones E2 (22280 cel/L) y E23 (1360 cel/L). En general, la región noroeste de la zona de estudio presentó las mayores abundancias. La abundancia y composición taxonómica de las diatomeas presentaron variación espacial a 50 m de profundidad (Figura 81), pudiéndose dividir en tres grandes regiones de mayor a menor abundancia: la zona oeste, las estaciones de la Sonda de Campeche y la parte central de la zona de estudio. Considerando la distribución de las diatomeas tanto a los 10 como a los 50 m de profundidad, se observan bien definidas estas tres zonas. La región con mayor influencia a aporte de ríos (la Sonda de Campeche) demuestra una mayor abundancia que la región central del Golfo de México, que es muy oligotrófica.

A los 10 m de profundidad, se presentaron las mayores abundancias del grupo de las diatomeas, registrándose principalmente el género *Navícula* en la estación E20 al borde de la plataforma de Yucatán y en una zona conocida por surgencias. A los 50 m de profundidad se presentaron las mayores abundancias (hasta 3240 cel/L) en la parte noreste del paralelo 25° N.



Figura 81. Distribución espacial de la abundancia: a) dinoflagelados a 10m y b) dinoflagelados a 50 m, c) diatomeas a 10m y d) diatomeas a 50m.

Perfiles horizontales

Se realizaron transectos verticales en cada paralelo para estudiar la distribución de la abundancia de células en función de la profundidad. Se presentan las distribuciones hasta 150 m en las estaciones en las cuales sí se recolectaron muestras a diferentes profundidades (E1, E2, E15, E16, E17 y E18).

Paralelo 25º N

La distribución horizontal y vertical resultante de sumar el número de células de diatomeas y dinoflagelados por L⁻¹ en el paralelo 25°N, presentó un máximo en las

abundancias a los 50 m de profundidad, alcanzando las más altas en la E20 con 3920 cel/L y E21 con 3840 cel/L. Se observó un patrón de mayor a menor abundancia del este hacia oeste (Figura 82). Con respecto a los dos grupos cuya abundancia se cuantificó en este estudio, se observó que los dinoflagelados presentaron una abundancia de < 2000 cel/L y las diatomeas < 3000 cel/L).



Figura 82. Distribución horizontal del fitoplancton (cel/L) con la profundidad (m) en el paralelo 25º N. a) fitoplancton total, b) diatomeas y c) dinoflagelados.

Discusión

La abundancia del fitoplancton observada durante este estudio fue muy baja en comparación a estudios realizados en la parte sur del Golfo de México (Campeche); la densidad celular más alta fue de 3240 cel/L. Hernández et al. (2008) reportaron densidades de células bajas a relativamente altas, de 5.3×10^{-3} cel/L a 1.4×10^{-5} cel/L.

La Sonda de Campeche se caracteriza por giros y remolinos que se forman y se derivan hacia el oeste, facilitando el transporte y distribución de organismos planctónicos. Durante este estudio se presentó un patrón general donde se observó que la abundancia más alta de diatomeas estuvo relacionada con una menor abundancia de dinoflagelados. Se sugiere que el crecimiento de diatomeas en la parte de la Sonda de Campeche está influenciado por estos giros que al formarse crean turbulencia. Este tipo de ambientes es donde el crecimiento de las diatomeas es favorecido, en comparación con los dinoflagelados que crecen en aguas estratificadas.

En general, en la zona de estudio la mayor abundancia del número de células y dinoflagelados por L⁻¹ se presentó a los 50 m de profundidad, lo que probablemente indica que es a esa profundidad en donde se encontraron las condiciones ambientales (luz y nutrientes) más apropiadas para el crecimiento del fitoplancton.

En todas las estaciones se registró una mayor abundancia del grupo de las diatomeas que dinoflagelados, En el caso de las diatomeas, los géneros del grupo de las penadas *Navicula* y *Nitzschia* y de las céntricas *Coscinodiscus* y *Rizosolenia* fueron los más abundantes, mientras que dentro del grupo de los dinoflagelados fueron *Ceratium* y *Gymnodinium*. Esto indica que en la zona de estudio la comunidad de diatomeas y dinoflagelados se caracterizó por ser relativamente sencilla, con poca estructura y con una alta dominancia de un número de géneros limitados.

El grupo de los dinoflagelados presentó la mayor diversidad de géneros (23 vs. 18 en el grupo de las diatomeas. Dentro de la diversidad de géneros del grupo de los dinoflagelados, destacó el género *Ceratium* (13 especies); en el pasado se habían reportado 16 especies del género *Ceratium* en la parte sur del Golfo México (Licea et al. 2004). Durante este estudio, estas especies fueron también las más dominantes, lo cual es consistente con lo reportado por Taylor et al. (2008), quienes señalaron que los dinoflagelados son un grupo protista dominante en la zona oligotrófica del Golfo de México y que muestra su mayor diversidad en regiones oceánicas.

Conclusiones

En general, la mayor abundancia del fitoplancton se presentó a los 50 m de profundidad.

Las mayores abundancias se presentaron cerca de la región central (Sonda de Campeche) y noreste del paralelo 25º N.

Las estaciones oceánicas que presentaron una mayor abundancia de células de fitoplancton fueron las que estuvieron ubicadas en la región noreste del Golfo de México.

Las diatomeas fueron el grupo dominante en abundancia tanto a 10 m como a 50 m de profundidad, el género *Navícula* representó el género dominante, con un 39.9% de la abundancia total de diatomeas y dinoflagelados. En la E20 se observó el mayor número de silicoflagelados cuantificados.

El género Ceratium tuvo la mayor diversidad (13 especies identificadas).

Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones se presentan por la importancia que guarda el estudio de los grupos de fitoplancton más pequeño, por ejemplo el picoplancton y los cocolitoforidos, ya que nos daría una información más completa sobre su abundancia total presente en la columna de agua y su contribución a la productividad primaria.

Otro grupo importante que no se pudo cuantificar fue el de los cocolitofóridos, ya que el lugol no es un buen fijador porque disuelve las estructuras de carbonato de calcio. Cambios en el pH destruyen estas células. Estudios previos, como el de Hérnandez et al. (2008) reportaron que las más altas densidades de cocolitoforidos en dos estaciones costeras representaban el 85% de la abundancia total en la parte sur del Golfo de México (Campeche). Por lo tanto, estos organismos representan un alto porcentaje de la abundancia total del fitoplancton en la columna de agua de este ambiente.

Para cuantificar el picoplancton hay que acudir a técnicas de filtración sobre membranas negras de policarbonato de 0.2 µm de poro. Tras la filtración de las células se procede a teñirlas con un fluorocromo apropiado (el más utilizado es el DAPI) y después se observan los filtros por epifluorescencia con varias bandas de excitación – emisión. Los resultados óptimos se obtienen con fotomicroscopía de epifluorescencia o por las técnicas de microscopía confocal. Para el establecimiento de la abundancia y biomasa de este grupo también resulta útil apoyarse en la fluorocitometría de flujo.

Si se desea investigar la contribución de del grupo de los cocolitoforidos se debe de seguir otra técnica de muestreo, por ejemplo:

- Se recomienda filtrar por lo menos de 2 a 10 litros de agua dependiendo de la zona donde se encuentra (oligotrófica 10 litros, eutrófica con 2 litros es suficiente).
- Usar filtros de microporo de 0.2 o 0.45 micras
- Usar un microscopio electrónico de barrido o un microscopio donde se pueda tener una lectura de 1000x, para poder identificar de una manera adecuada los cocolitofóridos.
- Si se desea cuantificar los cocolitofóridos no se debe de preservar con Lugol.
- Para el establecimiento de la abundancia y biomasa del picoplancton es necesario apoyarse en la fluorocitometría de flujo y, la fotomicroscopía de epifluorescencia o por las técnicas de microscopía confocal.

Referencias

- Bogdanov DV (1965) Algunos rasgos de la oceanografía del Golfo de México y del Mar Caribe. Investigaciones Pesqueras Soviético-Cubanas, Moscu pp. 23-44.
- Edler L (1979) Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea. Phytoplankton and Chlorophyll. Baltic Marine Biologists Publication No. 5, 38p.
- Gasca R (1993) Especies y abundancia de Sifonóforos (Cnidaria: Hydrozoa) en la región sur del Golfo de México. University of Puerto Rico, Mayaguez, Caribbean Journal of Science 29 (3-4): 220-225.
- Gordon AL (1967) Circulation of the Caribbean Sea. J Geophis Res 72(24):6207-6223.
- Gross MG y Healy LM (1979) Chemical aspects of coastal marine pollution. In: Siegel FR (ed) Review of research on modern problems in geochemistry. UNESCO Earth Science no. 16, 127-13.
- Hernandez-Becerril D, García-Reséndiz JA, Salas de León DA, Monreal-Gómez MA, Signoret-Poillon M y Aldeco-Ramirez J (2008) Nanoplankton fraction in the Sourthern Gulf Mexico: Ciencias Marinas 34(1):77-90.

Leipper DF (1970) Tides of the Caribbean Sea. J Geophys Res 86 (C5): 4243-4247.

Licea-Durán 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-Durán 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.
- Maul GA (1977) The anual cycle of the Gulf Loop current I. Observations during a oneyear time series. J Mar Res 35: 27-47.
- Margalef R (1969) Counting. En: Vollenweider RA, Talling JF y Westlake DF (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.
- Nowlin WD y Hubertz JM (1972) Contrasting summer circulation patterns of the eastern Gulf-Loop Current versus Anticyclonic Ring. In: Capurro LRA and Reid JLO (eds) Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico, Vol 2. Gulf Publishing, Houston pp119-138.
- National Academy of Sciences.(1975) Petrolum in the Marine environmental. Workshop on Inputs, Fates and the Effects of petroleum in the Marine Environment. Virginia May 21-25, 973. 107 p.
- Taylor F Jr, Hoppenrath M, y Saldarriaga JF (2008) Dinoflagellate diversity and distribution. Biodiv Conserv 17: 407–418.
- Throndsen J (1978) Phytoplakton preservation and storage. En: Sournia A (ed) Phytoplankton Manual. UNESCO, Paris 69-74 pp.
- Thomas CR (1997) Identifying marine phytoplankton. Florida Departament of Enviromental Protection Florida Marine Research Institute. 857 pp.
- Utermöhl H (1958) Zur Vervollkmmoung der quantitiven phytoplankton-methodik. Mitt.Internat. Verein. Limnol 9: 1-38.

ZOOPLANCTON

(Dr. Jaime Farber Lorda, Dra. Sharon Herzka)

Antecedentes

La biomasa del zooplancton no ha sido bien estudiada en el pasado. Para la zona sur del Golfo de México, existen datos para verano e invierno que se presentan en una amplia revisión de la distribución espacial del ictioplancton del Golfo de México 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 Golfo de México frente al estado de Tamaulipas; estos autores no presentan datos de biomasa.

Existen pocos estudios de la hidrología de la zona sur Golfo de México (particularmente de la zona profunda del Golfo de México) en comparación con el norte y oeste del Golfo de México. 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 de ésta parte del proyecto global es establecer una línea de base de las poblaciones de zooplancton presentes en la zona determinada (ver plan de estaciones), y relacionar ésta información con la hidrología de la zona de estudio. Como primer objetivo se van a determinar las biomasas de zooplancton y como segundo objetivo, la composición taxonómica de las poblaciones presentes en la zona de estudio en la zona de aguas profundas del Golfo de México, incluyendo larvas de peces, para un total de 30 grupos taxonómicos.

Metodología

Se colectaron un total de 44 muestras durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 (Figura 16). Las muestras fueron obtenidas con una red bongo. El marco de las redes utilizadas tiene una apertura de 80 cm, con 2 redes de diferente malla, de 333 µm y de 500 µm, cada una equipada con un flujómetro General Oceanics previamente calibrado. 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. Se filtraron aproximadamente 400 m³ por arrastre. Las muestras de la red de malla de 333µm 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, y se identificaron un total de 30 grupos diferentes.

De la muestra total de la red de 333µm se obtuvieron los biovolumenes por el método del volumen desplazado y se obtuvieron sub-muestras con un fraccionador folsom para obtener muestras más pequeñas con el fin de llevar a cabo los conteos. Se analizó ¼ 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 de la muestra completa. El zooplancton se analizó bajo el microscopio para obtener su composición taxonómica por grandes grupos. La abundancia de zooplancton y los biovolúmenes se estandarizaron por 1000 m³ con base en las mediciones del volumen filtrado durante cada arrastre.

De la malla de 500 µm se colectaron sub-muestras para isótopos estables, metales traza y bacterias; el resto se fijó en alcohol para estudios de genética (fuera del contexto del proyecto).

Resultados

En general, los biovolúmenes y la abundancia fueron relativamente bajos, con la excepción de algunas estaciones cercanas a la costa y en la región sureña de la zona de estudio en la zona de Campeche (E38, E40, E42, E46) en el sur del Golfo, donde se registraron temperaturas relativamente bajas, salinidad baja y las más altas concentraciones de clorofila a (Figura 83 a Figura 85). Flores-Coto et al. (2009) describen la distribución de la biomasa zooplanctónica en la parte sur el Golfo de México. En su análisis de largo plazo, ellos concluyen que las biomasas 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 biomasas en otoño e invierno que en verano. Sus resultados muestran valores similares a los encontrados por nosotros en noviembre del 2010 (Tabla 19). Sin embargo, sus estaciones son en general más costeras y estaban concentradas en la zona de la plataforma continental. Para el estudio taxonómico, Lopéz-Salgado y Suárez-Morales (1998) describen la abundancia de los copépodos frente al estado de Tamaulipas. Ellos deducen que la Corriente del 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 advacentes (Figura 86, Figura 87 y Figura 88).

Tabla 19. Abundancias (total, media, error estándar y porcentaje de abundancia con respecto al total) de los diferentes grupos taxonómicos estudiados (n=44 estaciones).

GRUPOS	Suma de individuos contados en todas las estaciones m ⁻³	Media (Ind. 1000 m ³)	Error Estandar (Ind. 1000 m ³)	% de abundancia
Amphipoda	24433	555	57.83	0.94
Appendicularia	47417	1078	143.60	1.83
Bivalvia larvas	4477	102	15.34	0.17
Brachiopoda	725	16	4.38	0.03
Briosoaria larvas	848	19	7.03	0.03
Caprilidaceos	42	1	0.67	0.002
Cephalopoda Jarvas	1072	24	4.26	0.04
Chaetognata	339926	7726	484.86	13.14
Cirripedia larvas	165	4	1.53	0.006
Cladocera	414	9	3.44	0.02
Copepoda	1384366	31463	1905.16	53.53
Ctenophora	64	1	0.83	0.002
Decápoda	8983	204	25.23	0.35
Decápoda larvas	17170	390	50.07	0.66
Doliolida	22679	515	47.09	0.89
Echinodermata	23712	539	65.70	0.92
Euphausiacea	81200	1845	136.90	3.14
Foraminiferos	40116	912	297.64	1.55
Gastropodos	1901	43	7.75	0.07
larvas				
Heterópoda	3422	78	10.30	0.13
Isopodos	521	12	3.41	0.02
Medusae	5976	136	22.50	0.23
Misydaceos	676	15	4.76	0.03
Ostracoda	288662	6560	890.14	11.16
Otras larvas inv.	2311	53	15.53	0.09
PISCIS NUEVOS	1469	33	0.25	0.06
PISCIS Iarvas	26557	604	113.84	1.03
Polychaeta	27214	619	42.04	1.05
Polychaeta larvas	26940	012	305.55	1.04
Pteropoda	100629	2287	169.98	3.89
Radiolarios	1704	40	23.50	0.07
Salpida	17244	392	52.19	0.07
Stomatonada	02021	10/8	104.02	3.20
larvas	207	6	3.94	0.01
Total	2585978	58772	3449.16	100

Los seis grupos taxonómicos más abundantes constituyeron el 88.05% de la abundancia total (Tabla 20). Las larvas de peces tuvieron una abundancia de 604 ± 113.84 ind. 1000 m³, constituyendo el 1.03% del total. Otro grupo relativamente importante fue el de los poliquetos (1.05%) y el de las larvas de poliquetos (1.04%).

Grupo	Ind. 1000 m ⁻³	%
1Copepodos	31463 ±1905.23	53.53
2Quetognatos	7726 ± 484.88	13.4
3Ostracodos	6560 ± 890.18	11.16
4Pteropodos	2287 ± 169.99	3.89
5Sifonóforos	1878 ± 104.02	3.19
6Eufásidos	1845 ± 136.91	3.14
		88.05

Tabla 20. Grupos principales de zooplancton que componen el 88.05% de la abundancia del zooplancton recolectado en las zonas de aguas profundas del Golfo de México.

Los resultados son típicos de una zona oligotrófica como la parte profunda del Golfo de México. Las muestras obtenidas en noviembre del 2010 indican *a priori* biomasas más importantes.





Figura 83. Temperatura y salinidad superficial de la zona de estudio durante el crucero XIXIMI 1 en el Golfo de México durante noviembre del 2010.



Figura 84. Distribución de los biovolumenes del zooplancton en la zona de estudio (ml 1000 m-3).



Figura 85. Concentración de clorofila *a* en aguas superficiales del Golfo de México durante noviembre del 2010 (promedio mensual). La imagen fue generada con datos del satélite Aqua MODIS (resolución 4 x 4km). Fuente: NASA (http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=ocean_month).



Figura 86. Abundancia total del zooplancton (miles de individuos 1000 m⁻³), incluyendo los 30 grupos taxonómicos estudiados (superior). Abundancia de copépodos (en medio). Abundancia de quetognatos (inferior).



Figura 87. Abundancia de ostrácodos (superior). Abundancia de Sifonóforos (medio) Abundancia de Pterópodos (inferior), (miles de individuos 1000 m⁻³).



larvas de peces 10^3 [#/1000m3] @ Depth [m]=1





Figura 88. Abundancia de eufásidos (superior). Abundancia de larvas de peces (medio). Abundancia de huevos de peces (inferior), (miles de individuos 1000 m⁻³).

Conclusiones

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. 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. Es importante resaltar que las mayores biomasas coinciden con los valores más elevados de clorofila, según lo muestra la imagen de satélite. 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 importante, tuvo el mismo patrón de distribución, así como otros grupos, incluyendo los ostrácodos, las larvas de peces y los eufásidos.

Recomendaciones

En el futuro, la comparación con las muestras del crucero que se llevó a cabo bajo condiciones de verano, nos permitirá comparar estacionalmente las biomasas y las abundancias zooplantónicas. La información de clorofila, simultáneamente durante el crucero, u otro indicador de condiciones tróficas sería de gran ayuda para entender mejor cuales son los mecanismos que están determinando estas condiciones.

Referencias

- Biggs DC, Sánchez LL (1997) Nutrient-enhanced primary productivity of the Texas-Lousiana continental shelf. J Mar Sys 11:237-247.
- Biggs DC (1992) Nutrients, plankton and productivity in a warm/core ring in the western Gulf of Mexico. J Geophys Res 97(C2): 2143-2154.
- Flores-Coto M, Espinoza-Fuentes L, Zavala-García F, Sanvicente-Añorve L (2009) Ictioplancton del sur del Golfo de México. Un compendio. Hidrobiol 19(1):49-76.
- Lopez-Salgado IE, Suarez-Morales (1998). Copepod assemblages in surface waters of the wetern Gula of México. Crustaceana. 71(3) 312-330.
- Rabalais NN, Turner RE, Wiseman WJ (2002) Gulf of Mexico hypoxia A.K.A. "The dead zone". Annu Rev Ecol Syst 33:235-263.

- Turner RE (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 RE, Allen RL (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 Luís Cadena llevó a cabos el análisi de las muestras de zooplancton y la determinación de las biomasas. El Oceanólogo Cesar Almeda Jáuregui realizó las figuras de éste reporte.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE **C** Y **N** ORGÁNICO E INORGÁNICO, COMPOSICIONES ISOTÓPICAS, TASAS DE ACUMULACIÓN Y PROPIEDADES TEXTURALES DE LOS SEDIMENTOS

Anexo 9. Carta Dr. Juan Carlos Herguera con justificación de retraso en análisis de la composición elemental de C y N orgánico e inorgánico, sus composiciones isotópicas, tasas de acumulación y propiedades texturales. Se anexa en formato electrónico (Anexo9_carta_herguera_sedimentos.pdf).

METALES TRAZA E ISÓTOPOS DE PB EN SEDIMENTOS PROFUNDOS

(Dr. Miguel Angel Huerta Díaz)

Antecedentes

La pirita representa una de las principales fases reducidas durante la diagénesis en sedimentos en ausencia de oxígeno tiene una gran capacidad para incorporar metales traza (Huerta-Diaz y Morse 1992). La formación de la 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 os 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 la parte óxica del sedimento (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-Diaz y Morse 1992, Huerta-Diaz et al. 1993, 1998). Una vez depositados y enterrados, los oxihidróxidos de Fe y Mn 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 interfase 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-Diaz 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:

$$DOP(\%) = \left(\frac{Fe_{pir}}{Fe_{pir} + Fe_{HCI}}\right) \times 100$$
(1)

En donde Fe_{HCl} y Fe_{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-Diaz y Morse 1990), los cuales pueden ser calculados a partir de la ecuación:

$$\mathsf{DTMP}(\%) = \left(\frac{\mathsf{Me}_{\mathsf{pir}}}{\mathsf{Me}_{\mathsf{pir}} + \mathsf{Me}_{\mathsf{HCI}}}\right) \times 100 \tag{2}$$
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 va 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 "lábiles" 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-Diaz y Morse (1992) mostraron como sedimentos asociados con derrames crónicos de petróleo (e.g., Green Canyon) del Golfo de México (GM) podían ser fácilmente distinguidos de los sedimentos profundos y de la plataforma continental del GM 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 GM. La hipótesis central de 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-Diaz y Morse (1992).

La comparación de las diferentes razones isotópicas del Pb (e.g., ²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb vs. ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb o cualquier otra combinación que haga aparente las diferencias en las fuentes) ha sido ampliamente utilizada para constreñir las fuentes de Pb en el ambiente (e.g., Sugden et al. 1993) y particularmente para identificar aportes antropogénicos de este elemento (Chow and Johnstone 1965, Gulson et al. 2004, Komárek et al. 2008). Las muestras de sedimentos generalmente muestran relaciones lineales simples cuando se comparan sus razones isotópicas de plomo (e.g., ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb versus ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb), las cuales son interpretadas como mezclas simples de dos fuentes discretas de Pb. Se ha calculado que aproximadamente el 67% del Pb presente en sedimentos pelágicos es químicamente precipitado del Pb disuelto en el agua, mientras que el 33% restante es transportado como un constituyente del material particulado (Chow y Patterson 1962). De acuerdo a estos mismos autores, la razón de depositación química del Pb tiende a ser uniforme geográficamente, mientras que su tasa de depositación mecánica varía considerablemente. De esta manera, la razón de abundancia de estos dos tipos de ocurrencia es diferente para los diferentes depósitos pelágicos (Chow y Patterson 1962). En el caso especial del Golfo de México, recibe aportes mecánicos de diferentes fuentes como el Río Mississippi y los ríos Grijalva-Usumacinta y Bravo, entre otros, además de posibles aportes de aguas subterráneas y aportes eólicos. El análisis de los cambios con la profundidad de los sedimentos en las razones isotópicas podría dar información sobre las contribuciones relativas de contaminantes (e.g., diversos tipos de petróleo). La hipótesis central de este estudio

sería que las razones isotópicas del Pb serán diferentes para sedimentos contaminados por petróleo originado del *BP Deepwater Horizon* en relación al generado por petróleo de origen mexicano o a las presentes antes de la explotación intensiva de petróleo en la zona mexicana del Golfo de México.

Objetivos

Los objetivos fundamentales del estudio fueron: (1) Cuantificar la pirita (FeS₂) sedimentaria y metales traza asociados y, (2) determinar las razones de isótopos estables de Pb en los mismos sedimentos.

Metodología

En total se recolectaron 10 núcleos de los que se muestrearon 169 muestras de sedimento continuas en el eje vertical de la profundidad. Para cada muestra se analizaron un total de 8 metales (Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V) en la fracción HCl y los mismos 8 elementos en la fracción pirita. Sobre estas mismas muestras también se realizaron análisis de isótopos de Pb. 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-Diaz 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 HNO₃ 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-Diaz 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) o por absorción atómica con horno de grafito (Varian modelo SpectraAA 850Z). Los límites de detección para cada una de las dos fracciones obtenidas se muestran en la Tabla 21. 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 (± desviación estándar

relativa) estuvo normalmente entre el 5 y el 10% para el caso de absorción atómica a la flama y entre el 10 y el 15% para el caso de absorción atómica con horno de grafito.

Elemento	Límite de detección (mg/L)		
	Fracción HCI	Fracción pirita	
Mn	0.023	0.026	
Fe	0.090	0.055	
Cu	0.017	0.037	
Cd	0.027	0.024	
Со	0.025	0.030	
Ni	0.094	0.079	
Pb	0.088	0.078	
V	0.0014	0.0011	

Tabla 21. Límites de detección para los diferentes metales traza en las fracciones HCl y pirita medidos en absorción atómica a la flama. Para el caso especial del V, los límites de detección fueron obtenidos en absorción atómica por horno de grafito.

Para el caso de los isótopos estables de Pb (204Pb/206Pb, 207Pb/206Pb, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁴Pb/²⁰⁸Pb), las muestras se secaron en estufa a 60 °C hasta alcanzar peso constante. Una vez secas, las muestras se digirieron por medio de microondas (CEM Mars 5 Microwave Accelerated Reaction System) en vasos de Teflón HP-500 específicos para microondas, a los que se añadieron 0.2 g de muestra y 10 mL de HNO₃ calidad Suprapur destilado en el laboratorio. Una vez digeridas, las muestras se transfirieron a tubos de centrifuga de 50 mL y se aforaron a 50 mL con agua mili-Q. Previo a su análisis las muestras se diluyeron en una proporción 1:1 con agua Mili-Q para finalmente ser analizadas utilizando un ICP-MS Perkin Elmer modelo ELAN DRCe. Las mediciones de los isótopos se realizaron por invección directa al instrumento y fueron calibradas utilizando el material certificado de referencia SRM 981 (Estándar Isotópico de Plomo Común) del National Institute of Standards and Technology. Los porcentajes de recuperación fueron del 100% para las relaciones isotópicas ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb y ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb y 101% para ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb (Tabla 22). Los porcentajes de recuperación para los porcentajes atómicos de los isótopos ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb y ²⁰⁸Pb fueron del 100% en todos los casos (Tabla 22). Las reproducibilidades de las mediciones de ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb y ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb, expresadas como sus desviaciones estándares relativas en base a 10 diferentes mediciones del material certificado de referencia SRM 981, fueron de 0.35%, 0.55% y 0.39%, respectivamente. Para el caso de los porcentajes atómicos de ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb y ²⁰⁸Pb, sus reproducibilidades fueron del 0.25%, 0.31%, 0.32% y 0.14%, respectivamente.

Tabla 22. Valores medidos promedio (n = 10) de las relaciones isotópicas ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb y ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb, los porcentajes atómicos de ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb y ²⁰⁸Pb, y sus correspondientes valores certificados del material de referencia SRM 981 (estándar isotópico de plomo común; National Institute of Standards and Technology). Los promedios de los valores medidos están basados en 10 diferentes mediciones.

Relación isotópica	Valor medido (promedio)	Valor medido (desviación estándar)	Valor certificado (promedio)	Valor certificado (desviación estándar)	Porcentaje recuperación (%)
²⁰⁴ Pb/ ²⁰⁶ Pb	0.05907	0.00021	0.059042	0.000037	100
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	0.9210	0.0051	0.91464	0.00033	101
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2.1698	0.0085	2.1681	0.0008	100
²⁰⁴ Pb (%)	1.4236	0.0035	1.4255	0.0012	100
²⁰⁶ Pb (%)	24.0985	0.0737	24.1442	0.0057	100
²⁰⁷ Pb (%)	22.1927	0.0720	22.0833	0.0027	100
²⁰⁸ Pb (%)	52.285	0.073	52.347	0.009	100

Resultados

Metales traza en sedimentos

Los perfiles de las concentraciones de Me_{HCl} (Figura 89) muestran que los valores generalmente se encuentran dispersos a lo largo de la diferentes estaciones, con los valores menores correspondiendo a las estaciones X-1-EX27, X-1-EX31 y X-1-EX33 y los más elevados al resto de las estaciones. Los valores promedio de Me_{HCl} estuvieron en el rango 0.00091 ± 0.00032 µmol g⁻¹ (para V; estación X-1-EX31) a162 ± 54 µmol g⁻¹ (para Fe; estación X-1-EX19). Para el caso de los perfiles de concentración de metales traza asociadas a la fracción pirita, la Figura 90 muestra que, contrario a lo que se observó en la fracción HCl, las concentraciones de Me_{Pir} fueron mayores en las estaciones X-1-EX27, X-1-EX31 y X-1-EX33 en relación al resto de las estaciones. Los valores promedio (Tabla 24) para esta fracción estuvieron en el rango 0.0013 ± 0.0015 µmol g⁻¹ (para Pb; estación X-1-EX35) a 7.2 ± 2.2 µmol g⁻¹ (para Fe; estación X-1-EX27).



Figura 89. Perfiles de las concentraciones de metales asociados a la fracción HCI (Me_{HCI}) para sedimentos de las diferentes estaciones del Golfo de México.

Tabla 23. Concentraciones promedio (± una desviación estándar) de metales traza asociados a la fracción HCl para los sedimentos de las diferentes estaciones. Nota: nd = no detectable.

	Metales traza (μmol g ⁻¹)				
Estación	Mn	Fe	Cu	Cd	
X-1-EX03	7.4 ± 4.9	26 ± 17	0.19 ± 0.07	0.017 ± 0.002	
X-1-EX15	45 ± 35	90 ± 12	0.27 ± 0.05	0.012 ± 0.002	
X-1-EX19	9.7 ± 7.3	162 ± 54	0.24 ± 0.03	0.011 ± 0.003	
X-1-EX27	1.3 ± 1.2	0.14 ± 0.01	0.022 ± 0.005	0.018 ± 0.001	
X-1-EX31	0.67 ± 0.20	0.15 ± 0.02	0.019 ± 0.001	0.017 ± 0.001	
X-1-EX33	1.5 ± 1.0	0.21 ± 0.17	0.042 ± 0.041	0.016 ± 0.007	
X-1-EX35	25 ± 16	71 ± 25	0.15 ± 0.05	0.015 ± 0.002	
X-1-EX36	46 ± 50	72 ± 21	0.20 ± 0.05	0.013 ± 0.001	
X-1-EX40	22 ± 11	100 ± 15	0.19 ± 0.04	0.010 ± 0.001	
X-1-EX43	20 ± 8	49 ± 13	0.21 ± 0.04	0.015 ± 0.001	
Estación	Со	Ni	Pb	V	
X-1-EX03	0.15 ± 0.02	0.25 ± 0.06	0.022 ± 0.011	0.044 ± 0.014	
X-1-EX15	0.17 ± 0.03	0.33 ± 0.07	0.042 ± 0.018	0.22 ± 0.08	
X-1-EX19	0.14 ± 0.01	0.22 ± 0.03	0.027 ± 0.008	0.079 ± 0.040	
X-1-EX27	0.12 ± 0.01	0.15 ± 0.02	0.0017 ± 0.0013	0.0012 ± 0.0011	
X-1-EX31	0.13 ± 0.01	0.138 ± 0.005	nd	0.00091 ± 0.00032	
X-1-EX33	0.16 ± 0.09	0.21 ± 0.14	0.0010 ± 0.0010	0.0030 ± 0.0018	
X-1-EX35	0.16 ± 0.02	0.34 ± 0.05	0.036 ± 0.020	0.18 ± 0.09	
X-1-EX36	0.16 ± 0.01	0.36 ± 0.06	0.027 ± 0.011	0.11 ± 0.08	
X-1-EX40	0.18 ± 0.01	0.32 ± 0.06	0.036 ± 0.009	0.27 ± 0.10	
X-1-EX43	0.17 ± 0.01	0.37 ± 0.05	0.027 ± 0.006	0.052 ± 0.036	



Figura 90. Perfiles de las concentraciones de metales asociados a la fracción pirita (Me_{pir}) para sedimentos de las diferentes estaciones del Golfo de México.

Tabla 24. Concentraciones promedio (± una desviación estándar) de metales traza asociados a la fracción pirita para los sedimentos de las diferentes estaciones.

	Metales traza (µmol g⁻¹)				
Estación	Mn	Fe	Cu	Cd	
X-1-EX03	0.19 ± 0.17	1.1 ± 0.4	0.019 ± 0.007	0.0034 ± 0.0005	
X-1-EX15	2.1 ± 4.4	1.0 ± 0.4	0.033 ± 0.036	0.0032 ± 0.0005	
X-1-EX19	0.7 ± 2.2	0.55 ± 0.35	0.023 ± 0.009	0.0029 ± 0.0005	
X-1-EX27	0.54 ± 0.60	7.2 ± 2.2	0.017 ± 0.004	0.0069 ± 0.0004	
X-1-EX31	0.092 ± 0.033	2.6 ± 0.7	0.032 ± 0.007	0.0068 ± 0.0005	
X-1-EX33	0.11 ± 0.08	3.0 ± 1.4	0.041 ± 0.013	0.0064 ± 0.0011	
X-1-EX35	0.10 ± 0.11	1.8 ± 1.0	0.038 ± 0.028	0.0044 ± 0.0005	
X-1-EX36	0.14 ± 0.12	1.6 ± 0.8	0.029 ± 0.029	0.0047 ± 0.0007	
X-1-EX40	0.19 ± 0.44	1.5 ± 0.2	0.037 ± 0.021	0.0042 ± 0.0001	
X-1-EX43	0.17 ± 0.08	1.4 ± 0.5	0.034 ± 0.023	0.0041 ± 0.0006	
Estación	Со	Ni	Pb	V	
X-1-EX03	0.022 ± 0.004	0.028 ± 0.004	0.0043 ± 0.0024	0.0051 ± 0.0015	
X-1-EX15	0.021 ± 0.006	0.030 ± 0.007	0.0040 ± 0.0042	0.024 ± 0.043	
X-1-EX19	0.012 ± 0.007	0.028 ± 0.004	0.0030 ± 0.0051	0.013 ± 0.026	
X-1-EX27	0.047 ± 0.003	0.056 ± 0.003	0.0082 ± 0.0024	0.017 ± 0.009	
X-1-EX31	0.040 ± 0.006	0.054 ± 0.005	0.015 ± 0.004	0.010 ± 0.003	
X-1-EX33	0.037 ± 0.010	0.051 ± 0.010	0.0095 ± 0.0029	0.012 ± 0.006	
X-1-EX35	0.021 ± 0.005	0.039 ± 0.008	0.0013 ± 0.0015	0.0043 ± 0.0018	
X-1-EX36	0.025 ± 0.009	0.038 ± 0.008	0.0041 ± 0.0032	0.0032 ± 0.0014	
X-1-EX40	0.030 ± 0.004	0.039 ± 0.004	0.0032 ± 0.0019	0.0067 ± 0.0015	
X-1-EX43	0.027 ± 0.005	0.038 ± 0.004	0.0049 ± 0.0023	0.0032 ± 0.0018	

Si se combina la información obtenida para las concentraciones de Me_{HCI} y Me_{Pir} a través del cálculo de los valores de grados de piritización (DOP) y grados de piritización de metales traza (DTMP), se puede observar que los mayores valores consistentemente corresponden de nuevo a las estaciones X-1-EX27, X-1-EX31 y X-1-EX33 (Figura 91). Las gráficas de DOP vs. DTMP para los metales analizados (Figura 92) muestran que estas tres estaciones presentan los porcentajes más elevados de DTMP y de DOP. Los valores anómalamente altos de DOP y DTMP pueden tener varias causas, (i) elevadas concentraciones de materia orgánica lábil en los sedimentos, (ii) bajas concentraciones de Fe reactivo, (iii) dilución bien por materiales terrígenos o carbonatos, entre los más importantes. Para el caso particular de las estaciones X-1-EX27, X-1-EX31 y X-1-EX33, los datos obtenidos indican que las diferencias son una consecuencia del ambiente sedimentario en el que se encuentran localizadas estas estaciones, ya que se ubican en la plataforma continental de la Península de Yucatán. Estos sedimentos son carbonatados, con concentraciones promedio de carbonato de calcio en el rango de 47 ± 3 (estación X-1-EX33) a $75 \pm 3\%$ (estación X-1-EX27) en los primeros 6 cm de estos núcleos (datos proporcionados por Juan Carlos Herguera). Para el caso de los otros siete núcleos, el rango de concentraciones de encuentra entre 20 ± 1 y 37 ± 2% (estaciones X-1-EX40 y X-1-EX03, respectivamente; datos proporcionados por Juan Carlos Herguera). El carbonato de calcio actúa como diluyente en los sedimentos, disminuyendo la concentración de Fe (*i.e.*, Fe_{HCI}) y del carbono orgánico disponible para la formación de pirita (Berner, 1984).



Figura 91. 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 Golfo de México.



Figura 92. Grados de piritización (DOP) graficados contra los grados de piritización de metales traza para Mn, Cu, Cd, Co, Ni, Pb y V y para las diferentes estaciones muestreadas en el Golfo de México

La relación existente entre DOP, las concentraciones de Fe_{HCI} y Fe_{Pir} y el efecto de las elevadas concentraciones de carbonato de calcio sobre la formación de pirita se puede observar en la Figura 93. En esta figura se puede apreciar que los valores promedio más elevados de DOP (92 ± 8 , $94 \pm 1 \ge 98 \pm 1\%$ para las estaciones X-1-EX33, X-1-EX31 y X-1-EX27, respectivamente) corresponden a las menores concentraciones de Fe_{HCI} (0.14 ± 0.01, 0.15 ± 0.02 y 0.21 ± 0.17 μ mol g⁻¹ para las estaciones X-1-EX27, X-1-EX31 y X-1-EX33, respectivamente) y con los contenidos más elevados de carbonato de calcio. En contraste, los valores de DOP y Fe_{HCI} para las otras siete estaciones se encuentran en el rango 0.34 ± 0.16 a $10 \pm 13\%$ y 26 ± 17 a 161 \pm 54 µmol g⁻¹, respectivamente. En otras palabras, todo el Fe disponible para la formación de pirita fue transformado a pirita en los sedimentos mas ricos en carbonatos, mientras que los sedimentos en los cuales las concentraciones de carbonato de calcio son relativamente menores presentan concentraciones de Fe_{HCL} relativamente elevadas y potencialmente disponibles para la formación de pirita. Sin embargo, es posible que la formación de pirita en los otros siete núcleos esté también limitada por la presencia de materia orgánica lábil. Los resultados obtenidos para el Fe pirítico indican que las concentraciones de este mineral fueron significativamente más elevadas en las estaciones X-1-EX33, X-1-EX31 y X-1-EX27 en relación al resto de las estaciones (Figura 94).

Resultados similares a los obtenidos para el Fe fueron obtenidos para los metales traza, como se puede observar en la Figura 95, en donde se graficaron los valores promedio de Me_{pir} , Me_{HCl} y DTMP para Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb y V y para cada

estación. De nuevo se puede observar que los mayores valores consistentemente corresponden a las estaciones mas ricas en carbonatos X-1-EX27, X-1-EX31 y X-1-EX33 y los menores a las otras siete estaciones. Finalmente, se observó la existencia de una relación logarítmica entre las concentraciones de metales en la fracción HCl y aquellas en la fracción pirita (Figura 96). Sin embargo, es interesante hacer notar que esta tendencia en general no es observada para las estaciones carbonatadas. La amplia dispersión en los valores de los metales traza que generalmente se observa en la Figura 96 sugiere la existencia de una elevada heterogeneidad en los ambientes sedimentarios para el Golfo de México.

Estos resultados sugieren que las concentraciones obtenidas de Fe pirítico y Fe-HCI (y metales traza asociados) corresponden a lo que podriamos denominar como línea base de metales y elementos traza reactivos para los diferentes ambientes sedimentarios del Golfo de México. Las concentraciones de estos metales observadas son extraordinariamente bajas cuando se les compara con sedimentos de otras regiones oceánicas o incluso con el mismo Golfo de México, como se puede ver en la Figura 97. Esta figura muestra los valores de Fe pirítico medidos en diferentes ambientes sedimentarios en el océano y, como se puede observar, los correspondientes a los sedimentos profundos de este estudio son sumamente bajos comparados con otros ambientes tanto oceánicos como del Golfo de México. Obervación que se puede extender a los metales traza, lo que indica que la línea base de estos elementos también es sumamente baja en relación a otros sedimentos de aguas profundas.



Figura 93. Valores promedio de las concentraciones de carbonato de calcio (datos proporcionados por Juan Carlos Herguera) y hierro en las fracciones HCl y pirita (símbolos) así como los valores promedio de grados de piritización (DOP) correspondientes a las diferentes estaciones del Golfo de México. Las barras de error se omitieron para una mayor claridad.



Figura 94. Gráficas de caja que muestran la distribución de valores de las fracciones HCl y pirita para las diferentes estaciones del Golfo de México. Como referencia, se muestran también los valores de carbonato de calcio (datos proporcionados por Juan Carlos Herguera).



Figura 95. Valores promedio de las concentraciones de carbonato de calcio (datos proporcionados por Juan Carlos Herguera) y metales traza en las fracciones HCl y pirita (símbolos) así como los valores promedio de grados de piritización de metales traza (DTMP) correspondientes a las diferentes estaciones del Golfo de México. Las barras de error se omitieron para una mayor claridad.



Figura 96. Valores promedio de las concentraciones metales traza en las fracciones HCI y pirita correspondientes a las diferentes estaciones del Golfo de México. Nótese la escala logarítmica en ambos ejes de la gráfica.



Figura 97 Valores máximos de las concentraciones de Fe pirítico en diferentes ambientes sedimentarios: Offatts Bayou, Port Aransas, plataforma de Galveston Bay, Orca Basin, plataforma GM (Golfo de Mexico), Skan Bay, Sitio FOAM, Delta Mississippi, Baffin Bay, Cape Lookout Bight, Saanich Inlet, Tidal Creek (Cooper y Morse 1996), Guerrero Negro Fosa 5, (Huerta-Diaz et al. 2011); Green Canyon (derrame crónico de petróleo; Huerta-Diaz y Morse 1992); St. Lawrence (Morse y Cornwell, 1987); Sedimentos profundos del GM (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, hypersalino; Henneke et al. 1997); Effingham Inlet (sitio óxico, Hurtgen et al. 1999); Delta del Danubio (Wijsman et al. 2001); Bannock Basin (Mar Mediterráneo, sulfídico, hypersalino; 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).

Razones isotópicas de plomo (²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb y ²⁰⁴Pb/²⁰⁸Pb)

Sorprendentemente, no se han reportado valores de razones isotópicas de Pb (²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb y ²⁰⁴Pb/²⁰⁸Pb) para el Golfo de México en la literatura y los valores más cercanos disponibles fueron los reportados para las Antillas Menores (White et al. 1985) y el Atlántico Norte Oriental y Occidental (Hamelin et al. 1990). Cuando se comparan los resultados correspondientes al Golfo de México se observa que sus señales isotópicas son diferentes a las reportadas para las regiones contiguas de las Antillas Menores y el Atlántico Norte, al menos cuando se consideran a las razones ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb y ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb (Figura 98 y Figura 99), comportamiento que curiosamente no se observó para las razones ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb (Figura 100). Esta diferencia podría reflejar un posible enriquecimiento de ²⁰⁷Pb en relación a los otros isótopos estables de plomo. Es importante mencionar que las señales isotópicas obtenidas para el Golfo de México también son diferentes a las reportadas para petróleo crudo (Figura 98 a Figura 100), cuando menos para las reportadas para el extraído del campo petrolero de Liaohe (Mar de Bohai; Bin-Quan et al. 2001), las únicas disponibles en la literatura. En estas figuras se aprecia que los valores isotópicos siguen las tendencias lineales obtenidas para las Antillas Menores y el Atlántico Norte, pero son diferentes a las obtenidas para el Golfo de México. Estos últimos resultados parecen apoyar la hipótesis planteada originalmente en este estudio, ya que las razones isotópicas del Pb para los sedimentos del Golfo de México aparentemente podrían ser diferentes a la de sedimentos contaminados por petróleo. Desafortunadamente no se han reportado valores isotópicos de Pb para petróleos originados en el Golfo de México, lo que hace difícil llegar a conclusiones fundamentadas lo que no deja de tener un interés como línea base, pero no tiene valor como trazadores de derrames de hidrocarburos.

Las razones isotópicas de Pb para el Golfo de México muestran diferencias notables entre las diferentes estaciones dado que las relaciones lineales son diferentes dependiendo de la estación. Estas diferencias posiblemente obedecen a la heterogeneidad de aportes materiales presentes en el Golfo de México (e.g., ríos, aguas subterráneas, partículas eólicas), las cuales modifican las pendientes de las diferentes relaciones isotópicas.

Por otro lado, las razones isotópicas de Pb para cada estación muestran variaciones con la profundidad que podrian indicar cambios en los aportes sedimentarios a lo largo del tiempo, tales como variaciones en los flujos fluviales (debido a represamientos de los ríos o cambios en los patrones pluviales), cambios en los regímenes pluviales (que afectarían las posibles descargas subterráneas, especialmente en la plataforma continental de Yucatán) o en la productividad de la columna de agua(Figura 101). Esto es particularmente notorio en los núcleos X-1-EX15, X-1-EX31 y X-1-EX43 en donde se pueden apreciar cambios importantes en las razones isotópicas ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb y ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb. Faltaría determinar la cronometría de los núcleos para poder establecer las fechas geológicas cuando ocurrieron estos cambios. Dichos cambios en los aportes sedimentarios pueden verse más claros en las Figura 102 y Figura 103, en donde se graficaron las razones

isotópicas ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb y ²⁰⁴Pb/²⁰⁸Pb vs. ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb, respectivamente. En base a estas figuras y las diferencias en las tendencias lineales es posible identificar que posiblemente los aportes hayan cambiado a través del tiempo para prácticamente todas las estaciones consideradas en este estudio.



Figura 98. Razones isotópicas de ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb para los diferentes núcleos sedimentarios del Golfo de México. Las razones para los sedimentos del Caribe (Antillas Menores), el Atlántico Norte (Oriental y Occidental) y petróleo crudo (Mar de Bohai) fueron tomados de White et al. (1985), Hamelin et al. (1990) y Bin-Quan et al. (2001), respectivamente.



Figura 99. Razones isotópicas de ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb para los diferentes núcleos sedimentarios del Golfo de México. Las razones para los sedimentos del Caribe (Antillas Menores), el Atlántico Oriental y petróleo crudo (Mar de Bohai) fueron tomados de White et al. (1985), Hamelin et al. (1990) y Bin-Quan et al. (2001), respectivamente.



Figura 100. Razones isotópicas de ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb para los diferentes núcleos sedimentarios del Golfo de México. Las razones para los sedimentos del Caribe (Antillas Menores), el Atlántico Oriental y petróleo crudo (Mar de Bohai) fueron tomados de White et al. (1985), Hamelin et al. (1990) y Bin-Quan et al. (2001), respectivamente.



Figura 101. Razones isotópicas de plomo para las diferentes estaciones muestreadas. Nótese el cambio de escala correspondiente a la profundidad para los diferentes núcleos.



Figura 102. Razones isotópicas ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb vs. ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb para las diferentes estaciones muestreadas en el Golfo de México.



Figura 103. Razones isotópicas ²⁰⁴Pb/²⁰⁸Pb vs. ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb para las diferentes estaciones muestreadas en el Golfo de México.

Conclusiones

Los resultados para las fracciones HCI, pirita y los valores de DOP y DTMP sugieren dos tipos de limitaciones en la formación de pirita en los sedimentos

1. Limitación por la disponibilidad de Fe lábil (Fe_{HCI} en los sedimentos de las estaciones XI-1-EX33, XI-1-EX31 y XI-1-EX27)

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

Los análisis de carbono orgánico correspondientes pendientes de ser realizados podrían ayudar a dirimir entre alguna de estas hipótesis. En caso de encontrar altos valores de C orgánico asociado a los núcleos XI-1-EX33, XI-1-EX31 y XI-1-EX27 revelaría la presencia de materia orgánica lábil, como la representada por el petróleo, podría estar asociada al incremento en la concentración de metales traza y Fe atrapados en el reservorio pirítico en estos tres lugares.

La abundancia de metales traza lábiles (MeHCI) 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 (Mepir) 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 HCI y pirita indica la existencia de diferentes ambientes en los sedimentos profundos del Golfo de México.

De manera similar a los resultados observados para los metales de las fracciones HCI y pirita, la dispersión en las razones isotópicas de Pb también indica que los ambientes sedimentarios profundos del Golfo de México presentan una gran heterogeneidad.

En este estudio las relaciones isotópicas de Pb no pueden mostrar impactos por el derrame de hidrocarburos debido a la falta de información de la composición isotópica de los hidrocarburos como del desconocimiento del origen y procesos de mezcla que controlan estas relaciones en los sedimentos abisales del Golfo de México.

Recomendaciones

Sería recomendable continuar con la elaboración del marco de referencia para la elaboración de líneas base de metales traza en sedimentos del Golfo de México a través de su muestreo continuo y períodico. Especialmente importantes podrían ser los sedimentos no carbonatados y con bajos contenidos de materia orgánica lábil, ya que podrían ser los más susceptibles a los efectos ocasionados por un posible derrame de petróleo.

Referencias

- Alleman LY, Hamelin B, Véron AJ, Miquel J-C y Heussner S (2000) Lead sources and transfer in the coastal Mediterranean: Evidence from stable lead isotopes in marine particles. *Deep-Sea Res. Part-II* 47, 2257-2279.
- Belzile N, De Vitre RR and Tessier A (1989) *In situ* collection of diagenetic iron and manganese oxyhydroxides from natural sediments. *Nature* 340, 376-377.
- Berner RA (1964) Stability fields of iron minerals in anaerobic marine sediments. J Geol 72, 826-834.
- Berner RA (1970) Sedimentary pyrite formation. Amer J Sci 268, 1-23.
- Berner RA (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 Biogeochimie de la Matière Organique à L'interface Eau-Sédiment Marin, pp. 35-44.
- Berner RA (1981) Authigenic mineral formation resulting from organic matter decomposition in modern sediments. Fortsch. Miner. 59, 117-135.
- Bindler R, Renberg I, Anderson NJ, Appleby PG, 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 RA (1984) Sedimentary pyrite formation: An update. Geochim Cosmochim Acta 48, 605-615.

Bing-Quan Z, Jing-Lian

Zhttp://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703701006081 - AFF2, Xiang-Lin Thttp://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703701006081 - AFF1, Xiang-Yang Chttp://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703701006081 - AFF1, Cai-Yuan Fhttp://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703701006081 - AFF1, Later of the science of the scin

L<u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703701006081 - AFF1</u> y Ju-Ying L (2001) http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703701006081 - AFF1Pb, Sr, and Nd isotopic features in organic matter from China and their implications for petroleum generation and migration. Geochim Cosmochim Acta 65, 2555-2570.

- Brännvall M-L, Kurkkio H, Bindler R, Emeteryd O y Renberg I (2001) The role of pollution versus natural geological sources for lead enrichment in recent lake sediments and surface forest soils. Environ Geol 40, 1057-1065.
- Chiaradia M, Chenhall BE, Depers AM, Gulson BL y Jones BG (1997) Identification of historical lead sources in roof dusts and recent lake sediments from an industrialized area: indications from lead isotopes. Sci Tot Environ 205, 107-128.
- Chillrud SN, Hemming S, Shuster EL, Simpson HJ, Bopp RF, Ross JM, Pederson DC, Chaky DA, Tolley L-R y Estabrooks F (2003) Stable lead isotopes, contaminant metals and radionuclides in upper Hudson River sediment cores: implications for improved time stratigraphy and transport processes. Chem Geol 199, 53-70.
- Chow TJ y Johnstone MS (1965) Lead isotopes in gasoline and aerosols of Los Angeles Basin, California. Science 147, 502-503.
- Chow TJ y Patterson CC (1962) The occurrence and significance of lead isotopes in pelagic sediments. Geochim Cosmochim Acta 26, 263-308.
- Ferrand JL, Hamelin B y Monaco A (1999) Isotopic tracing of anthropogenic Pb inventories and sedimentary fluxes in the Gulf of Lions (NW Mediterranean sea). Continental Shelf Res 19, 23-47.
- Gulson BL, Mizon KJ, Davis JD, Palmer JM y Vimpani G (2004) Identification of sources of lead in children in a primary Zn–Pb smelter environment. Environ. Health Perspect. 112, 52–60.Huerta-Diaz M.A. and Morse J.W. (1990) A quantitative method for determination of trace metal concentrations in sedimentary pyrite. Mar. Chem. 29, 119-144.
- Huerta-Diaz MA and Morse JW (1992) Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments. Geochim. Cosmochim. Acta 56, 2681-2702.
- Huerta-Diaz MA, 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 MA, Tessier A and Carignan R (1998) Geochemistry of trace metals associated with reduced sulfur in freshwater sediments. Appl Geochem 13, 213-233.

- Jacobs L, Emerson S and Huested SS (1987) Trace metal geochemistry in the Cariaco Trench. Deep-Sea Res 34, 965-981.
- Jenne EA (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 EA (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.
- Komárek M, Ettler V, Chrastný V y Mihaljevič M (2008) Lead isotopes in environmental sciences: A review. Environ Int 34, 562–577.
- Lion LW, Altmann RS y Leckie JO (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.
- Morse J.W. y Arakaki T. (1993) Adsorption and coprecipitation of divalent metals with mackinawite (FeS). Geochim Cosmochim Acta 57, 3635-3640.
- Ng A. y Patterson CC (1982) Changes of lead and barium with time in California offshore basin sediments. Geochim Cosmochim Acta 46, 2307–2321.
- Sugden CL, Farmer JG y MacKenzie AB (1993) Isotopic ratios of lead in contemporary environmental material from Scotland. Environ Geochem Health 15, 59–65.

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_{HCI} : Metal asociado a la fracción HCI (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 del M.C. Alexandro Orozco Durán 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

(Dr. Axayácatl Rocha)

Antecedentes

Los estudios bénticos del mar profundo del Golfo de México tienen una historia reciente sobre todo en México. El Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM) ha realizado proyectos relacionados con el macrobentos de la Zona Económica Exclusiva (Escobar-Briones et al. 1999). Trabajos como los de Hernández (1999), Rodríguez (1999), Muñiz (2001), Rodríguez (2003) y Alonso (2006) reconocen un decremento de la densidad de macrofauna béntica conforme incrementa 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, como es el caso del estudio de Velázquez (2005), que observó que a mayor distancia de la costa y mayor profundidad la cantidad de materia orgánica disminuye y genera cambios en la densidad y biomasa de la comunidad bentónica.

Son pocos los trabajos que se han realizado sobre la comunidad meiofáunica del Golfo de México. Rowe y Menzel (1971) observaron una disminución de la biomasa infaunal y en la densidad con respecto a la profundidad. Estos resultados sugirieron una pérdida de energía a lo largo de la columna de agua. 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, 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 Golfo de México. 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. Más recientemente Escobar-Briones et al. (2008) compararon la estructura de la meiofauna de dos regiones del Golfo de México, 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

Las comunidades de meiofauna representan la gran mayoría de la biodiversidad eucariótica que habita los sedimentos marinos. Llevan a cabo una variedad de funciones ecológicas claves que incluyen 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 10 estaciones del Golfo de México mediante métodos tradicionales morfológicos. Mediante esta caracterización se podrá:

1. Establecer una línea de base de la diversidad de la comunidad meiofáunica utilizando análisis faunísticos.

2. Monitorear los cambios en la comunidad bentónica de mar profundo e identificar las zonas impactadas por la contaminación petrolera.

Métodos

El procesamiento de las muestras incluyó

La 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 (Burguess, 2001; de Jonge y Bouwman, 1977). En forma breve el método consiste en:

- I. Enjuagado
- II. Tamizado
- III. Flotación en LudoxTM 50 (tres veces)
- IV. Recuperación por tamizado (tres veces)
- V. Impregnación en glicerina
- VI. 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 los organismos encontrados en los estratos superiores (superficie a 3 cm) y el 50% de los estratos más profundos. Se alcanzará el 100% de la cuantificación en un futuro próximo. La identificación a grandes grupos taxonómicos se realizó conforme a Giere (1993). Estos principales grupos taxonómicos son en los que típicamente se caracterizan las comunidades meiofáunicas (e.gr., Smol et al. 1994).

Métodos de Análisis

Las abundancias de organismos se analizaron mediante un análisis multivariado de escalamiento multidimensional (MDS, por sus siglas en inglés) (McGarigal *et al.* 2000).

Resultados

Se contabilizaron un total de 2,596 organismos en las 7 estaciones de la campaña XIXIMI-1. La abundancia de la meiofauna fue homogénea espacialmente en todas las estaciones, con excepción de la E15, en donde se encontró prácticamente el doble de organismos que en el resto de las estaciones (Figura 104).



Numero de individuos

Figura 104. Abundancia de la meiofauna expresada como el número total de organismos contabilizados 50 cm⁻² en las 7 estaciones del crucero XIXIMI-1.

Los perfiles de abundancia de la meiofauna dentro del sedimento revelan que la mayor parte de la biomasa se encuentra en los primeros 6 cm superficiales, aunque hay variabilidad considerable entre estaciones (Figura 105).



Figura 105. Perfiles de abundancia en el sedimento de organismos totales de la meiofauna. La abundancia representa el número de organismos por 50 cm².

La comunidad meiobéntica profunda del Golfo de México se encuentra dominada por nemátodos que representaron el 81% de los organismos contabilizados. Los siguientes grupos en términos de abundancia fueron los copépodos y los ostrácodos (Figura 106).



Figura 106. Composición taxonómica a nivel de grandes grupos de la meiofauna muestreada en el crucero XIXIMI-1.

Este patrón de predominancia ocurrió en todas las estaciones analizadas. Sin embargo, la estación E3 se distinguió por una composición distinta, marcada por una mayor abundancia de foraminíferos (Figura 107).



Figura 107. Composición taxonómica a nivel de grandes grupos de las estaciones del crucero XIXIMI-1.

En la distribución de abundancia vertical es claro que las tendencias observadas en la Figura 106 están determinadas por la abundancia de nemátodos, mientras que la abundancia de los otros taxones es considerablemente menor. Una excepción notable es un pico de foraminíferos en la estación E3 en el estrato de 5 a 7 cm (Figura 108).



Figura 108. erfiles de abundancia en el sedimento de grandes taxa de la meiofauna. La abundancia representa el número de organismos por 50 cm².

El análisis multivariado de escalamiento multidimensional de la estructura comunitaria revela que las estaciones E35, E43 y E36, que se encuentran en la Sonda de Campeche, poseen la misma estructura faunística y que esta es muy similar a la de E40 y E27. La similitud entre E27 y las estaciones de la Sonda de Campeche es particularmente sorprendente ya que se encuentra alejada de ella. Por otra parte, en la estación E15 se encontró una alta abundancia de meiofauna, lo cual lleva a una separación de los datos de esta estación en los resultados del MDS. Por otro lado, en la estación E3 se encontró una composición marcadamente distinta de las demás, debido a la presencia de un pico sub-superficial de foraminíferos (Figura 109).



Análisis de similitud entre las estaciones

Figura 109. Análisis de escalamiento multi-dimensional (MDS) basado en similitudes de Bray Curtis de la comunidad meiofáunica profunda de las estaciones de XIXIMI-

Conclusiones

- Los patrones de distribución vertical de la meiofauna en los sedimentos profundos del Golfo de México corresponde a los perfiles de distribución típicos de la meiofauna.
- La comunidad meiofaunica se encuentra dominada por nematodos de vida libre.
- La muestra de la estación E15 frente a las costas de Tamaulipas se destacó por poseer una biomasa mucho mayor de meiofauna que las muestras de la Sonda de Campeche y cerca de la plataforma de Yucatán.
- La región del Banco de Campeche posee una comunidad característica que es similar a la de la Península de Yucatán (E27).

Recomendaciones

- 1. Es necesario realizar el análisis de las comunidades a una mayor resolución taxonómica, lo que requiere considerablemente más esfuerzo del disponible hasta ahora.
- 2. Dicho esfuerzo debe estar enfocado al análisis de la nematofauna puesto que representa el taxón dominante.
- 3. La caracterización morfológica de la meiofauna se complementará con herramientas genéticas que permitan una mejor valoración de la diversidad alfa y filogenética. Se han adquirido los reactivos para aplicar las herramientas moleculares que se han desarrollado en el laboratorio para el estudio de la meiofauna costera (Martínez-Arce, 2008; Pereira *et al.* 2009, 2010), mismas que se aplicarán en un futuro próximo para la caracterización de la comunidad de este proyecto.

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.
- Burgess B (2001) An improved protocol for separating meiofauna from sediments using colloidal silica sols. Marine Ecology-Progress Series 214, 161-165.
- De Jonge VN, Bouwman LA (1977) A simple density separation technique for quantitative isolation of meiobenthos using the colloidal silica Ludox-TM. Marine Biology 42,143-148.
- Escobar E, Lopez M, Soto LA and Signoret M (1997) Density and biomass of the meiofauna of the upper continental slope in two regions of the Gulf of Mexico. Ciencias Marinas 23, 463-489.
- Escobar-Briones E, Signoret M and Hernandez D (1999) Variation of the macrobenthic infaunal density in a bathymetric gradient: Western Gulf of Mexico. Ciencias Marinas 25, 193-212.
- Escobar-Briones EG, Diaz C and Legendre P (2008) Meiofaunal community structure of the deep-sea Gulf of Mexico: Variability due to the sorting methods. Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography 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 SeaResearch 52, 211-226.
- Giere O (1993) Meiobenthology. The Microscopic Fauna in Aquatic Sediments. Berlin, Springer-Verlag.
- Hernández R D (1999) Riqueza taxonómica, densidad y biomasa de la infauna macrobéntica a lo largo de un gradiente batimétrico en el sector occidental del Golfo de México. Tesis de Licenciatura FES Zaragoza, UNAM, México.
- Martínez-Arce A (2008) Contribucion al código de barras de ADN para la evaluación de la diversidad de nemátodos marinos de vida libre en dos localidades del Golfo de California. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada.
- McGarigal K, Cushman S and Stafford S (2000) Multivariate statistics for wildlife and ecology research. New York: Springer-Verlag.
- 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 Golfo de México. Tesis de licenciatura, Facultad de ciencias, UNAM, México.
- Pereira TJ, Fonseca G, Mundo-Ocampo M, Guilherme BC and Rocha-Olivares A (2010) Diversity of free-living marine nematodes (Enoplida) from Baja California assessed by integrative taxonomy. Marine Biology 157, 1665-1678 (DOI: 10.1007/s00227-010-1439-z).
- Pereira TJ, Martínez-Arce A, Gingold R, Mundo-Ocampo M and Rocha-Olivares A (2009) Biodiversidad Marina Críptica, Ciencia y Desarrollo 52-57.
- 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 Golfo de México. Tesis de Maestría, Ciencias del Mar y Limnologia, UNAM, Mexico.
- Rowe GT and Menzel DW (1971) Quantitative benthic samples from the deep Gulf of Mexico with some comments on the measurement of deep-sea biomass. Bulletin of Marine Science 21, 556-566.
- 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.
- Smol N, Willems KA, Govaere JCR and 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.

Créditos

Participantes:

Dr. Axayácatl Rocha Olivares, investigador responsable Biol. Mirayana Marcelino Barros, estudiante Biol. Elizabeth Gahona Abalos, estudiante

ESTUDIO FAUNÍSTICO DE LA MACROFAUNA DE MAR PROFUNDO

(Dra. Victoria Díaz-Castañeda)

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 desarrollo del proyecto XIXIMI-1 tuvo como objetivo establecer la línea base en el Golfo de México y evaluar si había evidencia de la presencia de petróleo proveniente del pozo Macondo en la zona de aguas profundas del Golfo de México así como sus efectos sobre comunidades marinas.

La fauna béntica es abundante en el fondo marino y está presente en prácticamente todas las regiones oceánicas. Los invertebrados deposívoros son los metazoarios dominantes en los sedimentos marinos (biomasa, abundancia). Los poliquetos, crustáceos, moluscos y equinodermos constituyen los principales grupos de la macrofauna. Estos animales mezclan partículas sedimentarias favoreciendo reacciones químicas y el transporte de la materia orgánica, entre otras cosas.

A través de este estudio se pretendió evaluar la diversidad y abundancia de los principales grupos de la macrofauna, entre los cuales hay organismos que puedes ser utilizados como indicadores del "estado de salud" del ecosistema porque son sedentarios o tienen poca capacidad de desplazamiento y deben tolerar los factores estresantes o contaminantes.

De manera general, la densidad de organismos de la macrofauna decrece de manera importante al alejarse de la costa y a mayores profundidades (Escobar Briones et al. 2008). Rowe et al. (2008) encuentra que la biomasa de la macrofauna es mayor que la de la meiofauna a menos de 2000m de profundidad y que a profundidades mayores la biomasa de la meiofauna es mayor. También menciona que cuando el alimento es muy limitado, la abundancia relativa de organismos grandes como la macrofauna disminuyen drásticamente o desaparecen, y que predominan los de talla pequeña como la meiofauna.

La importancia de este trabajo reside en el poco conocimiento del bentos de esta región debido al alto costo asociado a la obtención de muestras en zonas oceánicas profundas, la presencia de especies indicadoras debido a su reducida capacidad de desplazamiento y su adaptación a condiciones de estrés debido a la explotación de recursos no renovables marinos en el Golfo de México.

Según Cosson et al. (1997) el grupo dominante en el Golfo de México lo constituyen los anélidos poliquetos, tanto en sitios eutróficos, mesotróficos como

oligotróficos. El área que muestrearon corresponde a un nucleador de caja de 0.25 m2 (= 50 x 50 cm), lo cual según estos autores representa un área de muestreo adecuada para una zona con densidades bajas como es la parte profunda del Golfo de México. Por su parte, Rowe et al. (2008) muestrean utilizando un nucleador de caja de 0.2 m2 lo cual permite estudiar cómo está estructurada la comunidad macrobéntica (diversidad de taxa, abundancia, densidad, aporte de carbono) en esta región del Golfo de México.

Objetivos

1) Describir la composición faunística macroinfaunal. La macrofauna se colectó con tamiz de 0.5 mm.

2) Establecer las tendencias de variación hacia el interior del sedimento en diferentes estratos, inclueyno la riqueza taxonómica, abundancia (ind.m-2), dominancia y biomasa (peso húmedo fresco y unidades de carbono).

Métodos

En el muestreo de sedimentos, se recolectaron muestras de sedimentos con nucleador de caja en las estaciones E3, E15, E19, E27, E31, E33, E35, E36, E40 y E43 (Figura 16). Para las muestras de organismos bentónicos, se usaron tubos de policarbonato (una muestra por núcleo). De estas estaciones, se eliminaron las muestras E19, E31 y E33 debido a que hubo problema de etiquetado y fijación. En las estaciones E3 y E27 no se encontró macrofauna (> 0.5 mm), solo meiofauna (por ejemplo, nemátodos y foraminíferos).

En este caso, y por acuerdo con el grupo que trabajó la meiofauna, se decidió que la macrofauna sería separada usando un tamiz de 0.5 mm ya que no contábamos con una cantidad suficiente de muestra de cada núcleo para trabajar diferentes fracciones del sedimento de manera independiente. El problema es que en ambientes con poco alimento como es el caso de la zona profunda del Golfo de México, se debe usar una luz de malla menor (0.30 o 0.35 mm) y la muestra debe ser de mucho mayor tamaño, generalmente 0.25 m² (ver Rowe et al. 1991; Rowe, 1996). Otros autores han usado un mínimo 3 núcleos/estación tomados con un nucleador de caja, en el cual cada uno es de 0.05 m2 o 20 cm largo (Hernández-Arana et al. 2003). Wei et al. (2010) colectaron 5 muestras por estación con un nucleador Gomex cuya área de muestreo es de 0.17 m², por lo que contaron con 0.85 m² de muestra por estación.

La metodología utilizada en el laboratorio consistió en:

1. Extracción de macrofauna de las muestras estratificadas fijadas en formol. Cada muestra fue lavada usando una malla 0.5 mm bajo el agua corriente y se preservaron en etanol al 70%.

2. Para separar la fauna se enjuagó el etanol de cada estrato usando un tamiz de 350 µm para concentrar la macrofauna béntica.

3. Cada muestra se revisó bajo microscopio estereoscópico y se separaron los diferentes taxa. Los organismos se identificaron y contaron; posteriormente se fijaron en viales con etanol al 70%.

Resultados

En general se recolectó poca macrofauna. Como se usó una sola muestra por estación de muestreo (i.e., de cada núcleo), y los organismos son de talla relativamente pequeña en este ambiente, se encontraron pocos organismos. Se recolectaron únicamente algunos poliquetos, nemátodos, oligoquetos, crustáceos peracáridos y un molusco. El total de organismos colectados fue de 25, de los cuales 6 son nemátodos. Un poliqueto perteneciente a la familia Glyceridae (especie carnívora; Figura 110) salió en las muestras de meiofauna procesadas por el Dr. Axayácatl Rocha (se tomaron 2 fotos).



Figura 110. Polychaeta Glyceridae

Se colectaron en total 25 organismos. En el presente estudio se encontraron anélidos (poliquetos, oligoquetos), moluscos, crustáceos y nemátodos. Hubo una abundancia muy baja de poliquetos (Glyceridae, Paraonidae, Spionidae), oligoquetos, isópodos, anfípodos, nematodos, copépodos y un molusco bivalvo (Tabla 25). Se documentaron tres familias de poliquetos: Paraonidae, Spionidae y Glyceridae. Los paraónidos son deposívoros de superficie y subsuperficie, los glicéridos son en su mayoría carnívoros y los espiónidos pueden alimentarse como deposívoros o como suspensívoros.

Non- Non- <th< th=""><th></th><th></th><th>1</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>r</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th></th<>			1					r					
B3 3547 0.5 0 0 0 0 0 0 0 2.5 0 <	Estación	Profundidad [mts]	Profundidad media [cms]		Glyceridae	Spionidae	Paraonidae	BIVALVIA	ADPODA	ANFIPODA	COPEPODA	NEMATODA	OLIGOQUETA
1.5	E3	3547	0.5										
2.5			1.5										
3.5 4.5 1 1 1 1 1 6 10 <			2.5										
4.5 10 11 11 11 2.5 1.2 cm 10 10 11 11 11 11 4.5 3.4 cm 10 11 11 11 11 6 4.6 cm 10 10 11 11 11 10 8.10 cm 10 10 10 10 10 10 10 2.5 1.5 10 <t< td=""><td></td><td></td><td>3.5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></t<>			3.5										
6 1 1 1 1 1 10 1 1 1 1 1 15 2391 0.5 1 1 1 1 2.5 1-2 cm 1 1 1 1 1 3.5 2-3 cm 1 1 1 1 1 4.5 3-4 cm 1 1 1 1 1 6 4-6 cm 1 1 1 1 1 8 6-8 cm 1 1 1 1 1 10 8-10 cm 1 1 1 1 1 11.5 1 1 1 1 1 1 2.5 1 1 1 1 1 1 3.5 1 1 1 1 1 1 2.5 1 1 1 1 1 1 1.5 1			4.5										
8 10 11 10 10 10 10 11 10 11 10 11 10 11 10 11 10 11 10 11 10 11 10 11 10 11 10 11<			6										
10 $ $			8										
E15 2391 0.5 Image: constraint of the second			10										
1.5 0.1 cm 1 1	E15	2391	0.5										
2.5 $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ 4.5 $3.4 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ 8 $6.4 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ 10 $8.10 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ 10 $8.10 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ 1.5 $1.5 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $3.51 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $4.5 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.1 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.5 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.5 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.3 1.5 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$ $1.2 \mathrm{cm}$			1.5	0-1 cm					1				
3.5 $2.3 cm$ <			2.5	1-2 cm									
4.5 $3-4 cm$ 1 1 6 $4-6 cm$ 1 1 8 $6-8 cm$ 1 1 10 $8-10 cm$ 1 1 11 $8.10 cm$ 1 1 15 1 1 1 1 2.5 1 1 1 1 3.5 1 1 1 1 4.5 1 1 1 1 4.5 1 1 1 1 6 1 1 1 1 1 10 1 1 1 1 1 2.5 1 1 1 1 1 10 1 1 1 1 1 4.5 1 1 1 1 1 1 6 1 1 1 1 1 1 10 1 1 1 1 1 1 1.5 1 1			3.5	2-3 cm									
6 $4-6 cm$ 1 1 8 $6-8 cm$ 10 $8-10 cm$ 10 10 $8-10 cm$ 10 $8-10 cm$ 10 11 $8-10 cm$ 10 $8-10 cm$ 10 10 1.5 1.5 10 10 10 10 10 2.5 10 10 10 10 10 10 10 8 10 10 10 10 10 10 10 10 2.5 1.5 10			4.5	3-4 cm									
8 6-8 cm <th<< td=""><td></td><td></td><td>6</td><td>4-6 cm</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td></th<<>			6	4-6 cm								1	
10 8-10 cm Image: constraint of the second sec			8	6-8 cm									
E19 3513 0.5 Image: state of the			10	8-10 cm									
1.5 <t< td=""><td>E19</td><td>3513</td><td>0.5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></t<>	E19	3513	0.5										
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$			1.5										
3.5 <t< td=""><td></td><td></td><td>2.5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></t<>			2.5										
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$			3.5										
6			4.5										
8 10			6										
10			8										
E27 1234 0.5 Image: constraint of the system of the			10										
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	E27	1234	0.5										
2.5			1.5										
3.5			2.5										
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $			3.5										
6 0 0 0 0 0 0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 E31 3631 0.5 0 0 0 0 0 0 1.5 0 0 0 0 0 0 0 0 2.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3.5 0<			4.5										
8 Image: constraint of the second			6										
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $			8										
E31 3631 0.5 Image: constraint of the second			10										
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	E31	3631	0.5										
2.5			1.5										
3.5			2.5										
4.5			3.5										
6 <t< td=""><td></td><td></td><td>4.5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></t<>			4.5										
8 10 10 E33 3717 0.5 1.5 1.5 3.5 1.5 4.5 1.5			6										
10 <			8										
E33 3717 0.5			10										
1.5	E33	3717	0.5										
3.5 4.5 1 <td></td> <td></td> <td>1.5</td> <td></td>			1.5										
4.5			3.5										
			4.5										

Tabla 25. Número de organismos de macrofauna encontrados en sedimentos.

		6	1				1					
		8										
		10										
E35	2240	0.5										
		1.5	0-1 cm			1	1	2				
		2.5	1-2 cm									
		3.5	2-3 cm								1	
		4.5	3-4 cm								1	
		6	4-6 cm								1	
		8	6-8 cm									
		10	8-10 cm									
E36	2821	0.5	0-1 cm									
		1.5	1-2 cm									
		2.5	2-3 cm									
		3.5	3-5 cm								1	
		4.5	5-7 cm								1	
		6	7-9 cm									
		8	9-11 cm									
		10										
E40	2784	0.5										
		1.5	0-1 cm					1	1			
		2.5	1-2 cm	1		1		1		1		
		3.5	2-3 cm									
		4.5	3-4 cm	1		1				3		
		6	4-6 cm		1							
		8	6-8 cm									
		10	8-10 cm									1
E43	3284	0.5										
		1.5	0-1 cm							1		
		2.5	1-2 cm									
		3.5	2-3 cm									
		4.5	3-4 cm									
		6	4-6 cm									
		8	6-8 cm									
		10	8-10 cm									

Problemas encontrados:

Probablemente se encontraron muy pocos organismos pues la cantidad de muestra no era la apropiada para estudiar la macrofauna béntica en estos ambientes. Wei et al. (2010) analizaron 51 estaciones (corresponden a 46 m²) ubicadas entre 200 y 3700 m de profundidad y encontraron encuentra 950 especies de macrofauna desde zonas someras hasta las regione más profundas del Golfo de México. Los grupos más abundantes por orden de importancia fueron los poliquetos, moluscos bivalvos, isópodos y anfípodos. Los paraónidos Levinsenia uncinata, Paraonella monilaris y espiónidos del género Prionospio son abundantes. En el presente estudio también se encontraron estas dos familias de poliquetos.

Conclusiones

Se concluye que la talla de las muestras no fue la adecuada para estudiar la macrofauna béntica, debido a las restricciones de tiempo de barco.

Referencias

- Cosson N, Sibuet M and Galeron J (1997) Deep-Sea Research I, Vol. 44 No. 2 pp. 247-269.
- Escobar-Briones E, Estrada-Santillán L and Legendre P (2008) Density and biomass of macrofauna in the Campeche canyon, southern Gulf of Mexico. Deep sea Res. Vol 55: 2679-2685.
- Hernández-Arana H, Rowdena A, Attrilla M, Warwicka R and Gold-Bouchot G (2003) Large-scale environmental influences on the benthic macroinfauna of the southern Gulf of Mexico. Estuarine, Coastal and Shelf Science 58: 825–841.
- Rowe G, Sibuet M, Deming J, Khripounoff A, Tietjen J, Macko S & Theroux R (1991) Total sediment biomass and preliminary estimates of organic carbon residence time in deep-sea benthos. Mar Ecol Prog Ser 79: 99-114.
- Rowe G (1996) The cycling of organic matter in food-limited environments. In: Uiblein F, Ott J, Stachowitsch M (eds) Deep sea and extreme shallow water habitats: affinities and adaptations. Biosystematics and Ecology Series, vol. 11(III/IV), pp. 233–260.
- Rowe G and Kennicutt M (2008) Introduction to the deep Gulf of Mexico benthos program. Deep Sea Res II, Vol. 55: 2536-2540.
- Wei C, Rowe G, Hubbard G, Wilson G, Petrescus I, Foster J, Wicksten M, Chens M, Davenport R, Soliman Y & Wang Y (2010) Bathymetric zonation of deep-sea macrofauna in relation to export of surface phytoplankton production. Mar Ecol Prog Ser 399: 1–14.

MONITOREO DE HONGOS EN SEDIMENTOS MARINOS

(Dra. Meritxel Riquelme, MC. Adriana Romero)

Antecedentes

Se estima que cerca de 700,000 m³ de crudo de petróleo fueron derramados en las aguas del Golfo de México como consecuencia de la explosión de la plataforma "Deepwater Horizon" (DP) en abril del 2010. Los daños a la macrofauna han sido sustanciales. Hasta el momento los impactos ambientales reportados en la vida silvestre son la muerte de aproximadamente 1,400 aves, 450 tortugas y 50 mamíferos marinos tan sólo durante el primer mes del derrame. Sin embargo, estos organismos son sólo una pequeña parte de la cadena trófica y las poblaciones más afectadas probablemente sean las microscópicas compuestas de procariotes y eucariotes microscópicos (Widger *et al.* 2011). Su abundancia se estima en más de 20,000 por litro de agua de mar (Damare y Raghukumar, 2008). Estos microorganismos y su metabolismo sostienen la producción primaria del océano y son los encargados de descomponer la materia orgánica y reciclar nutrientes (Tunell, 2011). Cambios abruptos y severos en su metabolismo pueden provocar cambios a largo plazo en todo el ecosistema (Widger *et al.* 2011).

Se sabe que la diversidad fúngica en sistemas marinos es amplia y que hay hongos que se desarrollan en el océano. Hasta el momento se han reportado cientos de especies de hongos típicamente terrestres en hábitats marinos, entre los cuales destacan los Dotideomicetos, tales como especies del género *Phoma* y *Alternaria* (Suetrong et al. 2009).

Hasta el momento los hongos han sido ignorados en la mayoría de los estudios de comunidades microbianas en ecosistemas marinos impactados por altas concentraciones de hidrocarburos. Sin embargo, actualmente se les comienza a dar importancia gracias a su capacidad de adaptarse a cualquier condición ambiental y sobre todo por ser responsables, junto con bacterias y otros microorganismos, del flujo de nutrientes en las cadenas tróficas del océano.

En ambientes marinos, los hongos se encuentran desde la zona fótica en la columna de agua hasta sedimentos marinos de más de 3 km de profundidad (Damare *et al.* 2006). En éstos últimos, se ha encontrado una amplia diversidad de hongos. Algunos son sumamente primitivos y otros tienen características de importancia industrial debido a su metabolismo particular. Junto con otros hongos aún no identificados se encargan de degradar materia orgánica marina y soportan condiciones extremas muy específicas, como temperaturas bajas, alta presión y falta de oxígeno, lo cual los hace susceptibles a cualquier cambio en las condiciones ambientales. Los

hongos forman relaciones mutualistas importantes con otros organismos marinos (Damare y Raghukumar, 2008). Los impactos ocasionados a las comunidades microbianas expuestas al derrame petrolero de la plataforma DP apenas comienzan a ser reportadas (Widger *et al.* 2011; Kostka *et al.* 2011).

En el caso de hongos, existe muy poca información sobre la composición de la comunidad fúngica marina (Burgaud et al. 2009), por lo que los impactos ambientales a dicha comunidad no han sido estudiados extensivamente. Sin embargo, se ha reportado que especies del género Candida poseen el potencial de degradar hidrocarburos (Chrzanowski et al. 2005, Kaczorek et al. 2008). Asimismo algunas especies del género Penicillium, específicamente Penicillium citrinum, ha mostrado la capacidad para bioconvertir carbono orgánico, además de que degrada materiales y sustancias complejas como la celulosa (Kuhad y Singh, 1993), pendimetalina (un pesticida) (Barua et al. 1990), hidrocarburos aromáticos de petróleo (Polman et al. 1994), poliuretano (Pathirana y Seal, 1985), y carboxina (Balasubramanya y Patil, 1980), entre otros. La presencia de varias especies de estos géneros se han reportado anteriormente en el océano, tanto en aguas superficiales (Kohlmeyer y Kohlmeyer, 1979), como asociados a algas y esponjas marinas (Gao et al. 2008), así como en sedimentos marinos someros (Albu et al. 2011) y profundos (Damare et al. 2006).

Recientemente, estudios de metagenómica que utilizan secuenciación de alto rendimiento han reportado que los hidrocarburos derivados del derrame petrolero de la plataforma DP han influenciado fuertemente la dinámica de poblaciones de microorganismos del Golfo de México. Los hongos, específicamente, Candida dubliniensis, Lodderomyces elongisporus, y Penicillum chrysogenum, aumentaron en abundancia en arenas y aguas a la orilla del mar de las áreas afectadas; se observó una mayor proporción de secuencias de ADN pertenecientes a estos organismos en muestras de sedimentos. Hasta el momento las comunidades no han regresado a su proporción "normal" de secuencias de ADN, es decir, la reportada antes del derrame petrolero (Widger et al. 2011).

Por otro lado, también se ha reportado la presencia de levaduras, específicamente de los géneros Rhodotorula, Cryptococcus y Candida, en cúmulos de petróleo encontrados en las costas de Florida en el verano del 2010. Se cree que su presencia es consecuencia del derrame petrolero asociado a la plataforma Deepwater Horizon. Las especies aisladas pertenecen a clados filogenéticos de levaduras conocidas que poseen potencial para degradar hidrocarburos y que han sido reportadas para hábitats marinos (Albu et al. 2011).

Objetivos

Identificar las diferentes especies fúngicas presentes en sedimentos marinos en la zona de aguas profundas del Golfo de México y monitorear cambios en la composición de la comunidad fúngica.

Métodos

El muestreo se llevó a cabo en puntos ubicados en el Golfo de México entre los paralelos 20 – 25, así como entre los meridianos 86 – 96 (Figura 16). Hubo un total de 10 núcleos con sedimento, siete de las cuales fueron estaciones profundas: E15 y E19 (ubicadas en el paralelo 25), E31 (paralelo 24), E33 (paralelo 23), E43 (paralelo 22), E36 (paralelo 21) y E40 (paralelo 20); y tres de las cuales fueron estaciones relativamente someras: E27 (paralelo 24), E3 (paralelo 23), y E35 (entre paralelo 20 y 21).

Para la toma de muestras en cada estación se llevó a cabo el siguiente protocolo, usando guantes de nitrilo en todo momento (Figura 111):

- 1. Abrir cinco nuevas jeringas y cortarles la punta con la aguja de tal forma que quede un cilindro.
- 2. Sumergir las jeringas (cilindro) en el núcleo.
- 3. Sacar las jeringas e inmediatamente taparlas con parafilm en lo que se transporta al laboratorio.
- 4. 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). 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.
- 5. 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 comenzando en enero del 2011.



Figura 111. Ubicación de los cilindros de 5 ml en el nucleador, así como método de almacenamiento de sedimentos en tubos de 1.5 ml con amortiguador de sacarosa 25% w/v.

Extracción de ADN de muestras de sedimentos

Se extrajo el ADN total de cada submuestra de sedimento usando el Ultraclean Soil DNA Isolation kit (MoBio Lab) especial para extracción de ADN de suelos y siguiendo el protocolo proporcionado por el fabricante. Se utilizó el total de cada submuestra, es decir, aproximadamente 1 gr por extracción. Sin embargo, antes de comenzar el protocolo de extracción las submuestras fueron centrifugadas a 13,000 rpm por 1 minuto para precipitar el sedimento y remover el sobrenadante, que en este caso fue el amortiguador de sacarosa. Posteriormente se procedió con la extracción de ADN. Se verificaron las concentraciones de ADN en un gel de agarosa al 1% teñido con bromuro de etidio [0.1 μ g/ml] en el cual se corrieron 5 μ l de muestra de ADN a 80 Volts por 45 minutos. Como marcador de peso molecular se utilizaron 10 μ l de ADN del fago lambda digerido con EcoRI y HindIII (Promega, Co.) a una concentración de 50 ng/ μ l. Además se llevó a cabo la cuantificación de ADN utilizando un espectrofotómetro NanodropTM (Thermo Fisher Scientific, Inc.), haciendo lecturas a 260 nanómetros. Se utilizó 1 μ l de muestra y como blanco, agua.

Amplificación por PCR del ADNr de hongos

Se procedió a amplificar por PCR las secuencias específicas del ADNr de hongos. El marcador taxonómico molecular por excelencia en el estudio de hongos saprobios es el Espaciador Interno Transcripcional (ITS, por sus siglas en inglés) (White et al. 1990). Sin embargo, hasta la fecha, no se ha descrito un juego de oligonucleótidos universales para hongos que funcionen adecuadamente en muestras ambientales, es decir, muestras de suelo, agua, aire, etc. Por lo anterior se amplificó con distintos conjuntos de oligonucleótidos para el ITS de hongos con resolución variada, esto es, con distintos niveles de especificidad para su identificación por secuenciación. Todas las reacciones de PCR fueron iguales. Se prepararon en un volumen final de 20 μ l. Como ADN templado se utilizó 1 μ l de ADN total extraído de las muestras de sedimento diluido 1:0 (a excepción de la PCR anidada, en la cual se utilizó como templado, 1 μ l de los amplicones de la primera PCR), 1.5 μ l de una mezcla de los deoxinucleótidos (adenina, guanina, citosina y timina) a una concentración de 2.5 mM c/u (Promega, Co.), 1.25 μ l de oligonucleótido sentido (Tabla 25) a una concentración de 10 μ M, así como 1.25 μ l de oligonucleótido antisentido (Tabla 25) a una concentración de 10 μ , 2 μ l de cloruro de magnesio a una concentración de 25 mM (Promega, Co.), 0.25 μ l (1 unidad) de GoTaqTM Flexi DNA polymerase [5U/ μ l] (Promega, Co.), 4 μ l de amortiguador GoTaqTM [5x] (Promega, Co.) y se completó a 20 μ l con 8.75 μ l de agua HPLC. En todos los casos se utilizó agua como blanco.

Los controles positivos variaron dependiendo de los oligonucleótidos utilizados. En el caso de las reacciones con los oligonuclétidos universales Dikarya 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 ADN del basidiomiceto Coprinopsis cinerea a una concentración de 100 ng/µl. Para ITSChytrid se utilizó el ADN del quítrido Allomyces macrogynus a una concentración de 30 ng/µl y en el caso de ITSOo se utilizó el ADN del oomiceto Saprolegnia parasitica a una concentración de 100 ng/µl. Las condiciones de los ciclos de PCR variaron (Tabla 26), así como también el tamaño esperado de los amplicones (Tabla 25) 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). Asimismo, los oligonucleótidos Dikarya fueron utilizados en una PCR anidada; es decir una primera PCR con un par de oligonucleótidos y una segunda PCR con el segundo par de oligonucleótidos (Tabla 25) en el cual se utiliza como templado los amplicones obtenidos en la primera PCR. Todas las reacciones se llevaron a cabo en un termociclador MultiGeneTM II (Labnet International, Inc.).

OLIGONUCLEÓ-	SECUENCIA	REFERENCIA					
TIDOS	(5' – 3')						
	UNIVERSALES						
ITS 1(sentido)	TCCGTAGGTGAACCTGCGG	White <i>et al</i> . 1990					
ITS4 (antisentido)	TCCTCCGCTTATTGATATGC	White <i>et al</i> . 1990					
	Tamaño esperado: 600 pb						
	DIKARYA						
	Primera PCR						
NSA3 (sentido)	AAACTCTGTCGTGCTGGGGATA	Martin y Rygiewicz					
		2005					
NLC2 (antisentido)	GAGCTGCATTCCCAAACAACTC	Martin y Rygiewicz 2005					
	Tamaño esperado: 1200 pb						

Tabla 25. Nombre, secuencias y referencia de los oligonucleótidos utilizados, así como los tamaños esperados en las distintas reacciones de PCR.

Segunda PCR							
NSI1 (sentido)	GATTGAATGGCTTAG TGAGG	Martin y Rygiewicz 2005					
NLB4 (antisentido)	GGATTCTCACCCTCTATGAC	Martin y Rygiewicz					
		2005					
	Tamaño esperado: 900 pb						
	TAXÓN ESPECÍFICO						
ITS5 (sentido)	GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG	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							
ITSChytrid (antisentido)	TTTTCCCGTTTCATTCGCCA	Nikolcheva y Bärlocher 2004					
Tamaño esperado: 700 pb							
ITSOo (antisentido)	AAAACGTWTCTTCAAA	Nikolcheva y Bärlocher 2004					
Tamaño esperado: 1500 pb							



Figura 112. Mapa de la localización de los distintos oligonucleótidos en el ADNr de hongos (Modificado de Martin y Rygiewicz 2005).

Línea de base de aguas profundas del Golfo de México

	Programa de PCR							
Conjunto de oligonucleó- tidos	Desnatura- lización Inicial °C/min	Ciclo Paso 1 Desnatura- lización °C/seg	Ciclo Paso 2 Alineamiento de oligonucleó- tidos °C/seg	Ciclo Paso 3 Extensión de la polimerasa °C/seg	Extensión final °C/min			
Universales	95/2	95/30	57/30	72/30	72/5			
Dikarya	95/2	95/30	55/40 y 60/40	72/60	72/5			
ITSAsco	95/2	95/30	55/30	72/50	72/5			
ITSBasidio	95/2	95/30	58/30	72/50	72/5			
ITSChytrid	95/2	95/30	53/30	72/50	72/5			
ITSOo	95/2	95/30	49/30	72/60	72/5			

Tabla 26. Condiciones de la PCR para los distintos conjuntos de oligonucleótidos utilizados.

Todas las PCRs fueron verificadas por electroforesis en un gel de agarosa al 1% teñido con bromuro de etidio [0.1 μ g/ml] en el cual se corrieron 5 μ l del producto de PCR a 80 Volts por 45 minutos, utilizando como referencia 10 μ l del marcador de peso molecular de ADN del fago lambda digerido con EcoRI y HindIII (Promega, Co.) a una concentración de 50 ng/ μ l.

Clonación de amplicones y análisis de transformantes

Para determinar la riqueza fúngica en sedimentos positivos para la presencia de hongos, se clonaron los amplicones obtenidos con la PCR anidada específica para el subreino Dikarya en el vector TOPO TA (Invitrogen, Co.). Esto es debido a que la resolución de esos oligonucleótidos es muy sensible y se han utilizado anteriormente

con éxito para caracterizar riqueza fúngica de ecosistemas extremos a partir de muestras ambientales con baja concentración de ADN (Romero-Olivares, 2010). Sin embargo, antes de clonar fue necesario extraer y purificar dichos amplicones. Para esto, se utilizó el QIAquickTM gel extraction kit (Qiagen, Inc.) siguiendo el protocolo proporcionado por el fabricante. Una vez que los amplicones fueron purificados, se procedió a la clonación siguiendo el protocolo sugerido por el fabricante. Cada reacción de clonación contenía una mezcla de 0.5 µl de la solución de sales del kit, así como 0.5 µl del vector pCR®2.1-TOPO® (Invitrogen, Co.). Se mezclaron de 0.5 - 4 µl de producto de PCR purificado (dependiendo de la concentración obtenida), tratando de mantener una relación final de 3:1, inserto:vector. La reacción se llevó a un volumen final de 6 µl con agua HPLC.

Se prepararon tres placas de Petri por cada clonación con medio LB (Luria-Bertani)-agar/ampicilina [100 µg/ml]/X-Gal [40mg/ml]. 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 mantuvo en hielo durante 30 minutos. Se aplicó shock térmico de 30 segundos en baño maría a exactamente 42°C. Inmediatamente se colocó el vial en hielo y se agregaron 250 µl de medio LB líquido (almacenado a 37°C) a las células transformadas. Se incubó 1 hora a 37°C con agitación a 200 rpm. Posteriormente se esparcieron 50 µl en cada una de las tres placas LB-agar/ampicilina/X-Gal y se incubaron a 37°C de 12 a 16 horas. Se seleccionaron las colonias transformadas por complementación α , tomando 100 colonias de cada clonación.

Extracción de ADN plasmídico por lisis alcalina y análisis de restricción

Se extrajo ADN plasmídico de las colonias identificadas como positivas. Con un palillo se tomó una muestra de una colonia transformada y se inoculó en 5 ml de medio LB líquido conteniendo ampicilina [100 µg/ml]. Se incubó de 12 -16 horas a 37°C con agitación a 200 rpm. Posteriormente se cosecharon las colonias centrifugando aproximadamente 3 ml de cultivo por 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 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 10 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 bajo 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 Rsal 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 Rsal. Esto es: 1 unidad de Rsal [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 HPLC. Se incubó a 37°C durante 2 horas. Para amplicones ITS que no presentaron secuencia de reconocimiento para la enzima Rsal 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 HPLC. Se incubó a 37°C durante 2 horas.

La verificación de los análisis 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 y secuenciación

Con un palillo se tomó una muestra de una colonia transformada y se inoculó en 5 ml de medio LB líquido conteniendo ampicilina [100 µg/ml]. Se incubó de 12 -16 horas a 37°C con agitación a 200 rpm. En este caso la extracción de ADN plasmídico se llevó a cabo con el QIAprep spin miniprep kit (QIAGEN, Inc.). De esta forma se aseguró el nivel de pureza requerido para la secuenciación, el cual no se obtiene con la extracción de ADN plasmídico por lisis alcalina convencional (descrita anteriormente). 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 Retrogen o SeqXcel (San Diego, CA, EE.UU.) por el método de Sanger utilizando los oligonucleótidos sentido y antisentido M13F (5' – GTAAAACGACGGCCAGT – 3') y M13R (5' – GCGGATAACAATTTCACACAGG – 3'), respectivamente. Estos son proporcionados por la empresa y 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 MEGA 5.05 (Tamura et al. 2011). Las secuencias sentido y antisentido de cada muestra se alinearon y unieron en una "secuencia consenso" las cuales fueron exportadas en formato FASTA. Estas secuencias fueron comparadas en la base de datos del GenBank (NCBI) utilizando BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) (Altschul et al. 1990). Con base en el valor de E (parámetro que describe el número de secuencias similares esperadas en la base de datos), 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 que se obtendría teóricamente para cada muestra en un gel de agarosa al 1% con un marcador de peso molecular de 1 kb.

Resultados

Las extracciones de ADN presentaron concentraciones muy bajas. Al observar las muestras de ADN en el gel de agarosa no se observó ninguna banda Figura 113). Esta observación se repitió para todas las muestras.



Figura 113. Ejemplo del gel de agarosa de las muestras de la estación 19 en el que las bandas de ADN total no se alcanzan a percibir debido a su baja concentración.

Sin embargo, al cuantificar por espectrofotometría se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 114. Promedio de la concentración de ADN genómico total en las 5 submuestras de cada estación.

A pesar de las bajas concentraciones de ADN total, se llevaron a cabo las reacciones de PCR con distintos conjuntos de cebadores para amplificar la región ITS del ADNr. Los resultados se muestran en la Tabla 27:

Tabla 27. Amplificaciones con los distintos conjuntos de oligonucleótidos. N/A = No Amplificó, X = Amplificación positiva

Esta-	Univer-	Dikarya	ITS	ITS	ITS	ITS
ción	sales	(Figura 115)	Asco	Basidio	Chytrid	Oo
	(Figura 114)					
E3	N/A	Х	N/A	N/A	N/A	N/A
E15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
E19	N/A	Х	N/A	N/A	N/A	N/A
E27	N/A	N/A	Х	N/A	N/A	N/A
E31	N/A	N/A	Х	N/A	N/A	N/A
E33	N/A	N/A	Х	N/A	N/A	N/A
E35	N/A	Х	Х	N/A	N/A	N/A
E36	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
E40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
E43	N/A	X	N/A	N/A	N/A	N/A



Figura 115. Ejemplo de gel de electroforesis de las muestras E15, E19 y E3 en donde se observa que las amplificaciones no fueron exitosas con los ITS universales.



Figura 116. Ejemplo de gel de electroforesis de las muestras E15, E19 y E3 en donde se observa que las amplificaciones fueron exitosas para E19 y E3 y no exitosas para E15 con los ITS Dikarya.

Las clonaciones se llevaron a cabo únicamente con los amplicones obtenidos con el conjunto de oligonucleótidos Dikarya). Este conjunto se utiliza en una PCR anidada, por lo cual la especificidad que se obtiene es muy elevada y la probabilidad de amplificar secuencias pertenecientes a otros eucariotas es muy baja (Martin y Rygiewicz 2005). Las estaciones que fueron positivas para hongos Dikarya fueron E3, E19, E35 y E43. Los amplicones de estas muestras fueron clonados tras ser purificados. Para la estación E43 no se obtuvieron clonas positivas. Diversos intentos por clonar dichos amplicones resultaron fallidos. Anteriormente se ha reportado la incapacidad de clonar ciertos productos de PCR amplificados de muestras ambientales (Head et al. 1998). Asimismo es bien sabido que la clonación de conjuntos de secuencias es complicado y que debido a la composición de algunas secuencias de ADN (p.e. aquellas muy ricas en adeninas y timinas, o aquellas con secuencias repetidas que formen estructuras secundarias con el plásmido), simplemente no pueden ser mantenidas completas dentro del plásmido.

Para las estaciones E3, E19 y E35, se seleccionaron 100 clonas de cada transformación. Se extrajo ADN plasmídico y se llevaron a cabo los análisis de restricción.

Al momento se tienen los resultados de las estaciones 3, 19 y 35. La estación E19 mostró mayor diversidad en cuanto a los patrones de restricción, ya que hubo 20 patrones de restricción distintos (Figura 117). En la muestra E3 hubo solamente 5 patrones de restricción distintos (Figura 118) y en la muestra E35 se obtuvieron únicamente 3 patrones de restricción distintos (Figura 119).



Figura 117. Esquema de los patrones de restricción obtenidos después de la digestión con la enzima *Rsa*l de los plásmidos de la estación E19. Sobre cada carril se observa la clave para cada patrón de restricción. El marcador de peso molecular indica los tamaños de banda desde 100 hasta 10,000 pb.



Figura 118. Esquema de los patrones de restricción obtenidos después de la digestión con la enzima *Rsa*l de los plásmidos de la estación E3. Sobre cada carril se observa la clave para cada patrón de restricción. El marcador de peso molecular indica los tamaños de banda desde 100 hasta 10,000 pb.



Figura 119. Esquema de los patrones de restricción obtenidos después de la digestión con la enzima *Rsa*l de los plásmidos de la estación E35. Sobre cada carril se observa la clave para cada patrón de restricción. El marcador de peso molecular indica los tamaños de banda desde 100 hasta 10,000 pb.

Tabla 28. Filotipos según el porcentaje de cobertura, similitud y valor de E, así como el número de repeticiones del patrón de restricción por estación.

MUESTRA	FILOTIPO	QUERY COVERAG E (%)	E VALUE	MAX IDENT (%)	REPETICIONES DEL PATRON DE RESTRICCIÓN
E19-90	Penicillium citrinum	65	0	99	1
E19-89	Candida dubliniensis	67	0	96	6
E19-88	Penicillium citrinum	65	0	99	2
E19-87	Penicillium citrinum	59	0	97	3
E19-72	Candida albicans	79	0	98	1
E19-71	Candida albicans	79	0	93	1
E19-69	Candida albicans	75	0	97	1
E19-68	Penicillium citrinum	57	0	99	2
E19-58	Candida albicans	75	0	95	1
E19-54	Penicillium citrinum	60	0	99	5
E19-52	Penicillium citrinum	71	0	96	1
E19-49	Candida albicans	73	0	97	2
E19-43	Candida albicans	75	0	97	3
E19-37	Candida albicans	78	0	97	5
E19-36	Candida albicans	76	0	98	3
E19-18	Candida albicans	82	0	98	6
E19-07	Candida albicans	95	0	90	8
E19-06	Alternaria radicina	84	0	94	1
E19-03	Candida albicans	91	0	97	1
E19-01	Candida albicans	71	0	98	6
E3-82	Alternaria alternata	89	0	99	3
E3-65	Alternaria tenuissima	87	0	99	3
E3-60	Phoma exigua	84	0	96	17
E3-45	Candida albicans	84	0	98	3
E3-32	Didymella bryoniae	85	0	96	42
E35 - 01	Hongo sin cultivar	49	5e-112	84	7
E35 - 02	Coprinopsis strossmayeri	92	0	91	1
E35 - 03	Candida sake	78	0	99	66

Se estimó la abundancia de cada filotipo por estación con base en el número de veces que se repitió un determinado patrón de restricción. Claramente se observa, en la gráfica de pastel, que la estación E19 (Figura 120) tuvo una marcada predominancia de especies pertenecientes al género Candida. La estación E35 (Figura 121) muestra algo similar a la estación E19, ya que el filotipo dominante también es una especie perteneciente al género Candida. En cambio, la estación E3 (Figura 122) mostró una mayor abundancia de filotipos pertenecientes a la clase de los Dotideomycetos, específicamente Dydimella y Phoma, mientras el género Candida fue mucho menos abundante que en el resto de las muestras y es la única especie en esa estación que no pertenece a la clase de los Dotideomycetos.



Figura 120. Abundancia de los filotipos encontrados en E19.



Figura 121. Abundancia de los filotipos encontrados en E35.



Figura 122. Abundancia de los filotipos encontrados en E3.

Conclusiones

Los filotipos observados en la muestra E19, específicamente Candida albicans, Candida dubliniensis y Penicillium citrinum, son filotipos reportados anteriormente como especies capaces de utilizar hidrocarburos como sustrato (Kaczorek et al. 2008; Kaczorek et al. 2005; Polman et al. 1994). Asimismo en las tres muestras analizadas se encontraron diferentes especies pertenecientes al género de Candida, pero la abundancia de estas varió, habiendo mayor abundancia en la muestra E19 y en la muestra E35. Es bien sabido que el género Candida es el más evolucionado dentro del reino Fungi y por lo tanto las especies de Candida poseen un metabolismo muy desarrollado capaz de adaptarse a cualquier ambiente.

Se ha de notar que el Golfo de México posee "chapopoteras" naturales (Figura 123). Tanto la estación E19 como la estación E35, que fueron las que presentaron mayor abundancia de especies pertenecientes al género Candida, se encuentran muy cerca de afloramientos naturales de petróleo. Por lo anterior, y debido a la falta de caracterización de la diversidad fúngica durante las condiciones previas al derrame de la plataforma DP, no es posible concluir si dicha abundancia se debe a consecuencias del derrame petrolero o bien a la diversidad natural de dichas áreas asociada a las adaptaciones de estos hongos a las concentraciones altas de hidrocarburos provenientes de "chapopoteras" naturales. Sin embargo, la estación 3, la cual no se encuentra sobre un afloramiento posee una diversidad fúngica distinta en comparación a las otras dos estaciones, en donde la presencia de especies de Candida es muy notoria. En E3, la diversidad observada es típica de los océanos, mientras que la diversidad de E19 y E35 no lo es. Asimismo, la falta de amplificación en el resto de las muestras de sedimento nos podría estar mostrando que los hongos solo se desarrollan bajo condiciones ambientales difíciles o bien que solo se desarrollan bajo la ausencia de alguna otra comunidad microbiana (ver resultados de bacteriología en sedimentos).



Figura 123. Distribución de los afloramientos naturales de hidrocarburos en el Golfo de México (imagen tomada de Tunnell 2011).

Es esencial el procesamiento de las muestras de sedimento obtenidas en la campaña XIXIMI-II para la obtención de resultados. Como se ha mencionado anteriormente, la falta de antecedentes locales dificulta la inferencia de resultados debido a que no se tiene un punto de comparación. Aunque las muestras obtenidas en la campaña XIXIMI-II se recolectaron a más de un año del inicio del derrame, los resultados por obtener serán de gran importancia para la validación de estos primeros datos (XIXIMI-I).

Hasta donde se sabe, nuestros datos son los primeros obtenidos en cuanto al estudio de diversidad fúngica de sedimentos marinos profundos del Golfo de México en aguas mexicanas. Existen muy pocos antecedentes de diversidad fúngica marina en general, ya que en sí, el estudio de diversidad fúngica es un área relativamente novedosa en comparación con el estudio de diversidad de otros microorganismos como bacterias o plancton.

Recomendaciones

Es esencial contar con los recursos necesarios para continuar con el procesamiento de las muestras de sedimento de XIXIXMI-II, para obtener un punto de comparación con nuestros primeros resultados. Asimismo, es fundamental el continuo monitoreo de sedimentos marinos y columna de agua para dar seguimiento a este trabajo y caracterizar las fluctuaciones en la diversidad fúngica en ecosistemas marinos y entender, sí efectivamente, la diversidad fúngica se vio afectada por el derrame petrolero de la plataforma Deepwater Horizon.

Referencias

- Albu S, Blackwell M and Aime MC (2011) Gulf coast tarball-associated yeasts: understudied agents of microbial hydrocarbon degradation and potential human pathogens. MSA Annual Meeting Abstracts, 79th Annual meeting.
- Altschul SF, Gish W, Miller W, Myers EW and Lipman DJ (1990) Basic local alignment search tool. Journal of Molecular Biology 215: 403-410.
- Balasubramanya RH and Patil RB (1980) Heterotrophic nitrification by microorganisms capable of degrading carboxin and oxycarboxin. Indian Journal of Microbiology 20: 294 -297.
- Barua AS, Saha J, Chaudhuri S, Chowdhury A and Adityachadhury N (1990) Degradation of pendimethalin by soil fungi. Pesticide Science 29: 419 - 426.
- Burgaud G, Arzur D, Sampaio JP and Barbier G (2011) *Candida oceani* sp. nov., a novel yeast isolated from a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent (22300 meters). Antonie van Leeuwenhoek 100(1): 75 82.
- Damare S and Raghukumar C (2008) Fungi and macroaggregation in deep-sea sediments. Microbial Ecology 56:168 177.
- Damare S, Raghukumar C and Raghukumar S (2006) Fungi in deep-sea sediments of the central Indian basin. Deep-Sea Research Part I 53:14 27.
- Gao Z, Li B, Zheng C and Wang G (2008) Molecular detection of fungal communities in the Hawaiian Marine sponges Suberites zeteki and Mycale armata. Applied and Environmental Microbiology 74(19): 6091 6101.
- Gardes M and Bruns TD (1993) ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes application to the identification of mycorrhizae and rusts. Molecular Ecology 2: 113 118.
- Kaczorek E, Chrzanowski L, Pijanowska A and 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 and Kohlmeyer E (1979) Marine mycology, the higher marine fungi. Academic press, New York.

- Kostka JE, Prakash O, Overholt WA, Green SJ, Freyer G, Canion A, Delgardio J, Norton N, Hazen TC and Huettel M (2011) Hydrocarbon-degrading bacteria and the bacterial community response in Gulf of Mexico beach sands impacted by the Deepwater Horizon oil spill. Applied and Environmental Microbiology 77(22): 7962-7974.
- Kuhad RC and Singh A (1993) Enhanced production of cellulases by *Penicillium citrinum* in solid state fermentation of cellulosic residue. World Journal of Microbiology and Biotechnology 9: 100 101.
- Maliszewska I and Mastalerz P (1992) Production and some properties of lipase from *Penicillium citrinum*. Enzyme Microbial Technology 14: 190 - 193.
- Martin KJ and Rygiewicz 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 and Bärlocher F (2004). Taxon-specific fungal primers reveal unexpectedly high diversity during leaf decomposition in a stream. Mycological progress 3(1): 41-49.
- Pathirana RA and Seal KJ (1985) Studies on polyurethane deteriorating fungi: A note on the spectrochemical changes during fungal deterioration. International Biodeterioration and Biodegradation 21: 123-126.
- Polman JK, Stoner DL, and Delezene-Briggs KM (1994) Lignin, and dimethoxybenzyl alcohol by *Penicillium citrinum*. Journal of Industrial Microbiology 13: 292 299.
- Romero-Olivares AL (2010) Caracterización de la Biodiversidad Fúngica de Ecosistemas Áridos de Baja California. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California
- Suetrong CL, Schoch J, Spatafora W, Kohlmeyer J, Volkmann-Kohlmeyer B, Sakayaroj J, Phongpaichit S, Tanaka K, Hirayama Y and Jones EBG (2009) Molecular systematics of the marine Dothideomycetes. Studies in Mycology 64: 155 173S6.
- Tunnell JW Jr (2011) An Expert opinion of when the Gulf of Mexico will return to prespill harvest status following the BP Deepwater Horizon MC 252 oil spill. Corpus Christi (Texas): Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University.
- Vincze, T, Posfai J and Roberts RJ (2003) NEBcutter: a program to cleave DNA with restriction enzymes. Nucleic Acids Research 31: 3688-3691.

- White TJ, Bruns T, Lee S and Taylor JW (1990) Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for Phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ and White TJ (eds) PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications. Academic Press, Inc., New York, pp. 315-322.
- Widger WR, Golovko G, Martinez A, Ballesteros E, Howard J, Xu Z, Pandya U, Fofanov V, Rojas M, Bradburne C, Hadfield T, Olson NA, Santarpia JL and Fofanov Y (2011) Longitudinal metagenomic analysis of the water and soil from Gulf of Mexico beaches affected by the Deep Water Horizon oil spill. Available from Nature Precedings http://hdl.handle.net/10101/npre.2011.5733.1

Glosario de Términos

ADNr: secuencia de ADN contenida en los cromosomas del nucléolo que codifica ARN ribosómico.

Dikarya: subreino del reino Fungi en el cual se encuentran clasificados taxonómicamente los hongos pertenecientes al taxón Ascomycota y Basidiomycota.

Enzimas de Restricción: enzima que puede reconocer una secuencia de nucleótidos y cortar el ADN en esa secuencia de reconocimiento.

Oligonucleótidos: secuencias cortas de ADN que por complementariedad se unen a segmentos específicos de ADN que se pretenden amplificar en la PCR.

PCR (Reacción en cadena de la polimerasa): técnica utilizada con el fin de obtener muchas copias de un mismo gen (amplificar). Funciona a través de ciclos continuos con cambios de temperatura.

Polimerasa: enzima utilizada en la PCR la cual se encarga de llevar a cabo las polimerizaciones de las secuencias de ADN que se pretenden amplificar.

RFLP (análisis de restricción): técnica en la cual se utilizan enzimas de restricción que se encargan de cortar el ADN en distintos fragmentos y es comúnmente utilizada para observar las variabilidades dentro de las secuencias de ADN.

ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS DE XIXIMI-1

(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. Provienen 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. En algunos casos, por razón del mal funcionamiento tanto del sensor de salinidad como el de oxígeno y el de fluorescencia, no se tienen valores para la profundidad de disparo y por lo tanto se reporta como vacía la celda correspondiente.

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 29). Los datos primarios tienen exactamente los mismos valores en cada sección.

Tabla 29. Nombre de los archivos de la base de datos. La base de datos contiene las variables primarias y resultados de los análisis de muestras recolectadas durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 (6-22 noviembre 2010).

Nombre de achivo	Descripción de los datos	Responsable
XIXIMI1-BACTERIAS	Bacterias, columna de agua	Dr. Alexei Licea
XIXIMI1-BONGO	Zooplancton/Ictioplancton	Dr. Jaime Farber
		Dra. Sharon Herzka
XIXIMI1-CID-AT	Carbón Inorgánico Disuelto, Alcalinidad total	Dr. Martín Hernández-Ayón
XIXIMI1-COD	Carbón Orgánico disuelto	Dr. Víctor Camacho
XIXIMI1-FITOPLANCTON	Fitoplancton	Dr. Rubén Lara
XIXIMI1-HIDROCARBUROS	Hidrocarburos	Dr. Vinicio Macías
XIXIMI1-HIDROGRAFIA	Temperatura, Salinidad,	Dr. Juan Carlos Herguera
	Oxígeno, Fluorescencia	Dr. Julio Sheibaum
		M. en. C. Vicente Ferreira
		M. en C. Joaquín García
XIXIMI1-HONGOS	Hongos en sedimentos	Dra. Merixtell Riquelme
XIXIMI1-MACROFAUNA	Macrofauna en bentos	Dra. Victoria Díaz
XIXIMI1-MEIOFAUNA	Meiofauna en bentos	Dr. Axayácatl Rocha
XIXIMI1-METALESTRAZA-	Metales traza en la columna de	Dra. Lucila Lares
AGUA	agua	
XIXIMI1-METALESTRAZA-	Metales traza en sedimentos	Dr. Miguel Ángel Huerta
SEDIMENTO		
XIXIMI1-NUTRIENTES	Nitrato+Nitrito, Fosfato, Silicato	Dr. Walter Daesslé
XIXIMI1-SEDIMENTOS	Calcita, terrígenos, agua	Dr. Juan Carlos Herguera

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) <u>http://odv.awi.de</u>. La versión utilizada

es la 4.3.9. 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 (<u>http://marinemetadata.org/</u>). 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 tabla propuesta, donde los posibles valores son 0, 1, 4, y 8.

- Clasificación en su forma general:
 - 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

En este proyecto, hemos dado respuesta a la necesidad de establecer la línea de base de condiciones oceanográficas del GM considerando el 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 dentro de los contextos que se consideren convenientes.

No se aprecian indicios claros o unívocos del derrame de gran escala de hidrocarburos y gases asociados provenientes del pozo Macondo en la zona de aguas profundas del Golfo de México desde el paralelo 25°N hacia el sur. Sin embargo, sí se presentan anomalías en algunos de los datos 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 empleó, y que se estableció la línea de base en una red de estaciones puntuales que abarcan una región enorme. Tampoco se evaluaron los posibles efectos del derrame sobre niveles tróficos superiores. Por último, los resultados de este informe abarcan solo un punto en el tiempo (6 meses después del derrame y condiciones de otoño). Es primordial continuar con el esfuerzo de establecimiento de la línea de base de las condiciones físicas, geoquímicas y ecológicas de una zona muy poco conocida de las aguas mexicanas.

RECOMENDACIONES

Consideramos de suma continuar con este esfuerzo de establecimiento de línea de base en el Golfo de México. Considerando la variabilidad física, química y ecológica del Golfo de México, y el área tan extensa que abarcan sus zonas profundas, es imposible hacer una caracterización integral adecuada (establecer la línea de base) con base en una sola temporada de muestreo. Sería una gran limitante el solo hacer una evaluación y monitoreo de una zona tan extensa y desconocida durante sola una ocasión, ya que no brinda la suficiente información para poder distinguir entre los efectos de la variabilidad natural y los disturbios causados por eventos de gran escala, como fue el derrame petrolero del pozo Macondo.

REFERENCIAS

- DeHaan, C.J. & Sturges, W., 2005. Deep Cyclonic Circulation in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 35(10), pp.1801–1812.
- National Research Council (2003) Oil in the Sea III:Inputs, fates and effects, National Academies Press.
- National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling (2011) Deep Water: The Gulf Oil Distater and the Future of Offshore Drilling, Report to the President. Disponible: http://www.oilspillcommission.gov/finalreport.
- Oil Budget Calculator Science and Engineering Team, The Federal Interagency Solutions Group (2010) Oil Budget Calculator.
- http://www.restorethegulf.gov/sites/default/files/documents/pdf/OilBudgetCalc_Full_HQ-Print_11110.pdf . Accedida en Enero 2012.
- Rivas, D., Badan, A. & Ochoa, J., 2005. The Ventilation of the Deep Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 35(10), pp.1763–1781.
- Sheinbaum, J. et al., 2002. Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical research letters*, 29(3), pp.10–11.
- Schmitz, W. J., Jr., On the world ocean circulation: Volume 1. WHOI Tech rep. WHOI-96-03, 141 pp, 1996.
- Vukovich, F.M., 2007. Climatology of Ocean Features in the Gulf of Mexico Using Satellite Remote Sensing Data. *Journal of Physical Oceanography*, 37(3), pp.689–707.
- Wetherly *et al.*, 2005. Intermediate-Depth Circulation in the Gulf of Mexico Estimated from Direct Measurements. Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models. Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union.
GLOSARIO DE TÉRMINOS

AATC: Agua del Atlántico Tropical Central

AIW: Antartic Intermidate 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 (<u>http://odv.awi.de/</u>).

SUW: Subtropical Under-Water

TACW: Tropical Atlantic Central Water

WOCE: World Ocean Circulation Experiment

CRÉDITOS

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**" 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 diversas aspectos administrativos de este proyecto. Junto con su equipo administrativo, el Dr. Graef hizo posible preparar y llevar a cabo una campaña oceanográfica sumamente ambiciosa en un tiempo muy limitado y partiendo de un puerto que está a miles de kilómetros de Ensenada. Posteriormente, recibimos el apoyo de la institución durante la fase de análisis de los miles de muestras que se recolectaron durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1. Agradecemos al Ing. René Salas, nuestro pasado Director Administrativo, y la Maestra Leonor Falcón, nuestra actual Directora Administrativa, por sus gestiones y los innumerables retos que nos ayudaron a resolver. Julieta Castro, Delegada Administrativa de la División de Oceanología, y nuestras secretarias, Elvia Serrano, Karina García y Fernanda Sánchez, llevaron a cabo y le dieron seguimiento a cientos de solicitudes y elaboraron contratos. En particular, Julieta Castro supo orientarnos y ayudarnos una y otra vez. Ana Isabel Hernández y Jonathan Arroyo del Departamento de Compras nos brindaron su extraordinaria cooperación para conseguir importar en tiempos record los instrumentos y materiales para la campaña.

La tripulación del *BO Justo Sierra,* al mando del Capitán Leobardo Ríos, 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-1 por su gran esfuerzo, que contribuyó mucho a que podamos cumplir con nuestros objetivos (Figura 124). El Ocean. Joaquín García nos ayudó con los preparativos del equipo electrónico antes de zarpar y estuvo pendiente de nuestras actividades durante el crucero. Hizo un enorme 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 a los coordinadores con un sinfín de funciones dentro del proyecto, incluyendo la organización del crucero, participación en el crucero en sí, 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, entre otros. También trabajó en la compilación minuciosa de este informe. Siempre ha mantenido una actitud positiva y propositiva, 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 concientes del compromiso y dedicación que este proyecto a implicado. Ha sido y siguie siendo un enorme reto para todos.



Figura 124. Participantes científicos de la campaña XIXIMI-1 (de izquierda superior a derecha inferior). Dr. Juan Carlos Herguera (JEFE DE CRUCERO, CICESE), Dra. Sharon Herzka (CICESE), Marco Antonio Tenorio (IMP), Miguel Ojeda (CICESE), Felipe Gasca (CICESE), Vicente Ferreira (CICESE), Dra. Lucila Lares (CICESE), miembro de la tripulación, Alexandro Orozco (UABC), Ricardo González (CICESE), Adriana Romero (UABC/CICESE), Dr. Diego López Veneroni (IMP), Angélica Pedraza (UABC), Reyna Barradas (CICESE), Erika Gutiérrez (CICESE), José Luis Abella (CICESE), Daniela Rabiela (CICESE), Edwina Nieto (INE), Carlos Flores (CICESE), Ricardo Solís (CICESE), Arturo Siqueiros (UABC), Jairo Fuentes (CICESE).

ANEXOS

Anexo 1. Posición geográfica de las estaciones de CTD ocupadas durante la campaña XIXIMI-1. Se muestra el número secuencial del lance de CTD, su hora y fecha (UTC), la profundidad del fondo (metros) y la del lance de CTD (decibares).

No.	Estación	Latitud		Longitud		Prof	Pres	Hora [UTC]			Fecha [UTC]		
Lance		°N		°0		[m]	[db]	Hh	Mi	se	dd	Mm	Aa
1	1	21	59.464	97	6.1908	1016	1002	23	26	20	4	11	2010
2	2	22	59.769	96	41.705	1793	998	7	46	31	5	11	2010
3	13	24	0.1638	96	43.122	1309	1002	15	50	9	5	11	2010
4	15	25	0.4794	95	36.057	2411	2379	1	17	47	6	11	2010
5	16	24	59.957	94	47.39	3597	2827	9	24	15	6	11	2010
6	17	24	59.783	93	59.596	3698	3001	15	47	38	6	11	2010
7	18	25	0.66	93	0.2424	3623	3003	1	25	23	7	11	2010
8	19	25	0.342	91	58.191	3517	3005	11	31	2	7	11	2010
9	20	24	59.86	91	0.3948	3536	3002	18	19	47	7	11	2010
10	21	25	0.3192	90	1.0128	3527	3003	2	18	15	8	11	2010
11	22	25	2.5728	89	0.2328	3478	3009	10	37	49	8	11	2010
12	23	24	59.88	88	0.1098	3410	3002	20	2	44	8	11	2010
13	24	24	50.429	87	0.6072	3339	3001	3	43	7	9	11	2010
14	27	23	59.3	86	45.47	1228	1005	12	47	33	9	11	2010
15	29	24	28.936	87	56.838	1	1349	4	50	47	11	11	2010
16	30	23	59.998	89	0.303	1	1003	11	48	56	11	11	2010
17	31	24	0.1176	90	0.36	1	3244	18	30	56	11	11	2010
18	32	24	0.0012	90	59.942	1	1003	3	38	14	12	11	2010
19	8	24	0.0126	92	0.6036	1	3658	10	28	44	12	11	2010
20	9	24	0.1926	93	0.3468	1	1003	16	52	4	12	11	2010
21	10	23	59.849	93	59.395	1787	3003	23	34	18	12	11	2010
22	11	24	1.5324	94	59.71	3263	1000	8	24	37	13	11	2010
23	12	24	0.9858	96	0.2352	3254	2269	17	46	23	13	11	2010

No.	Estación	Latitud		Longitud		Prof	Pres	Hora [UTC]			Fecha [UTC]		
Lance		°N		°O		[m]	[db]	Hh	Mi	se	dd	Mm	Aa
24	3.b	23	0.006	95	59.891	2298	2303	4	7	30	14	11	2010
25	3	23	0.4518	95	0.3168	3571	1002	11	16	38	14	11	2010
26	6	22	59.293	94	0.279	3715	3003	20	44	3	14	11	2010
27	44	22	59.613	93	0.669	3740	1002	4	20	52	15	11	2010
28	34	23	0.0192	92	0.8928	3683	1001	12	22	14	15	11	2010
29	33	23	0.8268	91	0.564	3705	3002	19	51	48	15	11	2010
30	47	22	29.764	92	0.8238	1	1002	5	26	20	16	11	2010
31	43	21	59.453	93	0.5448	1	3283	12	31	28	16	11	2010
32	7	21	59.19	94	1.0128	1	1000	20	38	36	16	11	2010
33	5	22	0.1668	95	0.0924	1	1003	2	32	21	17	11	2010
34	4	21	59.341	96	0.3042	1	2686	10	9	37	17	11	2010
35	39	20	59.918	95	59.713	1	1002	17	17	12	17	11	2010
36	38	20	59.813	95	0.7134	3164	3138	0	50	6	18	11	2010
37	37	21	0.2304	94	0.9924	2799	1002	8	56	42	18	11	2010
38	36	21	0.4248	92	59.878	2559	2515	16	11	27	18	11	2010
39	35	20	29.776	92	40.522	1	1002	23	42	10	18	11	2010
40	42	19	59.752	93	0.6672	1	1243	5	13	9	19	11	2010
41	41	20	0.4062	94	0.6168	1366	1004	11	23	53	19	11	2010
42	40	20	0.6768	95	0.267	1	2717	17	49	51	19	11	2010
43	45	19	16.135	94	59.764	1978	202	2	29	25	20	11	2010
44	45	19	16.36	94	59.198	1978	1001	3	24	55	20	11	2010
45	46	20	0.1554	95	59.803	1802	1001	11	24	40	20	11	2010
46	48	20	30.029	96	0.1992	1932	1004	14	44	45	20	11	2010
Fin de la campaña oceanográfica													

NOTAS:

Durante la navegación se hicieron mediciones continuas de parámetros meteorológicos y oceanográficos:

a) Magnitud y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica (Estación portátil meteorológica). b) Temperatura y salinidad (Termosalinómetro SBE); toma de agua ~ a 4 m en el casco del buque.

Anexo 2. Datos CTD (Conductividad, temperatura y profundidad), termosalinómetro (temperatura y salinidad superficial) y datos meteorológicos recolectados en cada estación de la campaña oceanográfica XIXIMI-1. Por su tamaño, se entrega el archivo en formato digital (Anexo2_datos_CTD_termosal.xlsx).

Anexo 3. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia medidos en los lances con la roseta durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1. Las gráficas de los perfiles están organizadas por número de lance. Para identificar la estación a la cual corresponde a cada lance, hacer referencia al Anexo 1. Por su tamaño, se entrega el anexo en formato digital (Anexo3_perfiles.pdf).

Anexo 4. Carta Dr. Juan Carlos Herguera con justificación de retraso en análisis de la composición isotópica del carbono inorgánico en el agua. Se anexa en formato electrónico (Anexo4_carta_herguera_CIDisotopos.pdf).

Anexo 5. Las muestras para los análisis de la composición isotópica de carbono de la materia orgánica particulada de la columna de agua fueron enviadas para análisis al Stable Isotope Facility (SIF) de la Universidad de California, Davis en octubre del 2010. Se mandaron a un laboratorio externo por tener problemas con el Espectrómetro de Masas del CICESE. Las muestras fueron recibidas en SIF el 19 de octubre del 2011. El 4 de enero del 2012 nos informaron que los resultados llegarían a finales de mes En el anexo se documenta el intercambio con SIF (Anexo5_Datos_isotópicos_MOP). Responsables: Dr. Juan Carlos Herguera y Dra. Sharon Herzka

Anexo 6. Carta Dra. Lucila Lares, Justificación de retraso en análisis de metales traza en la columna de agua. Se entrega en formato digital (Anexo6_carta_Lares.pdf).

Anexo 7. Carta Dr. Vinicio Macías, Justificación de retraso en análisis de hidrocarburos en la columna de agua. Se entrega en formato digital (Anexo7_carta_Macias.pdf).

Anexo 8. Gráficas del porcentaje de abundancia de distintos grupos bacterianos en cada una de las estaciones muestreadas durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1. Por su tamaño, se anexa el archivo en formato electrónico (Anexo8_graficas_bacterias.xls).

Anexo 9. Carta Dr. Juan Carlos Herguera con justificación de retraso en análisis de la composición elemental de C y N orgánico e inorgánico, sus composiciones isotópicas, tasas de acumulación y propiedades texturales. Se anexa en formato electrónico (Anexo9_carta_herguera_sedimentos.pdf).