

00322



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

96

"VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA(a)  
EN AGUAS OCEÁNICAS Y SEDIMENTO DEL MAR  
PROFUNDO EN EL GOLFO DE MÉXICO"

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
B I O L O G O  
P R E S E N T A  
K I M L E Y C O O P E R



DIRECTOR DE TESIS: DRA. ELVA GUADALUPE ESCOBAR BRIONES



A



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ARZOBISPADO NACIONAL  
CATEDRAL DE  
MEXICO

Autorizada la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a digitalizar en formato electrónico e imprimir el contenido de mi trabajo excepcional.

RECIBIDA: Kim Ley Cooper  
FECHA: 16 / Oct / 2003  
FIRMA: [Firma]

**DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA**  
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la  
Facultad de Ciencias  
Presente

Comunicamos a Usted que hemos revisado el trabajo escrito:  
"Variación de la concentración de clorofila (a) en aguas oceánicas  
y sedimento del Mar profundo en el Golfo de México"

realizado por Kim Ley Cooper con número de cuenta 9754113-2  
quién cubrió los créditos de la carrera de Biología  
Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis  
Propietario

Dra. Elva Guadalupe Escobar Briones Elva Escobar-Briones

Propietario

Dr. Javier Alcocer Durand Javier Alcocer

Propietario

Dr. Raul Aguirre Gómez Raul

Suplente

Dr. Javier Carmona Jiménez Javier

Suplente

Biol. Luis Alberto Osequera Pérez [Firma]

Consejo Departamental de

Biología

[Firma]  
M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chavez



## Índice

Lista de Figuras	i
Lista de Ecuaciones	ii
Lista de Tablas	iii
Resumen	1
Abstract	2
Introducción	4
Antecedentes	14
Objetivos	15
Hipótesis	15
Área de Estudio	16
Material y Métodos	
Trabajo de Campo	19
Trabajo de Laboratorio	23
Resultados	31
Discusión	77
Conclusiones	97
Apéndice	100
Referencias	108
Agradecimientos	112

**Lista de Figuras**

Figura 1. Velocidad de hundimiento de partículas biogénicas en el océano con base en su volumen tomado de (Fortier *et al.*, 1994). *Página 12*

Figura 2. Localización del área de estudio y toponimia de la región. *Página 17*

Figura 3. Ubicación de las localidades de muestreo en el sector suroccidental del Golfo de México en las cuales se recolectó las muestras de agua y sedimento en la campaña SIGSBEE.5 en julio 2002. *Página 20*

Figura 4. Perfil de temperatura, salinidad y densidad en columna de agua generado por el CTD en el campo durante la campaña de SIGSBEE.5. *Página 21*

Figura 5. Perfil de fluorescencia en columna de agua que muestra el cambio de PAR y la concentración de clorofila a con respecto a la profundidad. *Página 21*

Figura 6. Diseño de la recolecta de muestras en el perfil de columna de agua en las zonas batimétricas contempladas en el muestreo de este estudio. El esquema muestra los seis estratos de muestreo. *Página 22*

Figura 7. Distribución horizontal y vertical de la Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en los seis estratos de profundidad en columna de agua en las 12 localidades de muestreo en el transecto de costa a zona oceánica en el sector suroccidental del Golfo de México para el mes de junio del 2002. 1) Capa de mezcla, 2) Máximo de Chl a, 3) termoclina 4) Borde inferior de la termoclina, 5) Agua de 1500m de profundidad y, 6) Agua de fondo. *Página 33*

Figura 8. Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para cada estación (números del eje x) en el estrato de la capa de mezcla (10 a 40 m) de columna de agua, en un transecto en el sector suroccidental de el Golfo de México. Abreviaturas: PA= Planicie abisal, TC= Talud continental, REB= Reborde continental. *Página 35*

Figura 9. Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para la capa de mezcla (10 a 40 m), en un transecto del sector suroccidental de el Golfo de México. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo. *Página 36*

Figura 10. Relación lineal entre la concentración de la Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  del estrato máximo de clorofila a (40 a 100 m), con respecto a la distancia de la costa a la zona oceánica en el sector suroccidental de el Golfo de México. *Página 38*

Figura 11. Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de máximo de clorofila a (40 a 100 m), en un transecto en el sector suroccidental del Golfo de México. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo *Página 39*

Figura 12. Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para cada estación en el estrato de la termoclina (120 a 200 m), fin de la zona eufótica en un transecto en el sector suroccidental de el Golfo de México. *Página 41*

Figura 13. Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de termoclina (120 a 200 m), fin de la zona eufótica, en un transecto en el sector suroccidental de el Golfo México. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo. *Página 41*

Figura 14. Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de borde inferior de la termoclina, primer medida de la zona disfótica, en un transecto en el sector suroccidental de el Golfo de México. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo. *Página 43*

Figura 15. Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de agua de 1500 m de profundidad, en un transecto en el sector suroccidental del Golfo de México medida en Julio 2002. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo. *Página 45*

Figura 16. Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  estrato de agua de fondo (3500m Planicie abisal, 2700m Talud continental y 500m Reborde continental) en un transecto en el sector suroccidental de el Golfo de México medida en junio del 2002. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo. *Página 47*

Figura 17. Variación de la concentración de Chl a en la zona eufótica a lo largo del transecto desde el reborde continental (E12) en la zona nerítica hasta las estaciones de la planicie abisal en la zona oceánica (E1). *Página 48*

Figura 18. Comparación de la concentración Promedio de Chl a entre las estaciones de la zona oceánica (OCE) y las estaciones zona Nerítica (NER) (reborde y talud continental) en la zona eufótica. Datos obtenidos del transecto llevado acabo en la zona suroccidental del Golfo de México en Julio 2002. *Página 48*

Figura 19. Variación de la concentración de Chl a en la zona disfótica a lo largo del transecto desde el reborde continental (E12) en la zona nerítica hasta las estaciones de la planicie abisal en la zona oceánica (E1). *Página 49*

Figura 20. Comparación de la concentración Promedio de Chl a entre las estaciones de la zona oceánica (OCE) y las estaciones zona Nerítica (NER) (reborde y talud continental) en la zona disfótica. Datos obtenidos del transecto llevado acabo en la zona suroccidental del Golfo de México en Julio 2002. *Página 49*

Figura 21. Comparación de la concentración Promedio de Chl a entre las estaciones de la zona oceánica-abisal (OCE) y las estaciones de zona Nerítica, (reborde y talud continental) (NER) en el sedimento. Datos obtenidos del transecto llevado a cabo en la zona suroccidental del Golfo de México en Julio 2002.

Figura 22. Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{gcm}^{-3}$  en sedimento (3500m Planicie abisal, 2700m Talud continental y 500m Reborde continental) para un transecto en el sector suroccidental del Golfo de México medida en Julio del 2002. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

Figura 23. Variación de la concentración de Chl a en  $\mu\text{gcm}^{-3}$  para cada estación en el primer centímetro de sedimento superficial, en el transecto desde el reborde continental hasta la planicie abisal en el sector suroccidental del Golfo de México en Julio 2002. *Página 54*

Figura 24. Patrón de distribución de los valores promedio de la concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) y su cambio con la profundidad (m) para el sector suroccidental desde la costa hasta la zona oceánica (doce estaciones) del Golfo de México en el mes de Julio 2002. *Página 55*

Figura 25. Patrón de distribuciones entre concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) y la profundidad (m) para la zona oceánica (estaciones 1 a 9) del sector suroccidental del Golfo de México en el mes de Julio 2002. *Página 56*

Figura 26. Patrón de distribuciones entre concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) y la profundidad (m) para la zona de Talud continental y Reborde continental (estaciones 10, 11 y 12) en el sector suroccidental del Golfo de México en el mes de Julio 2002  
Objetivo. *Página 56*

Figura 27. Promedio, desviación estándar y varianza de la concentración de Chl a para las estaciones pertenecientes a Talud continental y Planicie abisal tanto en columna (máximo de Chl a) como en sedimento. Gráficas producto del análisis de ANOVA de STATISTICA. *Página 59*

Figura 28. Valores promedio de concentración de Chl a en  $\text{mg}/\text{m}^3$  (equivalente a  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) durante el mes de mayo 2002 representadas como color del mar de imágenes diarias del SeaWiFS. En rojo se proyecta el transecto que se siguió para la recolecta de muestras durante la campaña de SIGSBEE.5 en el mes de julio, desde latitud  $23^{\circ}35'$  longitud  $92^{\circ}02'$  (E1) hasta latitud  $21^{\circ}12'$  longitud  $96^{\circ}49'$  (E12) en las zonas nerítica y oceánica del sector suroccidental del Golfo de México. *Página 60*

Figura 29. Valores promedio de concentración de Chl a en  $\text{mg}/\text{m}^3$  (equivalente a  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) durante el mes de junio 2002 representadas como color del mar de imágenes diarias del SeaWiFS. En rojo se proyecta el transecto que se siguió para la recolecta de muestras durante la campaña de SIGSBEE.5 en el mes de julio, desde latitud  $23^{\circ}35'$  longitud  $92^{\circ}02'$  (E1) hasta latitud  $21^{\circ}12'$  longitud  $96^{\circ}49'$  (E12) en las zonas nerítica y oceánica del sector suroccidental del Golfo de México. *Página 61*

Figura 30. Histogramas de la concentración promedio mensual de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) de la superficie del mar registrados de los cuadrantes de la imagen del satélite SeaWiFS a lo largo del transecto correspondiente a la campaña SIGSBEE.5 durante el mes de Julio, en latitud  $23^{\circ}35'$  y longitud  $92^{\circ}02'$  (E1) y hasta latitud  $21^{\circ}12'$  y longitud  $96^{\circ}49'$  (E12) para los meses de a) mayo de 2002 y b) junio del 2002. *Página 63*

Figura 31. Se observan diferencias gráficas de valores de Chl a para el transecto de Seawifs del mes de Mayo donde se encontró que el promedio de estaciones de zona oceánica fue  $0.088\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) con una desviación estándar de  $0.071\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) y para zona nerítica fue  $0.326\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ )  $0.016\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ). *Página 64*

Figura 32. Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) para las doce estaciones cuyo valor es el promedio longitudinal de 30 minutos lineales sobre el transecto de Seawifs (10 a 25 m) para el mes de mayo 2002 (números del eje x). Abreviaturas: PA= planicie abisal, TC =talud continental y RC= reborde continental. *Página 65*

Figura 33. Se observan diferencias gráficas de valores de Chl a para el transecto de Seawifs del mes de Junio donde se encontró que el promedio de estaciones de zona oceánica fue  $0.11\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) con una desviación estándar de  $0.09\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) y para zona nerítica fue  $0.278\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ )  $0.11\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ). *Página 65*

Figura 34. Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) para las doce estaciones, cuyo valor es el promedio longitudinal de 30 minutos lineales sobre el transecto de Seawifs (10 a 25 m) para el mes de Junio 2002 (números del eje x). Abreviaturas: PA= planicie abisal, TC =talud continental y RC= reborde continental. *Página 66*

Figura 35. Regresión lineal de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) obtenida del transecto de seawifs en el mes de mayo (eje Y) contra concentración de Chla  $\mu\text{g L}^{-1}$  obtenida en la capa de mezcla in situ durante el crucero de Sigsbee.5 (eje x). *Página 66*

Figura 36. Regresión lineal de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) obtenida del transecto de seawifs en el mes de junio (eje Y) contra concentración de Chla  $\mu\text{g L}^{-1}$  obtenida en la capa de mezcla in situ durante el crucero de Sigsbee.5 (eje x). *Página 67*

Figura 37. Regresión lineal de la Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) obtenida del transecto de seawifs en el mes de mayo (eje Y) contra concentración de Chla  $\mu\text{g L}^{-1}$  obtenida en el sedimento in situ durante el crucero de Sigsbee.5 (eje x). *Página 67*

Fig 38 Regresión lineal de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) obtenida del transecto de SeaWiFS en el mes de junio (eje Y) contra concentración de Chl a obtenida en el sedimento *in situ* durante el crucero de SIGSBEE.5 (eje x). *Página 68*

Figura 39. Triplot de la ordenación generada por el análisis de redundancia con varianza explicada (RDA) donde los círculos sólidos corresponden a las localidades de muestreo,

los vectores corresponden a las variables ambientales con longitud multiplicada para mayor claridad en el diagrama. *Página 72*

Figura 40. Agrupamiento espacial de las estaciones en las cuales se recolectaron las muestras en las dos coordenadas principales, profundidad (R1) y Chl a (R2), cuyos factores determinan el 98% de la varianza obtenida del análisis de la matriz. *Página 74*

Figura 41. Valores de nivel del mar (cm), representados como color del mar de imágenes del día 7 de Julio 2002 obtenidas de topex poseidon. Se proyecta el transecto que se siguió para la recolecta de muestras durante la campaña de SIGSBEE.5 durante el mismo mes, desde latitud 23°35 longitud 92°02 (E1) hasta latitud 21°12 longitud 96°49 (E12) en las zonas nerítica y oceánica del sector suroccidental del Golfo de México. Las estaciones del transecto coinciden con la distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de máximo de clorofila a (40 a 100 m). Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo. *Página 75*

Figura 42. Regresión lineal de estaciones oceánicas E1 a E9 que relaciona el nivel de mar (cm) con concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Presenta la ecuación  $y = 131.12x - 1.03$  y una  $R^2$  de 0.778. (se excluye estación anómala E6). *Página 76*

Figura 43. Imagen fotográfica de un cocolitoforido colectado en el máximo de Chl a durante el crucero SIGSBEE.5 en julio 2002

Figura 44. Imagen fotográfica de un dinoflagelado colectado en el máximo de Chl a durante el crucero SIGSBEE.5 en julio 2002

Figura 45. Imagen fotográfica de un dinoflagelado colectado en el máximo de Chl a durante el crucero SIGSBEE.5 en julio 2002

Figura 46. Variación de los pigmentos cloroplásticos expresados en ng de Chl a / $\text{cm}^2$  de sedimento hacia el interior de los 10 cm superficiales del sedimento. (tomado de O Pfannkuche, 1996).

**Lista de Ecuaciones**

- Ecuación 1. Ley de Stokes  $V_s = [(\rho_2 - \rho_1) * g * D^2] / 18\eta$ . *Página 10*
- Ecuación 2. El valor en columna de agua se calculó a partir de la *Página 24*
- Ecuación 3. Determinación de la Chl a en sedimento. *Página 24*
- Ecuación 4. El promedio. *Página 25*
- Ecuación 5. La desviación estándar. *Página 25*
- Ecuación 6. El intervalo de confianza. *Página 25*
- Ecuación 7. La ecuación usada para eigen análisis de redundancia. *Página 27*
- Ecuación 8. La ecuación para cada regresión correspondiente a la matriz. *Página 28*
- Ecuación 9. Ecuación correspondiente a la matriz para el total de regresiones. *Página 28*
- Ecuación 10. En la regresión múltiple los valores ajustados  $\hat{Y}$ . *Página 28*
- Ecuación 11. Tabla completa de valores ajustados  $\hat{Y}$  se calculó en una matriz de operación, usando B. *Página 28*
- Ecuación 12. La matriz de covarianza correspondiente a tabla de valores  $\hat{Y}$  se calculó.
- Ecuación 13. Al reemplazar  $\hat{Y}$ . *Página 28*
- Ecuación 14. La ecuación 13 se redujo la ecuación a la nueva ecuación *Página 28*
- Ecuación 15. Eigen valores. *Página 28*
- Ecuación 16. Eigen valores traducidos. *Página 29*
- Ecuación 17. La transformación de  $\text{mg/m}^3$  a  $\mu\text{g L}^{-1}$  es posible. *Página 31*
- Ecuación 18. Los valores de Chl a en el sedimento superficial cambiaron con respecto a la profundidad de las zonas batimétricas con una relación lineal que se describe por la ecuación.
- Ecuación 19. Describe el comportamiento de los valores de Chl a con respecto a la profundidad en las doce estaciones en la figura 24. *Página 57*
- Ecuación 20. Describe la tasa de cambio para las estaciones de la zona oceánica y muestra una similitud con la ecuación obtenida para el promedio general del transecto. *Página 57*
- Ecuación 21. Describe la tasa de cambio de la Chl a con respecto al incremento de profundidad en columna de agua para las zonas del talud continental y del reborde continental (Figura 29). *Página 57*
- Ecuación 22. Asociada a una correlación ( $R^2$  de 0.778) muy clara entre el nivel del Mar y la concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en el estrato máximo de Chla a.

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Tasas de hundimiento y origen de las partículas en el océano según diferentes autores. *Página 11*

Tabla 2. Posición geográfica y profundidad del suelo marino, para estaciones de muestreo en el transecto del suroeste del golfo de México. *Página 19*

Tabla 3. Características del satélite para estimar el color del mar SEAWIFS conforme se usaron para interpretar la concentración de clorofila promedio. *Página 30*

Tabla 4. Concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en los seis niveles de columna de agua en las 12 estaciones del transecto de costa a zona oceánica en el sector sur occidental del Golfo de México en el mes de junio 2002. *Página 32*

Tabla 5. Concentración de Chl a en la capa de mezcla, medida en Julio del 2002 en el sector suroccidental del Golfo de México. *Página 34*

Tabla 6. Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el estrato de máximo de clorofila a localizado en el borde superior de la termoclina, (40 a 100m) medida en Julio del 2002 en el sector suroccidental del Golfo de México. *Página 37*

Tabla 7. Resumen de regresión lineal entre concentración de Chl a y posición de las estaciones a distancia de la costa. Para el estrato máximo de clorofila a (40 a 100 m). *Página 38*

Tabla 8. Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el estrato de termoclina, (120 a 200m) fin de la zona eufótica, medida en Julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México. *Página 40*

Tabla 9. Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el estrato de borde inferior de la termoclina, que es la primera medida de zona disfótica medida en Julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México. *Página 42*

Tabla 10. Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el de agua de 1500m de profundidad donde fuera posible, (se excluye E8 por falta de muestreo y reborde continental E12) medida en Julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México. *Página 44*

Tabla 11. Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  para cada estación en el estrato de agua de fondo (3500m Planicie abisal, 2700m Talud continental y 500m Reborde continental) medida en Julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México. *Página 46*

Tabla 12 Concentración de Chl a  $\mu\text{gcm}^{-3}$  para cada estación en el sedimento superficial del transecto de las zonas reborde continental a planicie abisal. (3500m Planicie abisal, 2700m Talud continental y 500m Rebordo continental) medida en Julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México.

Tabla 13. Resultados del ANOVA entre las zonas nerítica y oceánica para valores de Chl a de columna de agua y de sedimento superficial. *Página 58*

Tabla 14. Resultados de las pruebas de Newman Keuls para los valores de las concentraciones de Chl a en los habitats [columna de agua (1) y sedimento superficial (2)], y las zonas batimétricas [(Talud continental/Rebordo continental (1), y planicie abisal (2)]. Los valores promedio de Chl a se ordenaron de menor a mayor. El nivel de significancia igual a  $\alpha$  para cada grupo de "r" fue de  $r = p-1$ .

Tabla 15. Valores promedio longitudinal de 30 minutos lineales sobre el transecto para la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para los meses de mayo y junio de 2002, recolectados de los valores a lo largo de cada mes de las imágenes de satélite del SeaWiFS en el transecto, [latitud 23°35, longitud 92°02 (E1) a latitud 21°12 longitud 96°49 (E12)] de la campaña de SIGSBEE.5 durante el mes de Julio. *Página 63*

Tabla 16. Valores de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en los estratos de la columna de agua en las 12 estaciones del sector suroccidental del Golfo de México en Junio 2003. Abreviaciones: Reb cont = rebordo continental, Talud cont = talud continental, P. Abisal Planicie abisal *Página 69*

Tabla 17. Valores de concentración de oxígeno disuelto ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) en los estratos de profundidad de la columna de agua en las 12 estaciones del sector suroccidental del Golfo de México. Julio 2002. *Página 70*

Tabla 18. Valores de pH registrados en agua de los estratos en las 12 estaciones del transecto en el sector suroccidental del Golfo de México en julio 2002. *Página 71*

Tabla 19. Descriptores de escalamiento y ordenamiento generado por el análisis de coordenadas principales utilizando distancia euclideana como índice de agrupamiento. *Página 73*

## AGRADECIMIENTOS

- Al ICML UNAM-CU y al director Dr. Adolfo García Gasca por el apoyo a este trabajo de investigación durante su gestión.
- A la Unidad Académica en Sistemas Oceanográficos y Costeros del ICML UNAM-CU por apoyo y facilidades brindadas para el desarrollo de este estudio.
- A las tripulaciones del B/O Justo Sierra de la UNAM por el apoyo para la recolecta de los materiales estudiados en este trabajo.
- Al CONACyT por el financiamiento parcial de este proyecto a través del apoyo Variación de la estructura comunitaria del bentos abisal en el Golfo de México, Convocatoria Ciencia Básica SEP CONACyT 2002 Clave 40158, y apoyo parcial de los proyectos CONACyT G35442-T, CONACyT G-27777B
- A la DGAPA UNAM proyecto IN211200 por el apoyo con la beca de licenciatura de Kim Ley Cooper durante sus etapas 12 y 13 y financiamiento parcial para el desarrollo de este proyecto.
- A los miembros del jurado:

Dr. Javier Alcocer Durand, por su apoyo teórico, práctico y anímico desde los niveles de taller en la licenciatura, hasta la realización de la tesis, además de el uso de el fluorómetro en su laboratorio en Iztacala.

Dr. Javier Carmona Jiménez, por las observaciones y comentarios que ayudaron a reestructurar la tesis.  
Biólogo Luis Alberto Oseguera Pérez, por las observaciones y revisión teórica de la tesis, así como el apoyo técnico en Iztacala

Dr. Raul Aguirre Gómez y su grupo de trabajo en el Instituto de Geografía, en especial Olivia Salmerón por aportar las imágenes de satélite, y ayudarme en la interpretación de los datos provenientes de estas. También por dejarme llevar el curso de Imágenes de Satélite del ICMYL con el.

- A la Dra. Elva Escobar, directora de esta tesis por dejarme participar en el proyecto junto con ella, por todo su apoyo teórico, práctico, técnico y emocional que me permitió sacar adelante la tesis. Por invitarme a el crucero de SIGSBEE.6, al congreso en New Orleans y el resto de innumerables apoyos que me permitieron seguir aprendiendo. Además por ser también directora de servicio social y maestra de taller en la licenciatura, y abrirme los ojos a como se hace ciencia en México.
- Al Dr. Luis A. Soto, Laboratorio de Ecología de Bentos del ICML UNAM-CU, por el espacio otorgado a la Dra. Escobar para que se pudiera llevar a cabo este trabajo de tesis.
- Al Dr. L. Salas, por ayudarme con surfear e interpretación de corrientes.
- A Ignacio Palomar por su ayuda en toda el área técnica de Computo
- A mis compañeros de laboratorio como Fernanda Adame por sugerencias y apoyo en el análisis de datos y uso del Fluorometro, Manuel por proporcionar las fotos de Máximo de CHl a, y Diana

por ayudarme con bibliografía .

- A mi padre Juan Ley y madre Jennifer cooper por todo el apoyo a lo largo de mi vida académica desde el punto de visto económico, emocional y de orientación tanto en los momentos más difíciles como en los mejores
- A mi hermano Yusen por inspirarme y darme ánimos en innumerables cosas a lo largo de toda la carrera y formación.
- A Clara por compartir conmigo tres de mis años en la facultad y ser siempre un apoyo incondicional. A si mismo a mis amigos del pulpo, y de la carrera Diego, Carlo, Lucia, Neto, Poncho, Rafa, Beto, Vanesa, Laura, Barbara, Victor, Nicolas, Alejandra, Pablo, Citlali, Andrea, Mariana, Constanza(s), Aline, Yosune, Ismael, Elda, Ximena, Yvette, Olmo. A los del Cenote Azul por aguantarme: Emiliano, Juan Carlos, Adrian, Virginia, Magda, Adelaida, Rosario, Tatiana, Jackie, Aurora, Laura, Melinda, Iztel. A todos los PUMAS futbol americano.1999-2003.

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la concentración en un gradiente vertical y un gradiente horizontal de clorofila a (Chl a), sobre un transecto perpendicular a la línea de costa, en la planicie abisal sur occidental del Golfo de México. Esto con objeto de describir las características de columna de agua en un gradiente vertical y espacial, así como la concentración de pigmentos en el sedimento superficial y reconocer el patrón de distribución en el gradiente batimétrico. Con estos resultados buscamos relacionar el máximo de clorofila en columna de agua con la concentración de pigmentos en sedimento. Además de los valores obtenidos *in situ* durante la campaña oceanográfica, evaluamos la concentración promedio de Chl a en imágenes de color de mar utilizando el sensor SeaWiFS con el objetivo de relacionar los dos meses previos, con las concentraciones de material exportado obtenido en campo. Así mismo se utilizaron imágenes de nivel del mar, para relacionar las concentraciones de Chl a obtenidas en campo con la topografía de la superficie del mar. Finalmente se propuso un modelo de exportación del carbono biogénico de origen fotosintético al suelo marino. Se obtuvieron muestras de doce estaciones estratégicas sobre el transecto perpendicular a la costa donde tres localidades se ubicaron en la zona nerítica, una de las cuales se encontraba sobre el reborde continental (E12) y dos sobre talud continental (E10 y E11), y nueve se ubicaron en la zona oceánica sobre la planicie abisal (E1 a E9). Para cada estación se tomaron muestras de sedimento, y seis muestras en estratos de la vertical de columna de agua en profundidades discretas, de donde se recolectaron muestras para Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ), y se tomaron mediciones de factores ambientales como pH, concentración de  $\text{O}_2$  y temperatura. Los resultados obtenidos fueron: en la capa de mezcla de 0.003 a  $0.09 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a con promedio de  $0.05 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a; en el estrato máximo de clorofila a de 0.04 a  $0.27 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a con promedio de  $0.12 \mu\text{g L}^{-1}$ ; en el estrato de termoclina de 0.015 a  $0.127 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a con promedio de  $0.44 \mu\text{g L}^{-1}$ ; en el estrato borde inferior de la termoclina de 0.003 a  $0.009 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a con promedio de  $0.005 \mu\text{g L}^{-1}$ ; en el estrato de agua de 1500m de profundidad de 0.002 a  $0.006 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a con promedio de  $0.003 \mu\text{g L}^{-1}$ ; en el estrato de agua de fondo de 0.002 a  $0.006 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a con promedio de  $0.003 \mu\text{g L}^{-1}$ . Los valores de las imágenes SeaWiFS variaron de 0.011 a  $1.085 \mu\text{g L}^{-1}$  y tuvieron un promedio de  $0.098 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a. Los valores obtenidos en el transecto pertenecieron a los más bajos del promedio mundial de 0.01 a  $2.85 \mu\text{g L}^{-1}$ , además de ser congruentes con valores encontrados en otros estudios en el Golfo de México. En el sedimento superficial la concentración varió de  $0.042 \mu\text{g Chl a cm}^{-3}$  (E3) a  $0.910 \mu\text{g Chl a cm}^{-3}$  (E12), con promedio de  $0.260 \mu\text{g Chl a cm}^{-3}$ . La temperatura varió de  $29.2 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $4.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , con promedio de  $18.72 \text{ }^\circ\text{C}$ ; el  $\text{O}_2$  de  $8.2 \text{ mg L}^{-1}$  (E3) a  $1.9 \text{ mg L}^{-1}$  (E10) con promedio de  $3.98 \text{ mg L}^{-1}$ ; y pH varió de 8.13 a 6.58 con promedio de 7.81. El patrón de distribución vertical mostró que debajo de la termoclina, en la zona disfótica, existe menor concentración de Chl a que en la zona eufótica. Los valores máximos se encontraron sobre la termoclina y los mínimos en el agua de fondo. Dichas concentraciones correspondieron a la ecuación  $Y = 4.963X^{-0.941}$  con  $R^2 = 0.7$ , donde la exportación de la Chl a depende de la profundidad y es denominada producción de exportación, la cual decrece rápidamente bajo el borde inferior de la termoclina con un comportamiento casi lineal. En el transecto, solamente el 3.5% de Chl a cruza la termoclina y se exporta, el 1.2% y el 1.4% alcanza los estratos de 1500 m y al fondo. Las concentraciones de Chl a de sedimento superficial mostraron

diferencias significativas con respecto a las que se encuentran en columna ( $P = 0.011$ ), donde los valores de Chl a son más elevados en el sedimento superficial que en el máximo de Chl a en columna de agua, debido a la acumulación de fitodetrito exportado. Los promedios de Chl a localizados sobre columna en la zona oceánica mostraron diferencias significativas con los de la zona nerítica en la prueba de Newman Keuls ( $P = 0.006$ ). Con respecto al patrón horizontal encontramos que las concentraciones promedio de Chl a fueron significativamente diferentes para la zona nerítica [de talud y reborde continental E10 E11 y E12] y la zona oceánica [de la planicie abisal E1 a E9], ( $P = 0.019$ ). Las concentraciones del sedimento en la planicie abisal son diferentes con respecto a las de talud y reborde continental ( $P = 0.007$ ). El análisis de coordenadas principales, agrupó las estaciones con un 98.07% de la varianza a partir de Chl a para las seis zonas de profundidad y su ubicación con respecto a la costa. La topografía de la superficie del mar mostró el desplazamiento de la termoclina, y consiguó la nutriclina verticalmente hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de la posición respecto al centro del giro ciclónico, maximizando la concentración de Chl a en las estaciones oceánicas cercanas al giro. La concentración de materia orgánica en el sedimento del sector sur occidental del Golfo de México se encuentra estrechamente relacionada al máximo de clorofila en columna de agua. Aunque las estaciones individualmente muestran un desacoplamiento entre la concentración de Chl a en columna y la concentración de Chl a en sedimento, las ecuaciones de profundidad y distancia de la costa contra concentración de Chl a tanto en sedimento como en columna corresponden a un mismo patrón de disminución en concentración conforme nos alejamos de la costa. Las pruebas de correlación entre distancia de la costa y concentración, como son las regresiones muestran ser significativas con  $R^2 > 0.7$ . Así mismo el ANOVA muestra claramente las diferencias entre las estaciones neríticas con respecto a las oceánicas y entre columna y sedimento, comprobándose la hipótesis planteada en este estudio.

#### ABSTRACT

The present study had as an objective to evaluate chlorophyll a (Chl a) concentration on a transect placed perpendicular to the coast, following both a vertical and horizontal gradient at the SIGSBEE abyssal plane in the Gulf of Mexico, in order to vertically and spatially describe the water column characteristics, as well as pigment concentration on superficial sediment, while recognizing a pattern on the bathymetric gradient. With these results we intend to relate the chlorophyll maximum strata in the water column, with the pigment concentration on the sediment. Apart from the *in situ* values acquired during the oceanographic campaign, we evaluated the average Chl a concentration obtained from the SeaWiFS satellite sensor color images, in order to relate these with the exported material viewed at field. We also used sea level images to relate field Chl a concentrations with sea surface topography. Finally we proposed an export model to sea floor, of photosynthetically originated biogenic carbon. Samples from twelve strategically placed stations were obtained on the transect perpendicular to the coast, out of three neritic stations one belonged to continental shelf (E12), and two to continental slope (E10 and E11), while nine were placed at the oceanic zone over the abyssal plane (E1 a E9). Sediment was sampled for each station, as well as six vertical discrete depths in the water column, here Chl a ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) was collected, together with environmental

factors such as pH, O<sub>2</sub> concentration and temperature. The results were: mixing layer 0.003 to 0.09 µg L<sup>-1</sup> Chl a averaging 0.05 µg L<sup>-1</sup> Chl a; at the maximum Chl a strata 0.04 to 0.27 µg L<sup>-1</sup> Chl a averaging 0.12 µg L<sup>-1</sup>; at the thermocline strata 0.015 to 0.127 µg L<sup>-1</sup> Chl a averaging 0.44 µg L<sup>-1</sup>; at the lower thermocline border strata 0.003 to 0.009 µg L<sup>-1</sup> Chl a averaging 0.005 µg L<sup>-1</sup>; at the 1500m depth strata 0.002 to 0.006 µg L<sup>-1</sup> Chl a averaging 0.003 µg L<sup>-1</sup>; at the deepest strata 0.002 to 0.006 µg L<sup>-1</sup> Chl a averaging 0.003 µg L<sup>-1</sup>. The SeaWiFS values varied from 0.011 to 1.085 µg L<sup>-1</sup> and had an average of 0.098 µg L<sup>-1</sup> Chl a. These values belonged to the lowest world average 0.01 to 2.85 µg L<sup>-1</sup>, and were congruent with other values found at the Golfo de México. Superficial sediment concentration varied from 0.042 µg Chl a cm<sup>-3</sup> (E3) to 0.910 µg Chl a cm<sup>-3</sup> (E12), with an average of 0.260 µg Chl a cm<sup>-3</sup>. The temperature varied from 29.2 °C to 4.2 °C, with an average of 18.72 °C; the O<sub>2</sub> 8.2 mg L<sup>-1</sup> (E3) to 1.9 mg L<sup>-1</sup> (E10) averaging 3.98 mg L<sup>-1</sup>; and pH varied from 8.13 to 6.58 averaging 7.81. The vertical distribution pattern showed that below the thermocline, in the disphotic zone there is less Chl a than in the euphotic zone. The maximum values are found above the thermocline and the minimum values in the deepest samples. Such concentrations correspond with the equation  $Y = 4.963X^{-0.941}$  ( $R^2=0.7$ ), where Chl a exportation is dependent of the depth and is named export production, which readily decreases below the lower thermocline border in an almost linear manner. At this transect only 3.5% of Chl a crosses the thermocline and is exported, and between 1.2% and 1.4% reaches the deepest strata of 1500 m and 3500m. The sediment Chl a concentrations showed significant differences with those found in the water column ( $P = 0.011$ ), with higher Chl a values at the sediment, than at the Chl a maximum in the water column, due to exported fitodetritus accumulation. The average Chl a found in the column at oceanic zones proved significant differences with those found in neritic zones Newman Keuls ( $P=0.006$ ). With respect to the horizontal pattern, we found that the average Chl a concentrations were significantly different for the neritic zone [continental shelf and slope E10 E11 and E12] and for the oceanic zone [abyssal plane E1 to E9], ( $P=0.019$ ). The sediment concentrations at the abyssal plane were different from the continental shelf and slope stations ( $P=0.007$ ). The principal coordinate analysis grouped the stations with a 98.07% variance in the Chl a due to the six environmental depths and their localization with respect to the coast. The sea surface topography showed the vertical upwards and downwards displacement of the thermocline and nutricline depending on the position with respect to the centre of the cyclonic gyre, maximizing the concentrations of the Chl a at those stations close to where the gyre.

The concentration of organic matter in the sediment of the southern section of western Gulf of Mexico is closely related to the maximum Chl a in the water column. Although the stations individually don't show relation between water column and sediment, both the equations of depth and distance from the coast, against sediment and water column Chl a concentration, correspond to one same pattern that proves Chl a reduces as we move away from the coast. Correlation tests such as the linear regressions between distance from the coast against Chl a concentration, prove to be significant with a  $R^2 > 0.7$ . ANOVA tests clearly show the differentiation between neritic stations with respect to oceanic stations, both in sediment and water column, yet a differentiation between water column and sediment concentrations, proving our hypothesis stated.

## INTRODUCCIÓN

Los océanos ocupan el 71% de la superficie de la tierra, su volumen es 300 veces mayor que el medio terrestre, y la profundidad promedio es similar a la zona abisal del Golfo de México (~3700 m). Los estudios recientes de ambientes bentónicos y mar profundo, evidencian la variabilidad de hábitats que existen en el océano, y proponen que el suelo marino actúa como el último receptor para las partículas orgánicas (Beaulieu, 2002; Yoon, 2001; Hara, 2000; Pfannkuche, 1999; Volkman, 1998; Escobar, 1997; Stephens, 1997; Smith, 1996; Portier, 1994; Newton, 1994). Un número reducido de investigadores han inspeccionado visualmente o recolectado la interfase sedimento/agua en mar profundo tropical para determinar el flujo de material orgánico particulado desde la superficie hasta el sedimento. Las mediciones provienen de trampas de sedimento (Beaulieu, 2002; Yoon, 2001; Pfannkuche, 1999) y de tasas metabólicas en la interfase sedimento agua (Yaorong, 2003).

El crecimiento de plantas se ve limitado con la profundidad, dado que sólo el 50% de la radiación solar total llega a penetrar la superficie marina y mucha desaparece en las profundidades (Schultz, 2000; Libes, 1992). Los productores primarios sólo crecen dentro de la región superficial iluminada, y en los trópicos se agrega la mayor parte alrededor de los 100m (Yaorong, 2003). Gran parte del ambiente marino está en oscuridad perpetua, pero la mayor parte de la vida animal en los mares depende directa o indirectamente de la producción primaria (plantas) en la superficie. El crecimiento algal se ve limitado por la accesibilidad de nutrientes esenciales tales como nitratos y fosfatos que se encuentran en menor cantidad que el medio terrestre. En los mares la mayor parte de la materia en descomposición se hunde por debajo de la zona eufótica, y los nutrientes que se liberan de este material sólo pueden recuperarse al área iluminada por surgencias y mezcla estacional (Legendre, 1996). Los productores primarios son en su mayoría microscópicos, especies flotadoras y animales marinos son predominantemente invertebrados carentes de esqueletos masivos.

Las fluctuaciones ambientales ocurren en o cerca de la superficie, donde las interacciones con la atmósfera resultan en el intercambio de gases, produciéndose variaciones en temperatura y salinidad, creando turbulencia acuática provocada por los vientos. A mayor profundidad en la columna de agua las condiciones son más constantes. Los gradientes verticales de parámetros ambientales son características de los océanos, y estos establecen zonas a distintas profundidades con diferentes tipos de condiciones de vida. Conforme aumenta la profundidad no sólo disminuye la luz sino también la temperatura con un valor constante de 2 - 4 °C. La presión hidrostática incrementa con la profundidad. Dados los cambios ambientales generados por la profundidad muchos animales marinos tienden a distribuirse a zonas verticales distintivas (Romankevitch, 1984).

En la escala horizontal las barreras geográficas dentro de la columna de agua también se establecen por variaciones físicas y químicas del agua. La clasificación separa el ambiente bentónico del pelágico, donde el pelágico (aguas oceánicas) es aquel de la columna de agua desde la superficie hasta las mayores profundidades, y el bentónico (fondo) considera el suelo e incluye áreas como las costas, litorales y áreas internmareales, coralinas. Otra división básica separa el vasto océano abierto, zona "oceánica" de la costa "nerítica", donde las diferencias se basan en la profundidad y distancia de la tierra y la

separación convencionalmente se hace a los 200 m de profundidad, que marca el reborde de plataforma continental (Libes, 1992).

El ambiente pelágico se caracteriza por dos tipos de organismos marinos, un tipo es el plancton, o bien aquellos organismos cuyos poderes de locomoción son tales que son incapaces de ir contra la corriente y por ende son pasivamente transportados por las corrientes en el mar, y necton que son libres nadadores (peces mamíferos, calamares, etc.). La distinción de la procedencia depende de si es fotoautotrófica (fitoplancton) o heterótrofa (zooplancton).

### CONCENTRACIÓN DE CHL A EN COLUMNA DE AGUA Y FITOPLANCTON

La gran mayoría de los productores primarios en el océano son algas unicelulares de varios grupos que se agrupan en el fitoplancton de manera colectiva. Dado el predominio del fitoplancton en todas las áreas oceánicas iluminadas su importancia en la cadena trófica es esencial. Convierte material inorgánico (nitrógeno y fósforo) en compuestos orgánicos nuevos (lípidos y proteínas) a través de la fotosíntesis ( $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ ), iniciando así la cadena alimenticia (Nobuhiko, 2000). El dióxido de carbono utilizado por las algas puede disolverse libremente como  $\text{CO}_2$ , como  $\text{CO}_2$  unido como bicarbonato, o bien iones de carbonatos. El total de dióxido de carbono (en sus tres formas) es de 90 mg de  $\text{CO}_2 \text{ L}^{-1}$  en aguas oceánicas, y esta concentración es suficientemente alta para que no sea limitada la fotosíntesis llevada a cabo por el fitoplancton. Esta producción, que involucra una reducción de  $\text{CO}_2$  para producir sustancias orgánicas de alta energía, también se llama producción fotoautotrófica, donde no sólo se producen carbohidratos para la planta, sino también oxígeno libre (Nobuhiko, 2000). El proceso inverso de respiración, la reacción oxidativa, rompe los enlaces de alta energía y la libera así para el metabolismo. La energía solar utilizada para el proceso de fotosíntesis, y la conversión de energía radiante, hacia energía química depende de los pigmentos fotosintéticos que están contenidos en cloroplastos de las algas. El dominante es clorofila-a, pero la clorofila b, c y d, así como pigmentos accesorios (carotenos, xantofilas y ficobilinas) están también presentes en algunas especies (Bianchi, 1995). Todos los pigmentos fotosintéticamente activos absorben luz de longitudes de onda dentro de un rango de 400 - 700 nm (PAR), pero cada uno tiene un espectro de absorción. La clorofila-a tiene picos máximos de absorción en el rojo (entre 650-700 nm) y el azul-violeta (450 nm).

Una técnica para la medición de la abundancia o biomasa relativa de fitoplancton (producción primaria) en grandes extensiones de océano, es a través de la medición de concentración de clorofila a (Chl a), que es un pigmento indicador, cuya concentración puede relacionarse de manera directa con la concentración de fitoplancton (Trees, 1985). Un método para la estimación de Chl a es el fluorómetro que produce una cierta longitud de onda de luz ultravioleta que por estímulo ocasionará que la clorofila emita una fluorescencia roja, que será percibida por el fluorómetro, estimando así la cantidad de clorofila en un volumen de agua (Bianchi, 1995).

## EL MÁXIMO DE CLOROFILA A EN LOS MARES TROPICALES

La temperatura afecta la densidad al cambiar el espaciamiento entre las moléculas de agua en un volumen dado. Conforme aumenta la temperatura las moléculas aumentan su energía, aumentan el espacio y por ende disminuye la densidad del agua marina. La salinidad afecta la densidad al agregar masa a un cierto volumen. Entre más sal se disuelve la densidad aumenta mas. Típicamente la salinidad va desde 28 a 41 con un promedio de 35. Densidad del agua es de 1 gramo por centímetro ( $\text{gcm}^{-3}$ ) a 4°C. Con salinidad de 35 la densidad a 4°C es de  $1.0278 \text{ gcm}^{-3}$ . La evaporación y precipitación, así como las corrientes tendrán efectos sobre la densidad a través de la temperatura y la salinidad, provocando variación regional, por esto las capas oceánicas menos densas se colocarán sobre las más densas variando tanto horizontal como verticalmente en escalas espaciales. La capa sobre la termoclina donde ocurre la mezcla fundamentalmente por vientos se le conoce como la capa de mezcla, cuya dinámica es determinante para la productividad del fitoplancton donde normalmente se encuentra el máximo de Chl a. El máximo de Chl a puede definirse como la profundidad que se encuentra por debajo de la superficie y por encima de la termoclina donde la densidad del agua es óptima para que se suspendan las partículas de fito y zooplancton, ya sean vivas o muertas y normalmente ocurre alrededor de los 100m en zonas tropicales (Yoon, 2001).

## FACTORES QUE DETERMINAN LA CONCENTRACION DE CHL A EN COLUMNA DE AGUA

En el verano la masa de agua superficial se encuentra altamente estratificada, la termoclina es mas profunda que en invierno, la mezcla vertical es reducida con días mas largos, los ángulos solares mas altos, la irradiancia solar incrementa, hay poca regeneración de nutrientes por la excreción de zooplancton, y la mayor parte de los nutrientes fueron removidos durante el florecimiento de primavera, así es que fitoplancton está muy limitado en nutrientes (Newton, 1994).

La fotosíntesis que ocurre está determinada por la tasa a la que los nutrientes son aportados hacia éstas áreas. Los nutrientes inorgánicos se forman conforme la materia orgánica se descompone, en el proceso de remineralización. Las bacterias descomponen la materia orgánica y producen el nitrato, nitrito, amonio, fosfato, potasio, silicato, hierro etc. requerido por el fitoplancton para su crecimiento. De esta forma la materia se recicla en el océano (Rodger, 1995). El fitoplancton absorbe los nutrientes inorgánicos, las algas son consumidas, o mueren y son exportadas como heces fecales o agregaciones de fitoplancton. Estos minerales son vitales para el crecimiento fitoplanctónico. La tasa a la que las heces zooplanctónicas y fitoplancton muerto es remineralizado hacia superficie determinará que tan rápido crecerá el fitoplancton en esta agua (Romankevitch, 1984). En verano aunque la luz no es limitante, la tasa de aportación de nutrientes es menor para el fitoplancton. En general las fuentes de nutrientes disueltos para el crecimiento fitoplanctónico incluyen 1) nutrientes aportados por difusión, 2) el rompimiento de olas internas que mezclan aguas profundas ricas en nutrientes con aguas superficiales empobrecidas en nutrientes, 3) mezcla vertical por surgencias de aguas profundas ricas en nutrientes con aguas superficiales menos ricas. 4) remineralización de materia orgánica por bacterias. 5) excreción zooplantónica (Libes, 1992).

El juego entre los fenómenos físicos como la estratificación vertical, y químicos como la concentración de nutrientes inorgánicos influirán en los biológicos como productividad primaria. Conforme aumenta la fotosíntesis disminuye la concentración de nutrientes. Procesos geológicos como aporte de rocas erosionadas son contribuyentes de nutrientes. Eventos episódicos como frentes fríos, tormentas, huracanes, eddies, surgencias hundimiento, lluvias y aportes de ríos en la zona costera, pueden cambiar la estructura de la columna de agua (Andrade, 2000; Carton y Chao, 1999; Murphy *et al.*, 1999). Cualquier proceso como evaporación, precipitación, flujo térmico o circulación por vientos, cambiarán la profundidad de la capa de mezcla, y tendrán un efecto sobre un efecto sobre el crecimiento de productores primarios, (Schultz, 2000; Bianchi, 2000).

Se han propuesto modelos para el análisis del flujo de carbono biogénico ( $C_{Bio}$ ) al definir carbono biogénico en ecosistemas pelágicos, que consideran la transferencia de la producción fitoplanctónica en tres flujos distintos: remineralización en la zona eufótica ( $P_S$ ), transferencia por la cadena alimenticia ( $P_L$ ); [donde  $P_L$  es el plancton grande  $>5\mu m$ ], y el hundimiento hacia el fondo ( $P_D$ ). Esta transferencia se basa en dos variables de la cadena alimenticia, la contribución de fitoplancton en producción primaria total ( $P_L / P_T$ ) y el vínculo de la producción de fitoplancton con la herbivoría (Legendre y Rassoulzadegan, 1996).

En ambientes acuáticos el carbono biogénico ( $C_{Bio}$ ) de menor tamaño ( $P_S$ ) de origen fotoautotrófico es remineralizada (p.e. respirado) dentro de la zona eufótica la fracción de mayor talla es exportada fuera de ésta (Legendre y Rassoulzadegan, 1996). La transferencia a través de la cadena alimenticia y el hundimiento de partículas orgánicas son "la exportación". Se han propuesto cinco categorías para caracterizar los distintos flujos 1) el hundimiento de fitoplancton no ingerido, 2) herbivoría, 3) multivoría (tanto herbívoros como microbios juegan un papel importante), 4) cadena alimenticia microbianas, 5) circuito microbiano (Legendre y Rassoulzadegan, 1996). Los reservorios de carbono se definen con base en el tiempo de reciclado del  $C_{Bio}$  (tiempo entre la incorporación del  $CO_2$  por el fitoplancton y el regreso de este carbono como  $CO_2$  hacia las aguas superficiales o la atmósfera).

La oxidación de  $CO_2$  disuelto por bacterias heterotróficas y la respiración del microzooplancton generalmente corresponden al carbono orgánico de vida corta, con flujos rápidos, que convierten el carbono orgánico a  $CO_2$ . Los flujos de carbono orgánico en el reservorio de vida larga incluyen al mesozooplancton, principalmente copépodos que ingieren células grandes  $>5\mu m$ , agregados orgánicos (nieve marina) y microzooplancton, e incluyen también al macrozooplancton macrófago (salpas, doliolidos, apendicularios y pterópodos), que se alimentan de partículas "ordenes de magnitud menores a su talla. Según Legendre y Rassoulzadegan (1996), el flujo de  $C_{Bio}$  dentro de los ecosistemas oceánicos está determinado por 1) el tamaño de la estructura de los productores primarios y la segregación entre los productores primarios y sus depredadores o los herbívoros y 2) la exportación desde la zona eufótica que esta en función de la aportación de energía mecánica en la capa de mezcla, mientras que la proporción entre la exportación total entre transferencia de la cadena alimenticia y el hundimiento de COP (carbono orgánico particulado) está controlado por variaciones temporales en la profundidad de la capa de mezcla.

## ORIGEN DE LA CHL A EN EL SEDIMENTO SUPERFICIAL, MECANISMOS DE EXPORTACIÓN EN LOS TROPICOS, MODELOS PROPUESTOS E INFORMACIÓN RELEVANTE DE LA CAIDA DE PARTÍCULAS

La fauna del mar profundo (>200m) depende para su supervivencia en los fondos marinos de la exportación de material originado en la capa eufótica, o bien generada *in situ*, por ejemplo por elevada producción primaria en la superficie o por quimioautotrofia en ventilas hidrotermales e infiltraciones de metano en el fondo. Estas últimas se han detectado en el Golfo de México sólo a 500m (Smith, 1996).

La producción primaria elevada en la superficie de los mares comúnmente se correlaciona con concentraciones elevadas de materia orgánica en el fondo. La biomasa microbiológica depende de este aporte, y en ocasiones la elevada cantidad de esta y la densidad de metazoarios es igualmente un reflejo (Smith, 1996; Pfannkuche *et al.*, 1999). Algunos estudios consideran que la calidad más que de la cantidad de alimento y la concentración de oxígeno disuelto es un factor determinante.

Bajo ciertas condiciones el fitoplancton superficial puede agregarse y sedimentarse rápidamente a través de la columna de agua, acumulándose de manera casi intacta como fitodetrito en el mar profundo (Beaulieu, 2002). Si la cantidad de fitodetrito depositado es mayor que lo que puede procesar la comunidad béntica, se formara así una capa de floculo entre el sedimento que se encuentra debajo (Beaulieu, 2002). A pesar de que el fitodetrito ha sido descrito como "material particulado derivado de biomasa vegetal en descomposición", o bien "derivada de fitoplancton", este también puede contener detritus de origen protozoogénico, además de materia fecal que transporta células algales intactas. Estudios (Pfannkuche *et al.*, 1999) han reconocido que la sedimentación de materia orgánica particulada (POM) al mar profundo está sujeta a variaciones estacionales asociadas a la productividad del fitoplancton en las distintas latitudes. Hay indicios de que el desarrollo y sedimentación fitoplancton de florecimiento está sujeto a variación interanual (Smith, 1996; Pfannkuche, 1999). Estos pulsos aportan carbono orgánico al bentos, como se han reconocido en algunos ambientes costeros como en el propio Golfo de México (Escobar y Soto, 1995).

El tiempo de renovación de carbono biogénico ( $C_{Bio}$ ) en el océano puede definirse como el tiempo transcurrido entre la ingestión fotosintética del carbono inorgánico disuelto y el regreso de éste en su forma de  $CO_2$  a las aguas superficiales o bien a la atmósfera. Los reservorios de carbono son:

- I)  $C_{Bio}$  de vida corta (tiempo de recambio que va de  $<10^{-2}$  años = 3 'o 4 días),
- II)  $C_{Bio}$  de vida larga ( $10^{-2}$  años y  $10^2$  años), y
- III)  $C_{Bio}$  secuestrado (recambio de  $>10^2$  años).

El carbono orgánico de vida corta está constituido por organismos con tiempos de recambio corto y compuestos de carbono orgánico lábil disuelto que transita entre componentes microbianos de la cadena alimenticia (Rodger, 1995). Los organismos macrófagos pelágicos al transformar el carbono de origen fitoplanctónico hacia materia fecal, empaquetan partículas pequeñas en partículas mayores y más longevas, aumentando así el tiempo de renovación de carbono biogénico (Romankevitch, 1984). Esta tiene mayor capacidad de hundimiento y conforma casi el total del flujo vertical de material orgánico hacia aguas profundas. Las formas de agregaciones celulares como heces fecales, nieve marina, floculos derivados de las apendicularias o mucus disminuyen la degradación. La hez fecal se encuentra envuelta en una membrana

penetrófica, durante el tránsito hacia el fondo, donde la velocidad de hundimiento es aproximadamente de  $100 \text{ md}^{-1}$ . El alargamiento del tiempo de renovación esta en función de la relación entre el tamaño de los organismos y el tamaño de sus partículas de alimento (Fortier 1994). El destino del carbono proveniente de ultraplankton (células  $<5 \mu\text{m}$ ) en el ambiente pelágico depende de si éste es respirado al ser consumido por:

- a) tintínidos ( $70 \mu\text{m}$ ), resultando en carbono orgánico de vida corta
- b) apendicularios ( $15-20 \text{ mm}$ ) donde parte del ultrapláncton se canaliza hacia el almacén de carbono (reservorio) de vida larga a través de masa corporal, heces fecales, o estructuras descartadas, o
- c) salpas ( $50-150 \text{ mm}$ ) donde las células serán incorporadas como heces fecales de rápido hundimiento, que llegaran a aguas profundas y parte del carbono biogénico podrá ser secuestrado  $>100$  años (Fortier *et al.*, 1994).

El enlace entre el ciclo biológico de carbono orgánico y el ciclo geológico, está representado por el asentamiento y enterramiento de materia orgánica en el sedimento. La transformación de material orgánico biogénico hacia material fósil inicia inmediatamente después del decaimiento de organismos vivos. Lo anterior involucra procesos que se llevan a cabo durante el transporte, como lo es hundimiento en columna de agua, y alteraciones en las capas superficiales de sedimento donde prosperan organismos epi y endobentónicos. (Tissot y Welte, 1984; Portier, 1994).

La materia orgánica biogénica se considera lábil (metaestable) bajo la mayoría de las condiciones sedimentarias, dada su sensibilidad a la degradación oxidativa, ya sea mediado química o biológicamente. En aguas de océanos bien oxigenados la acumulación abundante de materia orgánica es la excepción más que la regla, ésta se limita más a áreas de surgencia y a algunas con fondos anóxicos (Hara, 2000).

Se consideraba un prerrequisito para la acumulación de la materia orgánica en sedimentos, el que las aguas de fondo oceánico estuvieran estancadas y en condiciones anóxicas o con bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Recientemente se discutieron los dos modelos contrastantes para explicar la exportación de sedimentos ricos en materia orgánica en el mundo marino (Hara, 2000). Estos son por una parte lugar el "Modelo del mar Negro" con preservación debida a condiciones anóxicas y estancamiento por la circulación restringida en los fondos de los cuerpos de agua, que con el tiempo ha provocado la oxidación de organismos en descomposición, quienes han consumido todo el oxígeno libre; y el segundo modelo se atribuye a la alta productividad primaria en un sistema dinámico que está asociado al clima y los cambios oceanográficos (Hara, 2000). Otro aspecto discutido recientemente es el papel que juega la adsorción de la materia orgánica en superficies minerales y su influencia en la acumulación de sedimentos marinos (Rodger, 1995).

Para zonas oceánicas tropicales como el Caribe y Golfo de México un modelo mucho más dinámico que integre un poco de ambos criterios, acumulación de Chl *a* en sedimento:

- 1.- por aguas anóxicas estancadas, y
- 2.- por alta productividad superficial) debería ser considerado.

Las islas de las Antillas (Cuba, Puerto Rico etc.) que impiden el flujo de agua profunda hacia el Caribe y Golfo de México, son motivo de que esta zona se encuentre altamente estratificada en los  $1200\text{m}$  superficiales de la columna; débilmente estratificados entre los  $1200$  y  $2000\text{m}$ ; y prácticamente homogéneo debajo de los  $2000\text{m}$

(Gordon, 1967). Es decir, la estructura columnar no es comparable al mar Negro puesto que no se comporta un cuerpo de agua estático en todas las profundidades. El que las velocidades de flujo de corrientes lleguen a ser de 30-40 cm s<sup>-1</sup> en algunas profundidades, puede traer consigo desacoplamiento entre la superficie y el fondo, permitiendo que zonas profundas no sean necesariamente reflejo de la superficie debido a movimiento horizontal de la Chl a.

La producción primaria ha sido estimada de 20 a 30 x 10<sup>9</sup>t de materia orgánica. La fijación de carbono no está distribuida equitativamente pero presenta áreas de mayor actividad en los márgenes continentales (varios cientos de g C<sub>org</sub> m<sup>-2</sup>año<sup>-1</sup>) mientras que las áreas centrales se caracterizan por tener menor productividad primaria (25 gms C<sub>org</sub> m<sup>-2</sup>año<sup>-1</sup>). Del total de la biomasa formada en la zona eufótica del océano, sólo una pequeña porción llega al fondo marino y es enterrado en el sedimento (Tissot, 1984). Es difícil determinar el flujo de materia orgánica en los diferentes niveles de la zona eufótica. El flujo dependiente de la profundidad se denomina "producción exportada", y decrece rápidamente justo bajo la zona eufótica. Después viene un decrecimiento casi lineal, hasta que la materia orgánica toca la capa bentónica (o capa nefeloide), donde nuevamente la actividad de organismos epibénticos consumen la materia orgánica en la superficie superior del sedimento donde se depende del aporte de la columna de agua. La degradación eventualmente se extiende hacia el sedimento en el fondo. Se considera que sólo el 1 o 0.01 % de la producción primaria se secuestra profundamente en los sedimentos marinos (Tissot 1984). Esto depende fuertemente de parámetros tales como producción primaria, profundidad del agua, contenido de oxígeno en columna de agua, los sedimentos superficiales (afectados por la actividad béntica), el tamaño de la partícula, y la porosidad (Volkman *et al.*, 1998)

La formación de agregaciones desde tamaños coloidales hasta nieve marina es importante para remover carbono orgánico del océano superficial, debido a que el detritus coloidal nunca se hunde por sí sólo. La mayor parte de nieve marina consiste de detrito amorfo, pequeño, mientras que casas los larvaceos (1-20 mm) constituyen uno de los componentes más grandes (Smith, 1996). Cada agregado orgánico que se asocia a la exportación biológica, se alimenta continuamente de diferente tamaño de detrito orgánico e incrementan su masa de agregación. La exportación de agregados es un proceso no biológico y la tasa de hundimiento puede estar controlada por factores como tamaño, contenido de agua y la estructura. La velocidad promedio de hundimiento de nieve marina (2.4-75mm longitud máxima) obtenidos por mediciones *in situ* es de 74 ± 39 m día<sup>-1</sup> (Hara *et al.*, 2000). Las tasas de hundimiento incrementan exponencialmente con el incremento de tamaño de agregación y peso seco.

Las partículas de materia orgánica se degradan al caer a través de la columna de agua, este proceso es dependiente del tiempo que estas permanezcan en la columna de agua, la temperatura, la cantidad de heterótrofos entre otros factores. Un modelo se basa en la medida de transporte vertical a partir de la velocidad de hundimiento (Vs; ms<sup>-1</sup>) en partículas teóricas, que siguen la ley de Stokes:

$$V_s = [(\rho_2 - \rho_1) * g * D^2] / 18\eta \quad (1)$$

Donde:  $\rho_2$  y  $\rho_1$  son las densidades (g\*cm<sup>-3</sup>) de la partícula y del agua respectivamente. "g" es la aceleración debido a la gravedad (m s<sup>-2</sup>), D es el diámetro de la partícula (cm) y  $\eta$  es la viscosidad dinámica (g cm<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>). El tiempo medido para materia fecal de algunos copépodos por algunos autores es de 4 a 20 d 1000 m<sup>-1</sup>, (Volkman, 1998). Claramente

las partículas más pequeñas y menos densas caen muy lentamente. Las velocidades de transporte vertical en la columna de agua van de horas hasta años. Los valores de densidad de materia orgánica implican una asociación de la materia orgánica con minerales, ya sean calcáreos biogénicos, silíceos (plancton), frústulas, o minerales. La materia orgánica pura tendría una densidad menor a la del agua y no se hundiría. La materia fecal del zooplancton comúnmente tiene más minerales que materia orgánica. Las partículas algales de bajo contenido en minerales pueden permanecer mucho tiempo en columna y ser remineralizadas fácilmente por bacterias antes de alcanzar el fondo. El tiempo de hundimiento depende fuertemente en la forma de la partícula, considerando que la mayor parte no son esféricas o redondeadas y por ende su velocidad disminuye (Volkman *et al.*, 1998).

A pesar de las evidencias que existen en ambientes de mar profundo (1,540 m) respecto a quistes viables de cocolitofóridos, diatomeas, dinofitas y otros fitoplanctontes (Riaux y Gobin, 1995), la mayor parte de materia de origen fotoautotrófico que alcanza las profundidades es transportada por sedimentación. Estudios recientes en el Atlántico Noreste han demostrado que las macro agregaciones que se originan en la zona eufótica sedimentan con una tasa de 100-150 m d<sup>-1</sup>, para formar depósitos lábiles (fitodetrito) en superficie (Gooday *et al.* 1989). Al medir la velocidad de hundimiento de heces fecales se revelaron velocidades desde 26.5 a 159.5 md<sup>-1</sup>, para heces de copépodos, 16.1 – 341.1 md<sup>-1</sup>, para heces de eufásidos, y de 43.5 a 1167.6 md<sup>-1</sup>, para salpa (Yoon, 2001). Cabe mencionar que al ser estimadas estas velocidades con las ecuaciones de Stokes, Newton y Komar para una densidad constante de 1.22g cm.<sup>-1</sup>, las velocidades fueron sobreestimadas.

Tabla 1 Tasas de hundimiento y origen de las partículas en el océano según diferentes autores.

Autor	Origen	Velocidad m d <sup>-1</sup>
(Hara <i>et al.</i> , 2000)	Mediciones <i>in situ</i>	Prom. 74 ± 39
(Gooday <i>et al.</i> , 1989)	materia fecal y macro agregaciones (nieve marina)	100 a 150
(Yoon, 2001)	heces de eufásidos	16.1 a 341.1
(Yoon, 2001)	heces de salpa	43.5 a 1167.6
(Yoon, 2001)	heces de copépodos	26.5 a 159.5
(Volkman, 1998)	Experimental	50 a 250

Si además de las citas mencionadas analizamos la Fig. 2 (Fortier *et al.*, 1994), resumiendo múltiples velocidades de hundimiento de partículas biogénicas en función de su volumen, tenemos suficiente evidencia para pensar que muy probablemente la materia orgánica presente en el sedimento en las localidades abisales del sector Sur occidental del Golfo de México provendrán de la zona eufótica con un tiempo de 28 días (3500m / 125 md<sup>-1</sup>).

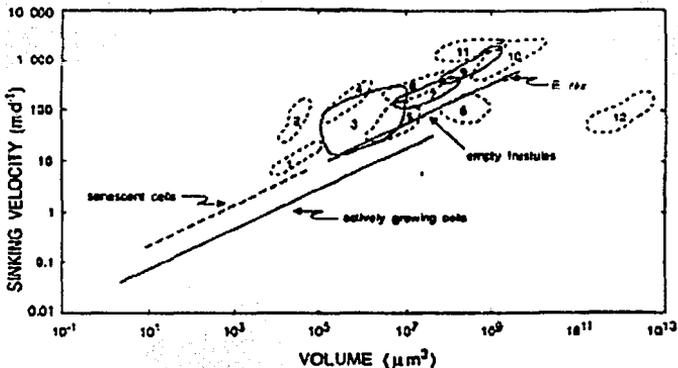


Fig. 1 Velocidad de hundimiento de partículas biogénicas en el océano con base en su volumen tomado de (Fortier *et al.*, 1994). Simbología: 1) copépodo nauplios y copepoditos; 2) apendicularios *Oikopleura dioica*; 3) copépodos grandes y pequeños; 4) materia fecal; 5) copépodos *Pontella meadii* 6) doliolido ; 7) *D. gegenbauri*; 8) eufáusidos; 9) pterópodos; 10) salpas; 11) exoesqueletos de *Limacina* pterópodos (volúmenes esféricos calculados en longitud); 12) agregaciones de diatomeas fitoplanctónicas.

Los sedimentos marinos no sólo acumulan materia orgánica de la producción primaria de columna de agua, sino también la materia orgánica alóctona, que se origina de dos otras fuentes. Una de ellas es predeposición de sedimentos marinos después de la erosión de una localidad cercana (Gooday, 1990). Ejemplos típicos son corrientes de turbidez a lo largo de márgenes continentales, o transporte descendiente en inclinaciones marginales o continentales. En estos casos el sedimento que inicialmente se depositó en fondos someros es erosionado por corrientes, inestabilidad mecánica (perfiles inclinados) terremotos u otros movimientos tectónicos. El sedimento erosionado es transportado hacia mayores profundidades y redepositado. Esto puede ocurrir debido a una corriente de turbidez por el cual se resuspende el sedimento en la parte baja de la columna y se vuelve a asentar. Este proceso normalmente conlleva disminución del tamaño de la partícula (Beaulieu, 2002).

La otra fuente principal de material alóctono es de origen continental y consiste en el transporte por vientos, ríos, y glaciares. Materia orgánica terrígena acarreada por viento y aerosoles a lo largo de grandes distancias en los océanos se estima que aportan un total de 10<sup>14</sup> t de carbono cada año (Romankevitch, 1984). Organoclastos completos como el polen y esporas son transportadas por viento desde las costas, al igual que lípidos de la cutícula cerosa de plantas. Parte de la materia orgánica que se encuentra en el fondo proviene de fuentes alóctonas, por la mayor resistencia que presentan a la oxidación. Los ríos son los que más aportan material terrígeno por año, con 0.4x10<sup>15</sup>

toneladas de carbono orgánico de continentes a océanos, cuatro veces más de lo aportado por vientos (Schlesinger Melack, 1981).

#### **DISTRIBUCIÓN SINÓPTICA CHL a EN LA SUPERFICIE DEL MAR IMÁGENES SEAWIFS Y DATOS DE NIVEL DEL MAR**

El Golfo de México ha sido sujeto a muchos estudios de campo de oceanografía física, donde comúnmente se observa la corriente de lazo y giros anticiclónicos. Müller Kräger *et al.* (1991), ha utilizado imágenes de satélite climatológicas de temperatura superficial del mar y concentraciones de clorofila para validar modelos físicos-biológicos del Golfo de México, como lo son respuestas biológicas a variaciones estacionales, eddies inyección de nutrientes por corriente de lazo, luz incidente y mezcla vertical. Son muy útiles para evaluar la producción de fitoplancton en la escala global y por largos periodos de tiempo.

Otra técnica para la medición indirecta de la concentración de fitoplancton es el uso de sensores remotos (Aguirre, 2002), los cuales se basan en percibir la radiación que es reflejada de la superficie marina en el rango visible (ó PAR) de espectro (400 – 700 nm). El interés científico en la coloración de los océanos se debe a que en la mayoría de ellos, el color (en la región visible del espectro) varía con la concentración de clorofila y otros pigmentos presentes en el agua. Las bandas del visible y del infrarrojo cercano que poseen sensores como SeaWiFS son de gran utilidad en investigaciones de la biosfera marina al percibir Chl a, su variabilidad, la dinámica de esta en diferentes ecosistemas, sus ciclos biogeoquímicos, y el papel que estos juegan en el ciclo global del carbono (Müller Kräger y Walsh, 1991; Murphy *et al.*, 1999). La radianza de saturación para este sensor es baja, lo cual permite obtener información de los parámetros marinos que poseen señales débiles, al saturarse rápidamente las señales altas provenientes de suelos, nubes y vegetación terrestre (Andrade y Barton, 2000). En consecuencia, es posible dar seguimiento a los florecimientos de algas marinas que, a su vez, servirán como marcadores de procesos hidrodinámicos como son la presencia de frentes, zonas de surgencias, eddies y giros.

#### **MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DEFINIR SIGNIFICANCIA EN LA VARIACION Y CORRELACION DE VARIABLES AMBIENTALES**

El análisis de RDA de CANOCO de dos o varios grupos de datos, es la estrategia más simple con la cual se puede realizar una matriz de covarianza como la matriz de eigen valores y eigen vectores (Legendre, 1998). El análisis canónico combina los conceptos de ordenación y regresión en los que se considera la matriz explicativa X y la matriz de respuesta Y. En este análisis se pueden incluir tablas con datos como: la concentración de Chl a, la cantidad de oxígeno disuelto, la temperatura, el pH, y demás variables ambientales, que pueden dividirse por estaciones y por estratos ambientales, y con ellos producir ejes ortogonales de donde se esquematice un diagrama de dispersión. Cada eje de ordenación canónica corresponde a una dirección en la dispersión multivariada de objetos (matriz Y), y estará relacionada a la combinación lineal de variables explicativas X. En principio, el RDA es la extensión directa de modelos de regresión múltiple de datos de respuesta multivariada. La redundancia es sinónima de varianza explicativa (Legendre, 1998).

## ANTECEDENTES

La concentración de clorofila a es utilizada de manera rutinaria como referente para la productividad de fitoplancton en ecosistemas acuáticos. Los feopigmentos, producto de la degradación de clorofila a, son biomarcadores del fitoplancton senescente, e indicadores de la herbivoría y otras transformaciones metabólicas. Muchos fluorómetros solo evalúan clorofila a subestimando el valor del pigmento como clorofila b y c. (Bianchi, *et al.*, 1995). Los valores máximos de clorofila a se localizan comúnmente en la base de la zona eufótica con concentraciones entre  $0.01 - 1.82 \mu\text{g litro}^{-1}$ , y  $0.01 - 2.85 \mu\text{g litro}^{-1}$ , determinadas respectivamente por HPLC y fluorometría (S. Bianchi *et al.*, 1995). En el sector del Golfo de México en el Noreste (NEGOM) que se encuentra en el margen continental entre el delta del Río Mississippi y el Apalachicola el promedio fue de  $0.4 \mu\text{g L}^{-1}$  con máximos hasta de  $12 \mu\text{g L}^{-1}$  (Yaorong Qian *et al.*, 2003). En el sur del Golfo de México donde descargan el Río Grijalva - Uzumacinta y el Coatzacoalcos se encontraron valores de  $0.4 - 2.3 \text{ mg m}^{-3}$  ( $0.4 - 2.3 \mu\text{g L}^{-1}$ ) por medio de imágenes de satélite de SeaWiFS (Aguirre, 2002). Müller Kärger (1991), reporta una variación estacional de concentración de pigmentos en Golfo de México con valores máximos  $> 0.18 \text{ mg m}^{-3}$  ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de diciembre a febrero y los más bajos  $0.06 \text{ mg m}^{-3}$  ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de mayo a julio.

Para que la producción primaria elevada en la superficie de los mares sea correlacionada con concentraciones elevadas de materia orgánica en el fondo, (Smith, 1996; Pfannkuche *et al.*, 1999) y sea posible identificar un acoplamiento entre sedimento y columna, deberán considerarse de todos los modelos de exportación (Fortier *et al.*, 1994; Legendre y Rassoulzadegan, 1996), las tasas de hundimiento (Tabla 1) y el origen de las partículas en el océano según los diferentes autores (Beaulieu, 2002, Pfannkuche *et al.*, 1999). Estudios como el de Bianchi (2000) y Harvey *et al.* (1995), quienes calculan la tasa de descomposición de Chl a en un microcosmos de sedimento experimental, entre  $0.04 - 0.07 \text{ día}^{-1}$ , y el de Volkman, (1998), quien propone la ley de Stokes como modelo de hundimiento de la partícula, son básicos para entender la dinámica que seguirá la Chl a desde la zona eufótica hasta su destino final sobre el sedimento, lo cual constituye la base de nuestro estudio.

Sabemos que en el Golfo de México por la época de lluvias, las condiciones de temperatura superficiales en verano pueden profundizar la termoclina, y que los frentes de Nortés temporales de octubre a marzo aumentan la mezcla de columna (Escobar y Soto, 1997). Por otro lado estudios como los hechos por Pfannkuche (2000) observan un cambio en la exportación en función de una temporalidad estacional (primavera o monzones) de mayor o menor producción en superficie. Considerando el como estos procesos de temporalidad podrían influir fuertemente en la productividad (concentración de Chl a), fue necesario plantear la posibilidad de un escenario semejante en nuestra área de estudio, por lo que surge la necesidad de observación de color del mar en fechas anteriores a las de muestreo a través de el satélite SeaWiFS.

## OBJETIVOS Y METAS

### OBJETIVO GENERAL

Describir la variación batimétrica y geográfica de la concentración de clorofila a en columna de agua y en sedimento a lo largo de un transecto perpendicular a la línea de costa y relacionar los valores observados de clorofila con los factores ambientales de columna de agua

### METAS

- Describir las concentraciones de clorofila a en columna de agua a lo largo de un gradiente vertical y espacial.
- Describir la concentración de pigmentos en el sedimento superficial y reconocer el patrón de distribución en el gradiente batimétrico.
- Relacionar el máximo de clorofila en columna de agua con la concentración de pigmentos en sedimento.
- Evaluar la concentración promedio de clorofila a en imágenes de color de mar para los meses de mayo y junio 2002, y relacionar las concentraciones con los valores obtenidos en campo.

### HIPÓTESIS

- H<sub>0</sub> La concentración de materia orgánica en el sedimento del sector sur occidental del Golfo de México se encuentra estrechamente relacionada al máximo de clorofila en columna de agua.
- H<sub>1</sub> La concentración de materia orgánica en sedimento en el sector sur occidental del Golfo de México se encuentra desacoplada al máximo de clorofila en columna de agua.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en el sector sur occidental del Golfo de México que por su producción primaria en la porción central de la cuenca se considera un sistema oligotrófico. La producción primaria más elevada está asociada al periodo de nortes o frentes de invierno que inician en octubre y finalizan en mayo, con variaciones interanuales vinculadas a oscilaciones climáticas de mayor escala (Escobar y Soto, 1995). La condición estratificada de la columna de agua en la cuenca es permanente en la porción oceánica. La temperatura superficial alcanza valores de 29° C al término del verano, y varía desde 23.7° C en el mes de abril. En el sector oeste la capa de mezcla varía de 50m de profundidad en la plataforma externa hasta 120m (Escobar y Soto, 1997). La mezcla convectiva en la columna de agua se inicia en octubre con el primer norte. Esta mezcla, generada por el viento, es común y afecta solamente la capa de mezcla de la columna de agua, alrededor de 150 m de profundidad. Los giros ciclónicos tienen un efecto significativo en la elevación de la termoclina y la nutriclina frente a la laguna de Tamiahua y maximizan el proceso de mezcla en esta temporada (Andrade y Barton, 2000; Carton y Chao, 1999; Murphy *et al.*, 1999; Escobar y Soto, 1997).

La circulación del Golfo de México está dominada por la Corriente de Lazo al este del Golfo y el gran giro anticiclónico al oeste (Müller Kräger y Walsh, 1991, Behringer *et al.*, 1977 citado por Gómez y Salas, 1997) los ciclones localizados frente a las costas de Texas y Louisiana y Campeche también son de gran importancia local. El origen del gran giro anticiclónico proviene de la Corriente de Lazo (Cochrane, 1972; citado por Gómez y Salas, 1997; Vidal *et al.*, 1992), donde el viento contribuye significativamente (Blaha, 1976; citado por Gómez y Salas, 1997). El centro de los anticiclones provoca circulación vertical descendente, donde se hunde la masa de agua, mientras que el centro de los ciclones se da la circulación vertical ascendente, causando surgencias puntuales con velocidades de ascenso de hasta 15m d<sup>-1</sup> que contribuye a la alta productividad primaria y secundaria del Golfo (Vidal *et al.*, 1998). En el talud del sector occidental se forman corrientes de chorro con velocidades de 32 a 85 cm s<sup>-1</sup> que se dispersan hacia el centro de la cuenca y mueven grandes volúmenes de agua. Los giros anticiclónicos constituyen la forma en como las masas de agua del Golfo central se dispersan y diluyen. La traslación de estos giros (~ 6 Km. d<sup>-1</sup>), su tiempo de residencia (~ 9 a 12 meses) y su colisión contra la plataforma continental son factores decisivos para la distribución de las propiedades físicas y químicas de la masa de agua desde la superficie hasta el fondo.

En el Golfo de México se reconocen diversas masas de agua (Nowlin, 1971) La capa superficial que ocupa los primeros 150 m, es más susceptible a cambios biológicos por fenómenos físicos y climatológicos como son vientos, el flujo de corrientes y la circulación. En la columna de agua se distinguen tres zonas: la capa de mezcla la termoclina y la capa profunda. Cada zona se caracteriza por las diferencias en temperatura que van de 23 en la superficie, 10° C a 500m y 4° C en las aguas mas profundas (3500m). El máximo de salinidad se localiza por debajo de la zona de mezcla 37.7 UPS, después disminuye rápidamente formando la haloclina, aproximadamente a los 400m y disminuye hasta un mínimo de 34.8 UPS a 750m de profundidad, a esta agua se

le reconoce como agua Antártica Intermedia con  $6.2^{\circ}\text{C}$  (Nowlin y McLellan, 1967). Por debajo de esta masa de agua se reconoce otra masa de agua a 1500m de profundidad, la del Nor-Atlántico, con una salinidad 34.8 UPS y una temperatura de  $4.02^{\circ}\text{C}$  (Pequegnant, 1983). Por debajo de la capa de mezcla y arriba de la isoterma de los  $17^{\circ}\text{C}$  a una profundidad de 250m se presenta el agua Común del Golfo de México que se reconoce como el resultado de la mezcla vertical de la masa de agua Subtropical subsuperficial con salinidad de 37.7 UPS y bajo contenido de  $\text{O}_2$  ( $3.4\text{mg L}^{-1}$ ) (Nowlin, 1971).

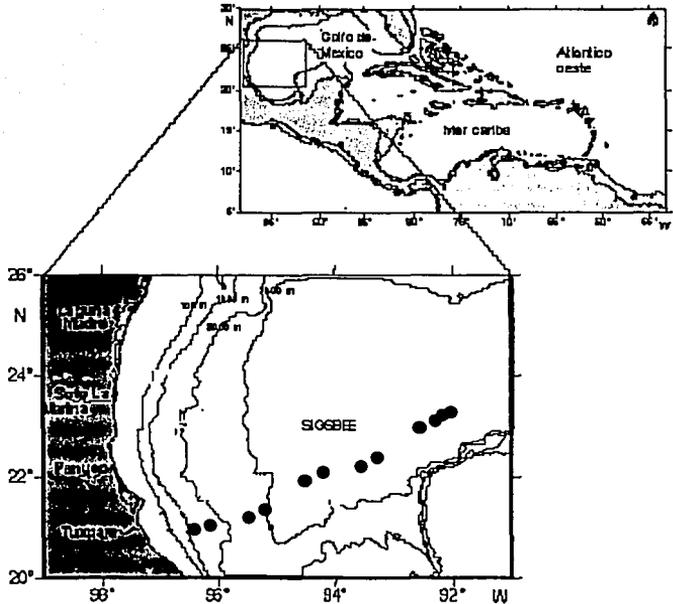


Fig.2 Localización del área de estudio, de las estaciones de muestreo y toponimia de la región.

El ciclo anual de las descargas de los ríos al Golfo de México es escasa entre febrero a mayo y aumenta de julio y septiembre en la época de lluvias. En la zona occidental la descarga de los ríos Soto la Marina Grande y Pánuco producen una capa con

una salinidad baja (30 UPS) y temperatura de 21 a 23 C y que pueden extenderse hasta 100 Km. mar adentro (Escobar y Soto, 1997)

La circulación profunda en el Golfo de México (Pequegnat, 1972; Hoffman y Worley, 1986; Sturges *et al.*, 1993) se caracteriza por un campo energético de eddies, para el cual Welsh e Inoue (2000) desarrollaron un modelo de simulación de corrientes donde un par de giros anticiclónicos-ciclónicos se desarrollan en el fondo bajo una nueva formación anular. El eje del par de giros se mueve hacia el oeste, siguiendo el contorno batimétrico de la cuenca. En la parte oeste del Golfo, el área de estudio, el giro ciclónico domina la circulación. Las velocidades máximas de los giros varían de 10 a 21 cm s<sup>-1</sup> a los 1 650 y 2 250 m de profundidad, respectivamente. Los giros son más rápidos en la Sonda de Campeche y en los montes de SIGSBEE debido a la fricción con las formaciones del fondo oceánico. La formación y migración del par de giros profundos y su interacción con la topografía del suelo oceánico proveen a las aguas profundas con un mecanismo de ventilación o emergencia a aguas más someras (Welsh e Inoue, 2000).

El sector occidental del Golfo está caracterizado por una plataforma estrecha que por lo general mide menos de 50 Km. de ancho y que finaliza entre 100 y 200m de profundidad (Bergantino, 1971). La plataforma es abrupta y se distingue por relieves paralelos a la línea de costa conocida como Cordillera Mexicana que se ubica entre los 24° N y 19° N (Antoine *et al.*, 1974). Esta cordillera actúa como barrera para el sedimento continental, por lo tanto genera un talud continental único debido a su naturaleza y origen. Esta zona de transición delimita al mar profundo. La planicie abisal se extiende hacia el este y sur de la plataforma continental de Tamaulipas. La planicie abisal SIGSBEE es una de las superficies más grandes dentro de una sola cuenca y se extiende desde 90° W a 95° W, y de los 22° N hasta los 25° N con 450km de largo y 290 Km. de ancho, abarcando un área de 103,600 km<sup>2</sup>.

El área de estudio tiene tres estratos distinguidos por el tipo de sedimento. El primer estrato esta principalmente constituido por lodo y está cerca del límite de aporte terrígeno aportado por los ríos Grande, Soto la Marina y Panuco. La plataforma interna de la plataforma, al norte de los ríos Pánuco y Soto la Marina se caracteriza por la presencia de grava y parches de arena mezclados con lodo. El segundo estrato es sedimento terrígeno que cubre la cordillera. El tercer estrato está formado básicamente por lodo biogénico (Escobar y Soto, 1997) que se origina de los arrecifes de plataforma continental de Florida, Yucatán, Veracruz y Texas/ Louisiana cuyos residuos orgánicos alcanzan la zona abisal por medio de corrientes oceánicas y en el sector norte el transporte por corrientes de turbidez del delta del Mississippi (Pica -Granados *et al.*, 1991).

## MATERIAL Y MÉTODOS

### TRABAJO DE CAMPO

Las muestras analizadas en este estudio provienen de colectas obtenidas a lo largo de un transecto perpendicular a la costa ubicado en el sector suroccidental del Golfo de México. La campaña SIGSBEE.5 realizada del 3 al 10 de julio del 2002, visitó un total de 12 localidades ubicadas desde el reborde continental hasta la planicie abisal (Tabla 2, Fig. 3). Con objeto de cubrir el objetivo el muestreo contempló tanto la recolecta en columna de agua a profundidades discretas, como muestras de sedimento superficial.

Tabla 2. Posición geográfica y profundidad del suelo marino, para estaciones de muestreo en el transecto del suroeste del Golfo de México.

Estación	Latitud N	Longitud W	Profundidad (m)
1	23°35.68	92°02.97	3500
2	23°30.30	92°17.52	3500
3	23°19.82	92°30.35	3500
4	23°06.31	92°58.00	3500
5	22°49.91	93°27.09	3500
6	22°33.53	93°56.25	3500
7	22°21.58	94°26.48	3500
8	22°05.36	94°57.98	3200
9	21°51.29	95°23.75	2700
10	21°36.19	95°52.31	2700
11	21°20.85	96°21.32	1500
12	21°12.87	96°49.27	500

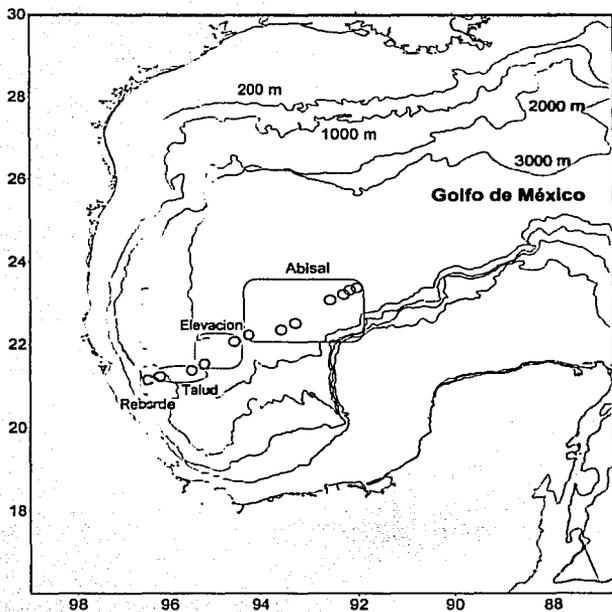


Fig.- 3 Ubicación de las localidades de muestreo en el sector suroccidental del Golfo de México en las cuales se recolectó las muestras de agua y sedimento en la campaña SIGSBEE.5 en julio 2002.

#### **PERFILES DE TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD Y PROFUNDIDAD**

Los registros continuos de temperatura, conductividad y profundidad se realizaron con la sonda CTD Delta Mark III C-24 WOOCE de General Oceanics, S/N 02-549 y permitieron reconocer durante el descenso la estructura de la columna de agua, ubicar la termoclina, sus fronteras, establecer la amplitud de la capa de mezcla y el inicio de la capa profunda. El perfil generado por el CTD en el campo durante la campaña de SIGSBEE.5 se muestra como ejemplo en la Fig. 4 y facilitó confirmar durante el descenso las características de la columna de agua, que permitieron la toma de muestras de agua durante el ascenso en el cual se efectuarían los disparos para colecta con botellas Niskin.



## RECOLECTA DE MUESTRAS DE AGUA PARA ANÁLISIS DE CLOROFILA

Los seis estratos de columna de agua de muestreo considerados fueron:

- 1) Capa de mezcla
- 2) Máximo de clorofila a
- 3) Termoclina
- 4) Borde inferior de la termoclina
- 5) Agua de 1500m de profundidad y
- 6) Agua de fondo

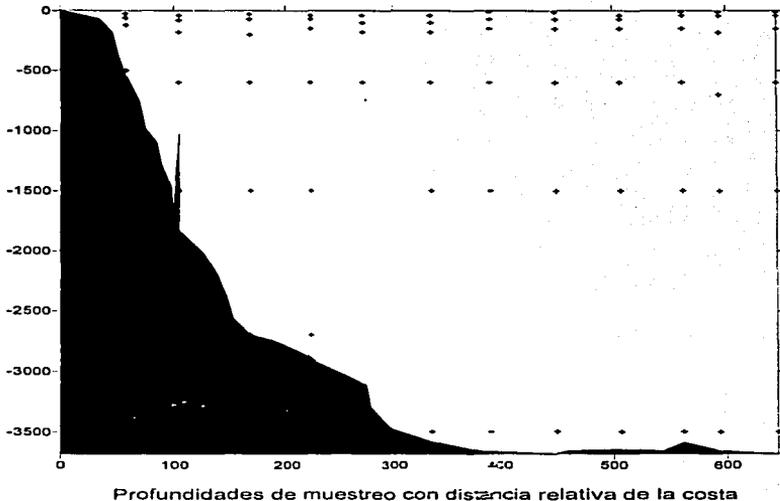


Fig.- 6 Diseño de la recolección de muestras en el perfil de columna de agua en las zonas batimétricas contempladas en el transecto del muestreo de este estudio. El esquema muestra los seis estratos de muestreo.

Las muestras de agua se recolectaron durante el ascenso con botellas Niskin de cinco litros montadas en la rosette en la sonda CTD siguiendo el esquema de recolección con seis niveles o estratos de profundidad (Fig. 6). Un total de cuatro litros de agua se filtró a bordo con un sistema de filtración de vacío a través de membranas de celulosa de Millipore de 47 mm de diámetro y 45  $\mu$ m de abertura de poro. Estos filtros se doblaron una vez finalizada la filtración, se envolvieron en papel aluminio, rotularon y se congelaron a bordo acompañados con desecante para su posterior análisis en el laboratorio. Se filtró una muestra por nivel en cada estación.

Adicionalmente, en cada nivel de profundidad muestreado se hicieron registros de los factores físicos como temperatura y salinidad, químicos como oxígeno disuelto en

botellas BOD 25 ml, pH y nutrientes por duplicado 10 ml, que no se discutirán ni describirán en este trabajo.

#### RECOLECTA DE MUESTRAS DE SEDIMENTO

En campo se utilizó un nucleador múltiple, para recolectar muestras de alta calidad y sin perturbación de la superficie del sedimento. Los nucleadores múltiples aparentemente sufren poco de efectos de onda de choque y disrupción al recuperarse, y han muestreado material de fitodetrito en numerosas localidades en las profundidades del Atlántico noreste (Smith *et al.*, 1996). De la columna de sedimento se tomó una sub-muestra con volumen de 1 ml, con una jeringa. Este sedimento se colocó en tubos de ensayo totalmente aislados de la luz para evitar degradación de los pigmentos los cuales fueron congelados hasta su análisis en el laboratorio.

### TRABAJO DE LABORATORIO

#### EVALUACIÓN DE PIGMENTOS EN COLUMNA DE AGUA

Los filtros congelados se homogeneizaron por 20 minutos con 5 ml de solución acuosa de acetona al 90%. La maceración del filtro se realizó cuidando no calentar la muestra y en oscuridad para no degradar los pigmentos. El total empleado de acetona fue de 10ml. La muestra macerada deberá agitarse vigorosamente en el tubo antes de ponerse a refrigerar y en la oscuridad. La refrigeración de la muestra no excedió las 24 horas, posterior a las cuales se agitó la muestra nuevamente y se mantuvo los tubos a temperatura ambiente 30 minutos antes del análisis. Para leer las clorofilas se utilizó un fluorómetro de mesa de Turner Designs el cual se recalibró si la temperatura ambiente fluctuó  $\pm 3^\circ\text{C}$  desde la última fecha de calibración.

Este fluorómetro de laboratorio emite radiación propia, que ilumina y activa la Chl a sin depender del PAR, lo que nos permite apreciar la concentración independientemente de la profundidad a que se encuentre y la penetrabilidad del PAR. Una vez que el fluorómetro se ha calentado por 15 minutos se usa una solución de acetona para marcar el cero del instrumento en el ajuste de sensibilidad y posteriormente se inicia la lectura de las muestras. El sobrenadante de la muestra extraída se decantó hacia el cuvette con previa medición del volumen. Si la concentración de la Chl a en la muestra fue mayor del límite superior ésta se diluyó y se procedió a reanalizarla siguiendo los pasos anteriores. La medida se registró y se releó hasta tres veces en los casos donde fue requerida una dilución.

La concentración de Chl a en el sobrenadante se basó en la detección de fluorescencia. Al medir se seleccionó específicamente para Chl a, utilizando filtros para la excitación y emisión que eliminan la interferencia espectral causada por feofitinas y por clorofila b. Se utilizó acetona al 90% como solvente de extracción de la Chl a de los filtros. Dada la eficiencia para la mayoría de las algas, sobre todo cuando el periodo de extracción es óptimo, en este caso se empleó acetona al 90%. La clorofila, acetona y el filtro macerado se centrifugaron por 15 minutos a 1500 revoluciones por minuto, con la idea de sedimentar el filtro y que éste no interfiera en la lectura del fluorómetro. Se empleó para la lectura un fluorómetro equipado con una luz de alta intensidad F4T.5 lámpara azul, fotomultiplicador sensible al rojo y filtros de excitación (CS -5 -60) y

emisión (CS-2-64), del fluorómetro de mesa Turner Designs Modelo 10. Es importante tener presente que cualquier sustancia que se extrae ya sea del filtro o de contaminación que florece en la región del rojo puede interferir en medida de clorofila.

El valor en columna de agua se calculó a partir de la ecuación 2

$$\frac{\text{(Lectura del aparato } \mu\text{gms/L}) * \text{(Volumen del extracto ml)} * \text{(Factor de Dilución)}}{\text{(Volumen filtrado ml)}} \quad (2)$$

#### DETERMINACIÓN DE LOS PIGMENTOS EN SEDIMENTO

La estrategia utilizada para la medición de concentración de pigmentos en sedimento fue la misma empleada para evaluar la concentración de Chl a en columna de agua utilizando el fluorómetro de Turner Designs. El procedimiento de extracción y cálculo fue distinto dado que aquí no se muestreó un volumen de agua sino de sedimento. Para extraer los pigmentos del sedimento se requirió agregar acetona (10 ml) al sedimento y mezclar vigorosamente, para que en un periodo no mayor a 12 horas se obtuviera el total de pigmentos contenidos en el sedimento. La concentración de pigmentos contenidos en la acetona (líquida) agregada llamada "extracto", fue el total de pigmentos contenidos en la muestra de 1ml de sedimento. El volumen del extracto incluyó agua intersticial (antes congelada) que se encontraba en el sedimento previo al agregado de acetona. El volumen del extracto, (agua + acetona) es considerado directamente en la ecuación, y puede afectar el valor de la concentración de Chl a.

El aparato midió la concentración del extracto, cuyo volumen (aprox. 10 ml) varió en ocasiones dentro del rango de lectura que exige el aparato y la lectura se expresó en  $\mu\text{gms.L}^{-1}$  que fue equivalente a  $\text{gms.m}^{-3}$  en el sistema métrico internacional, el aparato hace la conversión, partiendo del volumen del extracto (aprox. 10 ml) hacia lo equivalente en proporción en  $\mu\text{gms.L}^{-1}$ . La concentración de pigmentos en sedimento considero los siguientes aspectos:

- 1) La clorofila a fue extraída de una medida fija de  $1 \text{ cm}^3$ , que en volumen es equivalente a 1 ml.
- 2) El sedimento total (1ml ó  $1 \text{ cm}^3$ ) no puede ser considerado como parte del volumen del extracto, dado que no se disuelve, es centrifugado, decantado, y sólo participa en el volumen del extracto la cantidad de clorofila que se encuentra en solución con la acetona (suponemos que logramos extraer el total presente en sedimento).
- 3) Una diferencia fundamental es que no existe un volumen filtrado como en el caso de la columna de agua, lo cual elimina el denominador de la ecuación. Es por esto que la ecuación 3 para determinar la Chl a en sedimento fue:

$$\frac{\text{(Lectura del aparato } \mu\text{gms/L}) * \text{(Volumen del extracto L)} * \text{(Factor de Dilución)}}{\text{(Volumen filtrado L)}} \quad (3)$$

Las unidades de litros se eliminan y el resultado es expresado en  $(x)\mu\text{g}$  de Chl a por  $\text{cm}^3$ .

- 4) Dado que la lectura se expresa en  $\mu\text{gms/L}$ , y conocemos el volumen de acetona en el cual fueron disueltos  $(x) \mu\text{g}$  de clorofila, podemos obtener una medida en peso (g), de la cantidad de clorofila que estaba contenida en el ml de sedimento.
- 5) Para que la fluorescencia de clorofila pueda ser leída, esta deberá ser relativamente de reciente sedimentación, dado que la vida media de la Chl a

como pigmento emisor es corta (horas a días dependiendo de la cantidad de luz, concentración de oxígeno disuelto, temperatura y bioturbación por la presencia de fauna bentónica). Lo cual implica que sólo la superficie del volumen total ( $\text{cm}^3$ ) del sedimento contiene clorofila que pueda leída y percibida por el fluorómetro. Hipotéticamente y para fines prácticos de análisis comparativos, el uso de área superficial ( $\text{cm}^2$ ) o volumen total ( $\text{cm}^3$ ) significa lo mismo.

#### ANÁLISIS DE DATOS

En todos los casos se determinó por estrato de muestreo

a) el promedio (Eq 4)

$$(n_1 + n_2 + \dots + n_x) / x \quad (4)$$

b) la desviación estándar (Eq.5) con el método de (n-1):

$$\sqrt{[(n \sum x^2 - (\sum x)^2) / (n(n-1))]} \quad (5)$$

c) el nivel de confianza: que se define como el intervalo de confianza para el promedio de la población. Este equivale a los valores menor y mayor que se presentan en ambos extremos del promedio, donde sabremos con un cierto nivel de confianza (95%) la concentración más baja y la más alta posible según la desviación estándar, el promedio, y el número de estaciones consideradas, donde:

Alfa ( $\alpha$ ): es el nivel de significancia utilizado para calcular el nivel de confianza. El nivel de confianza es igual a  $100 * (1 - \text{alfa})\%$ . En otras palabras el nivel de confianza para un alfa de 0.05 indica el 95% de confianza. Este estudio utilizó 95% de confianza.

La desviación estándar se calcula sólo para el intervalo de datos considerados a esa profundidad, y para el número de localidades (normalmente 12) para esa misma profundidad o sus réplicas.

Tamaño: es el tamaño de la población es el numero de estaciones (normalmente  $n=12$ )

Si asumimos que alfa es igual a 0.05, necesitamos calcular el área bajo la curva estándar que equivale a  $(1 - \text{alfa})$ , o 95%. Este valor es  $\pm 1.96$ . El intervalo de confianza por lo tanto es (Eq.6):

$$(\text{Promedio } (x)) \pm 1.96 [\sigma / (\sqrt{n})] \quad (6)$$

#### ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

El ANOVA probó las diferencias entre los promedios, analizó la variación entre estaciones del talud continental (E12, E11 y E10) y de la planicie abisal (E1- E9) y la variación entre muestras de clorofilas en sedimento con respecto a las muestras del estrato de máximo de clorofila. La prueba permitió distinguir entre la varianza que obtenemos debido al error aleatorio, y la varianza que se obtuvo debido a las diferencias entre promedios. La última se puso a prueba estadística para el nivel de significancia elegido y de ser significativo, se rechazó la hipótesis nula sin mostrar diferencias entre

los promedios aceptándose la hipótesis alternativa de que los promedios fueron diferentes entre sí (Weimer, 2000).

El estadístico clave del ANOVA fue la prueba de "F" que buscó observar la diferencia entre grupos de promedios formados por las variables independientes, para saber si ocurrieron por azar. Si los promedios grupales no fueron significativamente diferentes entre sí, entonces se infirió que las variables independientes no tuvieron un efecto sobre las variables dependientes. La "p" fue el indicador de significancia, que informó a que nivel la probabilidad reflejó las diferencias entre promedios de la muestra. Entre mas chica fue la P, la diferencia fue mas significativa (Weimer, 2000).

#### **ANÁLISIS DE COORDENADAS PRINCIPALES**

El análisis de coordenadas principales (ACP) resumió a sólo algunas dimensiones la variabilidad de una matriz de dispersión de un número elevado de descriptores: los seis estratos de profundidad, los factores temperatura, pH y concentración de oxígeno disuelto. Este análisis previó la medida de la varianza explicada por los ejes principales, independientes entre sí. Los resultados de este análisis se graficaron con el programa CANOCO usando la opción analítica PCoord en la cual se eligió la distancia euclídeana (Legendre y Legendre, 1998).

#### **ANÁLISIS CANÓNICO DE REDUNDANCIA (RDA)**

Es el análisis de dos o varios grupos de datos. El análisis de ordenación canónico se eligió como la estrategia más simple con la cual se puede realizar una matriz de covarianza como la matriz de eigen valores. Por lo general los métodos de análisis canónico utilizan eigen análisis (eigen vectores y eigen valores). El análisis canónico combinó los conceptos de ordenación y regresión en los que se consideró la matriz explicativa X y la matriz de respuesta Y (Legendre y Legendre, 1998). Con ellos se produjeron ejes ortogonales de donde se esquematizó un diagrama de dispersión. En este análisis se incluyeron tablas con datos de:

- 1) la concentración de Chl a dividida por estaciones y por estratos ambientales (mezcla máximo de clorofila a, termoclina, borde inferior de la termoclina, y agua de fondo)
- 2) La cantidad de oxígeno disuelto ( $\text{mgL}^{-1}$ ), por estaciones y por capas ambientales (mezcla máximo de clorofila a, termoclina, borde inferior de la termoclina, y agua de fondo)
- 3) La temperatura en grados centígrados dividida por estaciones y por capas ambientales (capa de mezcla, máximo de clorofila a, termoclina, borde inferior de la termoclina, agua de 1500m de profundidad y agua de fondo)
- 4) La tabla de pH

Los factores anteriores hicieron posible el análisis dado que todas las variables estaban representadas para cada una de las estaciones y cada uno de los estratos. En el análisis de redundancia (RDA), cada eje de ordenación canónica correspondió a una dirección en la dispersión multivariada de objetos (matriz Y), y estuvo relacionado a la combinación lineal de variables explicativas X (Legendre y Legendre, 1998). Dos ordenaciones de los objetos a lo largo de los ejes canónicos permitieron obtener:

- 1) combinaciones lineales de las variables, y

2) combinaciones lineales de las variables ajustadas de  $\hat{y}$ , la cuales fueron combinaciones lineales de las variables X.

El RDA conservó la distancia euclídeana de entre los objetos de la matriz  $\hat{y}$ , que contuvo valores de Y ajustados por regresión a las variables explicativas X; por lo tanto variables de y fueron combinaciones lineales de las variables X (Legendre y Legendre, 1998).

En principio, el RDA es la extensión directa de modelos de regresión múltiple de datos de respuesta multivariada. La redundancia es sinónima de varianza explicativa. Observando desde una perspectiva descriptiva, se podría decir que la ordenación de "Y" esta determinada de tal forma que los vectores de la ordenación resultante son combinaciones lineales de las variables en X. El RDA también puede entenderse como la extensión de análisis de componentes principales, dado que la ordenación de los vectores son combinaciones lineales de variables de respuesta en Y. Esto significa que cada vector de ordenación es una proyección unidimensional de la distribución de los objetos en un espacio que conserva las distancias Euclídeanas entre ellos (Legendre y Legendre, 1998). Estos vectores de ordenación difieren por supuesto de los componentes principales en que podrían calcularse de la tabla de datos Y, dado que también están determinados para ser combinaciones lineales de las variables en X (Legendre y Legendre, 1998). La ecuación usada para eigen análisis de redundancia fue (Eq. 7):

$$(S_{yx} S^{-1}_{xx} S'_{yx} - \lambda_k I) u_k = 0 \quad (7)$$

De esta ecuación (7) puede derivarse la regresión linear múltiple, seguido de descomposición de componentes principales. Las características de los datos y formatos requeridos para realizar el RDA se describen como:

1) La tabla de variables de respuesta Y es de tamaño ( $n \times p$ ), donde  $n$  es el número de objetos (número de estaciones) y  $p$  el número de variables. Se centró las variables de respuesta en función de sus promedios, otras se estandarizaron por columna si las variables no fueron homogéneas en su dimensión (p.e. temperatura, concentración de oxígeno y pH).

2) La tabla de variables explicativas X fue de tamaño ( $n \times m$ ) donde  $m \leq n$ . Las variables se centraron sobre sus respectivos promedios por conveniencia; el centrar las variables en X y Y tuvo el efecto de eliminar el intercepto de la regresión, simplificando así la interpretación sin pérdida de información. Las variables de X pudieron estandarizarse. La cantidad de variación explicativa, así como los valores ajustados de regresión permaneció sin cambios al centrar o estandarizar las variables en X. El análisis de RDA se realizó con el programa CANOCO, la estandarización se realizó automáticamente para las variables explicativas (matriz X) al computar el RDA (Legendre y Legendre, 1998).

La distribución de las variables se expresó con graficas bivariadas dentro y entre los grupos de X y Y. Las transformaciones aplicadas para linearizar las relaciones y hacer las distribuciones más simétricas ayudaron a reducir el efecto de los extremos (Legendre y Legendre, 1998). El álgebra del análisis de redundancia se basó en que:

1) A cada variable de Y se le realizó una regresión sobre las variables de X y se calculó los valores ajustados.

2) Se llevó a cabo un análisis de componentes principales sobre la matriz de valores ajustados para obtener los eigen valores y eigen vectores.

Para cada variable de respuesta en la tabla Y, se calculó una regresión múltiple de todas las variables de la tabla de X. La ecuación para cada regresión correspondiente a la matriz fue (Eq. 8):

$$b = [X'X]^{-1} X' y \quad (8)$$

así la ecuación correspondiente a la matriz para el total de regresiones se presentó como (Eq. 9):

$$B = [X'X]^{-1} X' Y \quad (9)$$

donde B = la matriz de coeficientes de regresión de todas las variables de respuesta Y sobre los regresores X. En la regresión múltiple los valores ajustados  $\hat{Y}$  se calcularon como (Eq. 10)

$$\hat{Y} = XB \quad (10)$$

Así la tabla completa de valores ajustados  $\hat{Y}$  se calculó en una matriz de operación, usando B (Eq. 11):

$$\hat{Y} = X[X'X]^{-1} X' Y \quad (11)$$

Dado que las variables X y Y, estuvieron centradas sobre su respectivo promedio, no hubo un intercepto, en los vectores de B. Los  $\hat{Y}$  estuvieron centrados como siempre en una regresión lineal ordinaria. Si  $m = n$ , X estaba elevada al cuadrado y en dicho caso las regresiones múltiples siempre explicaron las variables en la matriz Y por completo siendo que  $\hat{Y} = Y$ , cuando X esta elevada al cuadrado (Legendre y Legendre, 1998).

La matriz de covarianza correspondiente a tabla de valores  $\hat{Y}$  se calculó como (Eq. 12):

$$S_{\hat{Y}\hat{Y}} = [1/(n-1)] \hat{Y}'\hat{Y} \quad (12)$$

Al reemplazar  $\hat{Y}$  esta quedó como la Eq. 13:

$$S_{\hat{Y}\hat{Y}} = [1/(n-1)] Y'X[X'X]^{-1} X'X[X'X]^{-1} X'Y \quad (13)$$

La ecuación 13 se redujo la ecuación a la nueva ecuación (Eq. 14):

$$S_{\hat{Y}\hat{Y}} = S_{YX} S_{XX}^{-1} S'_{YX} \quad (14)$$

Donde  $S_{YX}$  fue la matriz de covarianza ( $p \times p$ ) entre las variables de respuesta,  $S_{XX}$ , y ( $m \times m$ ) fue la matriz de covarianza entre los regresores cuando  $R_{XX}$  si todas las variables X estuvieron estandarizadas, y  $S_{YX}$  fue la matriz de covarianza de las variables de los dos juegos de datos ( $p \times m$ ); su transpuesto  $S'_{YX} = S_{XY}$  fue de tamaño ( $m \times p$ ). Si la variable Y también estuvo estandarizada, la ecuación se leería  $R_{YX} = R_{XY} R_{XX}^{-1} R'_{XX} R'_{YX}$ , que fue la ecuación para el coeficiente de determinación múltiple (Legendre y Legendre 1998).

La tabla de valores ajustados  $\hat{Y}$ , estuvo sujeta a análisis de componentes principales para reducir la dimensionalidad de la solución. Esto correspondió a resolver el problema de eigen valores (Eq. 15).

$$(S_{\hat{Y}\hat{Y}} - \lambda_k I) u_k = 0 \quad (15)$$

Que de la Eq. 15 se tradujo a la Eq. 16:

$$S_{XY} S^{-1} S_{XX} S^{-1} Y_{XX} - \lambda_k I) u_k = 0 \quad (16)$$

Misma que es la ecuación para análisis de redundancia propuesta por Legendre (2000)

#### INTERPRETACIÓN DE COLOR DEL MAR (IMÁGENES DE SATÉLITE)

Müller Kärger (1991) reporta una variación estacional de concentración de pigmentos en Golfo de México con valores mas altos  $> 0.18 \text{ mg m}^{-3}$  ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de diciembre a febrero y los mas bajos  $0.06 \text{ mg m}^{-3}$  ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de mayo a julio. Estudios como los hechos por Pfannkuche (2000), observan un cambio en la exportación en función de una temporalidad estacional (primavera o monzones) de mayor o menor producción en superficie, por lo que fue necesario plantear la posibilidad de un escenario con procesos semejantes en nuestra área de estudio. Sabemos que por la época de lluvias las condiciones de temperatura superficiales en verano pueden profundizar la termoclina, y que los frentes invernales de octubre a marzo aumentan la mezcla de columna (Escobar y Soto, 1997), como ambos procesos podrían influir fuertemente en la productividad (concentración de Chl a), surge la necesidad de observación de color del mar en fechas anteriores a las de muestreo.

Las imágenes diarias del mes de mayo y junio de 2002 fueron procesadas y promediadas mensualmente en el Instituto de Geografía en el laboratorio de percepción remota UNAM bajo la supervisión de Olivia Salmerón García y el Dr. Raúl Aguirre. A estas se les aplicaron los algoritmos que hacen la corrección atmosférica, para hacer la conversión de los valores recibidos en crudo y finalmente presentar los valores de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$ . La profundidad óptica para el Golfo de México es de 10 a 2.5m de profundidad con base en Müller Kärger (1991) y Walsh (1989) para el sensor CZCS.

Se consideró que la Chl a que se presentó en el suelo marino durante el periodo en el cual se realizó el muestreo, tendría que haber sido exportada de la columna de agua con 1 o 1.5 meses de anterioridad. Para demostrar el acoplamiento entre la concentración de Chl a proveniente del máximo de Chl a en columna de agua y la concentración de Chl a en sedimento, los valores de columna observados con las imágenes de percepción remota tendrían que corresponder a el mes de junio o mayo. Las imágenes obtenidas carecieron de información en muchos sectores, dadas las condiciones de nubosidad de verano que disminuyen la definición de la percepción remota. Se buscó obtener la información de la manera más detallada sobre el transecto, a partir de una imagen promedio de todos los datos obtenidos en el mes de junio y una imagen promedio del mes de mayo.

Las características del sensor SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor), son las de un espectro radiómetro montado en el satélite SeaStar. Desde marzo de 1998 las imágenes SeaWiFS son recibidas diariamente en el instituto de geografía de la UNAM por ser estación autorizada por la NASA, lo que le permite formar parte de un conjunto internacional de estaciones. El satélite SeaStar, anteriormente OrbView-2, fue construido y es controlado por la compañía Orbital Sciences Corporation. Se puso en órbita en agosto de 1997. La órbita del SeaStar tiene una altura de 705 Km. con una inclinación de  $98.2^\circ$ . El periodo orbital es de 99 minutos, con lo que tenemos aproximadamente 14,5 órbitas diarias. Aproximadamente el 90% de la superficie marina

es cubierta cada dos días. Además de circular y polar, la órbita es heliosíncrona, lo que le permite observar una determinada zona de la Tierra repetidamente con las mismas condiciones lumínicas. El cruce por el Ecuador, en sentido descendente, se produce a las 12:00 hora local, con un margen de 20 minutos (<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>). La selección de sus bandas se ha basado en las características espectrales de algunos constituyentes ópticos del agua y la transmitancia espectral del oxígeno y el vapor de agua atmosféricos. Para ello, este instrumento cuenta con ocho bandas espectrales. Las bandas 1 a la 6 están localizadas en la región óptica del espectro electromagnético (400 - 700 nm) y se ubican en zonas características de absorción y/o reflexión del fitoplancton. Las bandas 7 y 8 se localizan en la región del infrarrojo cercano ó reflectivo (745 - 885 nm) y son de utilidad para realizar una adecuada corrección atmosférica. De los seis canales que tiene el sensor, seis operan en la banda visible: 3 en el azul (B), 2 en el verde (G) y uno en el rojo (R). SeaWiFS transmite en dos formatos: datos LAC (*Local Area Coverage*) y datos GAC (*Global Area Coverage*). Los datos LAC se transmiten de forma continua, y tienen una resolución de 1,2 Km. en una franja de 2800 Km. de ancho (<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>). Los datos GAC se almacenan a bordo y se envían a la estación terrena de Wallops Flight Facility cada 12 horas. Los GAC se obtienen submuestreando los LAC, presentando una resolución de 4 Km. en una franja de 1.500 Km.

tipo	Resolución espectral	Resolución espacial	Resolución radiométrica
SeaWiFS	8 bandas (6 visible, 2 IR cercano)	1100 m.	10 bits

Módulo explorador	Swath	Angulo de barrido	IFOV	Resolución espacial
	2800 Km.	58.3° a c/lado del nadir	1.6 x 1.6 mrad	1.1 x 1.1 Km. nadir

\*La longitud máxima del pase es aproximadamente 3000 Km. N-S

Tabla 3. Características del satélite para estimar el color del mar SEAWIFS conforme se usaron para interpretar la concentración de clorofila promedio.

Se procesaron imágenes diariamente durante el mes de Mayo y Junio del 2002. A partir del total de imágenes obtenidas, se generaron dos imágenes finales promedio del mes respectivo. Sobre ambas imágenes generadas a partir del promedio mensual, se pudo trazar un transecto que seguía linealmente las mismas coordenadas de muestreo que el crucero SIGSBEE.5, el cual produjo un histograma que permitió hacer un buen diagnóstico numérico de la concentración de Chl a en  $\text{mgm}^{-3}$  ( $\mu\text{gL}^{-1}$ ) para la misma zona. Estos datos se procesaron en tablas semejantes a las obtenidas en el crucero, donde se calculó el valor promedio, los valores máximos y mínimos, y la desviación estándar, para hacer la información comparable a la de los datos obtenidos sobre el crucero. Las

concentraciones obtenidas contra la distancia de la costa se graficaron para buscar una correlación lineal entre estos dos factores a través de una regresión, de la misma forma en que se hizo esto para los datos del crucero. También se graficaron los valores de mayo y de Junio de SeaWiFS vs. los valores de capa de mezcla obtenidos in situ, así como contra los valores de sedimento obtenidos in situ. La transformación de  $\text{mgm}^{-3}$  a  $\mu\text{gL}^{-1}$  es posible dado que:

$$1\text{mg} = 10^{-3}\text{gms}$$

$$1\mu\text{g} = 10^{-6}\text{gms}$$

$$1\text{ litro} = 1 * 10^{-3}\text{ m}^3$$

lo que resulta en:

$$(1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}) * (10^{-3}\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}) * (1\mu\text{g} \times 10^{-6}\text{g}^{-1}) * (1 * 10^{-3}\text{ m}^3\text{L}^{-1}) = \mu\text{gL}^{-1} \quad (17)$$

lo que nos permite tomar las unidades como equivalentes y procesar los resultados de imágenes de satélite al parejo de los datos obtenidos en campo durante el crucero.

## RESULTADOS

### CONCENTRACIÓN DE CHL A EN COLUMNA DE AGUA

Las concentraciones de Chl a medidas en 12 estaciones y en 6 profundidades agua de fondo, (1500m), borde inferior de la termoclina, termoclina, máximo de clorofila a y capa de mezcla fluctuaron entre los  $0.002 \mu\text{g L}^{-1}$ , registrados en la estación 6 en el agua de fondo, y los  $0.267 \mu\text{g L}^{-1}$  valor correspondiente a la estación 11 máximo de clorofila a. (Tabla 4).

El Promedio de todos estos valores fue de  $0.04 \mu\text{g L}^{-1}$ . La desviación estándar general fue de  $0.0275 \mu\text{g L}^{-1}$ , que es evidencia de la dispersión que presentan los datos y por ende indicativo de heterogeneidad relativa entre las distintas profundidades.

La desviación estándar más alta la presentó la capa que denominamos "máximo de clorofila a" con  $0.071 \mu\text{g L}^{-1}$ , misma capa que presento la mayor concentración de Chl a Promedio en la columna de agua  $0.12 \mu\text{g L}^{-1}$ . La desviación estándar más baja se reconoció en el agua de fondo y en agua de 1500m de profundidad con  $0.001 \mu\text{g L}^{-1}$ , lo que nos indica que en las capas que se encuentran muy por debajo de la termoclina se presentan valores bajos similares entre sí.

Todas las estaciones presentaron un mismo patrón de distribución de la concentración de la Chl a que puede observarse en la Fig.10; con concentraciones mayores de Chl a en las capas superficiales (capa de mezcla, máximo de clorofila a y termoclina) y una disminución gradual hasta los valores en el agua de fondo. El valor Promedio máximo siempre se encontró sobre la termoclina en el estrato denominado máximo de Chl a ( $0.120 \mu\text{g L}^{-1}$ ) mientras que el valor promedio mínimo se registró en todos los casos bajo el agua de 1500m de profundidad ( $0.003 \mu\text{g L}^{-1}$ ).

Tabla 4 Concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en los seis niveles de columna de agua en las 12 estaciones del transecto de costa a zona oceánica en el sector sur occidental del Golfo de México en el mes de junio 2002. Concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en los seis niveles de columna de agua en las 12 estaciones del transecto de costa a zona oceánica en el sector sur occidental del Golfo de México en el mes de junio 2002. Abreviatura: nd = no hay dato.

Estación	Agua de fondo	1500m de Prof.	Bord. Inf. de la term	Termoclina	máx. Chl a	Capa de mezcla
1	0.002	0.002	0.003	0.127	0.059	0.064
2	0.003	0.002	0.004	0.015	0.057	0.046
3	0.002	0.003	0.005	0.052	0.053	0.043
4	0.006	0.006	0.008	0.042	0.122	0.041
5	0.004	0.003	0.006	0.046	0.146	0.041
6	0.002	0.002	0.009	0.056	0.04	0.003
7	0.002	0.002	0.005	0.061	0.172	0.036
8	0.004	Nd	0.005	0.017	0.199	0.031
9	0.003	0.002	0.006	0.05	0.094	0.047
10	0.003	0.003	0.006	0.011	0.164	0.099
11	0.002	Nd	0.005	0.022	0.267	0.085
12	0.005	Nd	0.033	0.14	0.064	0.064

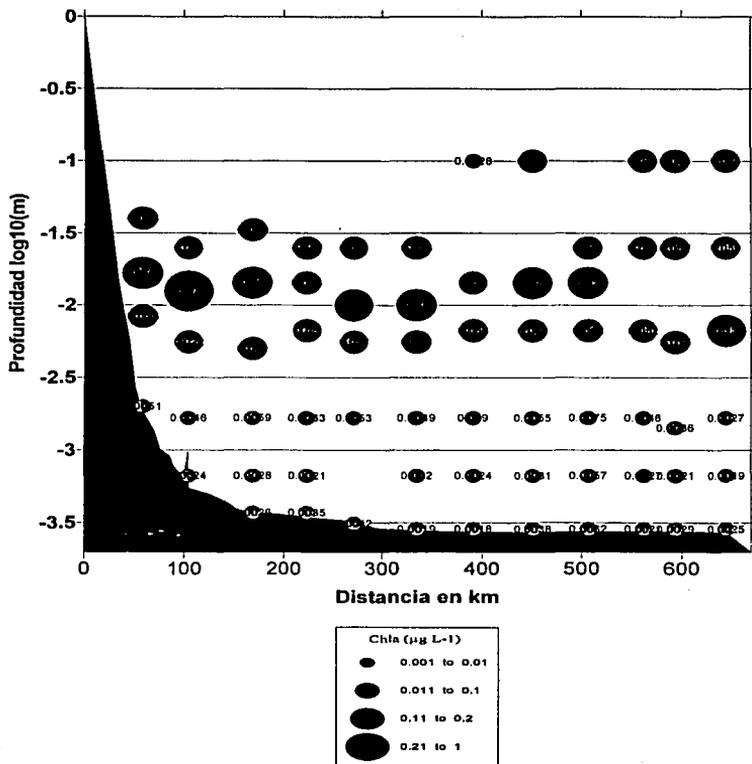


Fig.- 7 Distribución horizontal y vertical de la Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en los seis estratos de profundidad en columna de agua en las 12 localidades de muestreo en el transecto de costa a zona oceánica en el sector suroccidental del Golfo de México para el mes de junio del 2002. 1) capa de mezcla, 2) máximo de Chl a, 3) termoclina 4) borde inferior de la termoclina, 5) agua de 1500m de profundidad y, 6) agua de fondo.

## VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CHL a EN LA CAPA DE MEZCLA

Los valores de Chl a en la capa de mezcla en el sector occidental variaron de 0.003 a 0.09  $\mu\text{g L}^{-1}$  Chl a. (Tabla 5) con promedio de 0.05  $\mu\text{g L}^{-1}$  Chl a  $n=12$ . Los valores mas bajos se reconocieron sobre la planicie abisal,  $0.03 \pm \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a aumentando en talud continental  $0.06 \pm \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a, y en el reborde continental  $0.063 \pm \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a. La tendencia general fue a disminuir en dirección de la costa a la zona oceánica, figura 8 y 9. Los valores obtenidos para la capa de mezcla son menores que el estrato siguiente de máximo de Chl a en el borde superior de la termoclina, pero son equiparables a los de el estrato termoclina. Cabe mencionar que los tres estratos pertenecen a la zona eufótica y están por encima del resto que pertenecen a la zona disfótica, borde inferior de la termoclina, agua de 1500m de profundidad y agua de fondo.

Tabla 5 Concentración de Chl a en la capa de mezcla, medida en Julio del 2002 en el sector suroccidental del Golfo de México.

Estación	Latitud	Longitud		
	N	W	$\mu\text{g L}^{-1}$	Zona batimétrica
1	23°36	92°03	0.064	Planicie abisal
2	23°30	92°18	0.046	Planicie abisal
3	23°20	92°30	0.043	Planicie abisal
4	23°06	92°58	0.041	Planicie abisal
5	22°50	93°27	0.04	Planicie abisal
6	22°34	93°56	0.003	Planicie abisal
7	22°22	94°26	0.036	Planicie abisal
8	22°05	94°57	0.031	Planicie abisal
9	21°51	95°24	0.047	Planicie abisal
10	21°36	95°52	0.099	Talud continental
11	21°21	96°21	0.084	Talud continental
12	21°13	96°49	0.064	Reborde continental
Promedio			<b>0.05</b>	
Desviación Estándar			<b>0.024</b>	
Mediana			<b>0.044</b>	
Confianza 95%			<b>0.014</b>	
Promedio confianza +			0.064	
Promedio confianza -			0.036	
Varianza			<b>0.000584</b>	

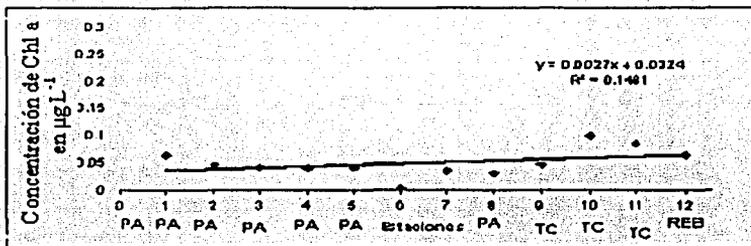


Fig.- 8 Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para cada estación (números del eje x) en el estrato de la capa de mezcla (10 a 40 m) de columna de agua, en un transecto en el sector suroccidental de el Golfo de México. Abreviaturas: PA= Planicie abisal, TC= Talud continental, REB= Reborde continental.

En la figura 8 se muestra la relación lineal que existe entre la concentración de Chl a y las doce estaciones para la capa de mezcla en el transecto que va desde la planicie abisal hasta el reborde continental en el sector suroccidental del Golfo de México. Los valores de las estaciones más cercanas a la costa, E10, E11 y E12, son mas altos con relación a los de planicie abisal E1 a E8, sin embargo la  $R^2$  de 0.15 no muestra ser significativa, por lo que los valores calculados no tienen buena correspondencia con los reales.

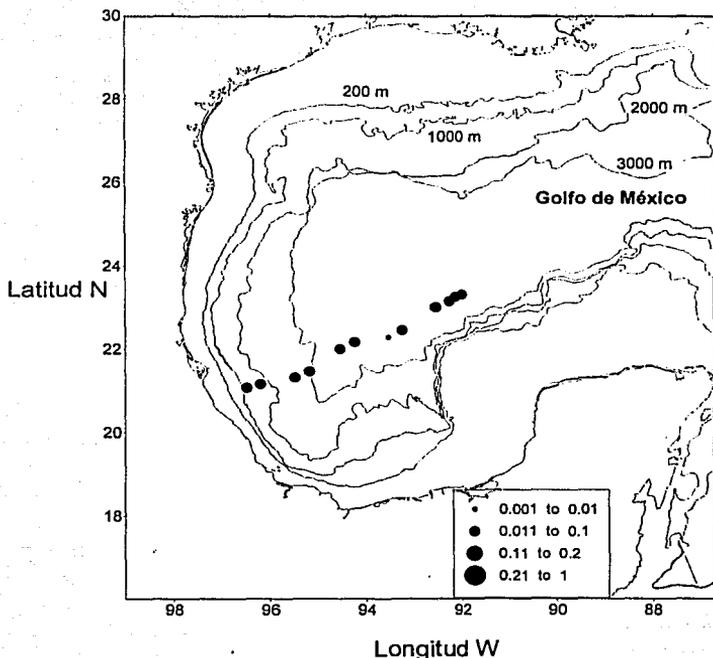


Fig. 9 Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para la capa de mezcla (10 a 40 m), en un transecto del sector suroccidental de el Golfo de México. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

#### VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CHL A EN EL ESTRATO DE MÁXIMO DE CLOROFILA A.

Los valores de Chl a reconocidos en el estrato máximo de clorofila a en el sector occidental variaron de  $0.04$  a  $0.27 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a. (Tabla 6) Los valores más bajos se reconocieron sobre la planicie abisal,  $0.04$  a  $0.017 \mu\text{g L}^{-1}$  de Chl a donde el promedio fue de  $0.104$  ( $n = 9$ )  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Los valores de talud y reborde continental fueron los más elevados de ( $0.14$  a  $0.27 \mu\text{g L}^{-1}$ ) con Promedio  $0.19 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a, ( $n = 3$ ). La tendencia general fue a disminuir en dirección de la costa hacia la zona oceánica, observándose tres valores relativamente altos en la porción más occidental del transecto en la zona oceánica (Fig.- 10 y 11).

Los valores de Chl a presentes en el estrato de máximo de Chl a (Borde superior de la termoclina) muestran una relación alta con la distancia a la costa ( $r = 0.7$ ) y permiten estimar los valores a lo largo del transecto con la ecuación  $Y = 0.042 + 0.013X$ .

Sobre este estrato, conforme la distancia de la costa incrementa, se muestra una disminución progresiva de concentración de Chl a, lo que corresponde a lo esperado teóricamente. Es el único de los estratos de la columna que presenta variabilidad estadísticamente significativa (regresión máximo de clorofila a) donde  $p = 0.0156$ . Este estrato presentó la mayor concentración de Chl a promedio en la columna de agua con  $0.12\mu\text{gL}^{-1}$ . La desviación estándar más alta también la presentó este estrato con  $0.071\mu\text{gL}^{-1}$ . La regresión denota una pendiente positiva conforme nos acercamos a la costa en la estación 12.

Considerando el total de las doce estaciones, resumimos la Regresión efectuada para este estrato en la tabla 6, donde deberá destacarse el valor de la  $|R|$  con 0.68 y la  $R^2$  con 0.46. Estos estadísticos nos informan que los valores estimados de la regresión, corresponden con los datos reales, es decir existe una regresión positiva.

Tabla 6. Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el estrato de máximo de clorofila a localizado en el borde superior de la termoclina, (40 a 100m) medida en Julio del 2002 en el sector suroccidental del Golfo de México.

Estación	Latitud		$\mu\text{L}^{-1}$	
	N	W		
1	23°36	92°03	0.059	Planicie abisal
2	23°30	92°18	0.057	Planicie abisal
3	23°20	92°30	0.053	Planicie abisal
4	23°06	92°58	0.122	Planicie abisal
5	22°50	93°27	0.146	Planicie abisal
6	22°34	93°56	0.040	Planicie abisal
7	22°22	94°26	0.172	Planicie abisal
8	22°05	94°57	0.199	Planicie abisal
9	21°51	95°24	0.094	Planicie abisal
10	21°36	95°52	0.164	Talud continental
11	21°21	96°21	0.267	Talud continental
12	21°13	96°49	0.140	Reborde continental
<b>Promedio</b>			<b>0.126</b>	
Desviación Estándar			<b>0.066</b>	
Mediana			<b>0.131</b>	
Confianza 95%			<b>0.037</b>	
Promedio + confianza			0.163	
Promedio - confianza			0.089	
<b>Varianza</b>			<b>0.004348</b>	

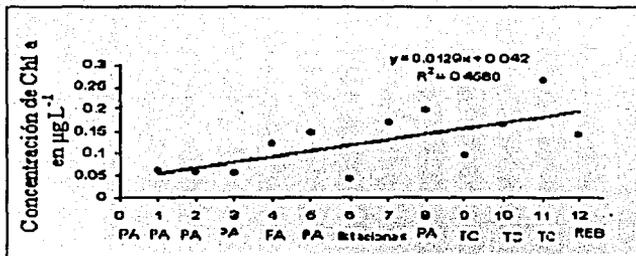


Fig.- 10 Relación lineal entre la concentración de la Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  del estrato máximo de clorofila a (40 a 100 m), con respecto a la distancia de la costa a la zona oceánica en el sector suroccidental de el Golfo de México.

Tabla 7 Resumen de regresión lineal entre concentración de Chl a y posición de las estaciones a distancia de la costa. Para el estrato máximo de clorofila a (40 a 100 m).

Resumen de Correlación y Regresión Chl a contra Posición	
Conteos	12
Números ausentes	0
R	0.678
R cuadrada	0.46
R cuadrada ajustada	0.405
RMS residual	0.053146

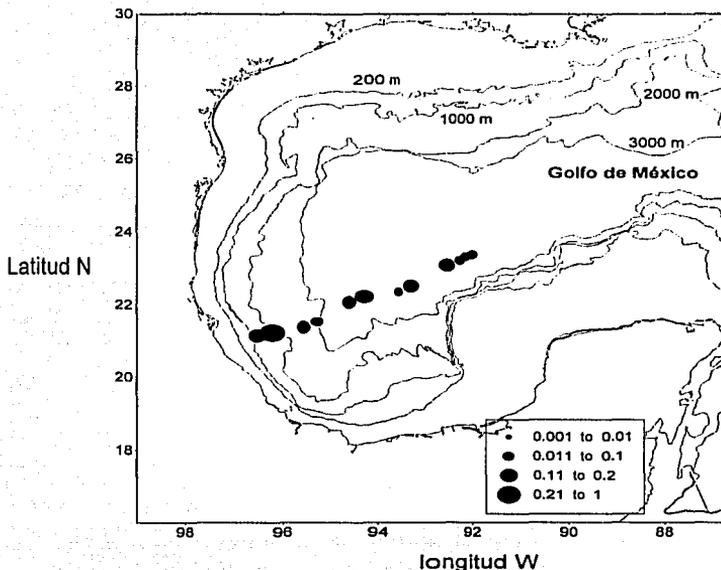


Fig.- 11 Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de máximo de clorofila a (40 a 100 m), en un transecto en el sector suroccidental del Golfo de México. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

#### VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CHLA EN EL ESTRATO DE TERMOCLINA

Los valores de Chl a reconocidos en el estrato de termoclina en el sector occidental variaron de  $0.015$  a  $0.127 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a. (Tabla 8) Los valores más altos se reconocieron sobre el reborde continental con  $0.03 \mu\text{g L}^{-1}$  y en la planicie abisal. El promedio de los valores de la planicie abisal fue de  $0.052 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 8$ )  $\mu\text{g L}^{-1}$  como se muestra en la figura 12. La concentración promedio para este estrato fue de  $0.44 \mu\text{g L}^{-1}$ . Los valores de talud continental y reborde continental son la excepción del patrón general del resto de los estratos, dado que en este caso los valores fueron menores que los valores reconocidos en la zona oceánica (PA). En general las concentraciones son bajas, exceptuando una localidad en la zona oceánica que fue relativamente alta ( $0.127 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y por encima del rango de confianza ( $0.061 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Tres estaciones fueron menores al promedio ( $0.01 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y por debajo del rango marcado por el nivel de confianza ( $0.028 \mu\text{g L}^{-1}$ ), dos sobre talud continental y una en zona la oceánica (Fig. 13, 14).

Tabla 8 Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el estrato de termoclina, (120 a 200m) fin de la zona eufótica, medida en julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México.

En Termoclina				
Estación	Latitud		$\mu\text{L}^{-1}$	
	N	W		
1	23°36	92°03	0.127	Planicie abisal
2	23°30	92°18	0.015	Planicie abisal
3	23°20	92°30	0.052	Planicie abisal
4	23°06	92°58	0.042	Planicie abisal
5	22°50	93°27	0.046	Planicie abisal
6	22°34	93°56	0.056	Planicie abisal
7	22°22	94°26	0.061	Planicie abisal
8	22°05	94°57	0.017	Planicie abisal
9	21°51	95°24	0.050	Planicie abisal
10	21°36	95°52	0.011	Talud continental
11	21°21	96°21	0.022	Talud continental
12	21°13	96°49	0.033	Reborde continental
	Promedio		0.044	
	Desviación Estándar		0.030	
	Mediana		0.044	
	Confianza 95%		0.017	
	Promedio + confianza		0.061	
	Promedio - confianza		0.028	
	Varianza		0.000884	

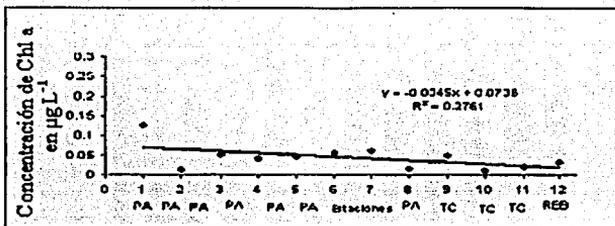


Fig.- 12 Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para cada estación en el estrato de la termoclina (120 a 200 m), fin de la zona eufótica en un transecto en el sector suroccidental del Golfo de México.

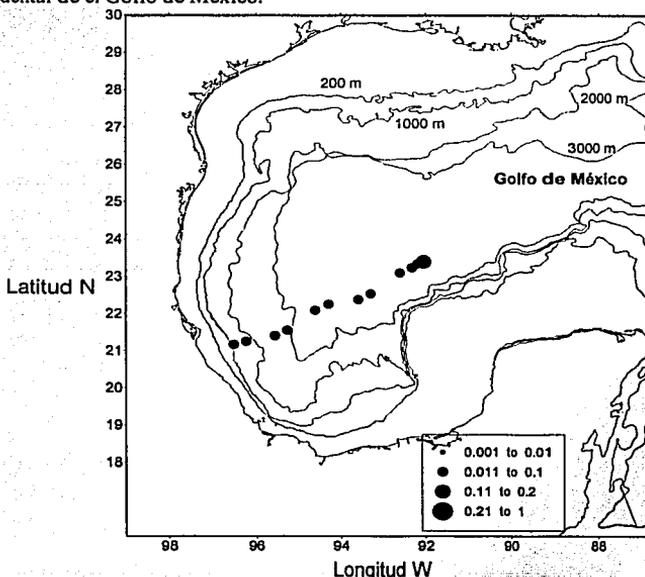


Fig. 13.- Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de termoclina (120 a 200 m), fin de la zona eufótica, en un transecto en el sector suroccidental del Golfo México. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

**VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS VALORES DE CHL A EN EL ESTRATO DE BORDE INFERIOR DE LA TERMOCLINA**

Los valores de Chl a reconocidos en el estrato borde inferior de la termoclina en el sector occidental variaron de 0.003 a 0.009  $\mu\text{g L}^{-1}$  Chl a (Tabla 9). La tendencia general de los valores de Chl a en este estrato fue a mantenerse en bajas concentraciones entre 0.005 y 0.006  $\mu\text{g L}^{-1}$ , con la excepción de las dos localidades oceánicas E4 y E6 (0.008 y 0.009  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Chl a), en las cuales las concentraciones de Chl a superaron el rango de confianza de 0.006; a pesar de esto, el promedio de los valores en la planicie abisal se mantuvo en 0.005  $\mu\text{g L}^{-1}$  (n = 8), lo que iguala la concentración promedio para este estrato con 0.005  $\mu\text{g L}^{-1}$  (n=12) Fig. 12, Mapa 6.

Tabla 9 Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el estrato de borde inferior de la termoclina, que es la primer medida de zona disfótica medida en julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México.

Borde inferior de la termoclina				
Estación	Latitud	Longitud		
	N	W	$\mu\text{gL}^{-1}$	Zona batimétrica
1	23°36	92°03	0.003	Planicie abisal
2	23°30	92°18	0.004	Planicie abisal
3	23°20	92°30	0.005	Planicie abisal
4	23°06	92°58	0.008	Planicie abisal
5	22°50	93°27	0.006	Planicie abisal
6	22°34	93°56	0.009	Planicie abisal
7	22°22	94°26	0.005	Planicie abisal
8	22°05	94°57	0.005	Planicie abisal
9	21°51	95°24	0.006	Planicie abisal
10	21°36	95°52	0.006	Talud continental
11	21°21	96°21	0.005	Talud continental
12	21°13	96°49	0.005	Reborde continental
		Promedio	0.005	
		Desviación Estándar	0.002	
		Mediana	0.005	
		Confianza 95%	0.001	
		Promedio confianza +	0.006	
		Promedio confianza -	0.005	
		Varianza	2.51 E-06	

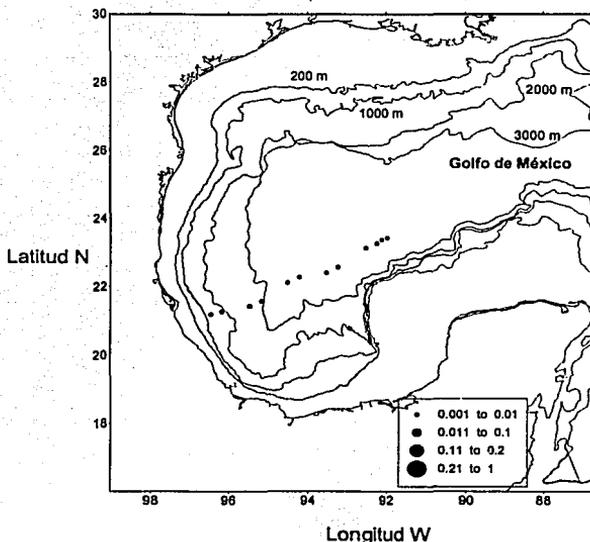


Fig. -14 Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de borde inferior de la termoclina, primer medida de la zona disfótica, en un transecto en el sector suroccidental de el Golfo de México. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

#### VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CHL A EN EL ESTRATO DE AGUA DE 1500M DE PROFUNDIDAD

Los valores de Chl a reconocidos en el estrato de agua de 1500m de profundidad en el sector occidental variaron de  $0.002$  a  $0.006 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a. (Tabla 10) El valor más alto se reconoció en la planicie abisal, con  $0.006 \mu\text{g L}^{-1}$  de Chl a; sin embargo tanto el promedio general como el de planicie abisal fue de  $0.003 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 12$ ). La tendencia general de los valores de Chl a en el agua del estrato de agua de 1500m de profundidad fue a mantenerse en bajas concentraciones ( $0.002$  y  $0.003 \mu\text{g L}^{-1}$ ) a excepción de la localidad oceánica alta E4 con  $0.006 \mu\text{g L}^{-1}$  (Figura 15)

Tabla 10 Concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el de agua de 1500m de profundidad donde fuera posible, (se excluye E8 por falta de muestreo y reborde continental E12) medida en julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México.

Agua de 1500m de profundidad				
Estación	Latitud	Longitud		
	N	W	$\mu\text{gL}^{-1}$	Zona batimétrica
1	23°36	92°03	0.002	Planicie abisal
2	23°30	92°18	0.002	Planicie abisal
3	23°20	92°30	0.003	Planicie abisal
4	23°06	92°58	0.006	Planicie abisal
5	22°50	93°27	0.003	Planicie abisal
6	22°34	93°56	0.002	Planicie abisal
7	22°22	94°26	0.002	Planicie abisal
8	22°05	94°57		Planicie abisal
9	21°51	95°24	0.002	Planicie abisal
10	21°36	95°52	0.003	Talud continental
11	21°21	96°21	0.002	Talud continental
		Promedio	0.003	
		Desviación Estándar	0.001	
		Mediana	0.002	
		Confianza 95%	0.001	
		Promedio confianza +	0.003	
		Promedio confianza -	0.002	
		Varianza	1.13E-06	

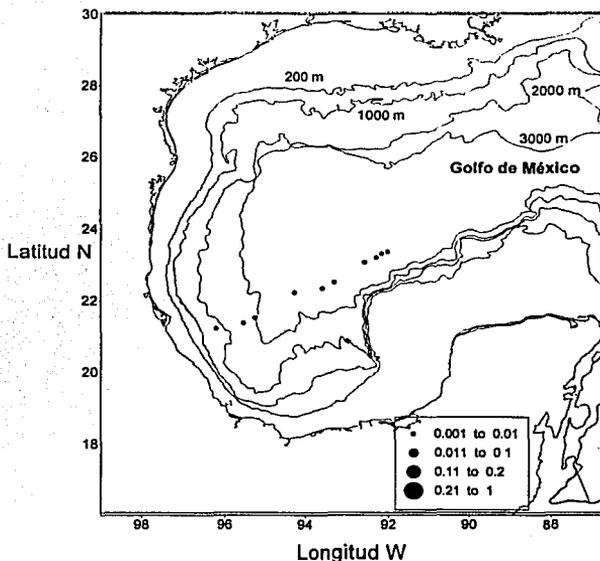


Fig.15 Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de agua de 1500 m de profundidad, en un transecto en el sector suroccidental del Golfo de México medida en Julio 2002. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

#### VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CHL A EN EL ESTRATO AGUA DE FONDO

Los valores de Chl a reconocidos en el estrato de agua de fondo en el sector occidental variaron de 0.002 a 0.006  $\mu\text{g L}^{-1}$  Chl a. (Tabla 11) El valor más alto se reconoció en la planicie abisal, con 0.006  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Chl a; sin embargo, tanto el promedio general (0.003  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) como el de las localidades de la planicie abisal fueron iguales. Nótese que la tendencia de la distribución de los valores de Chl a en este estrato fue similar al estrato anterior (agua de 1500m de profundidad), incluso en ambos estratos el valor más alto de Chl a (0.006  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) ocurrió en la E4, donde la ubicación de la zona podría ser informativa de la hidrodinámica de esta estación. La tendencia general fue de mantener a concentraciones bajas (0.002 a 0.006  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) (Fig. 16).

Tabla 11 Concentración de  $\text{Chl a}$   $\mu\text{g L}^{-1}$  para cada estación en el estrato de agua de fondo (3500m planicie abisal, 2700m talud continental y 500m reborde continental) medida en julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México

Agua de fondo				
Estación	Latitud	Longitud		
	N	W	$\mu\text{gL}^{-1}$	Zona batimétrica
1	23°36	92°03	0.002	Planicie abisal
2	23°30	92°18	0.003	Planicie abisal
3	23°20	92°30	0.002	Planicie abisal
4	23°06	92°58	0.006	Planicie abisal
5	22°50	93°27	0.004	Planicie abisal
6	22°34	93°56	0.002	Planicie abisal
7	22°22	94°26	0.002	Planicie abisal
8	22°05	94°57	0.004	Planicie abisal
9	21°51	95°24	0.003	Planicie abisal
10	21°36	95°52	0.003	Talud continental
11	21°21	96°21	0.002	Talud continental
12	21°13	96°49	0.005	Reborde continental
		Promedio	0.003	
		Desviación Estándar	0.001	
		Mediana	0.003	
		Confianza 95%	0.001	
		Promedio confianza +	0.004	
		Promedio confianza -	0.002	
		Varianza	1.60E-06	

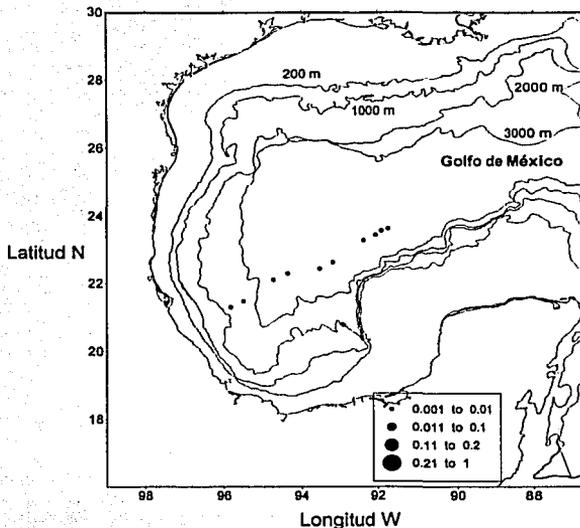


Fig.- 16 Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  estrato de agua de fondo (3500m Planicie abisal, 2700m Talud continental y 500m Reborde continental) en un transecto en el sector suroccidental de el Golfo de México medida en junio del 2002. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

#### VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CHL A EN LA VERTICAL DE LA COLUMNA DE AGUA

##### A. CAPA EUFÓTICA

Para la capa eufótica de las doce estaciones (capa de mezcla, máximo de clorofila a, y termoclina, 10 – 200 m) el valor promedio fue de  $0.075 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 36$ ) y la desviación estándar de  $0.058 \mu\text{g L}^{-1}$ . Para la capa eufótica sobre el talud continental y sobre el reborde continental (capa de mezcla, máximo de clorofila a, y termoclina, 25 – 180 m) estaciones 10, 11 y 12 el valor promedio fue de  $0.101 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 9$ ) y la desviación estándar fue de  $0.079 \mu\text{g L}^{-1}$ . Los valores de Chl a para la capa eufótica (capa de mezcla, máximo de clorofila a, y termoclina, 10 -200m) de las estaciones oceánicas sobre la planicie abisal el valor promedio fue de  $0.065 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 27$ ) y la desviación estándar fue de  $0.05 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a.

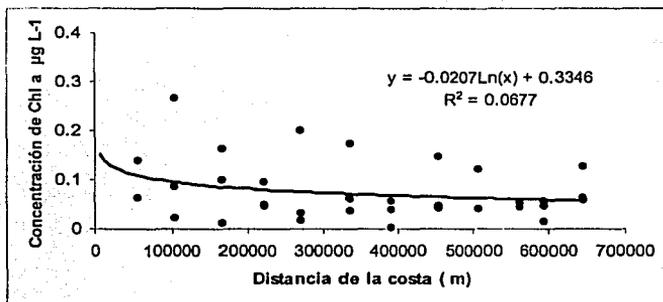


Fig.-17 Variación de la concentración de Chl a en la zona eufótica a lo largo del transecto desde el reborde continental (E12) en la zona nerítica hasta las estaciones de la planicie abisal en la zona oceánica (E1).

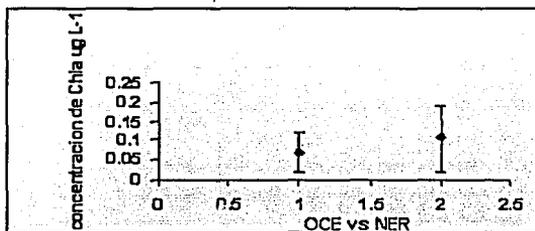


Fig.- 18 Comparación de la concentración Promedio de Chl a entre las estaciones de la zona oceánica (OCE) y las estaciones zona Nerítica (NER) (rebordo y talud continental) en la zona eufótica. Datos obtenidos del transecto llevado a cabo en la zona suroccidental del Golfo de México en Julio 2002.

La Figura 18 demuestra que para la zona eufótica los valores de concentración de Chl a entre las estaciones de zona oceánica y las estaciones de zona nerítica no presentan diferencias apreciables, a pesar de que el promedio si es distinto. También la figura muestra que la variación con respecto al promedio es mayor en zona nerítica que en zona oceánica.

## B. CAPA DISFÓTICA

El valor promedio para la capa disfótica en las doce estaciones (borde inferior de la termoclina, y agua de fondo) fue de  $0.0048 \mu\text{g L}^{-1}$ , con una desviación estándar de  $0.0055 \mu\text{g L}^{-1}$ . ( $n = 36$ ). Para la capa disfótica (borde inferior de la termoclina, y agua de fondo 500–1500m) en el talud continental y el rebordo continental E10, E11 y E12 el

valor promedio fue de  $0.008 \mu\text{g L}^{-1}$  con una desviación de  $0.011 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n=9$ ). El valor promedio para la capa disfótica (borde inferior de la termoclina, el agua a 1500m y agua de fondo 500 –1500m) en las estaciones 1 a 9 zona abisal fue de  $0.004$  con una desviación de  $0.002 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n=27$ ).

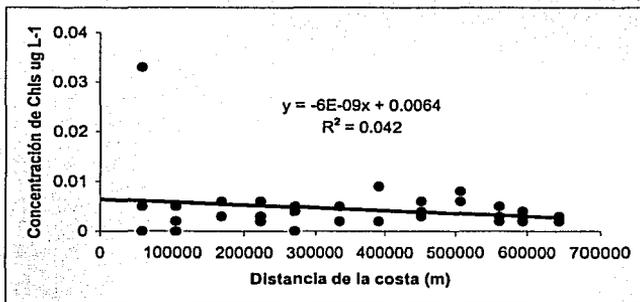


Fig.-19 Variación de la concentración de Chl a en la zona disfótica a lo largo del transecto desde el reborde continental (E12) en la zona nerítica hasta las estaciones de la planicie abisal en la zona oceánica (E1).

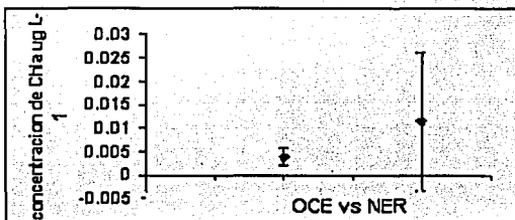


Fig.- 20 Comparación de la concentración promedio de Chl a entre las estaciones de la zona oceánica (OCE) y las estaciones zona Nerítica (NER) (rebordo y talud continental) en la zona disfótica. Datos obtenidos del transecto llevado a cabo en la zona suroccidental del Golfo de México en julio 2002

La figura 20 muestra que para la zona disfótica los valores de concentración de Chl a entre las estaciones de zona oceánica y las estaciones de zona nerítica presentan diferencias apreciables, además de que el promedio es distinto. También la figura muestra que la variación con respecto al promedio es mayor en zona nerítica que en zona oceánica. La comparación de las concentraciones promedio de Chl a de las estaciones de la zona nerítica (sobre el rebordo y talud continental) contra las estaciones de la zona oceánica, tanto en la zona eufótica como en la disfótica nos permiten reconocer que los

promedios se comportan de manera similar para ambos casos. Los valores promedio para las estaciones neríticas (sobre el Reborde y Talud continental) son superiores ( $0.101 \mu\text{g L}^{-1}$  y  $0.008 \mu\text{g L}^{-1}$   $n = 9$ ) que las estaciones oceánicas sobre la zona abisal ( $0.065 \mu\text{g L}^{-1}$  y  $0.004 \mu\text{g L}^{-1}$  valores  $n = 27$ ) (Fig. 17 y 18). Las diferencias en el estrato de máximo de clorofila a mostraron diferencias significativas ( $P = 0.0156$ ).

El valor promedio de la concentración de Chl a para SIGSBEE.5 fue de  $0.041 \mu\text{g L}^{-1}$   $N=72$ , este indica que la Chl a fue baja en concentración a todo lo largo y profundo de la columna de agua en el transecto considerado, sin embargo el que la desviación estándar general sea de  $0.0275 \mu\text{g L}^{-1}$ , (más de la mitad del Promedio), es evidencia de la heterogeneidad, debida a las claras diferencias que existen entre los estratos superficiales de columna de agua "eufóticos" y los estratos profundos "disfóticos" que registran valores distintos.

Para la capa eufótica (capa de mezcla  $0.05 \mu\text{g L}^{-1}$ , máximo de clorofila a  $0.12 \mu\text{g L}^{-1}$  y termoclina  $0.05 \mu\text{g L}^{-1}$ , (10 – 200 m) el valor promedio fue de  $0.075 \mu\text{g L}^{-1}$ , que claramente es mayor a la capa disfótica (borde inferior de la termoclina  $0.008 \mu\text{g L}^{-1}$ , agua de 1500 m  $0.003 \mu\text{g L}^{-1}$  y agua de fondo 120 – 3500m  $0.003 \mu\text{g L}^{-1}$ ) donde el valor Promedio fue de  $0.005 \mu\text{g L}^{-1}$ . La desviaciones estándar ( $0.058 \mu\text{g L}^{-1}$  para la zona eufótica), y ( $0.0055 \mu\text{g L}^{-1}$  disfótica), siguen siendo altas en relación a su respectivo valor promedio ( $0.075 \mu\text{g L}^{-1}$  y  $0.005 \mu\text{g L}^{-1}$ ), lo cual muestra la variación provocada entre las estaciones de talud continental, reborde continental y planicie abisal discutidas en el párrafo anterior.

#### VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CHL A EN SEDIMENTO SUPERFICIAL

La concentración de Chl a medida en el sedimento superficial en las 12 estaciones fluctuó de  $0.042 \mu\text{g cm}^{-3}$  (E3) a  $0.910 \mu\text{g cm}^{-3}$  (E12). Los valores se muestran por localidad en la Tabla 12. El valor promedio de los valores de Chl a en sedimento para las 12 estaciones del transecto fue de  $0.260 \mu\text{g cm}^{-3}$  con una desviación estándar de  $0.24 \mu\text{g cm}^{-3}$ . Diferenciando cada una de las zonas se reconoció que el valor promedio para las estaciones ubicadas en la zona abisal fue de  $0.17 \mu\text{g cm}^{-3}$  ( $n = 9$ ) con una desviación estándar de  $0.09 \mu\text{g cm}^{-3}$ . En contraste con el promedio de zona abisal, el valor promedio para las estaciones localizadas en las zonas del reborde continental y del talud continental fue siete veces más elevado, con  $0.71 \mu\text{g cm}^{-3}$ , y una desviación estándar de  $0.28 \mu\text{g cm}^{-3}$ , la cual es menos dispersa a la observada en la planicie abisal (Fig. 22). Estos resultados nos permiten reconocer el mayor aporte de Chl a al sedimento superficial por el acoplamiento más estrecho entre columna de agua y fondo.

Tabla 12. Concentración de Chl a  $\mu\text{gcm}^{-3}$  para cada estación en el sedimento superficial del transecto de las zonas reborde continental a planicie abisal. (3500m Planicie abisal, 2700m Talud continental y 500m Reborde continental) medida en Julio del 2002 en el sector sur occidental del Golfo de México.

Estación	Chl a $\mu\text{-}$ $3$
1	0.165304
2	0.253061
3	0.041748
4	0.242615
5	0.233199
6	0.237464
7	0.207664
8	0.054212
9	0.203859
10	0.0507
11	0.511124
12	0.90882

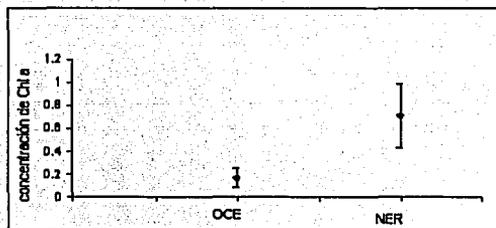


Fig.- 21 Comparación de la concentración promedio de Chl a entre las estaciones de la zona oceánica-abisal (OCE) y las estaciones de zona nerítica, (reborde y talud continental) (NER) en el sedimento. Datos obtenidos del transecto llevado a cabo en la zona suroccidental del Golfo de México en julio 2002.

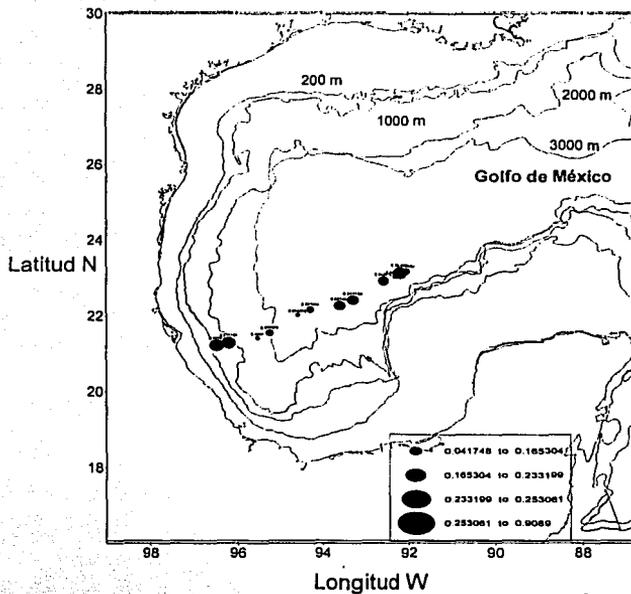


Fig. 22 Distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{gcm}^{-3}$  en sedimento (3500m planicie abisal, 2700m talud continental y 500m reborde continental) para un transecto en el sector suroccidental del Golfo de México medida en julio del 2002. Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

**Regression Summary**  
Sediment vs. Depth(m)

Count	12
Num. Missing	0
R	.870368
R Squared	.757562
Adjusted R Squared	.733351
RMS Residual	.123994

**ANOVA Table**

Sediment vs. Depth(m)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	1	.480600	.480600	31.252801	.0002
Residual	10	.163746	.016376		
Total	11	.634246			

**Regression Coefficients**

Sediment vs. Depth(m)

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	.004888	.136354	.004888	7.294818	<.0001
Depth(m)	-.000238	.000043	-.870368	-5.690420	.0002

**Confidence Intervals**

Sediment vs. Depth(m)

	Coefficient	95% Lower	95% Upper
Intercept	.004888	.600373	1.268503
Depth(m)	-.000238	-.000333	-.000143

**Residual Statistics**

Sediment vs. Depth(m)

# >= 0	9
# < 0	3
SS[ε(0) - ε(1)]	.391083
Durbin-Watson	2.543891
Serial Autocorrelation	-.282402

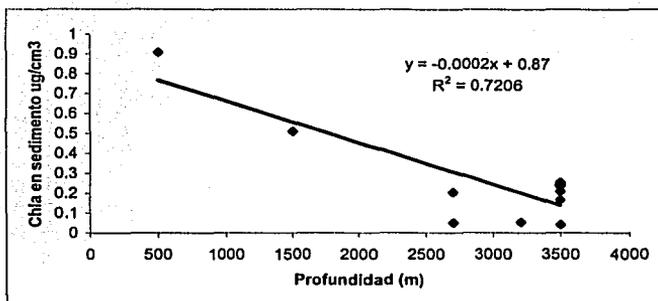


Fig. 23 Variación de la concentración de Chl a en  $\mu\text{gcm}^{-3}$  para cada estación en el primer centímetro de sedimento superficial, en el transecto desde el reborde continental hasta la planicie abisal en el sector suroccidental del Golfo de México en julio 2002.

Los valores de Chl a en el sedimento superficial cambiaron con respecto a la profundidad de las zonas batimétricas con una relación lineal que se describe por la ecuación 18

$$Y = -0.0002x + 0.87 \quad (18)$$

Los valores de  $R = 0.87$  y de la  $R^2 = 0.76$ , reconocen mostrando una relación estrecha de cambio entre Chl a y profundidad o distancia a la costa.

#### EXPORTACIÓN DE CHL A

El flujo de Chl a dependiente de la profundidad se denomina "producción de exportación", y decrece rápidamente justo bajo la termoclina con un cambio que se aprecia como un decremento casi lineal. El patrón vertical de distribución de la concentración de la Chl a fue similar en las doce estaciones (Fig.7); las concentraciones mayores se reconocieron en los estratos superiores (capa de mezcla, máximo de clorofila a y termoclina) y se apreció una disminución gradual hasta el agua de fondo. El valor promedio máximo sobre la termoclina fue de  $0.120 \mu\text{gL}^{-1}$  Chl a y el valor promedio en el en el agua de fondo fue de  $0.003 \mu\text{gL}^{-1}$  Chl a.

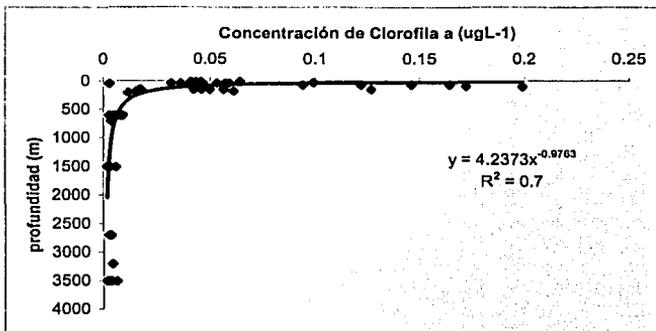


Fig. 24 Patrón de distribución de los valores promedio de la concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) y su cambio con la profundidad (m) para el sector suroccidental desde la costa hasta la zona oceánica (doce estaciones) del Golfo de México en el mes de julio 2002.

La concentración de Chl a con respecto al incremento de la profundidad en el sector suroccidental se describe con la ecuación  $Y = 4.2373X^{-0.9763}$  que permite reconocer la exportación potencial de C biogénico al fondo (Fig. 24) y proponer la tasa de cambio con la profundidad registrando que un muy pequeño porcentaje es exportado hasta el fondo. Solamente el 3.5% cruza la termoclina y se exporta hacia el estrato de borde inferior de la termoclina, mientras que entre 1.2% y 1.4% se exporta hacia los estratos de 1500 m y el fondo. El sedimento por acumulación registra el 116% del total en zona eufótica.

Conforme aumenta la profundidad observamos la disminución en la concentración muy claramente, sobre todo después de la termoclina que es la barrera natural entre la Chl a generada por fotosíntesis y la exportada. La  $R^2$  es de 0.7 lo cual muestra una muy buena correlación entre los valores estimados con los datos reales.

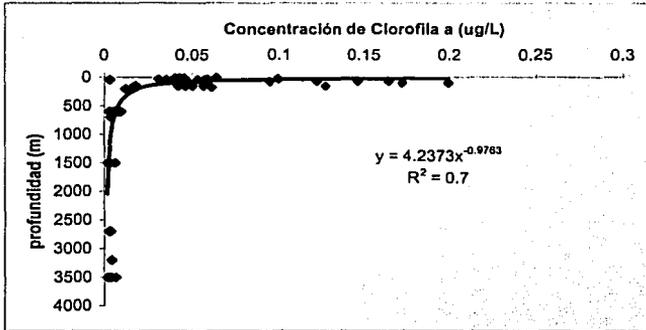


Fig.25 Patrón de distribuciones entre concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) y la profundidad (m) para la zona oceánica (estaciones 1 a 9) del sector suroccidental del Golfo de México en el mes de julio 2002.

La concentración de Chl a con respecto a la profundidad en las estaciones oceánicas se relaciona con la ecuación  $Y = 4.23X^{-0.98}$  (Fig.25) permitiendo reconocer que solamente un 3.7% llega al fondo con un acoplamiento bajo entre zona eufótica y disfótica.

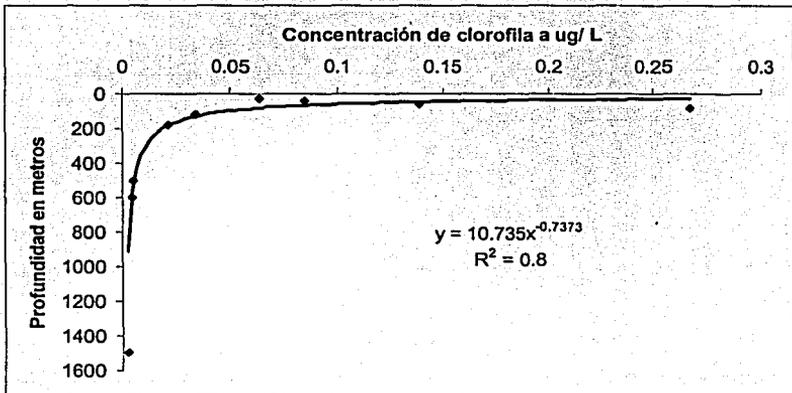


Fig. 26 Patrón de distribuciones entre concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) y la profundidad (m) para la zona de talud continental y reborde continental (estaciones 10 ,11 y 12) en el sector suroccidental del Golfo de México en el mes de julio 2002.

La concentración de Chl a con respecto a la profundidad en las estaciones de talud continental y reborde continental se relacionan con la ecuación  $Y = 10.74X^{-0.737}$  (Fig. 26) permitiendo reconocer una exportación de 1.2% más que las estaciones de zona oceánica (4.9% vs. 3.7%), aunque exportación es baja entre zona eufótica y la disfótica, las estaciones localizadas sobre el talud continental y el reborde continental presentaron un mejor ajuste de los promedios a la curva descrita por la ecuación, con una  $R^2$  más elevada (0.8) y un alto nivel de significancia.

Si observamos las (figuras 24, 25 y 26), podemos ver el Patrón que sigue la exportación de la Chl a desde la columna hacia el fondo. Aquí vemos que la ecuación que describe el comportamiento de los valores de Chl a con respecto a la profundidad en las doce estaciones en la figura 24 es de:

$$Y = 4.963 x^{-0.941}, R^2 \text{ de } 0.68 \quad (19)$$

La ecuación 19 mostró la disminución de la concentración de la Chl a con la profundidad en los promedios de las 12 estaciones del transecto desde la costa hasta la zona oceánica. Esta ecuación presentó una condición general sin separar zonas batimétricas con condiciones hidrodinámicas diferentes. La zona oceánica comprende el 83% de las estaciones ubicadas sobre la planicie abisal, y solamente el 17% de las estaciones se encuentran sobre la elevación continental. La ecuación Eq 19 describe la tasa de cambio para las estaciones de la zona oceánica y muestra una similitud con la ecuación obtenida para el promedio general del transecto.

$$Y = 4.24 X^{-0.976}, R^2 \text{ de } 0.68 \quad (20)$$

La ecuación que describe la tasa de cambio de la Chl a con respecto al incremento de profundidad en columna de agua para las zonas del talud continental y del reborde continental, (Fig. 26) fue Eq. 21:

$$Y = 10.74 X^{-0.737}, R^2 \text{ de } 0.79 \quad (21)$$

La ecuación obtenida en la zona nerítica muestra diferencias con respecto a la ecuación general y a la ecuación de la zona oceánica que permite reconocer un arribo mayor al fondo atribuido a la menor profundidad de la columna de agua a 500m (E12) y a 1500m de profundidad (E11), esta ecuación describe un mejor acoplamiento en las estaciones de la zona nerítica.

Los resultados obtenidos del ANOVA Tabla 13 para establecer diferencias entre muestras de columna de agua y sedimento, así como para establecer diferencias entre la zona nerítica y oceánica, reconoció con una  $P = 0.0002$  diferencias significativas que dependen de la profundidad o distancia de la costa.

La comprobación del ANOVA con la prueba de Newman Keuls (Tabla 14) permitió reconocer que los valores promedio de Chl a localizados en la zona oceánica mostraron diferencias significativas ( $p = 0.006$ ) con los de la zona nerítica al igual que las concentraciones del sedimento de la planicie abisal con respecto al del talud y reborde continental ( $p = 0.007$ ) y finalmente entre los valores de columna de agua en la zona nerítica y los valores de sedimento del talud continental ( $p = 0.012$ ).

Tabla 13 Resultados del ANOVA entre las zonas nerítica y oceánica para valores de Chl a de columna de agua y de sedimento superficial.

Condiciones 1-(Zonas Nerítica vs. Oceánica), 2-(Valores de Columna de agua vs. Valores en Sedimento superficial) 1,2 (Zonas Nerítica-Oceánica vs. Columna de agua-Sedimento)						
	GL	MS	df	MS		
	Efecto	Efecto	Error	Error	F	Nivel -p
1 Zonas Nerítica vs. Oceánica	1	0.152	20	0.023	6.511	0.019
2 Columna de agua vs. Sedimento superficial	1	0.183	20	0.023	7.800	0.011
1, 2	1	0.069	20	0.023	2.960	0.100

Tabla 14 Resultados de las pruebas de Newman Keuls para los valores de las concentraciones de Chl a en los habitats [columna de agua (1) y sedimento superficial (2)], y las zonas batimétricas [(talud continental/reborde continental (1), y planicie abisal (2)]. Los valores promedio de Chl a se ordenaron de menor a mayor. El nivel de significancia igual a  $\alpha$  para cada grupo de "r" fue de  $r = p-1$

Prueba Newman-Keuls Test , Intervalos críticos; $p = .010$ , INTERACCIÓN: 1 x 2			
	Paso 1	Paso 2	Paso 3
Intervalos críticos	0.288	0.334	0.361

Prueba de Newman-Keuls; Chl a. Probabilidades para pruebas de Post Hoc. INTERACTION: 1 x 2				
	{1}	{2}	{3}	{4}
1 zona nerítica	0.165	0.490	0.105	0.182
1 columna {1}		0.012	0.563	0.866
1 zona nerítica sedimento {2}	0.012		0.006	0.007
2 zona oceánica 1 columna {3}	0.564	0.006		0.732
2 zona oceánica 2 sedimento {4}	0.866	0.007	0.732	

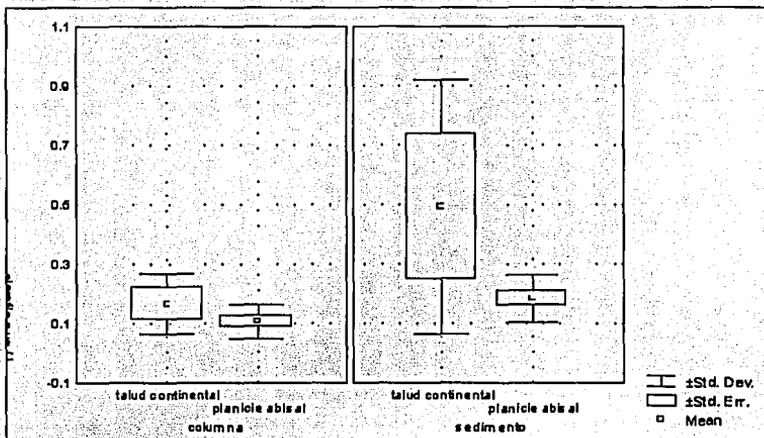


Fig. 27 Promedio, desviación estándar y varianza de la concentración de Chl a para las estaciones pertenecientes a Talud continental y Planicie abisal tanto en columna (máximo de Chl a) como en sedimento. Gráficas producto del análisis de ANOVA.

Las concentraciones de Chl a de sedimento superficial mostraron diferencias significativas respecto a las que se encuentran en columna (ANOVA  $P = 0.011$ ) (Tabla 13 y 14). Las concentraciones promedio de Chl a fueron significativamente diferentes para las zonas de talud continental y de la planicie abisal, (ANOVA  $P = 0.019$ ), con valores más elevados de Chl a en el sedimento superficial que en el máximo de Chl a en columna de agua (Fig. 27).

#### ACOPLAMIENTO ENTRE MÁXIMO DE CHL A Y SEDIMENTO

La búsqueda de un acoplamiento pudo ser comprobada sólo para aquellos estratos donde la variación de concentración entre estaciones era significativa, es decir, donde claramente la alta concentración en columna estaba estrechamente relacionada con la alta concentración en sedimento. Las concentraciones en general, para las distintas estaciones, y las distintas profundidades presentaban datos muy homogéneos. Solo en dos de los siete estratos "sedimento" y parcialmente en el estrato "máximo de Chl a" se podía hablar de una diferencia significativa entre las estaciones. Para estos dos estratos, se visualiza un acoplamiento evidente en las estaciones neríticas, puesto que existía mayor concentración tanto en el "máximo de Chl a" como en el "sedimento", lo que es indicativo de la exportación al fondo. Los valores de las estaciones cuyas concentraciones ayudaron a formar el gradiente que se presenta en las respectivas regresiones de "sedimento" y de "máximo de Chl a" muestran un mismo patrón, incrementando en la concentración conforme nos acercamos a las estaciones costeras, es decir conforme la profundidad

disminuye. Los valores que el sedimento presenta denotan el patrón mas claramente, contienen mayor variabilidad, y son estadísticamente mas significativos que "máximo de Chl a", sin embargo la tendencia es igual.

a) Los estratos mas representativos de nuestro transecto fueron "máximo de Chl a" ( $P = 0.0156$ ) y "sedimento", ( $P = 0.0002$ ) debido a que ambas presentaban variabilidad estadísticamente significativa entre las doce estaciones. El que los estratos representen las mismas coordenadas, y coincidan en las fechas de muestreo, no les quita la independencia ( $p = 0.012$ ); estas se encuentran a distintas profundidades, con condiciones físicas y químicas como: corrientes, luz, temperatura (11.8 en máximo de Chl a y 6.54 sedimento), nutrientes,  $O_2$  (4.13 en máximo de Chl a y 4.64 sedimento) y pH (8.04 en máximo de Chl a y 7.64 sedimento), distintas, lo que implica que las variables ecológicas que podrían afectar la concentración de Chl a son muy diferentes entre los estratos. A pesar de las marcadas distinciones entre los estratos, los patrones de concentraciones de clorofila coinciden mostrando semejanzas en el comportamiento.

b) Ambas capas demuestran que hay una correlación directa entre la distancia de la costa y la concentración de clorofila, donde entre mayor es la distancia de la costa, menor es la concentración de clorofila a. También ambas demuestran que existe una asociación entre las concentraciones de clorofila a y la profundidad de la columna, donde a mayor profundidad menor es la concentración de clorofila.

c) Por la forma en como el transecto recorre las estaciones, de este (E1 longitud  $92^\circ$ ) a oeste (E12 longitud  $96^\circ 5'$ ), el gradiente de concentración también aumenta. Esto porque la estación mas al oeste E12 es de menor profundidad (500m) y mas cercano a la costa.

Con estos resultados evidentes, podríamos decir que todo pareciera indicar un acoplamiento entre la concentración de clorofila que existe en la capa "sobre termoclina" y el sedimento, donde a mayor concentración superficial, mayor es la concentración en el sedimento.

#### **DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y GEOGRÁFICA DE LA CHL A EN LA SUPERFICIE DEL MAR VALORES PREVIOS A LA CAMPAÑA SIGSBEE.5: IMÁGENES SEAWIFS**

Las concentraciones de Chl a en la superficie del mar evaluadas por medio de los promedios mensuales de las imágenes de satélite correspondientes a los meses de mayo y junio del 2002 (Fig. 28 y 29) fueron similares ( $0.011 - 1.085 \mu\text{g L}^{-1}$ , promedio  $0.098 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a) a los valores obtenidos de la lectura fluorométrica de las muestras recolectadas *in situ* durante la campaña de SIGSBEE.5, ( $0.002 - 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ , promedio de  $0.049 \mu\text{g L}^{-1}$ ). El valor promedio de los valores de Chl a obtenidos para los meses de mayo y junio determinado por el SeaWiFS ( $0.098 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a) en el transecto estudiado, cae cerca del doble de los valores del promedio de la capa de mezcla observados *in situ*, ( $0.049 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Esto es importante de señalar en virtud a que los valores del SeaWiFS son superficiales (0 a 25 m) con respecto a los del máximo de Chl a que ocurren entre 40 y 100m de profundidad en la zona.

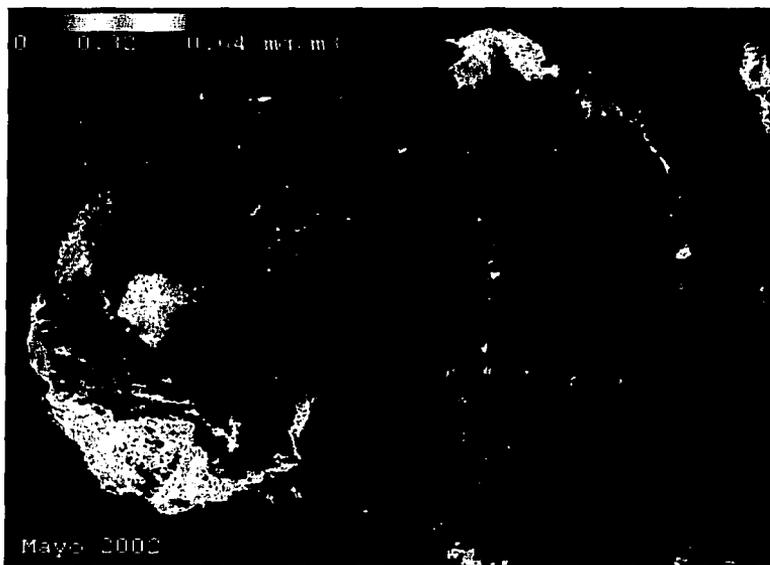
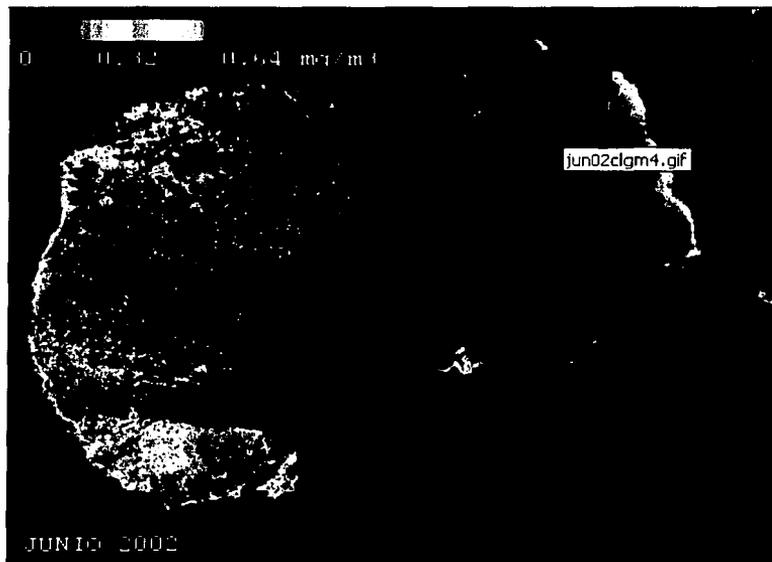


Fig. 28 Valores promedio de concentración de Chl a en  $\text{mgm}^{-3}$  (equivalente a  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) durante el mes de mayo 2002 representadas como color del mar de imágenes diarias del SeaWiFS. En rojo se proyecta el transecto que se siguió para la recolecta de muestras durante la campaña de SIGSBEE.5 en el mes de julio, desde latitud  $23^{\circ}35'$  longitud  $92^{\circ}02'$  (E1) hasta latitud  $21^{\circ}12'$  longitud  $96^{\circ}49'$  (E12) en las zonas nerítica y oceánica del sector suroccidental del Golfo de México.

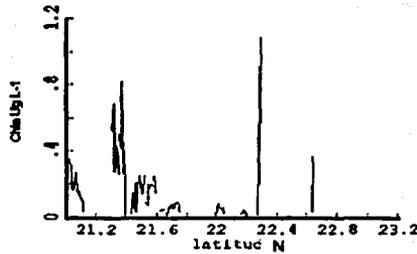
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Fig. 29** Valores promedio de concentración de Chl a en  $\text{mgm}^{-3}$  (equivalente a  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) durante el mes de junio 2002 representadas como color del mar de imágenes diarias del SeaWiFS. En rojo se proyecta el transecto que se siguió para la recolecta de muestras durante la campaña de SIGSBEE.5 en el mes de julio, desde latitud  $23^{\circ}35'$  longitud  $92^{\circ}02'$  (E1) hasta latitud  $21^{\circ}12'$  longitud  $96^{\circ}49'$  (E12) en las zonas nerítica y oceánica del sector suroccidental del Golfo de México.

Los resultados obtenidos de las lecturas promedio mensuales para mayo y para junio en el transecto elegido para la época de muestreo se expresan en histogramas de la distribución latitudinal de la concentración de Chl a en la superficie del mar registrada por las imágenes SeaWiFS. Estos histogramas (Fig. 30 a y b) muestran las tendencias generales y el rango de los valores sobre el transecto trazado, que incluye algunos picos cuyos valores deberán interpretarse como anomalías de la percepción remota (Fig. 30 latitud  $22.8$ ). Como puede observarse debido a la nubosidad algunas coordenadas no presentan valores, y el patrón general muestra un incremento pequeño pero consistente conforme el transecto se acerca a las latitudes menores, es decir la costa. Este patrón de incremento en concentración con cercanía a la costa es semejante al que presenta la información del crucero y es más notable en las figuras 30.

a)



b)

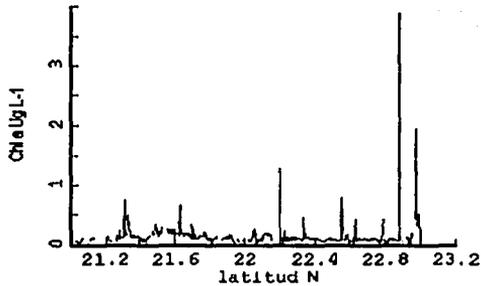


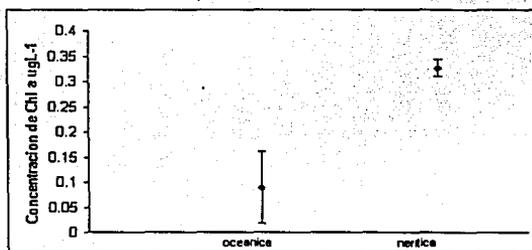
Fig. 30 Histogramas de la concentración promedio mensual de Chl *a* en  $\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mgm}^{-3}$ ) de la superficie del mar registrados de los cuadrantes de la imagen del satélite SeaWiFS a lo largo del transecto correspondiente a la campaña SIGSBEE.5 durante el mes de Julio, en latitud 23°35 y longitud 92°02 (E1) y hasta latitud 21°12 y longitud 96°49 (E12) para los meses de a) mayo de 2002 y b) junio del 2002.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 15 Valores promedio longitudinal de 30 minutos lineales sobre el transecto para la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para los meses de mayo y junio de 2002, recolectados de los valores a lo largo de cada mes de las imágenes de satélite del SeaWiFS en el transecto, [latitud 23°35. longitud 92°02 (E1) a latitud 21°12 longitud 96°49 (E12)] de la campaña de SIGSBEE.5 durante el mes de julio.

Estaciones	SeaWiFS		Promedio capa de mezcla y máximo de Chl a <i>in situ</i>
	Mayo 2002	Junio 2002	
1	nd	nd	0.061
2	nd	nd	0.051
3	0.023	0.023	0.048
4	0.203	0.203	0.082
5	0.023	0.193	0.094
6	0.155	0.056	0.022
7	0.030	0.015	0.104
8	0.066	0.083	0.115
9	0.121	0.224	0.070
10	0.338	0.390	0.132
11	0.314	0.166	0.176
12	Nd	0.291	0.064
<b>Promedio</b>	<b>0.141</b>	<b>0.164</b>	<b>0.085</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>0.122</b>	<b>0.122</b>	<b>0.044</b>
<b>Valor máximo</b>	<b>0.338</b>	<b>0.390</b>	<b>0.176</b>
<b>Valor mínimo</b>	<b>0.023</b>	<b>0.015</b>	<b>0.022</b>

La relación de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) obtenida de las imágenes de satélite SeaWiFS en el transecto durante los meses de mayo y junio de 2002 mostró:



T.E.S.J.S. CON FALLA DE ORIGEN

Fig.-31 Se observan diferencias gráficas de valores de Chl a para el transecto de SeaWiFS del mes de Mayo donde se encontró que el promedio de estaciones de zona oceánica fue  $0.088\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) con una desviación estándar de  $0.071\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) y para zona nerítica fue  $0.326\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ )  $0.016\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ).

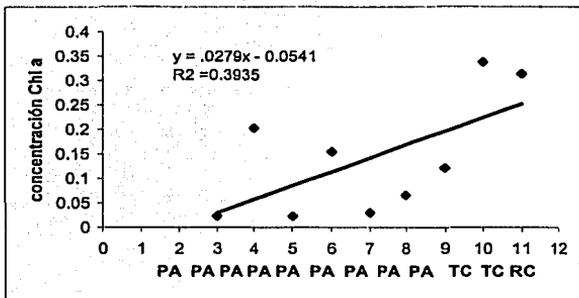


Fig.-32 Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) para las doce estaciones cuyo valor es el promedio longitudinal de 30 minutos lineales sobre el transecto de SeaWiFS (10 a 25 m) para el mes de mayo 2002 (números del eje x). Abreviaturas: PA= planicie abisal, TC =talud continental y RC= reborde continental.

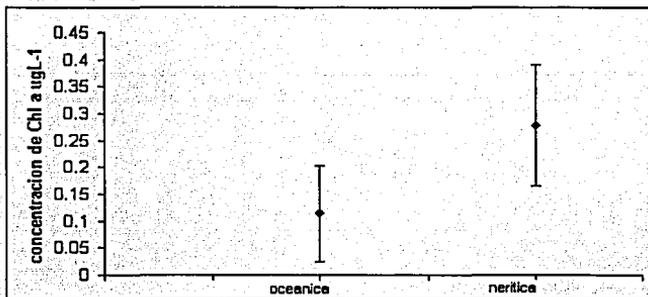


Fig.-33 Se observan diferencias gráficas de valores de Chl a para el transecto de SeaWiFS del mes de Junio donde se encontró que el promedio de estaciones de zona oceánica fue  $0.11\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) con una desviación estándar de  $0.09\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ) y para zona nerítica fue  $0.278\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ )  $0.11\mu\text{g L}^{-1}$  ( $\text{mg/m}^3$ ).

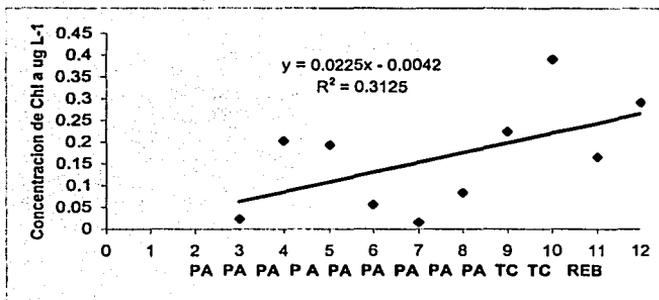


Fig.-34 Concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) para las doce estaciones, cuyo valor es el promedio longitudinal de 30 minutos lineales sobre el transecto de SeaWiFS (10 a 25 m) para el mes de junio 2002 (números del eje x). Abreviaturas: PA= planicie abisal, TC =talud continental y RC= reborde continental.

En las figuras 32 y 34 se muestra la relación lineal que existe entre la concentración de Chl a y las doce estaciones para el transecto obtenido de SeaWiFS, que va desde la planicie abisal hasta el reborde continental en el sector suroccidental del Golfo de México. Los valores de las estaciones más cercanas a la costa, E10, E11 y E12, son más altos que los de planicie abisal E1 a E8. Las  $R^2$  de 0.39 y 0.31 no muestran ser significativas, por lo que los valores calculados no tienen tan buena correspondencia con los reales. Cabe mencionar que la  $R^2$  es el doble que la de la  $R^2$  de la capa de mezcla (0.15) obtenida *in situ* durante el crucero SIGSBEE.5, aun considerando que los valores de SeaWiFS antes de ser promediados eran una mayor cantidad, es decir una muestra más representativa de la concentración superficial.

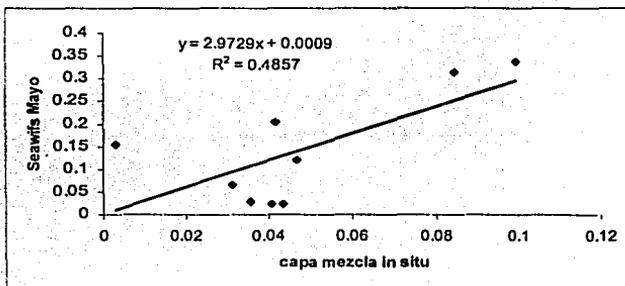


Fig.- 35 Regresión lineal de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) obtenida del transecto de SeaWiFS en el mes de mayo (eje Y) contra concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  obtenida en la capa de mezcla *in situ* durante el crucero de SIGSBEE.5 (eje x).

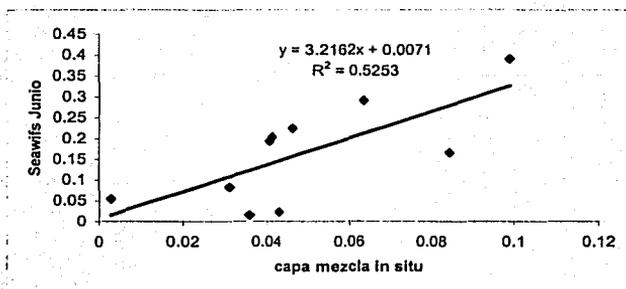


Fig.-36 Regresión lineal de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) obtenida del transecto de SeaWiFS en el mes de junio (eje Y) contra concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  obtenida en la capa de mezcla in situ durante el crucero de SIGSBEE.5 (eje x).

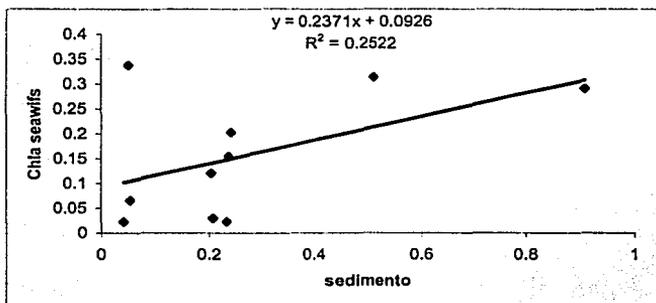


Fig.- 37 Regresión lineal de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) obtenida del transecto de SeaWiFS en el mes de mayo (eje Y) contra concentración de Chl a  $\mu\text{g L}^{-1}$  obtenida en el sedimento in situ durante el crucero de SIGSBEE.5 (eje x).

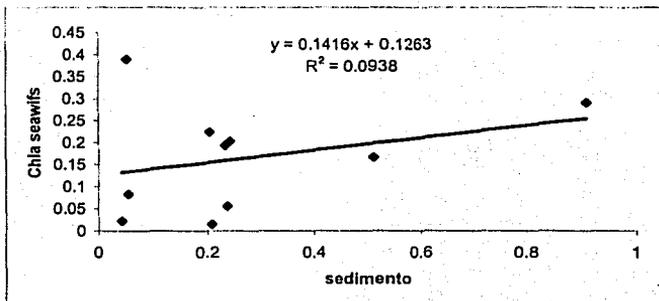


Fig. 38 Regresión lineal de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  (o  $\text{mg/m}^3$ ) obtenida del transecto de SeaWiFS en el mes de junio (eje Y) contra concentración de Chl a obtenida en el sedimento *in situ* durante el crucero de SIGSBEE.5 (eje x).

Las regresiones que muestran las figs 35, 36, 37, 38 nos permiten observar que tanta correlación existe entre los valores de concentración de Chl a de SeaWiFS, y las concentraciones de Chl a obtenidas *in situ* durante el crucero de SIGSBEE.5. Dados los valores de  $R^2$  que presentan dichas figuras podemos decir que el estrato de la capa de mezcla muestra una mejor correlación (0.49 y 0.52) con SeaWiFS que el sedimento (0.25 y 0.09). También es importante reconocer que la regresión (Fig. 36), que considera valores en el mes de junio de SeaWiFS contra los valores en la capa de mezcla del crucero SIGSBEE.5 en julio, fue la de el valor de  $R^2$  más alto con 0.52, lo que hace más significativo el ajuste de los valores calculados con los reales, es decir existe una mejor correlación.

**CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE COLUMNA DE AGUA  
TEMPERATURA**

La temperatura de la columna de agua varió de 29.2 °C a 4.2 °C, y mostró una disminución (principalmente en la termoclina) de la capa de mezcla hacia el agua de fondo. Sin distinguir las estaciones oceánicas de las neríticas la temperatura en la capa de mezcla varió de 29.2°C a 29°C, con un promedio de 29.02°C; en el máximo de Chl a varió de 27.6°C a 28°C con promedio de 27.87°C; en termoclina vario de 26°C a 21°C con promedio de 23.71°C; en el borde inferior de la termoclina no varió de 6.6°C; a los 1500m no varió con promedio de 4.2°C; en agua de fondo termoclina varió de 11°C a 4.2°C con promedio de 5.08°C. Se observa una clara disminución en el promedio conforme se alejan los estratos de la superficie, sin embargo no se observa ningún patrón horizontal muy claro conforme nos alejamos de la costa, excepto en el agua de fondo. El promedio general de la temperatura fue de 18.72 °C (desviación estándar = 10 ° C). El valor máximo (29.2°C) se presentó en la capa de mezcla estación 12 . Por otra parte sobre la planicie abisal, y el agua de 1500m de profundidad se presentó el valor mínimo de temperatura con 4.2°C.

Tabla 16. Valores de temperatura (°C) en los estratos de la columna de agua en las 12 estaciones del sector suroccidental del Golfo de México en junio 2003. Abreviaciones: Reb cont = reborde continental, Talud cont = talud continental, P. Abisal= planicie abisal

Estación	capa de mezcla	Máximo de Chl a	termoclina	Borde inferior termoclina	1500	Fondo	
E12	29.2	27.6	21	Nd	nd	11	Reb cont
E11	29	27.6	21.5	Nd	nd	8	Talud cont
E10	29	27.6	26	6.6	nd	4.2	Talud cont
E9	29	27.6	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal
E8	29	28	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal
E7	29	28	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal
E6	29	28	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal
E5	29	28	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal
E4	29	28	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal
E3	29	28	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal
E2	29	28	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal
E1	29	28	24	6.6	4.2	4.2	P. Abisal

### CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO

El valor promedio de la concentración de oxígeno disuelto en agua medido a lo largo de los distintos estratos de profundidad en columna de agua fue de 3.98 mg. L<sup>-1</sup> (desviación estándar =0.96). El valor máximo fue de 8.2 mg. L<sup>-1</sup> en el fondo oceánico (estación 3) y el mínimo en termoclina con 1.9 mg. L<sup>-1</sup> (estación 10) sobre talud continental (Tabla 16). El estrato que presentó mayor variación entre los valores de concentración de oxígeno disuelto fue la capa de mezcla con una desviación estándar de 1.02mgL<sup>-1</sup> y la de agua de fondo con 1.19 mg. L<sup>-1</sup>.

Tabla 17 Valores de concentración de oxígeno disuelto (mg.L<sup>-1</sup>) en los estratos de profundidad de la columna de agua en las 12 estaciones del sector suroccidental del Golfo de México en julio 2002

Estación	Capa de mezcla	Borde superior de la termoclina	Termoclina	Borde inferior de la termoclina	Agua de 1500m de profundidad	Agua de fondo	
1	3.8	5.2	4.6	3.8	4.8	4.6	P. Abisal
2	3.8	4.5	3.2	3	5.1	4.7	P. Abisal
3	4	4	3.4	3	4.1	8.2	P. Abisal
4	3.4	4	3	2.5	4.2	4.2	P. Abisal
5	4.2	4.1	4.8	2.6	4.8	4.1	P. Abisal
6	3.6	3.4	4	3	5.2	4.4	P. Abisal
7	3.6	4	3.5	3.1	4.2	4.2	P. Abisal
8	4	4.4	2.8	3.2	4.3	4.6	P. Abisal
9	3.7	4	3.8	3	4.4	4.3	P. Abisal
10	3.4	3.4	1.9	3.2	4.2	4.8	Talud continental
11	6.4	4.4	2.3	2.5	4.2	4.4	Talud continental
12	6.2	4.2	4.2	2.8	4.2	3.2	Reborde continental

**pH**

Los valores de pH en columna de agua a 25 °C tuvieron un promedio de 7.81 y una desviación estándar de 0.27. El pH varió de 8.129 en la estación 12 en capa de mezcla a 6.575 en el agua de fondo de la estación 1 sin mostrar un patrón de variación con distancia de a costa o con la profundidad (Tabla 17).

**Tabla 18 Valores de pH registrados en agua de los estratos en las 12 estaciones del transecto en el sector suroccidental del Golfo de México en julio 2002.**

Estación	Capa de mezcla	Borde superior de la termoclina	Termoclina	Borde inferior de la termoclina	Agua de 1500m de profundidad	Agua de fondo	
1	8.085	8.007	7.719	7.283	7.021	6.575	P. Abisal
2	8.085	8.088	7.865	7.658	7.722	7.913	P. Abisal
3	8.085	8.106	7.91	7.531	7.614	7.612	P. Abisal
4	8.019	7.981	7.853	7.368	7.419	7.512	P. Abisal
5	8.09	8.05	7.977	7.609	7.648	7.529	P. Abisal
6	8.096	8.099	7.989	7.673	7.72	7.846	P. Abisal
7	8.113	8.032	7.696	7.731	7.653	7.658	P. Abisal
8	8.092	8.037	7.938	7.676	7.700	7.816	P. Abisal
9	8.100	8.03	7.942	7.782	7.841	7.885	P. Abisal
10	8.129	8.03	7.761	7.68	7.662	7.83	Talud continental
11	8.071	7.979	7.754	7.676	7.6	7.683	Talud continental
12	8.07	8.092	7.991	7.853	7.845	7.841	Reborde continental

**CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES Y LOS VALORES DE CHL A EN COLUMNA DE AGUA (RDA)**

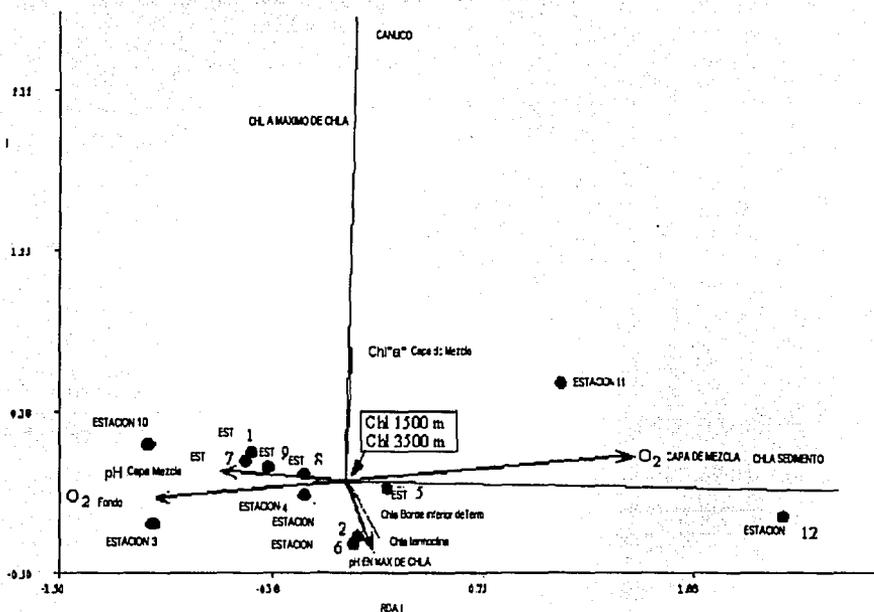


Fig.- 39 Triplot de la ordenación generada por el análisis de redundancia con varianza explicada (RDA) donde los círculos sólidos corresponden a las localidades de muestreo, los vectores corresponden a las variables ambientales con longitud multiplicada para mayor claridad en el diagrama.

La correlación de las variables ambientales con los vectores de ordenación obtenidos para las localidades, se muestran (Fig. 39) señalando que cada estación se representa por un centroide en el punto (●). Las variables representadas por las flechas nos permitieron reconocer seis estratos profundidad con su concentración de Chl a respectiva (capa de mezcla, máximo de clorofila a, termoclina, borde inferior de la termoclina [principia zona disfótica], agua de 1500m de profundidad y agua de fondo), el

sedimento superficial y los vectores que representan el pH y la concentración de O<sub>2</sub> disuelto en dos estratos (capa de mezcla y agua de fondo).

A grandes rasgos el patrón mas evidente del triplot separa las localidades más costeras sobre el eje del vector de Chl a en sedimento y agrupa las más oceánicas a la izquierda del mismo. Las localidades 2 y 6 se separan de este grupo dada la concentración alta en el estrato de termoclina, pero para un estudio más detallado del esquema, se presenta un análisis de cada vector a continuación

#### ANÁLISIS DE COORDENADAS PRINCIPALES

Los resultados del ACP mostraron una asociación directa entre las estaciones E1 a E10, y otra con las estaciones del reborde continental y el talud continental (E11 y E12) que por las características se separan del resto de las estaciones (Fig. 40). La agrupación de las localidades reconoció que el 98.07% tabla 19 de la varianza que explicó el agrupamiento se basó en los factores ambientales de Chl a en las zonas de profundidad vertical y su ubicación con respecto a la costa. Se identificaron grupos del transecto en la zona oceánica sobre la planicie abisal (longitud 92 ° a 95 ° y latitud 23 ° a 21°) en el primer grupo, en un segundo grupo se ubicaron las localidades de talud continental inferior y por separado sin conformar un grupo claro las localidades del talud continental superior y del reborde continental (longitud 96 ° y latitud 21°).

Esto prueba estadísticamente todo lo antes mencionado de diferenciación entre estaciones neríticas y estaciones oceánicas como modelo óptimo de análisis ecológico, para columna de agua y sedimento, dado que el agrupamiento considera todas las profundidades, y todas las estaciones simultáneamente, logrando concluir lo mencionado.

Tabla 19. Descriptores de escalamiento y ordenamiento generado por el análisis de coordenadas principales utilizando distancia euclídeana como índice de agrupamiento.

Objetos o variables/estaciones	Eigenvalores	% de varianza	acumulativo de la varianza %
1	0.64053	89.44984	89.45%
2	0.06175	8.62364	98.07%
3	0.00841	1.17478	99.25%
4	0.00516	0.72127	99.97%
5	0.00018	0.02559	100.00%
6	0.00002	0.00325	100.00%
7	0	0.00061	100.00%
8	0	0.0004	100.00%
9	0	0.00031	100.00%
10	0	0.00031	100.00%
11	0	0	100.00%
12	0	0	100.00%

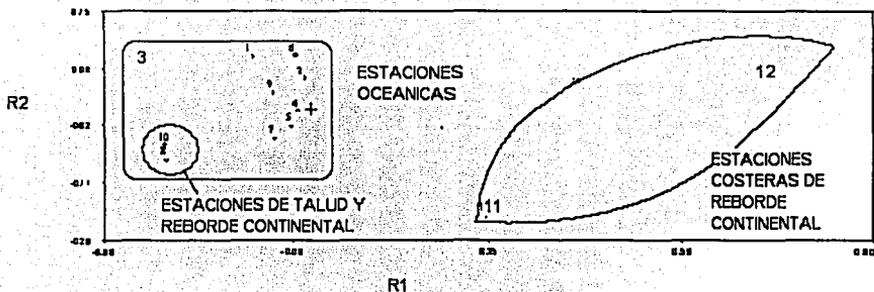


Fig. 40 Agrupamiento espacial de las estaciones en las cuales se recolectaron las muestras en las dos coordenadas principales, profundidad (R1) y Chl a (R2), cuyos factores determinan el 98% de la varianza obtenida del análisis de la matriz.

TOPEX/ERS-2 Analysis Jul 7 2002

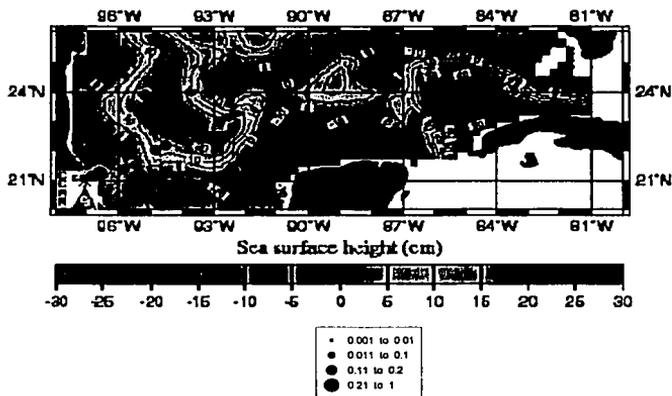


Fig. 41 Valores de nivel del mar (cm), representados como color del mar de imágenes del día 7 de julio 2002 obtenidas de topeX poseidon. Se proyecta el transecto que se siguió para la recolecta de muestras durante la campaña de SIGSBEE.5 durante el mismo mes, desde latitud 23°35 longitud 92°02 (E1) hasta latitud 21°12 longitud 96°49 (E12) en las zonas nerítica y oceánica del sector suroccidental del Golfo de México. Las estaciones del transecto coinciden con la distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de máximo de clorofila a (40 a 100 m). Los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo.

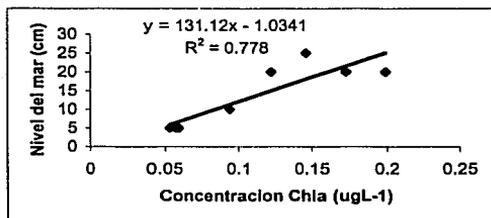


Fig. 42 Regresión lineal de estaciones oceánicas E1 a E9 que relaciona el nivel de mar (cm) con concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Presenta la ecuación  $y = 131.12x - 1.03$  y una  $R^2$  de 0.778 (se excluye estación anómala E6).

En la figura 41 podemos observar una elevación en el nivel del mar ( $22^{\circ}\text{N}-94^{\circ}\text{W}$ ) de hasta de 25cm, asociado a el centro de un giro ciclónico donde se da la circulación vertical ascendente que puede llegar a tener un efecto significativo en la elevación de la termoclina y la nutriclina, con surgencias puntuales de velocidades de ascenso de hasta  $15\text{ m d}^{-1}$ , que contribuyen a el proceso de mezcla en esta temporada (Escobar y Soto, 1997) y a su vez a la alta productividad primaria y secundaria de la zona (Carton y Chao, 1999, Vidal *et al* 1998). Dado que las estaciones del transecto coinciden con la distribución espacial de la concentración de Chl a en  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el estrato de máximo de clorofila a (40 a 100 m), y los círculos tienen un tamaño relativo como lo muestra el recuadro anexo, debe notarse que las estaciones del transecto ubicadas cerca del giro ciclónico muestran concentraciones de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) E4 (0.12) E5 (0.15) E7(0.17) y E8(0.2) mayores, con respecto el resto de las estaciones oceánicas que se encuentran en niveles de mar mas bajos, (0 a 10 cm) por debajo de  $0.09\ \mu\text{g L}^{-1}$ . Las diferencias entre estas estaciones oceánicas asociadas a distintos niveles de mar son significativas dada la ecuación ( $y = 131.12x - 1.03$ ), cuya correlación con la concentración de Chl a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) muestra ser alta en el estrato "máximo de Chl a" ( $R^2$  de 0.778), para las estaciones E1 a E9. La misma ecuación muestra que en las estaciones del transecto cercanas a ( $21^{\circ}\text{N}-96^{\circ}\text{W}$ ) y ( $23^{\circ}\text{N}-92^{\circ}\text{W}$ ) se observa una disminución en el nivel del mar de hasta -15cm, que podría estar asociado a el centro de los giros anticiclónicos ( $20^{\circ}\text{N}-96^{\circ}\text{W}$ ) y ( $22^{\circ}\text{N}-88^{\circ}\text{W}$ ) cuyas corrientes provocaran circulación vertical descendiente, donde se hunde la masa de agua, afectándose negativamente la concentración de Chl a, particularmente en estaciones oceánicas. En el talud y reborde la hidrodinámica es distinta por tener profundidades mucho menores a las estaciones oceánicas, donde aun estando sujetas a un nivel superficial del mar más bajo (0 a -10cm), estas podrán presentar altas concentraciones de Chl a, por procesos como remineralización desde el fondo hacia la capa de mezcla. Además en el sector occidental en el Talud se forman corrientes de chorro con velocidades de  $32$  a  $85\ \text{cms}^{-1}$ , que se dispersan hacia el centro de la cuenca y mueven grandes volúmenes de agua (Vidal *et al* 1998), reivindicando una hidrodinámica única.

Debemos considerar que por lo observado en meses anteriores el giro ciclónico no es permanente, que las características observadas solo se empiezan a formar a finales de junio y se mantienen durante toda la campaña del crucero desde el 3 al 10 de julio. Esto es relevante dado que implica que las concentraciones de Chl a superficiales percibidas por SeaWiFS, durante los meses promedio de mayo y promedio de junio, no fueron afectadas por este giro ciclónico que se forma en julio. Es decir, las concentraciones superficiales que se observan en la capa eufótica durante el mes de julio en la campaña oceanográfica, al ser afectadas por el giro ciclónico, justifican ser diferentes a las concentraciones de la zona eufótica de los meses anteriores (mayo y junio figuras de Seawifs 28 y 29). Sin embargo, la Chl a exportada hacia la zona disfótica durante mayo y junio, será la que se muestrea en las profundidades durante la campaña oceanográfica en julio, lo cual explicaría el desacoplamiento entre estas capas durante los muestreos *in situ*.

## DISCUSIÓN

### CONCENTRACIÓN DE CHL A EN COLUMNA DE AGUA

Primeramente debemos reconocer que nuestra metodología fue aplicada adecuadamente, dado que las concentraciones de Chl a fueron comparables con estudios hechos por otros autores (Aguirre, 2002; Bianchi, 2000; Pfannkuche, 1999) que incluyeron además de fluorometría, técnicas variadas como HPLC, en el propio Golfo de México y otros océanos tropicales. Comparando las concentraciones de Chl a *in situ*, con aquellas de color del mar que han sido producidas por imágenes de satélite, para junio de 1999, 2001 y 2003 también se encuentran valores congruentes.

Considerando las concentraciones de clorofila a registradas para nuestro transecto representativo de la zona suroccidental del Golfo de México,  $0.002 \mu\text{g L}^{-1}$  (mínima) y  $0.267 \mu\text{g L}^{-1}$  (máxima) con un promedio de  $0.041 \mu\text{g L}^{-1}$ , podemos afirmar que la concentración de clorofila a en esta zona es baja en relación con otras zonas propias del Golfo de México así como de otras zonas tropicales como el mar arábigo. Por ejemplo en el Noreste (NEGOM) que se encuentra en el margen continental entre el Delta del Río Mississippi y el Apalachicola el promedio fue de  $0.4 \mu\text{g L}^{-1}$  con máximos hasta de  $12 \mu\text{g L}^{-1}$  (Yaorong Qian et al 2003). En el sur del Golfo de México donde descargan el Río Grijalva - Uzumacinta y el Coatzacoalcos se encontraron valores de  $0.4 - 2.3 \text{ mg m}^{-3}$  ( $0.4 - 2.3 \mu\text{g L}^{-1}$ ) (Aguirre, 2002). Entendemos esta diferencia notable dado que la distribución espacial de clorofila "A" en NEGOM, se ve controlada por el agua dulce rica en nutrientes proveniente de los ríos y estuarios. Valores un poco más cercanos a los de SIGSBEE.5 fueron los de  $0.01 - 2.85 \mu\text{g L}^{-1}$  que se encontraron en el noroeste del Golfo de México (Bianchi, et al. 1995), donde cabe recalcar que los valores de nuestro estudio caen dentro del límite inferior de dicho rango de concentraciones. Los tres estudios mencionados no son específicos para el verano, y dado que nuestro estudio esta hecho en Julio corresponde a un mes que en el verano el Golfo esta altamente estratificado, con la termoclina poco profunda, la capa de mezcla muy superficial y existe muy poca mezcla vertical por carencia de Nortes y procesos hidrográficos. Aunque los días son mas largos, los ángulos solares son mas altos y existe mucha irradiación solar, también hay poca regeneración de nutrientes por vía de la excreción de zooplancton, y la mayor parte de los nutrientes fueron removidos durante el periodo de alta productividad de la primavera (floreamiento de primavera), así es que fitoplancton esta muy limitado en nutrientes y por ende en biomasa, lo cual repercute en la concentración de Chl a.

La temperatura afecta la densidad al cambiar el espaciamiento entre las moléculas de agua en un volumen dado. Conforme aumenta la temperatura las moléculas aumentan su energía, aumentan el espacio y por ende disminuye la densidad del agua marina (Yoon 2001). El calentamiento de la columna de agua dependerá de varios factores particulares físicos y químicos de la estación, como lo son por ejemplo corrientes térmicas de distintas temperaturas, surgencias, nubosidad en la zona, penetración de la luz (donde influye salinidad, materia inorgánica e incluso concentración de materia orgánica como fitoplancton), la precipitación y la evaporación, cuyos efectos sobre la densidad del agua provocaran variación regional (Yoon 2001), por esta razón diferenciamos las estaciones oceánicas (E1 a E9) de las estaciones de talud continental y reborde (E10, E11, y E12). Las capas oceánicas menos densas se colocaran sobre las mas densas variando tanto horizontal como verticalmente en escalas espaciales. Conforme las aguas superficiales se

calientan, la termoclina se hace menos profunda y se distingue más como agua tibia sobre una superficie de agua más densa y mas fría (Libes 1992), como podría suceder en las estaciones m enos profundas (E12 y E11). La mezcla en los estratos superficiales, donde la dinámica ocurre fundamentalmente por vientos, es determinante para la productividad del fitoplancton y por ende la concentración de Chl a. Por lo tanto la profundidad a la que se encuentren las termo y pycnoclina definirá que tan cerca de la superficie puede ocurrir la mezcla y la aportación de nutrientes hacia la zona eufótica, lo que provocará nuevamente variación regional y distinción entre estaciones costeras y oceánicas.

Cualquier proceso como evaporación, precipitación, flujo térmico o circulación por vientos, pueden cambiar la profundidad de la capa de mezcla, el juego entre los fenómenos físicos como la estratificación vertical, y químicos como la concentración de nutrientes inorgánicos influirán así en los biológicos como productividad primaria (Libes 1992). Conforme aumenta la fotosíntesis disminuye la concentración de nutrientes. Procesos geológicos como arrastre de minerales de rocas erosionadas son también contribuyentes de nutrientes y mas abundantes en la costa (estaciones 10, 11 y 12). Eventos episódicos como frentes fríos, tormentas, huracanes, eddies, surgencias, hundimiento pueden cambiar la estructura de la columna de agua (Carton y Chao, 1999; Murphy y O'Brien, 1999).

La concentración de Chl a va de la mano con la fotosíntesis que ocurre, y esta será determinada por la tasa a la que los nutrientes son aportados. Los nutrientes se forman con la descomposición de la materia orgánica durante el proceso de remineralización. Las bacterias descomponen la materia orgánica y producen el nitrato, nitrito, amonio, fosfato, potasio, silicato, hierro etc. requerido por el fitoplancton para su crecimiento (Nobuhiko 2000). De esta forma la materia se recicla en el océano. El fitoplancton absorbe los nutrientes inorgánicos, y este es consumido, o muere y es exportado vía heces fecales o agregación en mucílago. Estos minerales importantes son vitales para el crecimiento fitoplanctónico. La tasa a la que las heces zooplanctónicas y fitoplancton muerto es remineralizada hacia superficie determinará que tan rápido crecerá el fitoplancton (Hara 2000). En general las fuentes de nutrientes disueltos para el crecimiento fitoplanctónico incluyen

- 1) nutrientes aportados por difusión,
- 2) el rompimiento de olas internas que mezclan aguas profundas ricas en nutrientes con aguas superficiales empobrecidas en nutrientes,
- 3) mezcla vertical de aguas profundas ricas en nutrientes con aguas superficiales menos ricas como sucede en la estaciones costeras (doce y once)
- 4) remineralización de materia orgánica por bacterias,
- 5) excreción zooplanctónica
- 6) surgencias como sucede en la estación E10 y E11.

Ciertamente en nuestro estudio encontramos patrones distinguibles en la distribución espacial y vertical de la clorofila a. El patrón vertical es claramente repetitivo, en cuanto a que debajo de la termoclina (zona disfótica) existe mucha menor concentración de clorofila a que en la zona eufótica. Consideramos que este patrón es congruente con lo planteado por el modelo de análisis del flujo de carbono biogénico (C<sub>Bio</sub>) en ecosistemas pelágicos, (Legendre y Rassoulzadegan 1996), donde la transferencia de la producción fitoplanctonica se divide en tres flujos distintos:

- remineralización en la zona eufótica (PS),
- transferencia por la cadena alimenticia (PL; [donde PL es el plancton grande >5µm]), y
- el hundimiento hacia el fondo (PL).

Esta transferencia se basa en dos variables de la cadena alimenticia, la contribución de fitoplancton en producción primaria total (PL/PT) y el vínculo de la producción de fitoplancton con la herbivoría. Según (Legendre y Rassoulzadegan 1996) el flujo de  $C_{Bio}$  dentro de los ecosistemas oceánicos esta determinado por:

- 1) el tamaño de la estructura de los productores primarios y la segregación entre los productores primarios y sus depredadores o los herbívoros ; y
- 2) la exportación desde la zona eufótica está en función de la aportación de energía mecánica en la capa de mezcla, mientras que la proporción de la exportación total entre transferencia de la cadena alimenticia y
- 3) el hundimiento de COP (carbono orgánico particulado) está controlado por variaciones temporales en la profundidad de la capa de mezcla.

Como ya han sido descritos, los patrones de concentración de clorofila a, dependerán esencialmente del posicionamiento de la termoclina con respecto al fondo, de la profundidad del fondo, y del distanciamiento al que se encuentran las estaciones respecto a la costa. Relacionamos estos factores geográficos con las condiciones ecológicas propias de la estación como lo son temperatura, oxígeno y nutrientes. La variación de la concentración de clorofila a, esta directamente relacionada con la cantidad de nutrientes que se tienen disponibles para la productividad primaria, ya sea por aportación directa del continente, o por la vía de la remineralización desde el sedimento hacia la superficie (Pfnankuche, 1999; Escobar, 1997; Riaux, 1995; Romankevitch, 1984).

Sabemos que se puede observar la partición de la producción de fitoplancton en tres flujos distintos: remineralización en la zona eufótica, transferencia por la cadena alimenticia, y el hundimiento hacia el fondo (Legendre y Rassoulzadegan 1996). Para el reciclamiento de nutrientes la termoclina juega un papel esencial que participa como una frontera física, y permite la remineralización en la zona eufótica, así como barrera para la exportación de la materia orgánica hacia el fondo. Lo anterior es relevante en mares tropicales como el Golfo de México. Los organismos de baja densidad (fito y zooplancton) pueden mantenerse suspendidos sobre la termoclina, y ser degradados y reciclados *in situ*, a no ser que se agreguen o estén contenidos dentro de heces fecales con peso y volumen suficiente para atravesar la termoclina (Yaorong 2003, Beaulieu 2002, Yoon 2001, Smith 1996). Es decir la termoclina sirve como barrera de contención de donde la capa de mezcla podrá obtener los nutrimentos necesarios para la productividad primaria cuando suceda una mezcla vertical de la columna (Legendre y Rassoulzadegan 1996). El tiempo de renovación de carbono biogénico y nutrientes, que es el tiempo transcurrido entre la ingestión fotosintética del carbono inorgánico disuelto y el regreso de este en su forma de  $CO_2$  a las aguas superficiales está en estos casos disminuido y es clasificado como carbono de vida corta, (<10<sup>-2</sup> años).

La diferencia notable en concentración de Chl a que las estaciones 10, 11 y 12 presentan respecto a las demás estaciones oceánicas (1-9) se debe por una parte a que los nutrientes contenidos en la capa de mezcla los puede estar aportando la remineralización del carbono de vida corta dada la poca profundidad de la termoclina; por otra parte, el ser

estaciones costeras, con menor profundidad, y mayor mezcla vertical, el fitoplancton en estas estaciones puede aprovechar remineralización del carbono de vida larga (PL) que fue exportado y es proveniente del sedimento del fondo (Legendre y Rassoulzadegan, 1996; Newton, 1994; Gooday, 1990). En el sedimento se deposita tanto la materia orgánica exportada directamente, como la que está en descomposición, que es proveniente de fito y zooplancton, de heces fecales, y cuerpos de organismos pertenecientes a la cadena trófica cuyo volumen y peso les permitan ser exportados al fondo (Fortier et al., 1994; Gooday et al., 1989; Riaux-Gobin, 1995). La presencia de salpas que empaquetan partículas pequeñas en partículas mayores reducen el tiempo de renovación de nutrientes y carbono biogénico, transfiriendo estos hacia un compartimiento de mayor longevidad (Beaulieu, 2002; Fortier et al., 1994; Gooday et al., 1989; Riaux-Gobin, 1995). El alargamiento del tiempo de renovación deberá estar en función de la relación entre el tamaño de los organismos y el tamaño de sus partículas de alimento. Estos organismos ya degradados que por corrientes, vientos, ondas internas u otros procesos físicos son resuspendidos hacia la capa de mezcla, podrán aportar una abundancia mayor de nutrientes (Bianchi, 2000; Murphy, 1999; Smith, 1996). Debido a esto las estaciones 11 y 12 como lo reflejan sus concentraciones mayores, no dependen solamente de los nutrientes disueltos en columna.

Además de que en aguas someras, la mezcla vertical permite que la materia orgánica que ha sido remineralizada y depositada en el fondo sea aportada hacia superficie, recordemos que la materia orgánica terrígena es acarreada por viento y aerosoles a lo largo de grandes distancias en los océanos, (estimando que aportan un total de  $10^{14}$  t de carbono cada año) y que los ríos son los que más aportan material terrígeno por año, (con  $0.4 \times 10^{15}$  toneladas de carbono orgánico) desde continentes hacia los océanos (Escobar, 1997; Schlesinger, 1981). Sabemos por esto, que las estaciones (E12, E11, E10) cuya posición geográfica es más cercana a la costa, tiene más razones para presentar mayor productividad en la capa eufótica, los nutrientes remineralizados de la materia orgánica terrígena pueden ser aprovechados para la producción, incrementando así la concentración de Chl a.

La termoclina además jugará un papel importante como transportadora horizontal de los nutrientes aportados por continente y sedimento; El mejor ejemplo es la estación 10 (primera estación que pertenece a la zona oceánica con 2700m de profundidad), por ser la tercer estación más cercana a la costa (167.83km). Esta presenta alta productividad en la zona eufótica, debido a que tanto el viento como la termoclina han transportado horizontalmente los nutrientes provenientes del área costera, suspendidos sobre la superficie de la columna (capas "sobre termoclina y capa de mezcla"). Estos podrán ser aprovechados por el fitoplancton local, a pesar de no presentar aporte de sedimento por mezcla vertical *in situ*. Conforme nos alejamos de la costa, sólo la materia orgánica que no fue aprovechada anteriormente, sumado la que es remineralizada *in situ* podrá ser ingerida por el fitoplancton, afectando así la concentración de Chl a (Fortier, 1994; Newton, 1994; Romankevitch, 1984).

#### VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CHL a EN EL ESTRATO DE MÁXIMO DE CLOROFILA a

Reconocemos que la concentración de Chl a en los diferentes estratos estará definida por factores ambientales e hidrodinámicas independientes, sin embargo solo el estrato de máximo de Chl a muestra diferencias estadísticamente significativas con respecto al resto, además de diferencias significativas entre los valores de sus 12 estaciones. Promediando ( $0.120 \mu\text{gL}^{-1}$ ) este estrato presenta dichas características dada su profundidad respecto a la termoclina, quien regula la dinámica biológica del estrato.

En un gradiente vertical recordemos que conforme se incrementa la profundidad en la columna de agua la penetración de luz disminuye, y que la capa de mezcla recibe mayor cantidad de luz que las capas inferiores (Libes 1992), sin embargo esta presenta solo  $0.049 \mu\text{gL}^{-1}$  Chl a promedio. La capa de mezcla requiere del viento para que los nutrientes provenientes de la termoclina estén disponibles, mientras que en el caso del estrato de máximo de clorofila esto no es requerido. Sobre la termoclina (40m a 100m) donde se encuentra el estrato "máximo de Chl a", la penetración de luz es menor que la capa de mezcla, pero el fitoplancton se encuentra en contacto directo con los nutrientes disueltos producto de la descomposición del material orgánico suspendido, y por esto no depende de la mezcla vertical para que las condiciones ecológicas como lo son luz y temperatura, optimicen el crecimiento (la concentración de Chl a). El estrato inmediato inferior "termoclina"  $0.05 \mu\text{gL}^{-1}$  la Chl a promedio se encuentra en las profundidades de 150m, 200m, 180m y 60m respectivamente para las estaciones abisales, 10, 11 y 12, lo que ubica el estrato en una profundidad por debajo de la picnoclina, donde disminuye considerablemente la concentración de nutrientes y por ende la concentración de Chl a. Los estratos restantes como borde inferior de la termoclina ( $0.007 \mu\text{gL}^{-1}$  Chl a promedio), agua de 1500m ( $0.002 \mu\text{gL}^{-1}$  Chl a promedio), y agua de fondo ( $0.003 \mu\text{gL}^{-1}$  Chl a promedio) se encuentran en la zona disfótica, donde la hidrodinámica y ecología es totalmente distinta a la zona eufótica, lo que imposibilita hacer una comparación directa.

La heterogeneidad horizontal que presentan las estaciones de este estrato (Fig. 10 y 11), en la concentración de Chl a, se atribuye a la especificidad ecológica de las estaciones, cuyas variables físicas, químicas y batimétricas serán determinantes (Legendre y Rassoulzadegan, 1996). Debemos considerar que la profundidad y mezcla vertical que se permite diferencialmente en las estaciones costeras y oceánicas, establecerá la cantidad de nutrientes presentes, ya sea por remineralización o por aporte tanto de continente como de fondo. Sólo a esta profundidad (40m a 100m) se comprueba que las mayores concentraciones de Chl a se presentarán en las menores profundidades siguiendo el gradiente positivo desde zona abisal (estaciones 1-9) hacia talud continental y reborde continental (estaciones 10, 11 y 12). Probablemente si tuviéramos mayor concentración de Chl a en el Golfo, podríamos extrapolar la ecuación horizontal del comportamiento de "máximo de Chl a" hacia el resto de los estratos, pero dadas las bajas concentraciones y la baja variabilidad esto no es posible.

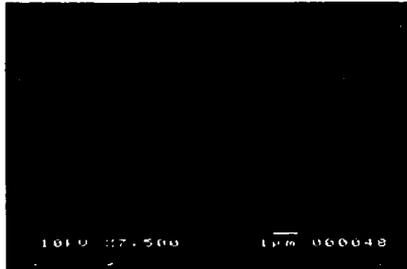


Fig. 43 imagen fotográfica de un disco de cocolitoforido colectado en el máximo de Chl a durante el crucero SIGSBEE.5 en julio 2002

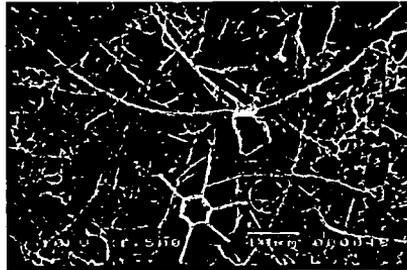


Fig. 44 imagen fotográfica de un dinoflagelado colectado en el máximo de Chl a durante el crucero SIGSBEE.5 en julio 2002

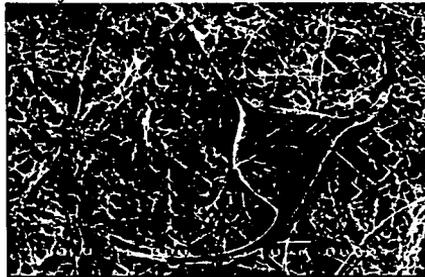


Fig. 45 imagen fotográfica de un dinoflagelado (*ceratum*) colectado en el máximo de Chl a durante el crucero SIGSBEE.5 en julio 2002

Con las fotos de las figuras 44, 45 y 46 podemos apreciar algunos de los organismos fitoplanctónicos que se muestrearon sobre el máximo de Chl a, cuyos

pigmentos contribuyeron a la concentración de Chl a presente en este estrato, es decir además del fitodetritus producto de organismos degradados que se encuentran suspendidos sobre la termoclina, habrá también organismos vivos contribuyendo a las concentraciones registradas, a pesar de la profundidad (100m) que ésta registra.

#### VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CHL A EN EL SEDIMENTO SUPERFICIAL

La concentración de Chl a y carbono orgánico en superficies de sedimentos marinos varía dependiendo de los ambientes de los océanos y de la cantidad de aporte de materia orgánica, las condiciones de preservación y dilución por material mineral. El COP se remineraliza a  $CO_2$ , CHL o carbono orgánico disuelto (Schultz, 2000).

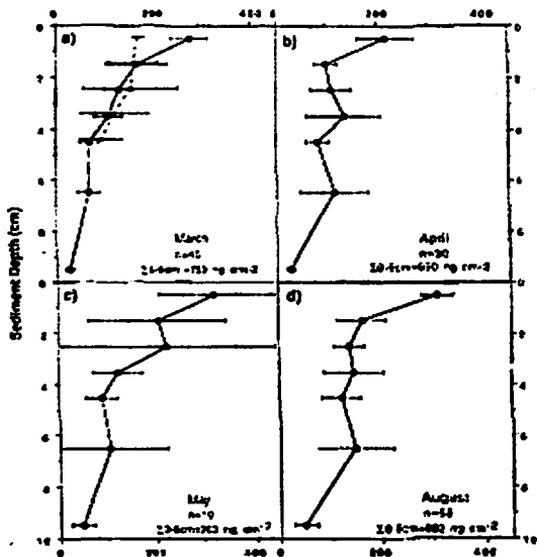


Fig. 46 Variación de los pigmentos cloroplásticos expresados en ng de Chl a  $cm^{-2}$  en los 10 cm superficiales del sedimento. (Tomado de Pfannkuche 1996).

Dada la baja productividad primaria que presenta el Golfo en la zona sur occidental (SIGSBEE.5) en el verano, los cambios y variaciones fueron apenas notados en las 12 estaciones tanto para la zona eufótica, como la zona disfótica en columna de agua. Solo en "sedimento" donde el fitodetrito es acumulativo, se pudo notar una diferencia significativa entre las estaciones, lo que hizo posible describir la concentración

de los pigmentos, reconociendo un patrón de distribución batimétrico más claramente. Este fluctuó entre  $0.042\mu\text{gcm}^{-3}$  (estación 3) y  $0.910\mu\text{gcm}^{-3}$  (estación 12), con un promedio de  $0.260\mu\text{gcm}^{-3}$  y desviación estándar de  $0.24\mu\text{gcm}^{-3}$ , podemos afirmar que las concentraciones de clorofila a en sedimento de la campaña SIGSBEE.5 son muy semejantes a otros océanos tropicales (Beaulieu 2002, Pfannkuche 1999, Bianchi 1995). Comparando las concentraciones de clorofila en el sedimento con otros océanos tropicales, como el mar Arábigo, donde se han hecho estudios en mar profundo, observamos que las concentraciones registradas allá son muy semejantes  $0.25 - 1.5\mu\text{gcm}^{-3}$  en sedimento " $(0.5 - 3\mu\text{g}/2\text{cm}^3)$ " (Pfannkuche *et al* 2000), o  $0.280\mu\text{gcm}^{-3}$  " $(280\text{ngcm}^{-3})$ " (Pfannkuche *et al* 1999).

La capa superficial del sedimento  $0.260\mu\text{gcm}^{-3}$  presenta altas concentraciones de clorofila a comparado con columna de agua en las mismas profundidades  $0.0000033\mu\text{gcm}^{-3}$  ( $0.003\mu\text{gL}^{-1}$  fondo). La explicación más obvia e inmediata es que la clorofila a que encontramos en superficie de sedimento es mayor porque es producto de la sedimentación acumulativa proveniente desde columna de agua (Beaulieu 2002, Hara 2000, Bianchi 1995, Fortier 1994 Gooday, 1990). La concentración de clorofila a en sedimento tendrá por lo tanto un factor de temporalidad y será dependiente de:

- 1) la tasa de exportación,
- 2) la tasa de degradación de clorofila, y
- 3) la tasa de ingestión por fauna bentónica.

**LA TASA DE EXPORTACIÓN.** Según Pfannkuche (1999), con un flujo constante de clorofila total de  $4\text{ ng cm}^{-2}\text{ d}^{-1}$  ( $0.004\mu\text{g cm}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ) tomaría de 70 -110 días acumular los 200 ng ( $0.200\mu\text{g}$ ) de clorofila a por  $\text{cm}^{-3}$  en las capas superficiales de sedimento que se encuentra igualmente a 3500 metros.

**LA TASA DE DEGRADACIÓN DE CLOROFILA UNA VEZ SEDIMENTADA.** La vida media de degradación de cloropigmentos que abarcan de 3 a 250 días, o bien 3-87 días en zona abisal, fueron determinadas en las capas superficiales de sedimento en el pacífico ecuatorial (Stephens *et al* 1997, citado por Pfannkuche, 1999). La clorofila a se encontró más reactiva que las fracciones de fepigmentos en estas investigaciones. Dado que consideramos que las condiciones de temperatura y presión son semejantes en sedimentos de mar profundo, podemos considerar estas tasas de degradación para nuestra investigación. Qué tanto se degradan las partículas de materia orgánica al caer a través de la columna de agua, es dependiente de la cantidad de tiempo que estas permanezcan en la columna de agua (Beaulieu, 2002; Bianchi, 2000; Rodger, 1995). Claramente las partículas más pequeñas y menos densas caen muy lentamente. Los valores de densidad de materia orgánica implican una asociación de la materia orgánica con minerales, ya sean calcáreos biogénicos, silíceos (plancton), frústulas, o minerales en detrimento como arcillas. La materia orgánica pura tendría una densidad menor a la del agua y no se hundiría al fondo. La materia fecal del zooplancton comúnmente tiene más minerales que materia orgánica. Partículas algales de bajo contenido en minerales pueden permanecer mucho tiempo en columna y ser metabolizados muy fácilmente antes de alcanzar el fondo. El tiempo de hundimiento depende fuertemente en la forma de la partícula, la mayor parte no son esféricas o redondeadas y por ende su velocidad disminuye. (Beaulieu 2002; Yoon, 2001; Smith *et al.*, 1996).

**LA TASA DE INGESTIÓN POR FAUNA BENTONICA** Esta es mas abundante en reborde y talud que en mar profundo, lo cual puede presentar diferencias estacionales respecto al consumo de clorofila a. Antes que nada debemos hacer una diferenciación entre zona nerítica, (talud/ reborde E10, E11 y E12) donde el promedio es de  $0.71\mu\text{g}/\text{cm}^3$ , y la zona abisal (E1 -E9) donde el promedio es de  $0.17\mu\text{g}/\text{cm}^3$ . Recordemos que bajo el límite de la zona eufótica y termoclina, la llamada "producción nueva" equivale el 100% de la producción que se exporta, y que bajo este límite la concentración de carbono orgánico y clorofila a en la columna de agua decrece por el consumo de la cadena alimenticia, la degradación microbiológica y la química (Yaorong, 2003; Yoon, 2001; Legendre y Rassoulzadegan, 1996). En la zona abisal el sedimento presenta menor cantidad de clorofila a, dado que la distancia recorrida hasta llegar al sedimento es mucho mayor para esta zona que lo es en reborde y talud, además de las diferencias en las variables ecológicas que existen entre las estaciones. Es decir, si tomamos de referencia los números de (Pfannkuche 1999) que tomaría de 70 - 110 días acumular 200 ng ( $0.200\mu\text{g}$ ) de clorofila a por  $\text{cm}^3$  en una profundidad de 3500m de la zona abisal, y hacemos una relación simple en función de profundidades, entonces en talud (1500m = 43% de 3500m) tomaría 30 -70 días, y en el reborde (500m = 14% de 3500m) tomaría de 10 a 50 días para acumular lo mismo. Lo que nos dice que en un mismo periodo de tiempo, las estaciones neríticas acumularán desde el doble hasta 3.7 veces más que las estaciones abisales. Esto último es considerando una tasa de exportación igual a ( $0.004\mu\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) (Pfannkuche, 1999) pero sabemos que en talud /reborde la tasa de exportación sería aún mayor, dada la diferencia en productividad en columna, lo cual afectaría mas aún la concentración presente en sedimento, como es notable en los promedios.

Si notamos la figura 23 muestra la regresión para la concentración de clorofila a en sedimento contra profundidad, esta presenta un valor de  $P = 0.0002$ , que implica que el estrato de sedimento sea el estrato muestreado con mayor nivel de significancia, (con la menor probabilidad de que la variación se haya presentado por azar). Además presenta una  $R$  de 0.87 y  $R^2$  de 0.76 que nos dice como la profundidad esta altamente correlacionada con la concentración de clorofila a en sedimento, entre mayor es la profundidad, menor será la concentración de clorofila a. Las estaciones E1-E9 están agrupadas y son las muestras representativas de las estaciones profundas pertenecientes a zona abisal. La regresión presenta una pendiente lineal y positiva muy pronunciada a favor de las estaciones costeras indicando mayor concentración conforme la profundidad y distancia de la costa disminuyen.

**ACOPLAMIENTO ENTRE COLUMNA Y SEDIMENTO** El acoplamiento entre columna y sedimento ya ha sido reportado por diversos autores en otras cuencas tropicales (Pfannkuche, 1999) donde el depósito de la materia orgánica demuestra que esta sujeta a las variaciones temporales causadas por el ciclo anual de productividad primaria y procesos secundarios que operan en la zona de exportación. Por ejemplo máximos de sedimentación se han observado después de florecimientos de fitoplancton en primavera en diferentes océanos (Newton *et al.*, 1994), o bien un aumento en depósitos de sedimentos que son correspondientes a productividad inducida por monzones (Pfannkuche, 2000). Los picos temporales de sedimentación resultan en depositación por pulsaciones sobre el sedimento.

Para hablar de un posible acoplamiento entre columna y sedimento, debemos entender la exportación desde superficie hasta el fondo. Tenemos ejemplos tropicales como la fosa de Cariaco en el Caribe, donde por la surgencia existe un excedente tal en la producción primaria que esta no es consumida en la superficie y por lo tanto es exportada al fondo, lo cual presentaría un modelo alternativo pero no necesariamente semejante al Golfo donde las condiciones son oligotróficas. Nuestro modelo de exportación responde más al modelo 2 (Hara, 2000) planteado en la parte introductoria, "de acumulación sedimentaria por alta productividad" que al "modelo del mar Negro", cuya propuesta es la acumulación de materia orgánica debida a las condiciones de anoxia. Tanto las zonas eufóticas de alta productividad (estaciones E10, E11 y E12) como las de baja productividad (E1 - E9), presentan clorofila a en el fondo, lo cual tampoco responde totalmente a lo planteado por el modelo 2, sin embargo las estaciones presentan clorofila a en el fondo, a pesar de que el promedio de oxígeno disuelto en el fondo equivale a ( $4.64 \text{ mgL}^{-1}$ ) que es aun mayor que ( $4.18 \text{ mgL}^{-1}$ ) en la superficie, es decir, se contradice el prerrequisito del "mar Negro" de que las aguas de fondo oceánico estuvieran además de estancadas, en condiciones anóxicas. La concentración de  $\text{O}_2$  y las bajas concentraciones de clorofila a en el fondo, parecen reflejar que con el tiempo se ha podido provocar la oxidación de organismos en descomposición, sin embargo por la baja productividad superficial y exportación, además de dinámicas renovadoras de oxígeno en corrientes profundas, puede que no se haya consumido todo el oxígeno libre.

**EXPORTACIÓN DE CHL A .** La mayor parte de la materia orgánica entra a la cadena alimenticia en las áreas superficiales y es respirada o utilizada para producción de biomasa heterotrófica. Por esta razón es difícil determinar el flujo de materia orgánica en los diferentes niveles de la zona eufótica. Por otro lado los oceanógrafos consideran que el flujo de materia orgánica bajo el límite de la zona eufótica (delimitado por el estrato termoclina y pycnoclina), equivale el 100% de la producción que se exporta. Bajo este límite la concentración de carbono orgánico y Chl a en la columna de agua decrece progresivamente debido a la disminución de luz y nutrientes, además de la degradación físico química y el consumo biológico que sufre el fitoplancton exportado por debajo de la termo- pycnoclina hacia el fondo (Yaorong, 2003; Yoon, 2001; Legendre y Rassoulzadegan, 1996). Por esta razón vale la pena hacer un análisis asociando estratos que definan y diferencien la zona "eufótica" de la "disfótica". Las concentraciones de Chl a generales serían más homogéneas y por ende la desviación estándar general sería menor, de no ser por las diferencias verticales ecológicas, físicas y químicas que se presentan entre las capas eufótica y disfótica (Schultz, 2000; Welsh, 2000; Stephens, 1997). Tanto en el promedio, como en la desviación estándar, se aprecia una diferenciación entre la capa eufótica (capa de mezcla, máximo de Chl a y termoclina) [ $0.075 \mu\text{g L}^{-1}$ , desv  $0.058 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 36$ )] y la capa disfótica (borde inferior de la termoclina, agua del 500m y agua de fondo) [ $0.0048 \mu\text{g L}^{-1}$ , desv  $0.0055 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 36$ )]. Esta evidencia constituye la primera consideración de cómo el material es exportado desde superficie a través de la columna hasta el agua de fondo.

En la zona disfótica, los estratos de agua de fondo y agua de 1500m de profundidad, contienen el material exportado de menor concentración de Chl a promedio ( $0.003 \mu\text{g L}^{-1}$ ), con la menor desviación estándar ( $0.001 \mu\text{g L}^{-1}$ ). En realidad la zona disfótica es bastante homogénea y ambos estratos profundos solo difieren del estrato

inmediato superior "borde inferior de la termoclina" porque que éste promedia  $0.0078\mu\text{g L}^{-1}$  y presenta una desviación mayor que su promedio con ( $0.009\mu\text{g L}^{-1}$ ), ya que el valor de Chl a de la estación 12 para este estrato es alto ( $0.033\mu\text{g L}^{-1}$ ). Esto se explica porque mientras que en las otras estaciones se ubica a los 600m promedio el estrato "borde inferior de la termoclina", para esta estación (12) sólo se ubica a los 120 metros de profundidad, donde además de mayor cantidad de luz, se encuentran una mayor cantidad de nutrientes que pueden provenir del agua de fondo por hidrodinámicas distintas, o de la propia termoclina. Esto confirma que un mejor análisis de los diferentes estratos deberá ser diferenciando entre talud continental, reborde continental y zona abisal.

Al tratar el total de los datos de manera conjunta, la correlación entre la concentración de Chl a y la distancia de la costa no mostró ser significativa ( $R < 0.7$ , y  $P > .01$ ), sin embargo en todos las regresiones de los diferentes estratos (excepto la termoclina), se reconoció una pendiente positiva hacia la costa, dado que esta presenta una mayor concentración y mayor exportación que la zona oceánica. Como ecológicamente no es correcto generalizar la columna de agua, (Nobuhiko, 2000; Riaux 1995; Rodger, 1995) verticalmente distinguimos entre zona eufótica y disfótica, y por consiguiente tampoco sería lo correcto generalizar la columna de agua horizontalmente, puesto que debemos considerar las diferencias batimétricas que existen entre zona abisal (oceánica), y talud-reborde continental (nerítica). Al distinguir estas zonas notamos que: en zona eufótica nerítica de talud-reborde continental (E10, E11 y E12) el promedio y desviación de Chl a [ $0.101\mu\text{g L}^{-1}$  desv  $0.079\mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 9$ )] se aprecia diferente de las estaciones eufóticas oceánicas (E1 - E9) [promedio  $0.065\mu\text{g L}^{-1}$  desv  $0.05\mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 27$ )]. Así mismo para la capa nerítica disfótica (borde inferior de la termoclina, agua de 1500m, y fondo) en el talud y reborde continental (E10, E11 y E12) el valor promedio [ $0.008\mu\text{g L}^{-1}$  desv.  $0.011\mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 9$ )], es distinto de el valor promedio para la capa disfótica abisal (E1-E 9) [ $0.004\mu\text{g L}^{-1}$  desv  $0.002\mu\text{g L}^{-1}$  ( $n = 27$ )].

Recordemos que el ANOVA con la prueba de Newman Keuls (Tabla 14) permitió reconocer que los valores promedio de Chl a localizados en la zona oceánica de columna mostraron diferencias significativas con los de la zona nerítica ( $p = 0.006$ ), al igual que las concentraciones del sedimento de la planicie abisal con respecto a las del talud y reborde continental ( $p = 0.007$ ), es decir según nuestros resultados de ANOVA, para fines prácticos, tanto en columna como en sedimento las estaciones neríticas deberán considerarse por separado de las oceánicas. El que los valores de columna de agua en la zona nerítica contra los valores de sedimento de zona nerítica presenten ( $p = 0.012$ ) ratifica que sus concentraciones son diferentes entre si, con todo y que ambos estratos se distinguen de la zona oceánica.

Si recordamos que las ecuaciones de exportación en columna de agua, también presentan diferencias entre zona nerítica ( $\bar{Y} = 10.74X^{-0.737}$ ) y zona oceánica ( $\bar{Y} = 4.23X^{0.98}$ ) y una diferencia porcentual de 1.2% de materia exportada desde zona eufótica hacia zona disfótica (4.9% nerítica v.s. 3.7% oceánica), sabemos que nuestros resultados ya proveen herramientas suficientes para analizar la exportación con un mejor criterio. Es importante reconocer que estas ecuaciones y razonamientos podrán ser utilizados como referentes para futuros estudios hechos en la zona del Golfo de México tomando en cuenta:

- a) que el transecto a considerar no este en una zona de alta productividad relativa causada por la cercanía de ríos o estuarios,
- b) que las estaciones no sean meramente costeras, ya que la mas cercana se encuentra 57.3 kms de la costa,
- c) que el muestreo sea en verano,
- d) que el muestreo se lleve a cabo en latitudes tropicales (longitudes en los 90s y latitudes en los 20s.

**CÁLCULO PARA LA EXPORTACIÓN DE CHL A** Para saber como puede ser afectada la exportación, es importante reconocer estudios recientes como el de Gooday *et al.* (1989), en el Atlántico noreste donde se han demostrado que las macro agregaciones que se originan en la zona eufótica sedimentan con una tasa de 100-150 m d<sup>-1</sup>, para formar depósitos (fitodetrito) en superficie, y el estudio de Yoon (2001) donde al medir la velocidad de hundimiento de heces fecales, se revelaron velocidades desde 26.5 a 159.5 md<sup>-1</sup>, para heces de copépodos, 16.1 – 341.1 md<sup>-1</sup>, para heces de euphasidos, y de 43.5 a 1167.6 md<sup>-1</sup>, para salpas. Este estudio calculó que para que se deposite la materia con clorofila a en el sedimento en las observaciones de la campaña SIGSBEE.5, (3500m) transcurriría entre un mes y un mes y medio. Este factor de temporalidad es importante para considerar cuanto y como es que se presentaría el material una vez que llega al fondo de este. Dada la cantidad de tiempo que permanece en columna antes de llegar al fondo, debemos considerar tanto la degradación y transformación de clorofila a durante la exportación, como la dinámica horizontal y vertical que esta seguirá en el proceso

Sabemos que la clorofila a tiene una tasa de descomposición entre 0.04 – 0.07d<sup>-1</sup> (Bianchi, 2000). Si suponemos 30 días como tiempo estimado de exportación, tendremos como resultado (0.07 d<sup>-1</sup>\* 30d = 2.1[> 1]), que implicaría la degradación total de la clorofila a. La descomposición disminuye sólo en condiciones de baja concentración de O<sub>2</sub> o anoxia, por la ausencia de macrofauna que promueve la descomposición, o por mucosidades de materia fecal en las que se encuentre envuelta. Si a esto le sumamos que se estima que solo el 1% del total de la materia orgánica que se produce llegara al fondo, (Volkman *et al.*, 1998) dado que en el proceso de exportación ocurre degradación y consumo, entonces sabemos que un gran porcentaje de la clorofila a no se encontrara en su conformación original en el sedimento, además de que tanto su derivados como otros pigmentos no son calculados por el fluorómetro (Trees, 1985) lo cual hace frágil la estimación de exportación. El que la clorofila a no mantenga su estructura original, no quiere decir que sus derivados dejen de aportar importantes cantidades de materia orgánica para el consumo trófico béntico, sin embargo esta estimación es una buena primer aproximación. Debemos reconocer que la metodología plantea el flujo de clorofila a, mas no necesariamente ésta es representativa de el total de flujo de materia orgánica, o incluso del total de fitodetrito, gran parte de la materia orgánica que se encuentra en el fondo puede ser proveniente de fuentes alóctonas, dada la mayor resistencia que presenta a la oxidación (Beaulieu, 2002; Gooday, 1990).

Como ya mencionamos se podría observar un cambio de mayor o menor producción en superficie en función de una temporalidad estacional, por la época de lluvias, por las condiciones de temperatura superficiales que en verano pueden profundizar la termoclina, y por los frentes de Nortes temporales que de Octubre a Marzo aumentan la mezcla de columna; como estos procesos podrían influir fuertemente en la

concentración de clorofila a, surge la necesidad de observación de color del Mar en fechas anteriores a las de muestreo. Con esto buscamos corroborar que el material producido en meses anteriores al muestreo fuera de concentraciones comparables. La concentración de Chl a de julio en el fondo deberá ser reflejo de la productividad del mes de mayo o junio  $\pm 15$  días, en un rango no mayor a dos meses. Al graficar los transectos de las coordenadas correspondientes, a través de las imágenes de color de mar de mayo, junio y julio sabemos que se presenta una producción con características de concentración de clorofila a muy semejantes. Es decir dentro del margen de tiempo en el que se pudo dar la exportación, sin degradación total de la clorofila, (un mes y medio) la producción de superficie y columna no varió lo suficiente como para afectar el valor de Chl a exportado hasta sedimento. Por lo tanto para fines prácticos, en el modelo de exportación podemos considerar una concentración superficial equiparable en los tres meses, que nos permitirá hacer cálculos predictivos.

Consideramos que la densidad del agua a los 100m de profundidad (SGTH 29)  $1.029 \text{ kg m}^{-3}$  ( $1.029 \text{ g cm}^{-3}$  o bien  $1.029 \text{ g ml}^{-1}$ ), es crucial para definir si la Chl a será exportada hacia el fondo, o resuspendida hacia la superficie.

Según la ley de Stokes, la densidad de una partícula teórica promedio es  $\rho = 1.3 \text{ g cm}^{-3}$  partiendo del supuesto que la hez fecal tiene un diámetro de 1mm, lo que resulta en una velocidad de hundimiento  $1.6 * 10^{-1} \text{ m s}^{-1}$ , (1000 m de agua en dos horas), que es claramente una sobre estimación cuando comparamos esta velocidad con las medidas de la tabla 1 que presenta resultados de campo de los estudios de Yoon (2001), Hara *et al.* (2000), Gooday *et al.* (1989) y Volkman (1998). Con base en los datos de la tabla 1 calculamos un hundimiento promedio para hez fecal de  $125 \text{ m d}^{-1}$ , lo cual es mas cercano a la realidad. Utilizando esta velocidad de hundimiento recalculamos la densidad de  $\rho_2$  (hez fecal) bajo los mismos criterios de Stokes, donde la densidad de la hez fecal fue igual a

$$\rho_2 = (18\eta V) / (g D^2) + \rho_1$$

$$\rho_2 = 1.0294 \text{ g cm}^{-3}$$

$\rho_2$  = hez fecal

$\rho_1$  = (densidad Standard del agua) =  $1.027 \text{ g cm}^{-3}$

18 = constante

$\eta$  = viscosidad dinámica de la partícula  $0.9289 * 10^{-3} (\text{Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1})$

V = velocidad de  $125 \text{ m d}^{-1}$

g = gravedad  $9.8 \text{ m s}^{-2}$

Esto quiere decir que a los 100m donde se presenta la pycnoclina la densidad del agua  $1.029 \text{ g cm}^{-3}$  y la de la hez fecal  $\rho_2 = 1.0294 \text{ g cm}^{-3}$  son equivalentes, lo cual explica que se mantenga la mayor parte de la clorofila sobre esta profundidad (estrato "máximo de Chl a" = 100m). Recordemos que la clorofila a puede percibirse con el fluorómetro a pesar de que el fitoplancton no este vivo, y esto debe mencionarse puesto justo a esa profundidad (100m) el PAR (Fig. 5) está en su limite de extinción y bien puede ser que el máximo de Chl a a esa profundidad este compuesto tanto de material acumulado (fitodetrito) como vivo *Prochlorococcus marinus* SS120 (Dufresne *et al.*, 2003).

Para lograr llegar hasta los 100m (pycnoclina), o atravesar esta profundidad, la partícula contenedora de Chl a (fitoplancton agregado, o hez fecal) deberá tener una densidad mayor a  $1.029 \text{ g cm}^{-3}$  ya sea agregándose hasta medir  $> 1 \text{ mm}$  de diámetro,

disminuyendo su viscosidad por redondeo, o bien auxiliarse de otros factores como puede ser algún fenómeno hidrodinámico como lo es un giro anticiclónico que permita que las partículas penetren a regiones de mayor profundidad, (Müller-Kärger, 1991). De no ser así, el material que no logra exportarse ( $P_L$ ) atravesando la pincoclina, será resuspendido, metabolizado y remineralizado ( $P_S$ ) (Legendre y Rassoulzadegan, 1996).

Conforme aumenta la profundidad, aumenta la presión y disminuyen la temperatura y la salinidad. Estos factores físicos seguirán jugando un papel importante sobre la densidad y el efecto de esta regulará la flotabilidad de las partículas exportadas ( $P_L$ ), sin embargo si el material logró atravesar la pincoclina, tiene buena posibilidad de seguir hasta el fondo. Es por esto que los valores de Chl a desde los 600m (borde inferior de la termoclina) hasta el fondo en columna de agua son relativamente constantes y homogéneos promediando  $0.0027 \mu\text{g/L}$  bajo la lógica de la ecuación  $y = 4.96 \times 10^{-0.941}$  (ecuación 19). Los inesperados valores altos de concentración de Chl a en sedimento se deben a que una vez exportado el material a través de la pincoclina, este ya se encuentra en temperaturas de  $4^\circ \text{C}$ , cero penetración de luz, y a presiones que pueden ayudar a mantener el material compacto, por lo que la degradación en el trayecto será disminuida (Beaulieu, 2002). Si sumamos el que en columna bajo estas condiciones físicas la actividad de los organismos heterótrofos pelágicos (herbivoría) también es reducida (Legendre y Rassoulzadegan 1996), entendemos la posibilidad de acumulación de fitodetrito exportado (Chl a) en sedimento (Pfanckuche, 1999). Una vez que se encuentra en sedimento, solo dependerá de actividad de meio y macro fauna béntica el que tan rápido esta se degrade (Bianchi, *et al.* 2000; Rodger, *et al.* 1995).

Para entender la exportación, debemos considerar los siguientes puntos, donde he asociado variables físicas para modelar posibles escenarios hipotéticos:

i) La dinámica de la capa eufótica es independiente de la capa disfótica. Es decir, el material exportado una vez que cruza la pincoclina (100 m) estará sujeto a variables físicas muy distintas a las que se vería sometido de mantenerse por encima de la pincoclina. Una vez exportado por debajo de la pincoclina difícilmente se resuspenderá hacia superficie, a no ser que ocurra un proceso hidrodinámico de mezcla como un giro ciclónico fuerte, o huracán que expulse agua de profundidades mayores.

ii) Se calcula la velocidad de sedimentación de una partícula  $125 \text{ m día}^{-1}$ . Es decir que para que recorra los 3500m de profundidad desde zona eufótica, hasta el fondo serán  $(3500\text{m}/125\text{m día}^{-1})$  28 días. Para que el material exportado recorra 2900m desde donde principia la zona disfótica tardara  $(2900\text{m}/125\text{m día}^{-1})$  23.2 días. Si un litro de agua es igual a  $(0.1\text{m})^3$ , para recorrer 0.1m (altura de un litro con área de  $0.001 \text{ m}^2$ ) tardara  $(0.1\text{m}/125\text{m día}^{-1})$  0.0008 días (1minuto 9 segundos).

iii) Para igualar el valor de concentración de Chl a que existe en sedimento ( $259 \mu\text{g L}^{-1}$ ) necesitamos 8000 litros de columna de agua del estrato "fondo" (concentración =  $0.00325 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Para fines prácticos tomaremos un área de  $0.01\text{m}^2$  y una altura de 800m para igualar el volumen de los 8000 litros. Con referencia en el punto anterior (ii), la velocidad de sedimentación es de 0.0008 días por litro (o bien  $1 \text{ min. } 9 \text{ s L}^{-1}$ ), entonces 8000 litros tardarían  $(8000\text{L} * 0.0008 \text{ días L}^{-1}) = 6.4$  días para acumularse en una superficie de  $0.001\text{m}^2$ . Es decir, la cantidad de Chl a que observamos en sedimento debería ser producto de una profundidad de 800m (8000 litros verticales con  $0.001\text{m}^2$  de área en la base, y de igual concentración) que tardarían 6.4 días en acumularse. Esto es solo cierto si suponemos que la velocidad de sedimentación de  $125\text{m día}^{-1}$  se mantiene y

es constante a largo los 800m, además de que la partícula cae verticalmente y sin resuspensión ni contratiempos.

iv) Sabemos que el punto anterior (iii) no puede ser cierto dado que volumen de agua que esta en columna verticalmente sobre el sedimento no son solo 8000 litros como ahí se consideran. Desde el fin de la termoclina (600m), hasta el fondo (3500m) son 2900m verticales. Para fines prácticos podemos nuevamente considerar que los 2900m equivalen a 29000 L de agua verticales cada uno con un área superficial de  $0.001\text{m}^2$  y una altura de 0.1m. Si tomamos el litro mas superficial como referente de distancia, estos 29000 litros a una velocidad de  $125\text{m}\text{día}^{-1}$  tardaran 23.3 días en depositarse. En 23.3 días se deberían acumular ( $[23.3 \text{ días} * 0.004595\mu\text{g L}^{-1}$  promedio de zona disfótica/  $0.0008 \text{ d L}^{-1}$ ) =  $133.83\mu\text{g}$ . Es decir  $(133.83\mu\text{g}$  hipotéticos acumulados /  $0.259\mu\text{g}$  promedio en sedimento) = 516.7 veces mas de lo que realmente hay.

v) Si la tasa de descomposición de Chl a es  $0.07 \text{ partes día}^{-1}$  (Bianchi, 2000; Harvey *et al.*, 1995) y contamos el día cero como el día en que se exporta, entonces en 23.3 días la partícula se habrá degradado ( $23.3 * 0.07$ ) 1.63 veces, que es  $>1$ , y por ende no llegaría nada de Chl a al fondo después de este periodo de tiempo hipotético que tarda en llegar desde el primer día de exportación hasta el día en que alcanza el fondo.

vi) Si tomamos nuestra muestra de los 600m "borde inferior de la termoclina" como referente de material que logro atravesar la picnoclina, sabemos que el promedio de la concentración de Chl a que llega al fondo en columna agua es  $([0.00325 \mu\text{gL}^{-1}$  Fondo] /  $[0.0078 \mu\text{gL}^{-1}$  bajo termoclina] = 0.42) solo el 42% del promedio de Chl a que logra atravesar la picnoclina. Es decir no todo el material exportado llega al fondo, a pesar de que las variables físico químicas se mantengan relativamente constantes por debajo de la termo/picnoclina.

Estos datos (puntos i a vi) nos permiten observar la complejidad que conlleva la exportación, dado que ninguno de los resultados obtenidos a partir de afirmaciones teóricas se acercan a los valores de campo. Primeramente porque consideramos que la partícula se mantiene integra (sin descomposición), con un volumen constante a lo largo de todo el trayecto, y además mantiene su velocidad constante y una caída totalmente vertical. Con estos parámetros debería tardar en acumularse 23 días, y obtendríamos 516.7 veces mas de lo que observamos in situ. Esto no es real debido a que:

- Las corrientes que acarrear la partícula horizontalmente e incluso la resuspenden afectaran la velocidad durante toda la trayectoria.
- La densidad del agua incrementa conforme a la profundidad y también afectara la velocidad de la partícula.
- Solo el 42% de lo que se exporta llega al fondo en columna de agua, que nos dice que la partícula no se mantiene integra durante toda la trayectoria.
- El volumen deberá de cambiar puesto que la partícula al tener fricción puede disminuir, o de lo contrario aumentar si se agrega con otras.
- Los heterótrofos y la actividad metabólica de microorganismos también afectan negativamente la concentración y el volumen de la partícula mientras se completa el ciclo del carbono en la trayectoria hacia el fondo. La tasa de descomposición de  $0.07 \text{ partes día}^{-1}$  nos dice que la Chl a después de 23.3 días de exportación no llegaría al fondo. Sabemos que por agregación en nieve marina, recubrimiento membranoso en heces fecales, disminución de temperatura y compactación por

aumento de presión puede afectar negativamente la tasa de descomposición, y preservarse así por mayor cantidad de tiempo la Chl a.

El alargamiento del tiempo de renovación esta en función de la relación entre el tamaño de los organismos y el tamaño de sus partículas de alimento. El destino del carbono proveniente de ultraplankton (células  $<5 \mu\text{m}$ ) en el ambiente pelágico depende de si este es respirado al ser consumido por:

- a) tintinidos ( $70 \mu\text{m}$ ), resultando en carbono orgánico de vida corta
- b) apendicularios ( $15-20 \text{mm}$ ) donde parte del ultraplankton se canaliza hacia el almacén de carbono (reservorio) de vida larga a través de masa corporal, heces fecales, o estructuras descartadas, o
- c) salpas ( $50-150 \text{mm}$ ) donde las células serán incorporadas como heces fecales de rápido hundimiento, que llegaran a aguas profundas y parte del carbono biogénico podrá ser secuestrado  $>100$  años (Fortier *et al.*, 1994).

Por lo expuesto anteriormente debe considerarse una tasa de descomposición que sea una función multifactorial, que integre cuestiones como la actividad metabólica (microorganismos y heterótrofos en general), temperatura, concentración de  $\text{O}_2$ , y la profundidad a la que la partícula se encuentre.

La combinación azarosa de todos estos factores, físicos y biológicos que actúan sobre la partícula hacen el cálculo de la cantidad de materia orgánica exportada sumamente compleja y es por esto que no existe un relación directa entre lo que hay en columna y sedimento.

#### **DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y GEOGRÁFICA DE LA CHL A EN LA SUPERFICIE DEL MAR VALORES PREVIOS A LA CAMPAÑA SIGSBEE.5: IMÁGENES SEAWIFS**

Reconocemos la limitante de los datos obtenidos por imágenes de satélite:

- a) porque que sus sensores solo perciben los primeros 25m de la superficie marina;
- b) tienen una resolución de 1,2 Km. (los datos LAC) en una franja de 2800 Km. de ancho; y
- c) los datos GAC se obtienen submuestreando los LAC, presentando una resolución de 4 Km. en una franja de 1.500 Km.
- d) si existe nubosidad se afecta la percepción y puede perderse el muestreo

Esto cuestiona la validez de las concentraciones de Chl a superficial en la zona sur occidental del Golfo de México, obtenidas por SeaWiFS, además de que sabemos por las medidas puntuales realizadas *in situ*, que el máximo de Chl a se encuentra sobre la termoclina de 40 a 100m de profundidad, implicando que solo se percibe un porcentaje de la concentración total. Considerando la profundidad de percepción, nos sorprendió que los valores de SeaWiFS presentaran mayor concentración ( $0.011 - 1.085 \mu\text{g L}^{-1}$ , promedio  $0.098 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a) que los valores obtenidos *in situ* ( $0.002 - 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ , promedio de  $0.049 \mu\text{g L}^{-1}$ ) pero sabemos que los valores pueden ser más altos en mayo y junio que en julio, puesto que existe una mayor mezcla en columna de agua generada por los últimos frentes de invierno en la cuenca, y la termoclina puede ser menos profunda, lo cual favorece un incremento de concentración de nutrientes y por ende de Chl a en las capas mas superficiales.

Lo que favorece los resultados de SeaWiFS, es que estos son resultado de un transecto lineal que sigue las mismas coordenadas, pero con un número de datos mucho más grande que los muestreos oceanográficos realizados en *in situ*. Son 226 el número

de datos registrados por mes, que representan el promedio de 30 días de muestreo continuo, con 14.5 órbitas diarias, es decir en un solo estrato (capa de mezcla) obtenemos una muestra más representativa, lo que incrementa la confiabilidad de los resultados. Por lo anterior es evidente la necesidad de un análisis separado de junio y mayo, aunque ambos meses sean considerados como exportadores potenciales del material de Chl a observado en el fondo *in situ* durante el mes de julio (SIGSBEE.5).

Al plasmar el transecto sobre las imágenes de satélite, éstas nos permitieron observar la zona suroccidental del Golfo en una temporalidad más amplia, donde las concentraciones superficiales a lo largo del mes fueron comparables con las observadas *in situ*, dado que seguían el mismo patrón horizontal, e incluso fueron mejor referente ( $R^2$  mayores) del gradiente. Es decir, la concentración en estaciones zona oceánica [ $0.088\mu\text{gL}^{-1}$  (mayo),  $0.11\mu\text{gL}^{-1}$  (junio)] fue menor que la concentración en zona nerítica [ $0.326\mu\text{gL}^{-1}$  (mayo)  $0.278\mu\text{gL}^{-1}$  (junio)].

Las imágenes de satélite fueron muy útiles para saber que las concentraciones superficiales promedio de los meses de mayo, junio y julio eran relativamente equiparables entre sí, es decir que en términos prácticos no afectaban el cálculo de la exportación. Visualmente el color del mar no presentaba diferencias reales, excepto en coordenadas cercanas a la costa, y los valores de concentración numéricos se mantuvieron dentro de un mismo rango. Es decir, no hubo ningún proceso meteorológico o hidrodinámico extraordinario, donde por giros o surgencias se produjera un cambio significativo en la concentración de nutrientes, y que como consecuencia afectara la concentración de Chl a a través del incremento en la producción de fitoplancton en los meses previos a la campaña oceanográfica (Carton y Chao, 1999). Al no aumentar la concentración superficial desmesuradamente en ninguna de las estaciones durante mayo y junio, no se evaluó que existiera una mayor exportación hacia el sedimento de manera diferencial. Es decir que si existió exportación directa de superficie a fondo provocando diferencias en concentraciones observables en los estratos profundos, estos no fueron ventajados por un proceso apreciable por el satélite de SeaWiFS.

#### CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE COLUMNA DE AGUA

Las corrientes en el Golfo de México pueden influir en la distribución espacial del fitoplancton. Las corrientes y giros que se presentan en la zona muestreada pueden tener una influencia importante en la producción primaria de la superficie y en la exportación de este material al fondo del océano (Carton y Chao, 1999; Murphy, 1999; Salas De León y Monreal 1997). Es conocido el efecto que tiene la dirección de los giros en la producción primaria en el hemisferio norte. Los giros anticiclónicos van a ocasionar una convergencia de las aguas hacia el centro por lo cual encontraremos una elevada temperatura (hundimiento de la termoclina) y una baja producción. Por el contrario, un giro ciclónico en el hemisferio norte ocasionará un desplazamiento de las aguas hacia las orillas del giro ocasionando que agua del fondo suba hacia el centro dando lugar a una zona de agua fría (elevación de la termoclina) y con alta producción primaria (Carton y Chao, 1999; Murphy, 1999; Salas De León y Monreal 1997). El como se exporta el material, puede ser afectado por la velocidad de la corriente que afecta la zona y el alcance de su efecto en la profundidad podría cambiar la dirección y la velocidad del material transportado desde superficie hacia el sedimento. Las velocidades máximas de los giros varían desde  $10$  a  $21\text{cms}^{-1}$  a los  $1650$  y  $2250$  m de profundidad. Los giros son

más rápidos en Campeche y la planicie abisal (Welsh e Inoue, 2000), debido a la fricción con tales formaciones. La Formación y migración de el par de giros profundos bajo la corriente de Lazo y su interacción con la topografía proveen a las aguas profundas con un mecanismo de ventilación (Welsh e Inoue, 2000).

En este estudio tenemos un transecto que es afectado por dos corrientes; las estaciones 1-6 se encuentran en la orilla del gran giro anticiclónico, por lo tanto, se puede pensar que la producción en estas zonas será baja, lo que resulta congruente con los nuestros resultados expuestos. Por otra parte, ya que la corriente de este giro tiene una velocidad de  $30\text{cm s}^{-1}$  y un alcance de 1000 m de profundidad (Gómez y Salas, 1997), podemos suponer que la producción generada en la superficie sufrirá una desviación al oeste de aproximadamente  $25.92\text{ Km.d}^{-1}$  en los primeros 1000m, 'esto sólo si suponemos que la partícula tiene densidad y viscosidad similar a la del agua. Si consideramos la Ley de Stokes, que habla de la caída vertical de una partícula fecal teórica con una velocidad de  $16\text{ cm}^{-1}$ , sabremos que la desviación será el producto del vector de ambas fuerzas, por lo que se disminuirá el valor horizontal de  $25.92\text{ Km.d}^{-1}$ , pero se mantendrá la direccionalidad. Las estaciones 7-10 se encuentran cercanas al ciclón del oeste de Campeche, este es un giro frío y por tanto productivo, tiene una velocidad tangencial de  $58\text{ cm}^{-1}$  con una predominancia en el otoño (Molinari *et al.*, 1978 en Gómez y Salas 1997) y en agosto (Nowlin, 1972; en Gómez y Salas, 1997). Ya que las estaciones 7-10 se encuentran a orillas de este giro, no podemos esperar una productividad alta, pero sí una desviación de la exportación del material producido en superficie hacia el oeste. Finalmente, las estaciones 11 y 12 se encuentran muy cercanas a la costa y aparentemente no son influidas por ninguna de las grandes corrientes del Golfo. Es por 'esto que la producción de la superficie puede ser la única responsable de la producción encontrada en el sedimento, y encontramos patrones de acoplamiento mejores que en aquellas estaciones (E1 -E10) que son más dinámicas.

#### **CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES Y LOS VALORES DE CHL A EN COLUMNA DE AGUA, ANÁLISIS CANÓNICO, ANÁLISIS DE COORDENADAS PRINCIPALES**

Sabemos que las doce estaciones del transecto presentan diferentes características batimétricas como la profundidad del fondo marino, que trae consecuencias hidrodinámicas sobre columna de agua (Escobar y Soto 1997; Nowlin, 1971). La cantidad de distancia que tiene que recorrer la materia orgánica que se exporta, y que tan fácilmente se pueden aportar nutrientes del agua de fondo hacia la capa de mezcla dependerán directamente de estos factores topográficos (Pflannkuche *et al.*, 1999; Escobar y Soto 1997). Así mismo, el tipo de corrientes y giros a los que esta sujeta la columna, serán dependientes del posicionamiento geográfico de la estación (Carton y Chao, 1999; Murphy, 1999; Salas De León y Monreal 1997). Sin embargo existen variables ambientales como lo son temperatura, pH y oxígeno que serán igualmente propias de la estación y que podrían estar correlacionadas directamente con la concentración de Chl a. Estas variables fueron medidas y correlacionadas por capas a través del programa canuco de donde se produjo el esquema de coordenadas principales, así como el de RDA.

La ordenación corresponde al arreglo de unidades en un agrupamiento determinado. Consiste en graficar puntos-objeto a lo largo de un eje, representando una relación ordenada, o formando un diagrama de dispersión con dos o más ejes. Las relaciones de orden por lo general son cuantitativas. El término proviene de la representación de objetos (estaciones) como puntos a lo largo de varios ejes de referencia.

Para concebir la ecología, varios descriptores son observados (profundidad, temperatura, pH y oxígeno), cuya variación buscamos relacionar con las estaciones. Para esto se hace un enfoque multivariable consistente en la representación de la dispersión de los objetos en un diagrama multivariable, con un número de ejes igual al número de descriptores que sean significativos (Legendre y Legendre 1998), los cuales fueron representados en la figura 39 como vectores que serán discutidos a continuación:

Vector de "Oxígeno capa de mezcla". En aguas superficiales y poco profundas, donde la productividad es alta, como la E12, y E11 (Promedio =  $6.3 \text{ mgL}^{-1}\text{O}_2$ ) una parte del amonio es asimilado por el fitoplancton antes de que pueda oxidarse. En estratos como la capa eufótica oceánica, de E1 a E9 (Promedio  $3.75 \text{ mgL}^{-1}$ ), la carencia de fitoplancton deja amonio libre que puede oxidarse y reducir la cantidad de  $\text{O}_2$  presente (Libes, 1992). Por esta razón observamos que del lado derecho de este vector se asocian las E11 y E12, y del lado izquierdo las E1 a E9.

Vector de "Oxígeno agua de fondo". Puesto que el agua de fondo en la estación 12 presenta menor cantidad de oxígeno disuelto ( $1.45 \text{ mgL}^{-1}$ ) que el resto de las estaciones, podríamos argumentar en favor del consumo de oxígeno por alta cantidad de materia orgánica en descomposición (Libes, 1992), pero entendemos la dirección de este vector puesto que además de esto, la concentración de oxígeno disuelto de la estación 3 es más del doble ( $8.2 \text{ mgL}^{-1}$ ) que el resto de las estaciones.

Vector "de pH". Las diferencias entre el valor máximo 8.129 (E10) y mínimo 7.98 (E11) no son realmente significativas por ser logarítmicas, y por ende la diferenciación que pretenden los estratos de capa de mezcla y máximo de clorofila no es válida.

Vectores de "Concentración de Chl a en sedimento". Para este estrato, la correlación entre la Chl a y la distancia a la costa fue franca, al igual que la correlación con respecto a la profundidad, donde las estaciones 11 y 12 (talud y reborde continental) se agruparon, distinguiéndose de las estaciones de la planicie abisal E1 - E10.

Vectores de "columna". El posicionamiento general de izquierdo (valores negativos) para estaciones oceánicas y derecho (valores positivos) para estaciones neríticas, se fundamenta en los promedios generales, donde las estaciones neríticas (E12 y E11) presentaron un promedio en la capa eufótica de  $0.106 \mu\text{gL}^{-1}$  y en la capa disfótica de  $0.011 \mu\text{gL}^{-1}$ , en contraste con las estaciones ubicadas en la zona oceánica (E1 a E10) que en la capa eufótica mostraron un promedio de  $0.068 \mu\text{gL}^{-1}$  y en la capa disfótica de  $0.0038 \mu\text{gL}^{-1}$ , con diferencias significativas entre los valores promedio. A este patrón responde también el vector del borde inferior de la termoclina y termoclina.

En capa de mezcla y máximo de clorofila a, la dirección de los vectores es casi indistinguible, porque las condiciones ambientales como temperatura (sólo  $0.3^\circ\text{C}$  de diferencia en el promedio), y concentración de oxígeno disuelto (sólo  $0.04 \text{ mgL}^{-1}$  de diferencia en el promedio) son similares. Por lo tanto apuntan en la misma dirección y agrupan a las estaciones igual que el resto de los vectores de columna, derecha zona nerítica e izquierda zona abisal.

## CONCLUSIONES

Reconocimos a la zona sur occidental del Golfo de México perteneciente a la planicie de SIGSBEE, como una zona oligotrófica con baja concentración de Chl a, tanto el mes de muestreo oceanográfico *in situ*, (Julio), como en los meses anteriores de Mayo y Junio que fueron analizados con el satélite SeaWiFS. A pesar de ello encontramos patrones distinguibles en la distribución espacial y vertical de la clorofila a. El patrón vertical prueba que debajo de la termoclina en la zona disfótica ( $0.0048 \mu\text{g L}^{-1}$  promedio) existe menor concentración de Chl a que en la zona eufótica ( $0.075 \mu\text{g L}^{-1}$  promedio), y que se encuentran los valores máximos sobre la termoclina ( $0.267 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a) y mínimos en el agua de fondo de ( $0.002 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a). Dichas concentraciones corresponden a el patrón de distribución definido por la ecuación  $Y = 4.963X^{-0.941}$ , que presenta una fuerte correlación de  $R^2 = 0.7$  con los valores reales, donde el flujo de Chl a dependiente de la profundidad, que se denomina producción de exportación, decrece rápidamente bajo el borde inferior de la termoclina con un comportamiento casi linear. Solamente el 3.5% cruza la termoclina y se exporta hacia el estrato de borde inferior de la termoclina, mientras que entre 1.2% y 1.4% se exporta hacia los estratos de 1500 m y el fondo. Las concentraciones de Chl a de sedimento superficial mostraron diferencias significativas respecto a las que se encuentran en columna con una ANOVA  $P = 0.011$ , donde los valores de Chl a eran más elevados en el sedimento superficial que en el máximo de Chl a en columna de agua, debido a la acumulación de fitodetrito exportado.

Respecto a el patrón horizontal encontramos que las concentraciones promedio de Chl a fueron significativamente diferentes para la zona nerítica [de talud y reborde continental E10 E11 y E12] y la zona oceánica [de la planicie abisal E1 a E9], con una ANOVA de  $P = 0.019$ , que incluye tanto valores de columna como de sedimento. Con análisis de coordenadas principales, la agrupación de estaciones reconoció que el 98.07% de la varianza que explicó el agrupamiento, se basó en los factores ambientales de Chl a en las zonas de profundidad vertical y su ubicación con respecto a la costa. Las variaciones en concentración dentro de cada estrato fueron explicadas individualmente por el análisis de RDA, donde influían factores ambientales como profundidad, distancia de la costa y concentración de  $\text{O}_2$ , principalmente. Una vez considerados los anillos de giros ciclónicos en la zona, probamos que la variación entre estaciones también estaba definido por el nivel de mar, que movía la termoclina, y consigo la nutriclina verticalmente hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de la posición respecto al centro del giro, lo que maximizó la concentración de Chl a en las estaciones oceánicas cercanas a este.

## VARIACIÓN DE LOS VALORES DE CHL A

La variación batimétrica de la Chl a mostró una disminución por encima ( $0.099$  a  $0.002 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y por debajo ( $0.139$  a  $0.001 \mu\text{g L}^{-1}$ ) del máximo de clorofila ( $0.266$  a  $0.040 \mu\text{g L}^{-1}$ ), estrato que se localizó entre 40 y 100m de profundidad, donde además de la mayor concentración de Chl a promedio ( $0.12 \mu\text{g L}^{-1}$ ), también se presentó la mayor desviación estándar ( $0.071 \mu\text{g L}^{-1}$ ), constituyendo el estrato de mayor variación en la columna de agua ( $p = 0.0156$ ). Por debajo de la termoclina se extingue el PAR (menor a 1.8%), la temperatura disminuye ( $< 26^\circ\text{C}$ ), y se marca también el inicio de la

picnoclina (100 ± 10 m), y de la haloclina (80 -90m), cuyos respectivos valores cambiarán drásticamente el ambiente y consigo la concentración de Chl a.

El "máximo de Chl a" fue tomado como el estrato más representativo de columna de agua, en el cual la variación geográfica de la Chl a mostró una disminución con distancia de la costa donde los valores más bajos se reconocieron en la zona oceánica sobre la planicie abisal, [0.04 a 0.017 µg L<sup>-1</sup> promedio 0.104 (n = 9) µg L<sup>-1</sup>] y los valores más elevados en la zona nerítica sobre talud y reborde continental [0.14 a 0.27 µg L<sup>-1</sup> promedio 0.19 µg L<sup>-1</sup>, (n=3)]. La tendencia general de la columna fue a disminuir en dirección desde la costa hacia la zona oceánica, donde se muestra una relación alta con la distancia a la costa (r = 0.7) y los valores se permiten estimar a lo largo del transecto con la ecuación  $Y = 0.042 + 0.013X$ . Los valores de concentración en estaciones oceánicas fueron fuertemente influidos por el nivel de mar al que se encontraban, bajo la correlación de  $R^2 = 0.778$  que se ajusta a la ecuación ( $y = 131.12x - 1.03$ ). Cabe mencionar que no todos los estratos representan variabilidad suficiente entre estaciones, ni entre profundidades, para poder generar un modelo de columna adecuado a las concentraciones de todos, pero al ser promediados los estratos como capa eufótica (mezcla, máximo de Chl a y Termoclina) y capa disfótica (borde inferior de la termoclina, agua de 1500m y agua de fondo) estos presentan en zona nerítica-eufótica el valor promedio de 0.101 µg L<sup>-1</sup> (n = 9) y en zona oceánica-eufótica de 0.065 µg L<sup>-1</sup> (n= 27), mientras que en zona nerítica disfótica 0.008 µg L<sup>-1</sup> y oceánica-disfótica 0.004 µg L<sup>-1</sup> lo cual confirma las evidencias de diferenciación entre ambas zonas, comprobado por que los promedios de Chl a localizados sobre columna en la zona oceánica mostraron diferencias significativas (p= 0.006) con los de la zona nerítica en la prueba de Newman Keuls.

#### VARIACIÓN DE LOS VALORES DE CHL A EN SEDIMENTO SUPERFICIAL

La variación de la Chl a en sedimento superficial a lo largo del transecto de costa a mar abierto fluctuó de 0.042 µgcm<sup>-3</sup> (E3) a 0.910 µgcm<sup>-3</sup> (E12), donde fue cuatro veces más elevado el valor de para las estaciones localizadas en las zonas del reborde y talud continental, con promedio de 0.71 µgcm<sup>-3</sup> que las estaciones de la zona abisal con promedio de 0.17 µgcm<sup>-3</sup> (n = 9). La regresión entre concentración de Chl a y distancia de la costa, muestra una correlación de  $R^2 = 0.757$  y una  $|R| = 0.87$ . Donde los valores se ajustan a la ecuación  $Y = - 0.0002x + 0.087$ , disminuyendo en concentración conforme se aumenta la profundidad. Este estrato presenta el mejor modelo de todos, donde el gradiente batimétrico es claro, y responde a la prueba de Newman Keuls, que muestra que las concentraciones del sedimento de la planicie abisal son diferentes con respecto a las de talud y reborde continental (P= 0.007).

#### RELACIÓN DE LOS VALORES DE CHL A EN COLUMNA DE AGUA CON LOS VALORES DE SEDIMENTO SUPERFICIAL.

El patrón vertical de distribución de la concentración de la Chl a fue similar en las doce estaciones, donde el flujo de Chl a dependiente de la profundidad "producción de exportación", decrece rápidamente bajo la termoclina, no obstante se presentan ecuaciones diferentes para la zona nerítica que para la zona oceánica. La concentración

de Chl a con respecto a la profundidad en las estaciones oceánicas se relaciona con la ecuación  $Y = 4.23X^{-0.98}$  permitiendo reconocer que solamente un 3.7% llega al fondo. La concentración de Chl a con respecto a la profundidad en las estaciones de talud y reborde continental se relacionan con la ecuación  $Y = 10.74X^{-0.737}$  permitiendo reconocer una exportación de 1.2% más que las estaciones de zona oceánica (4.9% vs. 3.7%), y un mejor ajuste de los promedios a la curva descrita por la ecuación, con una  $R^2$  de 0.8.

En el patrón horizontal encontramos que los valores de Chl a en el sedimento superficial cambiaron con respecto a la profundidad de las zonas batimétricas con una relación lineal que se describe por la ecuación  $Y = -0.0002x + 0.087$  ( $R = 0.87$  y  $R^2 = 0.76$ ). Así mismo encontramos que en la columna los valores de concentración disminuyeron en dirección de la zona oceánica, donde se muestra una relación alta con la distancia a la costa ( $R^2 = 0.7$ ) que se estima con la ecuación  $Y = 0.042 + 0.013X$ . Ambas ecuaciones reconocen una relación estrecha de cambio entre Chl a y distancia a la costa, donde las concentraciones promedio de Chl a fueron significativamente diferentes para la zona nerítica [de talud y reborde continental E10 E11 y E12] y la zona oceánica [de la planicie abisal E1 a E9], con una ANOVA de  $P = 0.019$ , que incluye valores tanto de columna como valores de sedimento, lo que nos habla de un acoplamiento. La ANOVA con la prueba de Newman Keuls permitió reconocer que aunque los valores de columna de agua en la zona nerítica y los valores de sedimento del talud continental son diferentes entre sí ( $P = 0.012$ ), que los promedios de Chl a localizados sobre columna en la zona oceánica mostraron diferencias significativas con los de la zona nerítica ( $P = 0.006$ ), al igual que las concentraciones del sedimento de la planicie abisal se mostraron diferentes con respecto a las de talud y reborde continental ( $P = 0.007$ ). Es decir, aún manejando valores de concentración diferentes, dada la acumulación de fitodetrito sobre el sedimento, los patrones de sedimento y columna de agua son comparables y relacionan ambos estratos denotando un acoplamiento.

#### RELACIÓN DE LOS VALORES DE CHL A OBTENIDOS POR SEA WIFS, CON LOS VALORES OBTENIDOS DE CAMPO

Las concentraciones de Chl a en la superficie del mar evaluadas por medio de los promedios mensuales de las imágenes de satélite correspondientes a los meses de mayo y junio del 2002 fueron similares ( $0.011 - 1.085 \mu\text{g L}^{-1}$ , Promedio  $0.098 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a) a los valores obtenidos de la lectura fluorométrica de las muestras recolectadas *in situ* durante la campaña de SIGSBEE.5, ( $0.002 - 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$  Promedio de  $0.049 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Por el número de datos cercanos a la costa en el transecto de SeaWiFS, el valor promedio ( $0.098 \mu\text{g L}^{-1}$  Chl a), cae cerca del doble de los valores del promedio de la capa de mezcla observados *in situ*, ( $0.049 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Las regresiones nos permiten observar que tanta correlación existe entre los valores de concentración de Chl a de SeaWiFS, y las concentraciones de Chl a obtenidas *in situ* durante el crucero de SIGSBEE.5, donde los valores de  $R^2$  que presenta el estrato de la capa de mezcla muestra una mejor correlación (0.49 y 0.52) con SeaWiFS que el estrato de sedimento (0.25 y 0.09), siendo el mes de Junio el de valor de  $R^2$  mas alto con 0.52, es decir existe una mejor correlación con los valores de julio. Los patrones horizontales de diferenciación ambiental son muy notables en SeaWiFS dado que se encontró que el promedio de estaciones de zona oceánica fue

$0.088\mu\text{gL}^{-1}$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) con una desviación estándar de  $0.071\mu\text{gL}^{-1}$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) y para zona nerítica fue  $0.326\mu\text{gL}^{-1}$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) con una desviación de  $0.016\mu\text{gL}^{-1}$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

La concentración de materia orgánica en el sedimento del sector sur occidental del Golfo de México se encuentra estrechamente relacionada al máximo de clorofila en columna de agua. Las estaciones puntualmente no muestran un acoplamiento entre la concentración de Chl a en columna y la concentración de Chl a en sedimento, por las diferentes hidrodinámicas que definen las fronteras físicas de la termoclina y pycnoclina. Sin embargo al asociar los estratos con parámetros ambientales más generales como son zona eufótica y disfótica, así como la zona nerítica y oceánica, el acoplamiento es evidente. Las ecuaciones de profundidad y distancia de la costa contra concentración de Chl a tanto en sedimento como en columna corresponden a un mismo patrón de disminución en concentración conforme nos alejamos de la costa. Las pruebas de correlación entre distancia de la costa y concentración, como son las regresiones muestran ser significativas con  $R^2 > 0.7$ . Así mismo, las pruebas de ANOVA resultan claves en la distinción de estaciones neríticas de las oceánicas (o bien continentales de abisales), tanto en columna como en sedimento, lo cual prueba la hipótesis planteada.

Apéndices

Anexo I. Matrices del Análisis Canónico

MATRIZ DE CORRELACION								
Chla Eje 1	1							
Chla Eje2	-0.095	1						
Chla Eje3	0.144	-0.261	1					
Chla Eje4	-0.122	0.400	-0.068	1				
Ambiental Eje1	0.957	0	0	0	1			
Ambiental Eje2	0	0.818	0	0	0	1		
Ambiental Eje3	0	0	0.251	0	0	0	1	
Ambiental Eje4	0	0	0	0.084	0	0	0	1
O2 capa de mezcla	0.827	0.270	0.093	0.010	0.865	0.317	0.372	0.124
O2 agua fondo	-0.547	-0.155	0.174	0.033	-0.572	-0.189	0.694	0.394
pH capa de mezcla	-0.352	0.109	0.091	-0.071	-0.374	0.134	0.363	-0.843
pH máximo de clorofila a	0.083	-0.664	0.124	-0.023	0.086	-0.812	0.494	-0.299
Chla eje 1	Chla eje 2	Chla eje 3	Chla eje 4	Amb Eje1	Amb Eje1	Amb eje 3	Amb Eje4	

Anexo II.

O2 capa de mezcla	1		
O2 agua fondo	-0.247	1	
pH capa de mezcla	-0.249	0.108	1
pH máximo de chl a	-0.036	0.329	0.291
			1
O2 capa de mezcla	O2 agua fondo	pH capa de mezcla	pH máximo de chl a

Anexo III

N	nombre	Promedio ponderado	Desviación estándar	Factor inflación
1	clorofila eje1	0	0.945	
2	clorofila eje 2	0	0.288	
3	clorofila eje 3	0	0.088	
4	clorofila eje 4	0	0.073	
5	eje ambiental 1	0	0.905	
6	eje ambiental 2	0	0.235	
7	eje ambiental 3	0	0.022	
8	eje ambiental 4	0	0.006	
1	O2 capa de mezcla	4.175	0.978	1.141
6	O2 Agua de fondo	4.642	1.143	1.199
7	pH capa de mezcla	8.086	0.026	1.168
8	pH máximo de clorofila a	8.044	0.042	1.229

Resumen

Ejes	1	2	3	4	Varianza total
Valores Eigen	0.819	0.055	0	0	1
Correlaciones de ambiente con Clorofila	0.957	0.818	0.251	0.084	
Porcentaje de varianza acumulativa de Clorofila	81.9	87.4	87.5	87.5	
de relación medioambiente clorofila	93.6	99.9	100	100	
Suma de todos los valores Eigen					1
Suma de todos los Valores Eigen canónicos					0.875

Chla data.txt (convertido)

RDA	Ejes Canonicos	4	Covariables:	0	Escala	-1	
Cent./stand.	por muestras	0	0	por especies	1	0	
Sin transformación							
Spec: concentración Chla							
N	Nombre	eje1	eje2	eje3	eje4	peso	1
	EIG	0.818	0.055	0.000	0		
1	Sedimento	2.636	-0.042	0.022	0.163	1	1
2	agua de 3500	0.005	-0.007	-0.342	0.923	1	1
3	agua de 1500	0.005	-0.011	-0.211	0.915	1	1
4	Borde inf . term	0.072	-0.106	0.105	-1.681	1	1
5	Ther moel	0.194	-0.312	-0.512	-1.545	1	1
6	Abov eT	0.061	2.519	-0.773	-0.220	1	1
7	Capa	0.0344	0.7349	2.4426	-0.1142	1	1



Chla (convertido)	data.txt						
RDA	Canonical axes:	4	Covariables:	0	escala:	-1	
Cent./stand.	by samples:	0	0	by species:	1	0	
No transformation							
Samp: puntaje muestras							

N	NOMBRE	EJE1	EJE2	EJE3	EJE4	PESO	l
	EIG	0.818	0.055	0.000	0		
1	1	-0.366	-0.25	0.064	-0.170	1	1
2	2	-0.04	-0.229	0.088	0.120	1	1
3	3	-0.894	-0.251	0.047	-0.028	1	1
4	4	-0.071	0.004	-0.028	0.032	1	1
5	5	-0.103	0.098	-0.062	0.010	1	1
6	6	-0.095	-0.363	-0.084	0.016	1	1
7	7	-0.203	0.188	-0.123	-0.042	1	1
8	8	-0.840	0.319	-0.144	0.021	1	1
9	9	-0.229	-0.097	0.018	0.005	1	1
10	10	-0.856	0.263	0.153	0.027	1	1
11	11	1.033	0.610	-0.010	0.089	1	1
12	12	2.674	-0.292	0.075	-0.087	1	1
13	ORIGIN	-1.088	-0.479	-0.010	0.122	0	0

Chla data.txt (convertida)

RDA	Ejes Canónicos:	4	Covariables:	0	escala:	-1
Cent./stand.	Por muestra	0	0	Por especie:	1	0
No transformada						
CFit: ajuste acumulativo por Chla ajustado						

N	Nombre	eje1	eje2	eje3	eje4	VAR(y)	% EXPLICAT
	FR ajustado	0.818	0.055	0.000	0		
1	Sedimento	0.917	0.917	0.918	0.918	6.2	91.78
2	agua de 3500	0.141	0.159	0.451	0.617	0	61.71
3	agua de 1500	0.163	0.204	0.330	0.513	0	51.33
4	Borde Inf term	0.594	0.68	0.680	0.695	0.01	69.55
5	termoclina	0.170	0.208	0.201	0.22	0.18	20.2
6	sobre Term	0.005	0.655	0.656	0.652	0.54	65.62
7	Capa de mezcla	0.014	0.451	0.494	0.494	0.07	49.46

## Chla data.txt (convertido)

RDA	Ejes Canónicos:	4	Covariables:	0	Escalas:	-1
Cent./stand.	por muestra:	0	0	Por especie:	1	0

No transformada

SqRL: Longitud residual por con ejes s (s=1...4)

N	Nombre	aje1	aje2	aje3	aje4	SQLENG	% FIT
	FR ajustado	0.818	0.055	0.000	0		
1	1	0.184	0.291	0.292	0.293	0.3	3.43
2	2	0.102	0.053	0.054	0.054	0.09	40.23
3	3	0.082	0.019	0.017	0.017	0.87	97.96
4	4	0.021	0.026	0.025	0.025	0.01	-206.22
5	5	0.130	0.138	0.137	0.137	0.03	-438.43
6	6	0.161	0.029	0.029	0.029	0.15	80.63
7	7	0.155	0.125	0.124	0.123	0.09	-30.13
8	8	0.540	0.512	0.512	0.512	0.84	38.83
9	9	0.038	0.060	0.061	0.061	0.06	2.22
10	10	0.130	0.065	0.063	0.064	0.83	92.29
11	11	0.412	0.045	0.045	0.044	1.46	96.93
12	12	0.216	0.143	0.142	0.141	7.27	98.05

## Chla data.txt (converted)

RDA	Canonicos ejes:	4	Covariables:	0	Escala:	-1
Cent./stand.	por muestra:	0	0	por Chla:	1	0

No transformada

Regr: Regresión/canónica  
coeficientes para variables estandarizadas

N	Nombre	aje1	aje2	aje3	aje4
	EIG	0.818	0.055	0.000	0
1	Q2 capa mezcla	0.627	0.108	0.014	0.000
6	Q2 fondo	-0.440	0.047	0.017	0.003
7	pH capa mezcla	-0.224	0.122	0.008	-0.005
8	pH max Chla	0.311	-0.238	0.003	-0.001

Chla data.txt  
(convertido)

RDA	Ejes Canónicos:	4	Covariables:	0	Escala:	-1
Cent./stand.	Por muestra:	0	0	por Chla:	1	0

No transformada  
tVal: t-valores de  
coeficientes regresión

N	NOMBRE	EJE1	EJE2	EJE3	EJE4
	FR EXPLICADA	0.936	0.0634	0.0006	0
1	O2 capa mezcla	5.6891	1.6204	0.4281	0.0109
6	O2 fondo	-3.8934	0.6937	0.4799	0.1182
7	pH capa mezcla	-2.0151	1.8123	0.2557	-0.17
8	pH sobre termoc	2.7195	-3.4349	0.0915	-0.0505

Chla data.txt (converted)

RDA	Ejes Canónicos	4	Covariables:	0	escala:	-1
Cent./stand.	by samples:	0	0	by species:	1	0

No transformada  
StBi: coordenadas de Chla  
para biplot de valor t

N	Nombre	ejc1	ejc2	ejc3	ejc4	VAR(y)	% EXPL
	EIG	0.818	0.055	0.000	0		
1	Sedimento	0.204	-0.003	0	0	6.2	91.78
2	agua de 3500	0.401	-0.535	0	0	0	61.71
3	agua de 1500	0.252	-0.483	0	0	0	51.33
4	Baja Termoclina	0.15	-0.222	0	0	0.01	69.55
5	Termoclina	0.413	-0.663	0	0	0.18	20.2
6	Máximo de Chla	0.002	0.129	0	0	0.54	65.62
7	Capa de mezcla	0.008	0.190	0	0	0.07	49.46

Chla data.txt (convertido)

RDA	Canonónicos ejes:	4	Covariables:	0	Escala
Cent./stand.	por muestra:	0	0	por Chla:	1

No transformada  
EtBi: coordenadas  
ambientales para valores t de biplot

N	NAME	EJE1	EJE2	EJE3	EJE4
	EIG	0.818	0.055	0.000	0
1	O2 capa mezcla	0.587	0.101	0	0
6	O2 fondo	-0.402	0.043	0	0
7	pH capa mezcla	-0.208	0.113	0	0
8	pH max Chla	0.280	-0.215	0	0

Chla data.txt (convertidas)					
RDA	Ejes Canónicos:	4	Covariables:	0	Escala: -1
Cent./stand.	Por muestras:	0	0	para Chla:	1 0
No transformada					
CorE: Inter set de correlaciones de variables ambientales con ejes					
N	NOMBRE	EJE1	EJE2	EJE3	EJE4
	FR EXTRAIDO	0.2795	0.136	0.0157	0.0017
1	O2 capa mezcla	0.8268	0.2596	0.0933	0.0104
6	O2 fondo	-0.5471	-0.1552	0.1741	0.0333
7	pH capa de mezcla	-0.3582	0.1092	0.0909	-0.0712
8	pH máx de Chla	0.0825	-0.6638	0.1239	-0.0253

Chla data.txt (converted)

Chla data.txt (converted)					
RDA	Ejes Canónicos:	4	Covariables:	0	Escala: -1
Cent./stand.	Por muestras:	0	0	para Chla:	1
No transformada					
BipE: puntaje de Biplot para variables ambientales					
N	NOMBRE	EJE1	EJE2	EJE3	EJE4
	R(SPEC,ENV)	0.957	0.817	0.250	0.084
1	O2 cap	0.784	0.074	0.008	0.000
6	O2 botto	-0.517	-0.044	0.015	0.004
7	pH cap	-0.338	0.031	0.008	-0.005
8	pHaboveT	0.078	-0.192	0.011	-0.008

Chla data.txt (converted)					
RDA	Ejes Canónicos:	4	Covariables:	0	Escala: -1
Cent./stand.	Por muestras:	0	0	para Chla:	1 0
No transformada					
CentE: Centroides de variables ambientales (mean.gt.0) de diagrama de ordenación					
N	NOMBRE	EJE1	EJE2	EJE3	EJE4
	R(CHLA AMB)	0.9573	0.8177	0.2508	0.0844
1	O2 capa mezcla	0.1831	0.0175	0.0019	0.0002
6	O2 fondo	-0.1274	-0.011	0.0038	0.0006
7	pH capa mezcla	-0.0011	0.0001	0	0
8	pH sobre termocl	0.0004	-0.001	0.0001	0

Chla data.txt  
(convertida)

RDA	Ejes Canónicos:	4	Covariables:	0	Escala:	-1
Cent./stand.	Por muestras:	0	para Chla:	1		0

No transformada  
SamE: muestra donde  
los puntajes son  
combinaciones  
lineares de variables  
ambientales

N	NOMBRE	EJE1	EJE2	EJE3	EJE4	PORCEN	% AJUS
	EIG	0.818	0.055	0.000	0		
1	1	-0.489	0.167	-0.009	0.001	1	3.43
2	2	0.071	-0.29	-0.001	-0.001	1	40.23
3	3	-1.015	-0.227	0.054	0.009	1	97.96
4	4	-0.202	-0.067	-0.046	0.014	1	-206.22
5	5	0.233	-0.034	-0.005	-0.002	1	-438.43
6	6	0.043	-0.333	-0.004	-0.004	1	80.63
7	7	-0.523	0.115	-0.006	-0.004	1	-30.13
8	8	-0.200	0.047	-0.001	-0.0011	1	38.83
9	9	-0.399	0.079	-0.008	-0.003	1	2.22
10	10	-1.034	0.205	0.004	-0.007	1	92.29
11	11	1.172	0.533	0.019	0.005	1	96.93
12	12	2.350	-0.183	0.007	-0.002	1	98.05

## REFERENCIAS

- Aguirre G. R. (2002). Primary production in the southern Gulf of Mexico estimated from solar-stimulated natural fluorescence. *Hidrobiológica* 12 (1): 21-28.
- Andrade, C.A., and E.D. Barton, 2000: Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 105, 26191-26201.
- Beaulieu, E (2002). Accumulation and fate of phytodetritus on the sea floor. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 40: 171-232.
- Bianchi, S.T., Douglas C., Biggs, C., Lambert, J. (1995). Distribution of Chlorophyll A and Phaeopigments in the Northwestern Gulf of Mexico: a comparison between Fluorometric and High Performance Liquid Chromatography Measurements. *Bulletin of Marine Science* 56 (1): 25 -32.
- Bianchi, S.T., Johansson, B., Ragnar E. (2000). Breakdown of phytoplankton pigments in Baltic sediments: effects of anoxia and loss of deposit feeding macrofauna. *Journal of Experimental Marine, Biology and Ecology* 251: 161 - 183.
- Carton, J.A., and Y. Chao, 1999: Caribbean Sea eddies inferred from TOPEX/POSEIDON altimetry and a 1/6° Atlantic Ocean model simulation, *Journal of Geophysical Research*, 104, 7743-775
- Escobar E. y Soto L. A. (1997). Continental shelf benthic biomass in the Western Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research* 17 (6): 585 -604.
- Fortier L., Jaques Le Fevre, Louis Legendre (1994). Export of biogenic carbon to fish and to the deep ocean: the role of large planktonic microphages. *Journal of Plankton Research* Vol. 16 No 7. pp. 809 -839.
- Gooday, A., Turley, C. (1990). The Deep Sea Bed: Its Physics, Chemistry and Biology,, pp 119 -138, *Philos. Trans. R. Soc. Lond., A., Vol 331*
- Gordon, A.L. (1967). Circulation of the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research* 72: 6207-6223.
- Hara S. and Koike, J. (2000). Dynamics of Organic Marine Aggregates Nanometer Colloids to Marine Snow pp. 277-299. *Dynamics and characterization of Marine Organic Matter*. Terra Scientific Publishing Company Tokyo edited by Nobuhiko Handa. *Ocean Science Research Volume 2*.
- Hoffman, E.E. and Worley, S.J. (1986). Circulation of the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 91: 14221-14236

- Legendre L., Rassoulzadegan R. (1996). Food Web mediated export of Biogenic Carbon in Oceans: environmental control. *Marine Ecology Progress Series* 145: 179 – 193.
- Legendre L. y Legendre P. (1998). *Numerical Ecology*. Second Edition, Developments in Environmental Ecology. Elsevier Scientific Publishing Company, Netherlands. 387 – 633 pp.
- Libes M. Susan. (1992). *An introduction to Marine Biochemistry*. John Wiley and Sons Inc.
- Müller Kräger F. E. y Walsh, J. J. (1991). On the seasonal Phytoplankton Concentration and Sea surface Temperature Cycles of the Gulf of Mexico as Determined by Satellites. *Journal of Geophysical Research*. Volume 96. 12645 – 12665 pp.
- Murphy, S.J., H.E. Hurlburt, y J.J. O'Brien, 1999: The connectivity of eddy variability in the Caribbean Sea, the Gulf of Mexico, and the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 104, 1431-1453
- Newton, P.P., Lampitt, R.S., Jickells, T.D., King, P. and Boutle, C. (1994). Temporal and spatial variability of biogenic particle fluxes during the JGOFS northeast Atlantic process studies at 47°N, 20°W (1989-1990). *Deep Sea Research I*. 41: 1617 – 1642.
- Nobuhiko H. (2000) *Ocean Science Research Volume 2* Terra Scientific Publishing Company Tokyo.
- Nowlin W.D. McLellan (1967). A characterization of the Gulf of Mexico waters. *Inter. Journal Marine Research* 25: 29-59
- Nowlin W.D. (1971). Water Masses and general circulation of the Gulf of Mexico. *Ocean Continent* 452: 173 -178.
- Pequegnant W. E. (1983). The ecological communities of the continental slope and adjacent regiments of the Northern Gulf of Mexico. Prepared by TerEco Corporation for Minerals Management Service, U.S. Department of the Interior. Contract AA851 –CTI-12. p 398 p + Append.
- Pfannkuche, O. A. Boetius, et.al. (1999). Responses of deep sea Benthos to Sedimentation patterns in the North East Atlantic in 1992 *Journal of Deep Sea Research* 46: 573-596.
- Riaux, G., Chretiennot, D., Descolas, G. (1995). *Marine Geology* Marine. Geology Volume 123. No. 3 – 4. pp. 239 –252.
- Rodger H., John. H., Tuttle y Tyler B. (1995). Kinetics of phytoplankton decay during

- simulated sedimentation: changes in biochemical composition and microbial activity under oxic and anoxic conditions. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. Volume 59, p 3367-3377.
- Romankevitch, E. A. (1984). *Geochemistry of Organic Matter in the Ocean*. Ed. Springer Heidelberg, USA, 334 p.
- Salas De León, D. A., y Monreal G. M. A. (1997). *Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana.*
- Schlesinger, W.H. and Melack J.M. (1981). *Transport of Organic Carbon in The World Rivers*. *Tellus* 33: 172-187.
- Schultz Horst D., Zabel, Mattias (2000). *Marine Geochemistry*. Springer Heidelberg, pp 128-138.
- Smith Craig R., Hoover. Daniel J. E. Doan Shawn. H. Pope Robin, J. Demaster. David, C. Dobbs Fred and Altabet Mark A. (1996). *Phydetritus at the abyssal seafloor across 10° of latitude in the central equatorial Pacific*. *Deep Sea Research II*, Volume 43 (4-6): 1309-1338
- Smith Craig R., Hoover. Daniel J., Doan Shawn E, Pope Robin H., Demaster David J., Dobbs Ferd C. y Altabet Mark A. (1996). *Deep sea Research III* 43 (4-6): 1309-1338.
- Soto L., Escobar E. (1995). *Coupling mechanisms related to benthic production in the SW Gulf of Mexico*. In: Eleftheriou A, Ansell A, y Smith J. (eds.) *Biology and Ecology of shallow coastal waters Proc 28<sup>th</sup> European Symposium*. International Symposium Series 233-242.
- Stephens, M.P., Kadko, D.C. Smith, C.R., Latasa, M. (1997). *Chlorophyll a and pheopigments as tracers of labile carbon at central equatorial Pacific seafloor*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 4605-4619.
- Tissot B.P. y Welte, D.H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer Verlag, Heidelberg, 699 pp.
- Trees, C. C., M.C. Kennicutt, II and J.M. Brooks (1985). *Errors associated with the standard fluorimetric determination of chlorophylls and pheopigments*. *Mar. Chemistry* 17: 1-12.
- Vidal, F. V., Vidal, V. M., Rodríguez, P. F., Zambrano, L., Casillas, J., Rendón, R. y Jaimes de La Cruz, B. (1998). *Circulación del Golfo de México*. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 46: 167-170.

- Volkman, J. K., Barret, S. M., Blackburn, S. I., Mansour, M. P., Sikes, E. and Glein, F., (1998). Microalgal Biomarkers: A review of recent research developments. *Org. Geochem* 29: 1163 – 1179.
- Walsh, J. J. (1989). Nitrogen exchange at the continental margin: A numerical study of the Gulf of Mexico. *Programs In Oceanography* 23: 248 -301.
- Welsh, S.E. e Inoue, M. (2000) Loop current rings and the deep circulation in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research C. Oceans* 105 (C7): 16951 - 16959.
- Weimer R.C. (2000) Estadística, segunda edición, compañía editorial continental S.A.de C.V. México.
- Yaorong Q., Jochens A. Q., Mahlon C. K., and D. Biggs (2003). Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass and community structure over the continental margin of the northeast Gulf of Mexico based on pigment analysis. *Continental Shelf Research* 23: 1 –17.
- Yoon, W., Kim S. y Han. K. (2001). Morphology and sinking velocities of fecal pellets of copepod, molluscan, euphausiid, and salp taxa in the Northeastern tropical Atlantic. *Marine Biology* 139: 923 – 928.

Páginas Web consultadas:

[www.oceancurrents.rsmas.miami.edu](http://www.oceancurrents.rsmas.miami.edu)

<http://topex-www.jpl.nasa.gov>

<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>

[www.dgbiblio.UNAM.mx](http://www.dgbiblio.UNAM.mx)

## AGRADECIMIENTOS

- Al ICML UNAM-CU y al director Dr. Adolfo García Gasca por el apoyo a este trabajo de investigación durante su gestión.
- A la Unidad Académica en Sistemas Oceanográficos y Costeros del ICML UNAM-CU por apoyo y facilidades brindadas para el desarrollo de este estudio.
- A las tripulaciones del B/O Justo Sierra de la UNAM por el apoyo para la recolecta de los materiales estudiados en este trabajo.
- Al CONACyT por el financiamiento parcial de este proyecto a través del apoyo Variación de la estructura comunitaria del bentos abisal en el Golfo de México, Convocatoria Ciencia Básica SEP CONACyT 2002 Clave 40158, y apoyo parcial de los proyectos CONACyT G35442-T, CONACyT G-27777B
- A la DGAPA UNAM proyecto IN211200 por el apoyo con la beca de licenciatura de Kim Ley Cooper durante sus etapas 12 y 13 y financiamiento parcial para el desarrollo de este proyecto.
- A los miembros del jurado:

Dr. Javier Alcocer Durand, por su apoyo teórico, práctico y anímico desde los niveles de taller en la licenciatura, hasta la realización de la tesis, además de el uso de el fluorómetro en su laboratorio en Iztacala.

Dr. Javier Carmona Jiménez, por las observaciones y comentarios que ayudaron a reestructurar la tesis.

Biólogo Luis Alberto Oseguera Pérez, por las observaciones y revisión teórica de la tesis, así como el apoyo técnico en Iztacala

Dr. Raul Aguirre Gómez y su grupo de trabajo en el Instituto de Geografía, en especial Olivia Salmerón por aportar las imágenes de satélite, y ayudarme en la interpretación de los datos provenientes de estas. También por dejarme llevar el curso de Imágenes de Satélite del ICMYL con el.

- A la Dra. Elva Escobar, directora de esta tesis por dejarme participar en el proyecto junto con ella, por todo su apoyo teórico, práctico, técnico y emocional que me permitió sacar adelante la tesis. Por invitarme a el crucero de SIGSBEE.6, al congreso en New Orleans y el resto de innumerables apoyos que me permitieron seguir aprendiendo. Además por ser también directora de servicio social y maestra de taller en la licenciatura, y abrirme los ojos a como se hace ciencia en México.
- Al Dr. Luis A. Soto, Laboratorio de Ecología de Bentos del ICML UNAM-CU, por el espacio otorgado a la Dra. Escobar para que se pudiera llevar a cabo este trabajo de tesis.
- Al Dr. L. Salas, por ayudarme con surfar e interpretación de corrientes.
- A Ignacio Palomar por su ayuda en toda el área técnica de Computo
- A mis compañeros de laboratorio como Fernanda Adame por sugerencias y apoyo en el análisis

de datos y uso del Fluorometro, Manuel por proporcionar las fotos de Máximo de Chl a, y Diana por ayudarme con bibliografía .

- A mi padre Juan Ley y madre Jennifer cooper por todo el apoyo a lo largo de mi vida académica desde el punto de visto económico, emocional y de orientación tanto en los momentos más difíciles como en los mejores
- A mi hermano Yusen por inspirarme y darme ánimos en innumerables cosas a lo largo de toda la carrera y formación.
- A Clara por compartir conmigo tres de mis años en la facultad y ser siempre un apoyo incondicional. Así mismo a mis amigos del pulpo, y de la carrera Diego, Carlo, Lucia, Neto, Poncho, Rafa, Beto, Vanesa, Laura, Barbara, Victor, Nicolas, Alejandra, Pablo, Citali, Andrea, Mariana, Conzanza(s), Aline, Yosune, Ismael, Elda, Ximena, Yvette, Olmo. A los del Cenote Azul por aguantarme: Emiliano, Juan Carlos, Adrian, Virginia, Magda, Adelaida, Rosario, Tatiana, Jackie, Aurora, Laura, Melinda, Iztel. A todos los PUMAS futbol americano.1999-2003.