



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

Proceso de acoplamiento pelágico-béntico en los ambientes de
plataforma y talud continental del Noroeste del Golfo de México

T E S I S

que para optar por el grado de:

Maestro en Ciencias
(Biología Marina)

presenta:

Raúl Galván Bazán

Tutor Principal:

Dr. Luis Arturo Soto González
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

Comité Tutor:

Dr. Sergio Licea Durán
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Dra. Laura Elena Sanvicente Añorve
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

Dr. Alfonso Vázquez Botello
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

Dr. Jorge Zavala Hidalgo
Centro de Ciencias de la Atmósfera

México, D. F., Octubre 2014



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.



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

Proceso de acoplamiento pelágico-béntico en los
ambientes de plataforma y talud continental del
Noroeste del Golfo de México

T E S I S

que para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias
(Biología Marina)

presenta

Raúl Galván Bazán

Director de Tesis: Luis Arturo Soto González

Comité Tutorial: Sergio Licea Durán
Laura Elena Sanvicente Añorve
Alfonso Vázquez Botello
Jorge Zavala Hidalgo

México, D. F., 2014

Índice

1. Resumen	1
2. Introducción	2
3. Zona de estudio	3
4. Material y métodos	3
4.1. Muestreo de sedimentos	4
4.2. Análisis de las variables de la zona béntica	4
4.3. Muestreo en la columna de agua	6
4.4. Análisis estadístico de la distribución de clorofila-a en la columna de agua	7
4.5. Análisis de imágenes satelitales de clorofila-a y patrón de corrientes superficiales	8
5. Resultados	9
5.1. Componentes principales en zona béntica	9
5.2. Distribución espacial de carbono orgánico en sedimentos	11
5.3. Análisis de la distribución espacial de clorofila-a en la columna de agua	13
5.4. Análisis de imágenes satelitales de clorofila-a y corrientes oceánicas	15
6. Discusión	22
6.1. Carbono orgánico en sedimentos	22
6.2. Clorofila-a en columna de agua	25
6.3. Patrones de clorofila-a a partir de datos satelitales	27
6.4. Factores que afectan la interacción entre los ambientes pelágico y béntico en el noroeste del Golfo de México	29
7. Conclusiones	30
Agradecimientos	31
Referencias	32

1. Resumen

Se analizaron concentraciones de carbono orgánico en sedimentos, y de clorofila-a en la columna de agua, en dos estaciones del año distintas (julios-agosto y enero-febrero), en el noroeste del Golfo de México. Las regiones frente al río Bravo, así como frente al río Soto la Marina, presentaron diferencias significativas, en la concentración de carbono orgánico en sedimentos, entre las dos estaciones del año analizadas. También se encontraron diferencias estacionales de clorofila-a en la columna de agua, éstas fueron mayores frente a la desembocadura de los ríos Bravo y Soto la Marina.

A partir de un análisis multivariado, se identificaron cuatro patrones espaciales para cada una de las dos estaciones del año estudiadas, determinados por conjuntos de variables cuantificadas en sedimentos y agua de fondo. Se presume que estos patrones indican regiones con procesos de sedimentación, o composición sedimentaria, similares. Estos patrones fueron comparados con otros patrones, derivados a partir del análisis de valores satelitales de clorofila-a registrados durante nueve años. Los patrones derivados a partir de valores de clorofila-a satelitales mostraron que la región norte del área de estudio y la localizada frente al río Soto la Marina presentan las variaciones estacionales más elevadas de concentración de clorofila-a. Estas variaciones son provocadas por varios factores, como la influencia de ríos, los patrones de corrientes y fenómenos atmosféricos. Se postula que la variación de clorofila-a en la columna de agua, vista como representante de la producción primaria, es la principal causante de la concentración de carbono orgánico observada en sedimentos y se discuten otros procesos que pueden estar involucrados.

2. Introducción

El acoplamiento pelágico-béntico es un proceso que ocurre en ambientes acuáticos epicontinentales y oceánicos, que consiste en el intercambio de materia, entre el ambiente pelágico y béntico, a partir de interacciones entre el agua y los sedimentos (Giordani 2002; Raffaelli *et al.* 2003). El proceso de acoplamiento es importante pues prácticamente todos los organismos marinos dependen del flujo de nutrientes entre la zona fótica y la béntica. Asimismo, porque durante este proceso, parte del CO₂ atmosférico, que durante la fotosíntesis es transformado en materia orgánica, es almacenado en los sedimentos y eventualmente “secuestrado” en ellos (Wollast 1998; Escobar-Briones y García-Villalobos 2009).

Varios trabajos han abordado el estudio del acoplamiento pelágico-béntico en diferentes partes del mundo y de diferentes maneras (Longhurst 1983; Grebmeier *et al.* 1988; Ambrose y Renaud 1995; Danovaro 1999; Duineveld *et al.* 2000; Soetaert *et al.* 2000; Rathburn *et al.* 2001; Dale y Prego 2002; Giordani 2002; Soto y Escobar-Briones 1995; Liu *et al.* 2007). En resumen, la cantidad de materia orgánica (MO) en los sedimentos se ve afectada por la variación espacio-temporal de la tasa de producción primaria en la zona fótica, la profundidad en la columna de agua, distancia a la costa, influencia de ríos, tasa de remineralización en la columna de agua y sedimentos, aunque otros factores también pueden estar involucrados (Wollast 1998).

En el Golfo de México, específicamente en la región noroeste de la ZEE (Zona Económica Exclusiva) de México, la información relativa al proceso de acoplamiento es bastante escasa (Soto y Escobar-Briones 1995). Aunque hay estudios que han cuantificado la productividad primaria en la columna de agua, o la biomasa en los sedimentos, éstos no han establecido una conexión concreta entre los sistemas pelágico y béntico (Escobar-Briones y Soto 1997; Signoret *et al.* 1998; Escobar-Briones y García-Villalobos 2009).

Debido a la falta de información mencionada, este trabajo se enfocó en la identificación de patrones espaciales, en sedimento y columna de agua, que reflejen la conexión entre la zona pelágica y la béntica. Con este fin, se analizaron variables del sedimento, y de la columna de agua, obtenidas durante dos estaciones del año distintas. Los muestreos fueron parte del proyecto MARZEE (Marco Ambiental de las Condiciones Oceanográficas en el Sector NW de la ZEE de México en el Golfo de México). También se analizaron valores de clorofila-a satelitales (MODIS-Aqua R2013.1), correspondientes a los años 2003 - 2011. Por medio de la implementación de un modelo aditivo, se identificaron regiones con diferencias, estadísticamente significativas, de concentración de carbono orgánico en sedimentos, entre las dos estaciones del año en las que se realizaron muestreos. También se identificaron diferencias significativas en la concentración de clorofila-a en la columna de agua, entre ambas campañas. Por medio de un análisis de componentes principales, se revelaron patrones espaciales, en la zona béntica, caracterizados por un conjunto de las variables cuantificadas durante las dos campañas realizadas. Un análisis relacionado al de componentes principales se aplicó a los valores de clorofila-a satelitales para revelar patrones espaciales, y temporales, con concentraciones de clorofila-a similares. La información obtenida por medio de los análisis fue cotejada con mapas de distribución mensual promedio de clorofila-a, y con los vectores de corrientes oceánicas superficiales de la zona estudiada.

3. Zona de estudio

El Golfo de México es un mar semi-cerrado, oligotrófico en mar abierto, pero puede llegar a ser meso- o eutrófico en la zona costera (Manzano-Sarabia y Salinas-Zavala 2008; Xue *et al.* 2013). Según Antoine (1972), el Golfo de México se puede dividir en siete provincias geográficas. La denominada “plataforma continental y pendiente del oeste del Golfo de México”, localizada desde el sur de Veracruz hasta el norte del Río Bravo, es la que comprende el área de estudio del proyecto MARZEE. Esta región tiene una pendiente de aproximadamente 1° (Wilhelm y Ewing 1972) y presenta pliegues cubiertos de sedimento, paralelos a la costa, y que pueden impedir el transporte de sedimentos hacia la cuenca del Golfo (Antoine 1972). Varios ríos desembocan en el Golfo de México, pero se destacan (de norte a sur) el Bravo, Soto la Marina, y Pánuco. El aporte de estos ríos es limitado, en especial si se compara con otras regiones del Golfo (Xue *et al.* 2013). Otra característica destacable es la Laguna Madre, si bien el intercambio de materia entre ésta y el océano es limitada.

Esta provincia también es clasificada como la plataforma Tamaulipas-Veracruz (TAVE) (Zavala-Hidalgo *et al.* 2003), la cual colinda al norte con la plataforma de Louisiana-Texas (LATEX) y al sur con la plataforma de la bahía de Campeche. Aunque pocos, los estudios relacionados con la circulación de esta sección del Golfo muestran que los patrones de circulación se alteran estacionalmente, y que pueden dar origen a cambios de temperatura, salinidad, y surgencias costeras (Zavala-Hidalgo *et al.* 2003; Zavala-Hidalgo *et al.* 2006). Durante primavera y verano, en la zona limítrofe entre las plataformas de LATEX y TAVE, la convergencia de vientos puede producir cambios en la dirección de la corriente oceánica que fluye paralela a la costa, lo que a su vez provoca una confluencia de corrientes que genera arrastre lateral hacia mar adentro. Esta misma zona puede verse afectada por la formación de ciclones tropicales durante verano-otoño, y por el paso de eddies, estos últimos sin una estacionalidad regular (Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009; Xue *et al.* 2013).

Se reconocen dos periodos de tiempo en los que las condiciones climatológicas, e hidrológicas, son diferentes en el Golfo de México. Uno en invierno, durante el cual la columna de agua se mezcla debido a los fuertes vientos provenientes del norte (llamados “Nortes”); en este periodo se observan los valores máximos de clorofila-a en superficie. El otro periodo es durante el verano, en el que la columna de agua se estratifica, y se presentan los valores mínimos de concentración de clorofila-a en superficie (Soto y Escobar-Briones 1995; Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009; Xue *et al.* 2013).

4. Material y métodos

El área de muestreo comprende la sección noroeste del Golfo de México, dentro de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México, dentro de las latitudes $22.50^\circ - 25.90^\circ$ N, y las longitudes $95.40^\circ - 97.60^\circ$ W. Dentro de esta área se realizaron muestreos a lo largo de siete (MI) y cinco (MII) transectos perpendiculares a la costa. En cada transecto se establecieron cinco estaciones en las profundidades de 50, 100, 200, 500 y 1500 m. La Fig. 1 muestra las estaciones muestreadas para las dos campañas diferentes, que realizadas en dos épocas del año distintas. Para los análisis realizados a partir de datos satelitales se decidió abarcar una zona ligeramente más amplia y que contiene el área de muestreo original (longitudes $98^\circ - 94^\circ$

W, latitudes 21° - 27° N). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el lenguaje y ambiente de programación R (R Core Team 2013), así como varios de los paquetes disponibles para el mismo. Todas las gráficas fueron creadas usando el paquete *ggplot2* (Wickham 2009) para R.

4.1. Muestreo de sedimentos

Se realizaron muestreos a lo largo de un gradiente latitudinal, y longitudinal, durante julio - agosto 2010 (MI), y enero - febrero 2011 (MII). En las estaciones dentro de la plataforma (50, 100, y 200 m de profundidad), la recolección de sedimentos se efectuó por medio de una draga Smith McIntyre (0.13 m² de área, 17 cm de penetración). En las estaciones profundas (500, 1000, y 1500 m), se utilizó un nucleador de caja Reineck (0.24 m² de área, 80 cm de penetración). Se recolectaron sedimentos en puntos aleatorios de la draga utilizando una espátula, los cuales fueron transportados a bolsas o recipientes plásticos, e inmediatamente almacenados en refrigeración hasta su procesamiento.

Se cuantificó el contenido de carbono orgánico (C_{org}) por el método de Walkley (1947), modificado por Ortiz-Hernández *et al.* (1993). La concentración de carbono inorgánico (C_{inorg}), carbono total (C_T), nitrógeno total (N_T), y materia orgánica (MO), se cuantificaron utilizando un analizador elemental CHNS/O Perkin Elmer 2400 en modo CHN. La cuantificación de aluminio (Al), magnesio (Mg), hierro (Fe), níquel (Ni), cobalto (Co), cromo (Cr), y vanadio (V), se llevó a cabo utilizando un espectrómetro secuencial de rayos X (Siemens SRS 3000), equipado con un tubo de rodio y ventana de berilio de 125 μ m. También se cuantificaron los hidrocarburos alifáticos y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (UNESCO 1976). Se determinó el $\delta^{13}C_{CV\text{PDB}}$ ($\delta^{13}C$) por medio de un equipo Finningan Delta Plus XL dual acoplado a un analizador elemental Flash 1112EA con Conflo III como interfase y un automuestreador A200S. También se realizó la clasificación granulométrica de los sedimentos (Vázquez *et al.* 2011).

4.2. Análisis de las variables de la zona béntica

Se utilizó un modelo aditivo generalizado (Wood 2004) para ajustar el porcentaje de materia orgánica en los sedimentos (variable de respuesta) en función de la posición geográfica de las estaciones y la campaña de muestreo (variables independientes). Este modelo es una extensión del modelo lineal, con la peculiaridad de que la relación entre la variable dependiente y la, o las, variables independientes (continuas), es dividida en secciones. Dentro de éstas se ajusta, de manera individual, la respuesta entre la variable dependiente e independiente(s). En las regiones donde se juntan dos secciones diferentes la respuesta es "suavizada", esto con el fin de que la función resultante sea continua (Zuur 2012).

Se definió un suavizante bidimensional en función de la longitudinal y la latitud. La incorporación de la variable explicativa "campaña" permitió reconocer si existen diferencias, estadísticamente significativas, entre los valores de carbono orgánico entre las dos campañas en cuestión. La fórmula de dicho modelo es:

$$C.org_{ij} = \alpha + s(Longitud_i, Latitud_i) : Camp_{ij} + \varepsilon$$

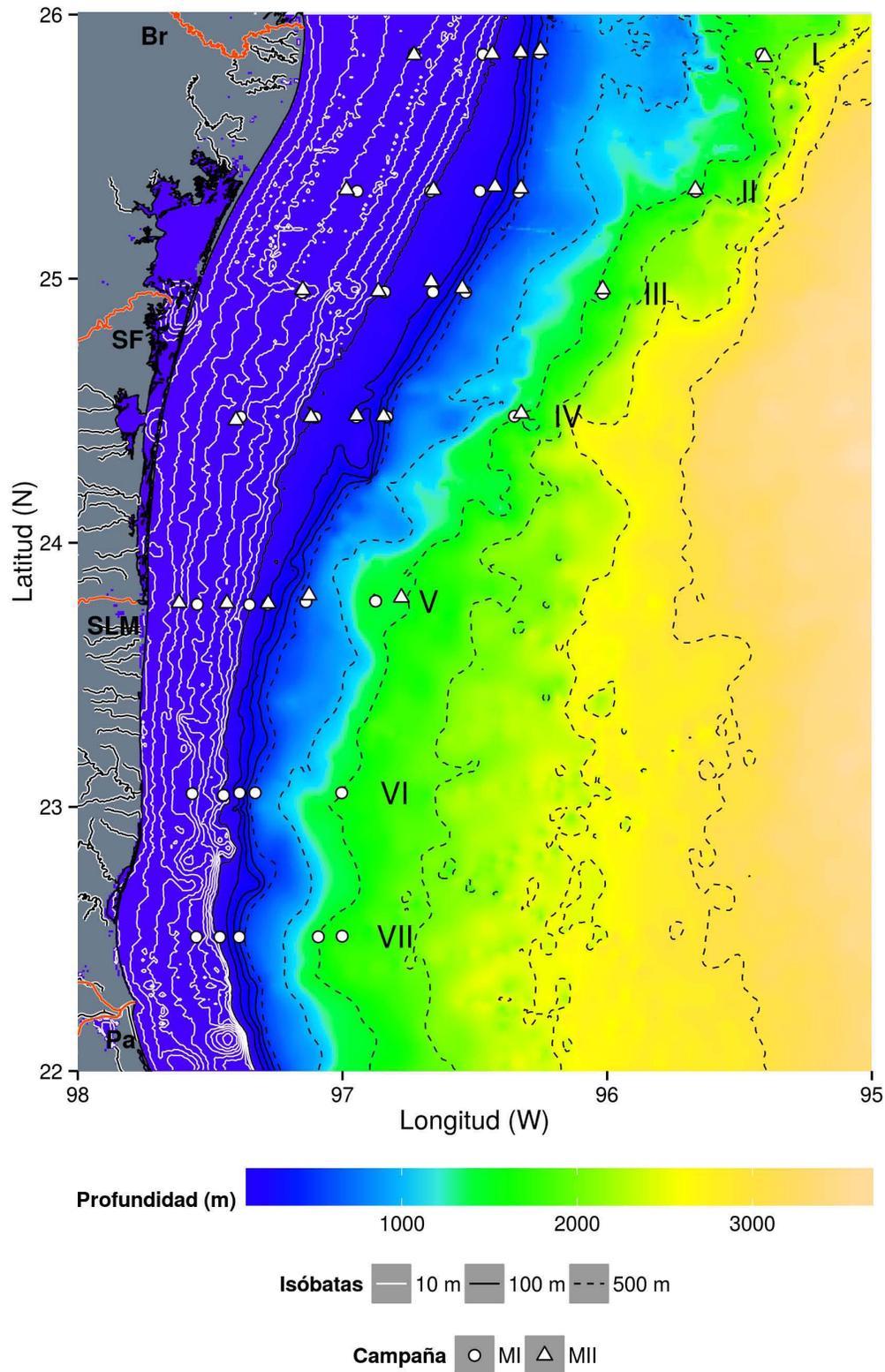


Figura 1: Posición geográfica de los puntos de muestreo de las campañas MI y MII. Se indican los ríos de la zona y se resaltan los ríos principales: Bravo (Br), San Fernando (SF), Soto la Marina (SLM), y Pánuco (Pa). I-VII identifican a cada transecto.

Donde $s(\text{Longitud}_i, \text{Latitud}_i)$ es el suavizante bidimensional, $: \text{Camp}$ indica la interacción con los niveles j de campaña (MI y MII en este caso), dado que esta variable es categórica, el modelo ajusta un suavizante diferente para cada campaña.

Se efectuó un análisis de componentes principales utilizando 21 de las variables medidas en el sedimento, tales como la concentración de limos, arcillas, arenas, C_{org} , C_{inorg} , N_T , hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos alifáticos policíclicos (HAPs), Cr, Co, Ni, V, Fe, Mg, Al, $\delta^{13}\text{C}$; también se utilizaron variables como la temperatura, salinidad, y oxígeno disuelto del agua de fondo, así como la profundidad máxima. Debido a que la escala de estas variables son diferentes, las variables fueron centradas (a cada elemento se le restó la media de la variable correspondiente), y estandarizadas (cada valor se dividió entre la desviación estándar de la variable correspondiente). Se eliminó un valor extremo (estación 21, campaña MARZEE-II), debido a valores anómalos de porcentaje de arena ($> 50\%$) y a que presentó también los valores más bajos de la campaña en cuanto al Fe, V, C_{org} , Cr, Co, Ni y N_T . La matriz utilizada, por tanto, cuenta con 59 valores para cada una de las 21 variables utilizadas (59×21). Para ayudar a la interpretación, los componentes se rotaron por medio de la rotación varimax.

Para la interpretación de este análisis es necesario saber que cada componente representa una nueva variable, la cual está formada por una combinación lineal de las variables originales (hasta cierto punto, es posible imaginar esto como una regresión lineal), estas variables son independientes entre sí. Estas nuevas variables buscan encontrar los ejes donde se encuentre la mayor variación de los datos, siendo el primer componente aquel que recolecta o explica la mayor cantidad de varianza, el segundo el que recolecta la segunda mayor cantidad de varianza, y así sucesivamente. Debido a que los componentes son una combinación lineal de las variables originales, es fácil reconocer que éstas están correlacionadas, en mayor o menor medida, con cada componente. La intensidad de esta correlación es lo que se conoce como las “cargas” de las variables, aquellas variables con mayores cargas son las que más influencia tienen en un componente determinado y, por tanto, de mayor interés. Ahora bien, cada punto de muestreo tiene una cantidad determinada de valores, cada uno correspondiente a la medición de una variable específica, puesto que los componentes principales no son más que un nuevo conjunto de variables, cada punto de muestreo tendrá un valor en cada una de estas variables, a este valor es lo que se le conoce como “puntaje” (volviendo con la analogía de la regresión lineal, se puede pensar en los puntajes como los valores ajustados o predichos por cada componente para cada punto de muestreo). Finalmente, la razón detrás de la aplicación de este análisis es que los componentes obtenidos (se asume) reflejan estructuras y patrones (en este caso espaciales) subyacentes, que son explicados por un subconjunto de las variables originales (Quinn y Keough 2002).

4.3. Muestreo en la columna de agua

Se utilizó un disparador tipo roseta con 12 botellas (4 l), con un CTD (Conductivity, Temperature and Depth por sus siglas en inglés) acoplado para cuantificar el oxígeno disuelto, temperatura, salinidad, y fluorescencia de la columna de agua. Durante el ascenso de dicho equipo, se recolectaron muestras de agua con las botellas Niskin para cuantificar, entre otras variables, clorofila-a, oxígeno disuelto y nutrientes disueltos. Antes de abrir las botellas, el CTD se dejó reposar en la profundidad a realizar el muestreo para asegurarse de que la turbulencia provocada por el movimiento del CTD no perturbara el agua muestreada y, por

tanto, lo valores de las variables a cuantificar. Los valores de clorofila-a fueron cuantificados a partir de muestras tomadas con las botellas Niskin por el método de Jeffrey y Humphrey (1975).

Se eliminaron las mediciones registradas durante el ascenso del CTD. También se eliminaron las mediciones en el intervalo de cero a cinco metros (superficie) para eliminar valores extremos. Se eliminaron los valores altamente extremos localizados a lo largo de la columna de agua, pues se consideraron como errores de medición.

4.4. Análisis estadístico de la distribución de clorofila-a en la columna de agua

Se utilizaron sólo los valores registrados en los primeros metros de profundidad. Los valores de fluorescencia (mg/m^3), obtenidos a través de los sensores del CTD, se convirtieron a valores de clorofila-a ($\mu\text{g}/\text{l}$) por medio del procedimiento que se describe a continuación.

Primero se ajustaron los valores de fluorescencia, de manera individual para cada una de las estaciones, por medio de un modelo aditivo:

$$\begin{aligned} & \textit{Para cada Estacion : Campaña :} \\ & \textit{fluorescencia}_i = \alpha + s(\textit{profundidad}_i) + \varepsilon_i \end{aligned}$$

Donde s corresponde a una función suavizante de la variable predictiva profundidad. A partir de este modelo se ajustaron los valores de fluorescencia a las mismas profundidades en las que se llevaron a cabo cuantificaciones de clorofila-a usando muestras de agua. Este paso se realizó debido a que no en todos los casos el sensor integrado al CTD registró los valores de fluorescencia a las mismas profundidades en las que se tomaron muestras de agua para cuantificar clorofila-a. Una vez obtenidos los valores de ambas variables a las mismas profundidades, se utilizó un modelo de regresión lineal para ajustar los valores de clorofila-a (variable respuesta) en función de los valores de fluorescencia (variable predictiva), en el modelo se especificó que se calculara una pendiente diferente para cada una de las estaciones (ID):

$$\begin{aligned} \textit{clorofila}_{ij} = \alpha + \beta_1 \times \textit{fluorescencia}_i + \beta_j \times \textit{ID}_{ij} + \\ \beta_{ij}(\textit{ID}_{ij} \times \textit{fluorescencia}_{ij}) + \varepsilon_{ij} \end{aligned}$$

La parte $\alpha + \beta_1 \times \textit{fluorescencia}_i$, es el modelo de regresión base, el subíndice i indica cada uno de los valores individuales de clorofila y fluorescencia cuantificados, mientras que j indica los diferentes niveles de ID (estación \times campaña, *e. g.* estación1, campaña MI; estación 1, campaña MII, etc.). La parte $\beta_j \times \textit{ID}_{ij}$ indica un ajuste en el intercepto para cada valor de ID, mientras que $\beta_{ij}(\textit{ID}_{ij} \times \textit{fluorescencia}_{ij})$ indica un ajuste en la pendiente de la relación entre la clorofila y fluorescencia para cada valor de ID. En algunas estaciones no se recolectó agua utilizando las botellas Niskin hasta la profundidad de 200 metros, lo que llegó a causar problemas al realizar el ajuste por medio de la fórmula anterior. En estos casos

se decidió realizar el ajuste sólo hasta la profundidad máxima donde se tomaron muestras de agua, y a mayores profundidades se sustituyeron los datos obtenidos por el ajuste por los valores originales de fluorescencia.

Se utilizó un modelo aditivo generalizado para ajustar los valores de clorofila-a, generados por el procedimiento anterior, en función de la profundidad de la columna de agua, la posición geográfica de las estaciones (latitud y longitud) y la campaña en que se realizaron los muestreos. Los modelos realizados, con los valores de clorofila-a en su escala original, mostraron violaciones del supuesto de normalidad, por tal motivo se decidió utilizar un modelo generalizado usando la familia gaussiana y una liga logarítmica. La fórmula de este modelo es:

$$\text{clorofila} - a_i \sim N(\mu_i)$$

$$\begin{aligned} \log(\mu_{ij}) = & \alpha + te_1(\text{Longitud}_i, \text{Profundidad}_i) : \text{Camp}_{ij} + \\ & te_2(\text{Latitud}_i, \text{Profundidad} : i) : \text{Camp}_{ij} + \text{Camp}_{ij} + \varepsilon_{ij} \end{aligned}$$

La primera línea significa que la clorofila-a fue ajustada utilizando la familia normal (distribución de Gauss). En la siguiente línea se especifica el modelo; nótese que el valor de clorofila-a se substituyó por $\log(\mu_{ij})$, lo que significa que la función liga utilizada es el logaritmo de la clorofila-a. Se especificaron dos suavizantes bidimensionales, el primero utiliza la longitud geográfica y la profundidad (de la columna de agua), y el segundo la latitud geográfica y la profundidad. Se ajustó un suavizante diferente para cada nivel j de campaña. Los suavizantes utilizados en este modelo son conocidos como productos tensoriales, los cuales son preferibles cuando las variables involucradas en su construcción tienen escalas diferentes (la profundidad está cuantificada en metros, mientras que la longitud y latitud están en grados decimales). Se decidió utilizar dos suavizantes bidimensionales porque la construcción de uno sólo, utilizando las tres variables (longitud, latitud y profundidad), resultaba en serios errores de ajuste.

4.5. Análisis de imágenes satelitales de clorofila-a y patrón de corrientes superficiales

Se utilizaron valores agregados de 8 días, y por mes, de clorofila-a (MODIS-Aqua R2013.1, unidades de mg/m^3), correspondientes a los años 2003-2011 (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>), para identificar zonas y periodos temporales en los que es posible esperar valores similares de clorofila-a.

Para la identificación de zonas con características similares se observaron mapas de la distribución espacial del promedio mensual de clorofila-a, de los años mencionados, en la zona de muestreo y zonas aledañas. Estos mapas se cotejaron con otros que muestran el promedio de la velocidad mensual de corrientes superficiales (a 5 metros de profundidad) simuladas por el modelo HYCOM (siglas en inglés para Hybrid Coordinate Ocean Model <http://hycom.org/>) para los periodos en los que se llevaron a cabo las campañas MI y MII.

Se aplicó una descomposición en valores singulares a la matriz de varianza-covarianza de los valores de clorofila-a (agregados de ocho días) en la zona de muestreo y aledañas. Dicha

matriz tiene dimensiones $m \times n$, donde m es igual al número de muestreos (fechas), mientras que n corresponde a los puntos de espaciales de muestreo (cada uno de los píxeles de la imagen). Antes de realizar la descomposición, y el cálculo de la matriz de varianza-covarianza, los valores de clorofila-a fueron convertidos a su logaritmo, de esta manera fue posible apreciar mejor las diferencias de clorofila-a (Salmerón-García *et al.* 2010); los valores también fueron centrados (a cada valor se le restó la media de los datos). Este método es similar al análisis de componentes principales, y sirve para reconocer patrones espaciales, denominados como funciones ortogonales empíricas (FOEs), y temporales, llamados componentes principales (CPs). Las FOEs y CPs se dividieron entre la varianza explicada por el par correspondiente. Al igual que en el análisis de componentes principales, cada par está ordenado dependiendo de la varianza que recolecta, el que recolecta la mayor cantidad de varianza es la FOE/CP uno, y así sucesivamente (Beckers y Rixen 2003; Hannachi 2004; Hartmann 2014).

5. Resultados

5.1. Componentes principales en zona béntica

La [tabla 1](#) muestra las cargas de cada variable (*i. e.* la influencia de cada variable en el componente) en los primeros cuatro componentes principales (CP 1-4) y en los componentes rotados (rotación varimax, CR 1-4). En conjunto, estos cuatro componentes recolectaron $\sim 76\%$ de la varianza original. Nótese que el símbolo de las cargas entre los componentes principales y los componentes rotados pueden ser diferentes, esto no cambia la interpretación de los componentes. La interpretación del análisis se realizó utilizando los componentes rotados, pero se incluyeron los componentes principales en la [tabla 1](#) para señalar la diferencia entre ambos. En la [tabla 1](#), el orden de los componentes rotados tres y cuatro están intercambiados, la razón de esto es porque al realizar la rotación, el componente principal tres se considera “menos importante” (explica menos varianza) que el componente principal cuatro.

Las variables con mayor influencia en CR1 son la temperatura, salinidad (ambas con cargas positivas), el C_{inorg} , Ni, Co, y la profundidad (todas con cargas negativas). La variable $\delta^{13}C$ también tiene influencia relativamente alta (carga negativa). Estos resultados indican que se puede esperar un decremento de temperatura y salinidad (en el agua de fondo) en las zonas de mayor profundidad o con mayores concentraciones de Ni, Co o C_{inorg} . Este componente está dominado por variables que cambian de acuerdo a la profundidad de la columna de agua, o visto de otra manera, con la longitud geográfica, ya que en esta zona la profundidad estuvo altamente correlacionada con la longitud.

La [Fig. 2](#) muestra un gráfico de dispersión de los puntajes de CR1 *vs* CR2, y CR1 *vs* CR3. Se utilizó la profundidad (aproximada) de las estaciones para mapear el color, y la campaña para la forma de los puntos. CR1 acomodó las estaciones conforme a la profundidad, sin embargo los grupos se encuentran sobrepuestos, aunque conforme aumentan los valores positivos del componente, disminuye el solapamiento de los grupos.

El componente CR2 separó las estaciones de acuerdo a la época del año en que se realizaron los muestreos (ver [Fig. 2](#)). Las variables con mayor influencia en este componente fueron C_{org} , MO (ambas con cargas negativas), el oxígeno disuelto, Mg, y Al (con cargas positivas).

Tabla 1: Cargas de las variables en los primeros cuatro componentes principales (y su rotación)

	CP1	CP2	CP3	CP4	CR1	CR2	CR4	CR3
Limos	-0.24	-0.19	0.20	-0.36	0.29	-0.18	0.11	0.89
Arcillas	0.24	0.18	-0.22	0.36	-0.29	0.15	-0.08	-0.91
Arenas	-0.18	-0.02	0.36	-0.28	0.18	0.09	-0.29	0.79
MO	-0.13	-0.34	-0.04	0.26	0.46	-0.75	0.08	-0.04
C_{org}	-0.13	-0.34	-0.04	0.27	0.46	-0.75	0.08	-0.04
C_{inorg}	0.30	0.13	0.16	-0.20	-0.83	0.23	-0.26	0.02
N_T	-0.11	-0.26	-0.20	-0.22	0.14	-0.37	0.60	0.30
HAPs	-0.16	0.15	-0.11	-0.26	0.22	0.48	0.32	0.27
Alifáticos	-0.01	0.01	-0.15	0.16	0.13	-0.03	0.11	-0.32
Temperatura	-0.37	0.00	0.04	0.01	0.82	0.12	0.04	0.36
Salinidad	-0.33	-0.06	-0.02	-0.01	0.74	-0.01	0.17	0.33
OxiDis	-0.06	0.41	0.01	-0.14	0.04	0.92	-0.11	0.01
Co	0.24	-0.22	-0.05	-0.31	-0.71	-0.40	0.33	0.19
Cr	-0.17	0.04	-0.33	-0.11	0.36	0.23	0.59	-0.03
Ni	0.31	-0.11	-0.17	-0.31	-0.86	-0.18	0.44	-0.04
V	0.04	-0.13	-0.47	-0.25	-0.16	-0.10	0.92	-0.11
Fe	-0.02	-0.02	-0.51	-0.09	0.07	0.07	0.84	-0.33
Mg	-0.08	0.42	-0.08	0.02	0.19	0.88	-0.08	-0.23
Al	-0.17	0.36	-0.18	0.01	0.41	0.81	0.14	-0.21
$\delta^{13}C$	0.32	-0.17	0.06	0.16	-0.63	-0.53	-0.20	-0.33
Profundidad	0.35	0.10	0.10	-0.15	-0.89	0.13	-0.21	-0.11
% Var. Expl.	28.9	22.1	14.53	10.68	26	21	15	14

Esto sugiere que los sitios con mayores porcentajes de carbono o materia orgánica fueron aquellos que también presentaron menores concentraciones de oxígeno disuelto, Mg y Al.

En el componente CR3, las variables con mayores cargas fueron el porcentaje de limos (positiva), arcillas (negativa) y, en menor medida, las arenas (positiva). Finalmente, en el componente CR4, el V y el Fe, ambas con cargas positivas, fueron las variables con mayores cargas. Cabe mencionar que tanto el N_T como el Cr, también con cargas positivas, presentaron cargas relativamente altas en CR4. Tanto CR3 (Fig. 2, derecha), como CR4 (no graficado) no agruparon las estaciones de ninguna manera.

Para indagar más a fondo cómo los cuatro componentes analizados separan a las estaciones, se interpolaron los puntajes de los componentes rotados por medio de un modelo aditivo, en función de la posición geográfica de las estaciones, y la campaña de muestreo. Los resultados se muestran en la Fig. 3.

Los puntajes correspondientes a CR1 de la Fig. 3 reafirmaron que este componente estuvo dominado por la variable profundidad. De acuerdo al análisis, los valores más altos de C_{inorg} , Co y Ni se encontraron al este del área de estudio, mientras que hacia la costa se encontraron los valores más altos de temperatura y salinidad en el agua de fondo.

Los puntajes de CR2 fueron diferentes en las dos épocas de muestreo (valores positivos en MI, y negativos en MII). Los valores más bajos se encontraron cercanos a la costa en la latitud de 24° N, lo que significa que en esta región estuvieron los valores más altos de MO,

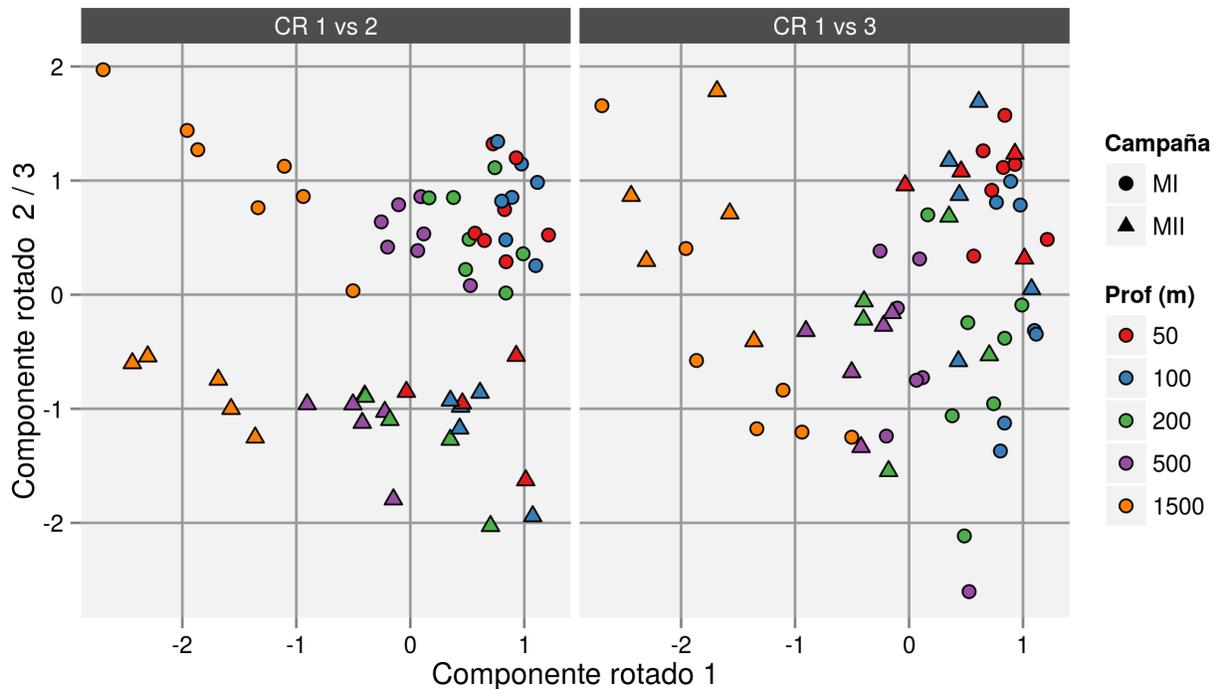


Figura 2: Diagrama de dispersión de componentes rotados 1 vs 2 (izquierda) y 1 vs 3 (derecha). El CR1 separa los estaciones en un gradiente de profundidad, el CR2 por campaña y el CR3 no forma grupos. Prof = profundidad.

y los valores más bajos de Mg, Al, y oxígeno disuelto (hay que recordar que se eliminó la estación 21 de la campaña MII, la cual presentó el porcentaje más bajo de C_{org} de todos los puntos de muestreo).

El componente CR3 se relacionó mayormente con la proporción de arenas, limos y arcillas. Los puntajes para ambas campañas muestran que la zona norte, y las partes cercanas a la costa del área de muestreo, presentaron proporciones relativamente elevadas de arenas y limos. En cambio, la zona sureste presentó proporciones relativamente elevadas de limos, especialmente en la campaña MI.

El componente CR4 reveló la existencia de una zona con puntajes positivos en la zona central del área de estudio. Este patrón fue más conspicuo en la campaña MII. Esto implica que en los parches centrales se encontraron las concentraciones más altas de Fe, V y, en menor medida, de N y Cr. En las regiones con puntajes negativos estuvieron los valores más bajos para dichas variables.

5.2. Distribución espacial de carbono orgánico en sedimentos

La tabla de regresión del modelo aditivo, con el que se ajustó el porcentaje de C_{org} , se muestra en la [tabla 2](#). Los valores de “intercepto” y “CampMII” indicaron que, de manera general, los valores más altos de C_{org} se encontraron en MII. Los valores de 17.172 y 19.168 corresponden a los grados de libertad de cada suavizante, este valor indica la “curvatura” de los datos (un valor cercano o igual a uno implica una respuesta lineal, valores más altos corresponden a una respuesta cada vez menos lineal), ambos suavizantes fueron estadística-

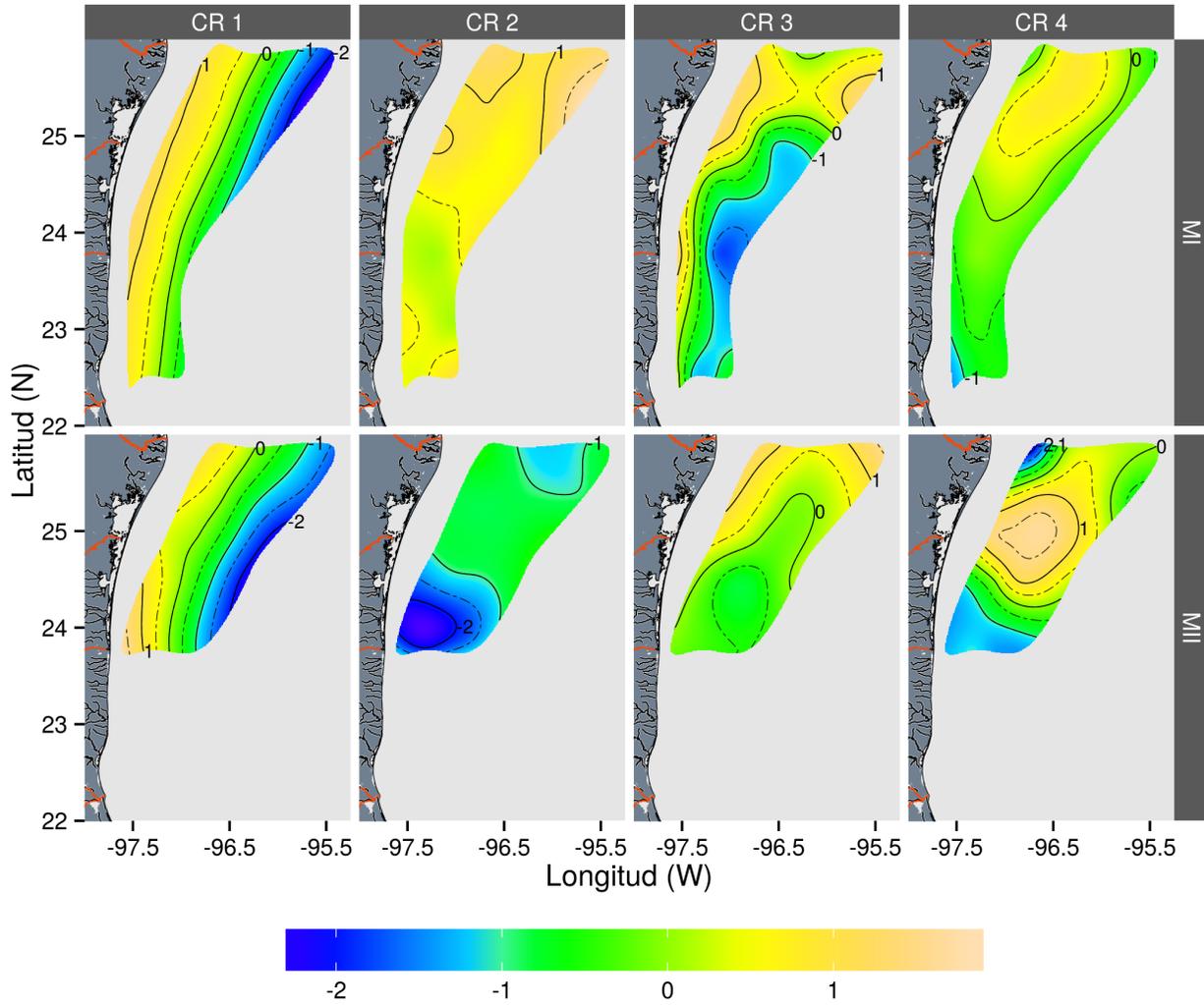


Figura 3: Interpolación de los puntajes de CR1-4 en el espacio de muestreo para MI (arriba) y MII (abajo).

mente significativos e indicaron una respuesta no lineal. Los siguientes términos muestran valores que “califican” al modelo. De importancia inmediata es el valor de R^2 , que muestra que el modelo explicó $\sim 83\%$ de la varianza.

La Fig. 4 muestra superficies con los porcentajes de C_{org} ajustados por el modelo para MI y MII. Los porcentajes más altos de C_{org} se registraron frente a la desembocadura del río Soto la Marina, aunque los valores más altos no se encontraron en la estación más cercana a la costa, sino en la segunda más cercana. La misma figura también muestra que, durante la campaña MII, el porcentaje de C_{org} en sedimentos fue mayor. Además, durante la campaña MI, en la región norte del área de muestreo, y frente a la desembocadura del río Soto la Marina, se registraron los porcentajes más bajos de C_{org} en sedimentos.

En la Fig. 5 se pueden observar los porcentajes de C_{org} ajustados por el modelo aditivo (con bandas de confianza del 95%), a lo largo del gradiente longitudinal, en siete latitudes diferentes. Los valores de latitud mostrados corresponden a la latitud promedio de cada uno

Tabla 2: Modelo aditivo del porcentaje de C_{org} en sedimento. GLE: grados de libertad estimados, s() indica un función suavizante.

(Intercepto)	0.946*** (0.017)
CampMII	0.103 (0.252)
GLE: s(Longitud,Latitud):CampMI	17.172*** (21.307)
GLE: s(Longitud,Latitud):CampMII	19.168*** (21.543)
Devianza explicada	0.937
R^2	0.828
Num. obs.	60
Num. de suavizantes	2

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

de los transectos muestreados, y los intervalos de longitud abarcan el mismo rango de los transectos originales; no se incluyeron los puntos de muestreo originales pues su posición latitudinal puede ser diferente a la latitud utilizada en la figura. La figura confirma que en la mayor parte del área de estudio no se presentaron diferencias significativas, pero al noreste de ésta, y en la latitud cercana a la desembocadura del río Soto la Marina, sí se encontraron diferencias significativas (ver paneles superiores de la Fig. 5).

5.3. Análisis de la distribución espacial de clorofila-a en la columna de agua

Los coeficientes de regresión del modelo usado para ajustar los valores de clorofila-a en la columna de agua se muestran en la tabla 3. Este modelo explica $\sim 80\%$ de la varianza. El valor promedio de clorofila-a, para la campaña MI (en el punto medio de la longitud y latitud), fue de -2.204 ± 0.013 (log) $\mu\text{g/l}$ (correspondientes a valores entre 0.128 y 0.131 $\mu\text{g/l}$), mientras que para la campaña MII fue de -11.608 ± 1.28 (log) $\mu\text{g/l}$ (valores prácticamente de 0 $\mu\text{g/l}$). La diferencia entre ambas campañas resultó estadísticamente significativa (recordar que esto sólo aplica al punto localizado en el valor promedio de la longitud, latitud y profundidad). Todos los suavizantes fueron estadísticamente significativos y los grados de libertad muestran que la respuesta fue altamente no lineal.

La Fig. 6 muestra los valores de clorofila-a ajustados por el modelo en ambas campañas, a diferentes niveles de profundidad. La Fig. 7 muestra perfiles de los mismos datos en el gradiente longitudinal (paneles superiores) y de profundidad (paneles inferiores). En Fig. 7 se omitieron los intervalos de confianza, pues son indistinguibles de la respuesta media. Los valores más altos de clorofila-a se encontraron frente a las desembocaduras de los ríos Bravo y Soto la Marina durante la campaña MI, pero en MII no se observó este mismo patrón.

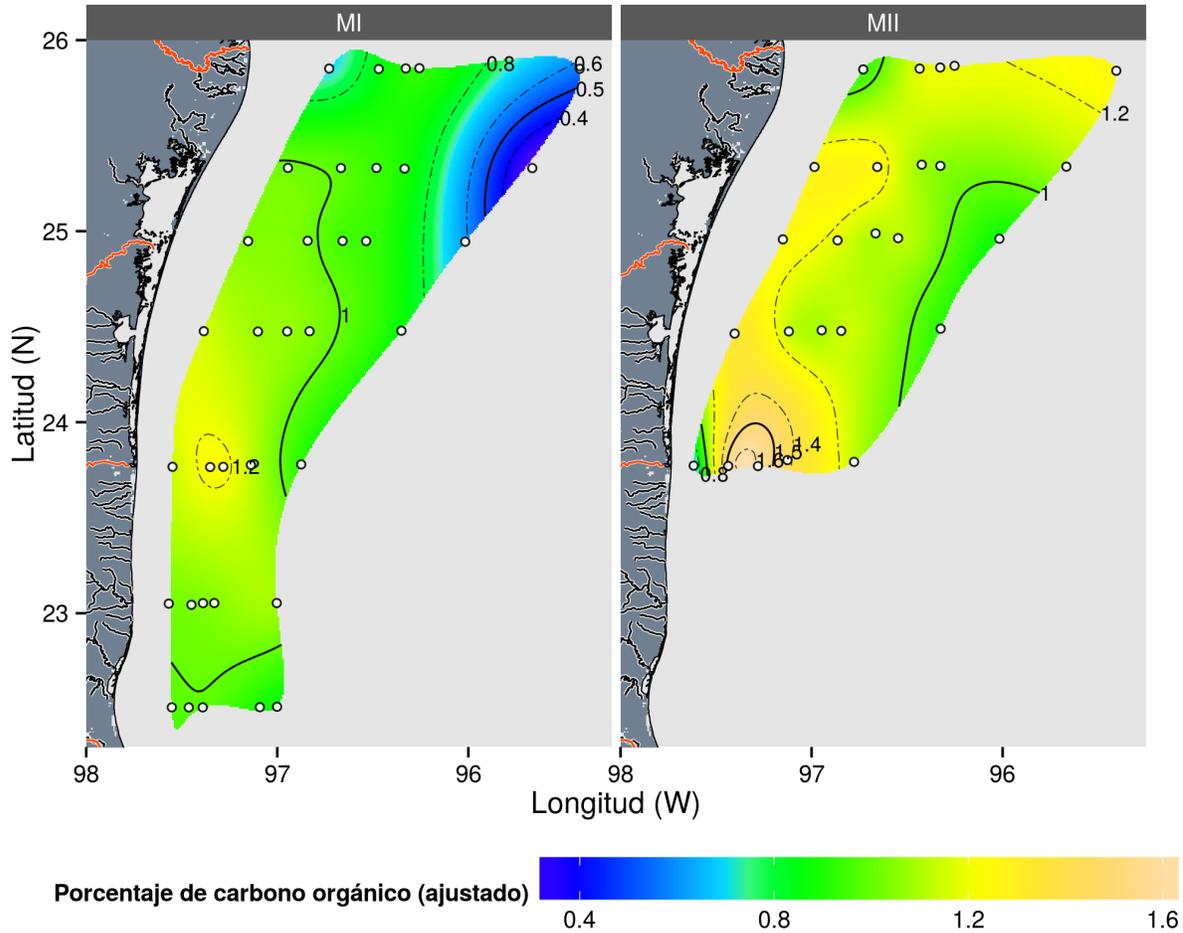


Figura 4: Superficie de porcentaje de C_{org} en sedimentos ajustado por el modelo aditivo para las campañas MI y MII. Los puntos muestran las posiciones de muestreo.

Fuera de estas dos zonas, los perfiles de profundidad indicaron que los valores máximos de clorofila-a, en la campaña MI, se encontraron en profundidades cercanas a los 80 metros. Por otro lado, los valores máximos en MII se encontraron relativamente homogéneos hasta aproximadamente los 100 m de profundidad.

Hasta aproximadamente los 50 m de profundidad, y a lo largo del gradiente longitudinal, la concentración de clorofila-a mostró tener una respuesta no lineal en la campaña MI. Los valores más altos para esa campaña se presentaron en las longitudes más cercanas a la costa. Para la misma campaña, a partir de los 80 metros, la respuesta fue prácticamente lineal, pero en la zona noreste se observó un repunte en los valores de clorofila-a cerca de los 80 metros. En la campaña MII, el gradiente longitudinal mostró una respuesta lineal y hubo zonas donde no se presentaron grandes variaciones de clorofila-a.

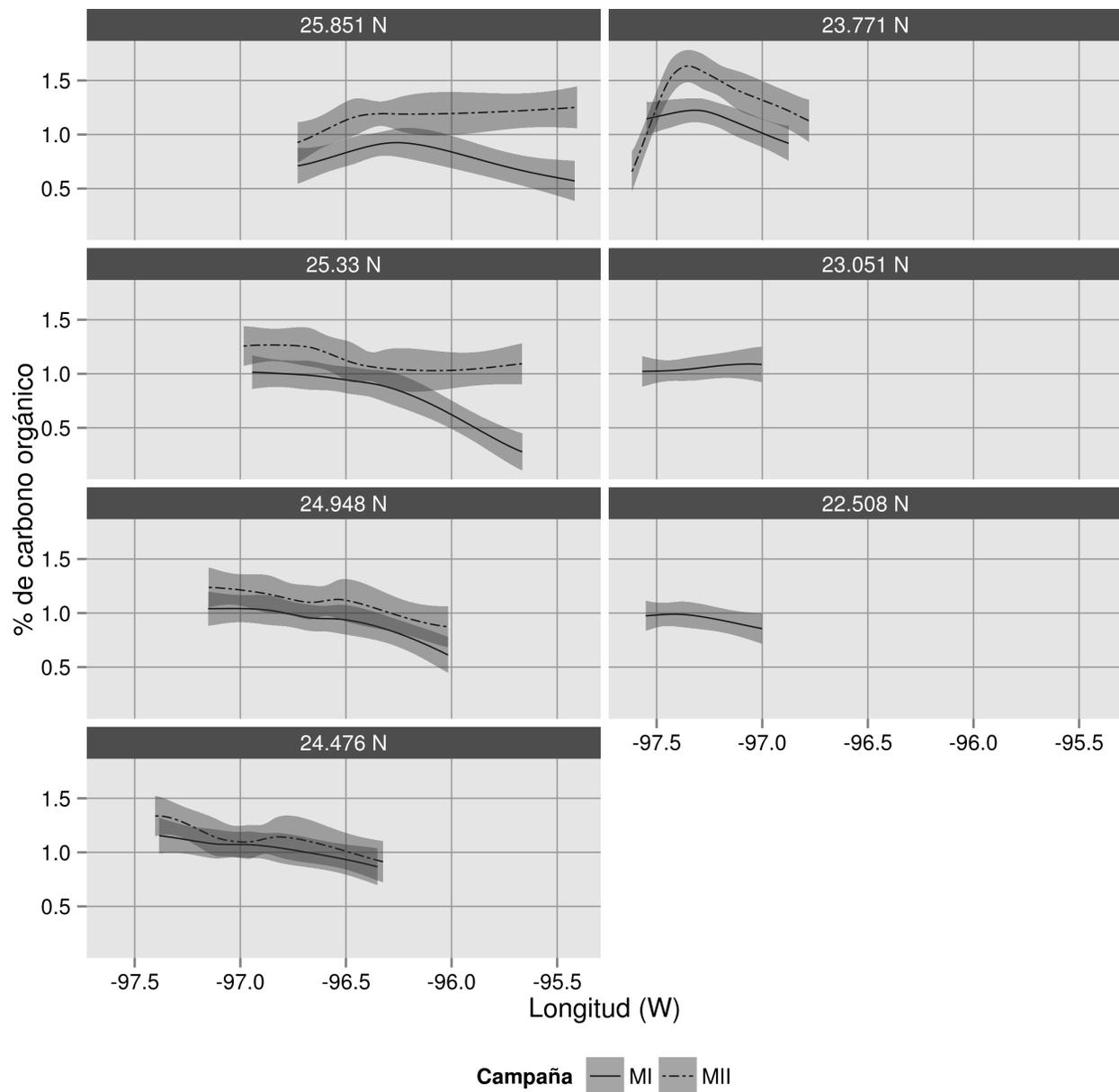


Figura 5: Representación gráfica del % de Corg y bandas de confianza (95 %) ajustados para las campañas MI y MII, en siete transectos simulados.

5.4. Análisis de imágenes satelitales de clorofila-a y corrientes oceánicas

La Fig. 8 muestra el promedio mensual (años 2003-2011) de la concentración de clorofila-a en la zona de muestreo (denotada por la línea negra) y áreas cercanas; la figura también señala el promedio general de clorofila-a por mes. Los valores más altos de clorofila-a en el área de estudio se encontraron durante el invierno, especialmente por arriba de los 25° N. Desde primavera, hasta principios del verano, se observó una disminución en los valores de clorofila-a, la cual comienza en el sureste del área de estudio en primavera y gradualmente se

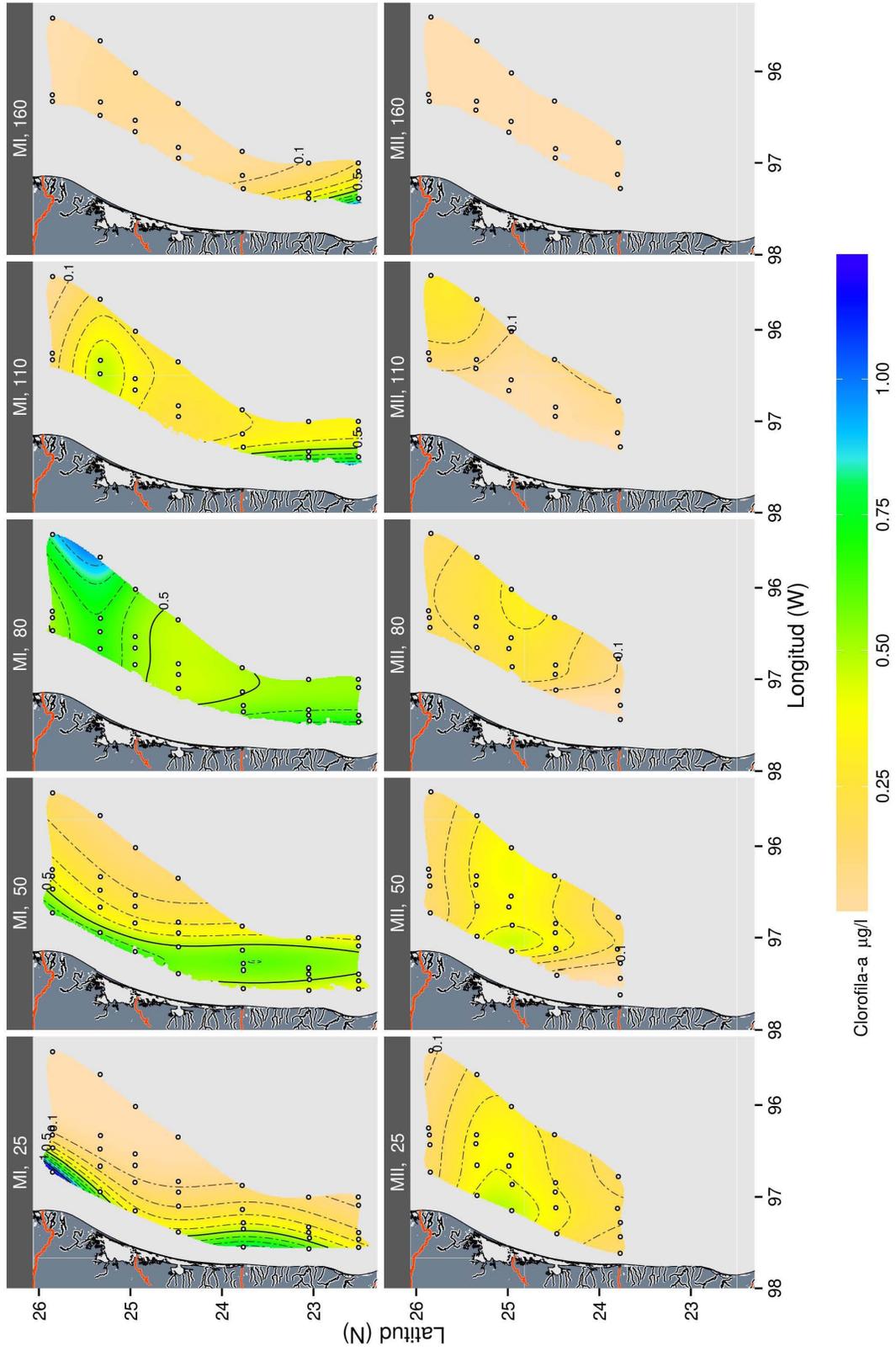


Figura 6: Valores de clorofila-a ajustados por el modelo aditivo generalizado a diferentes niveles de profundidad (m).

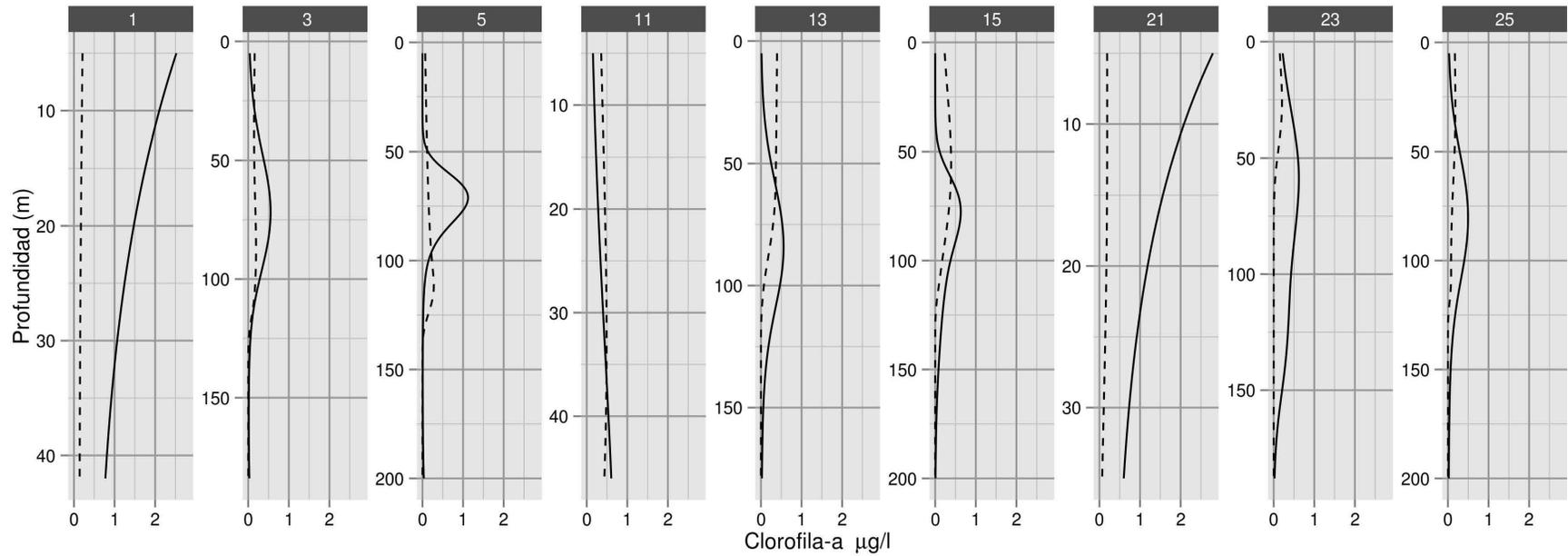
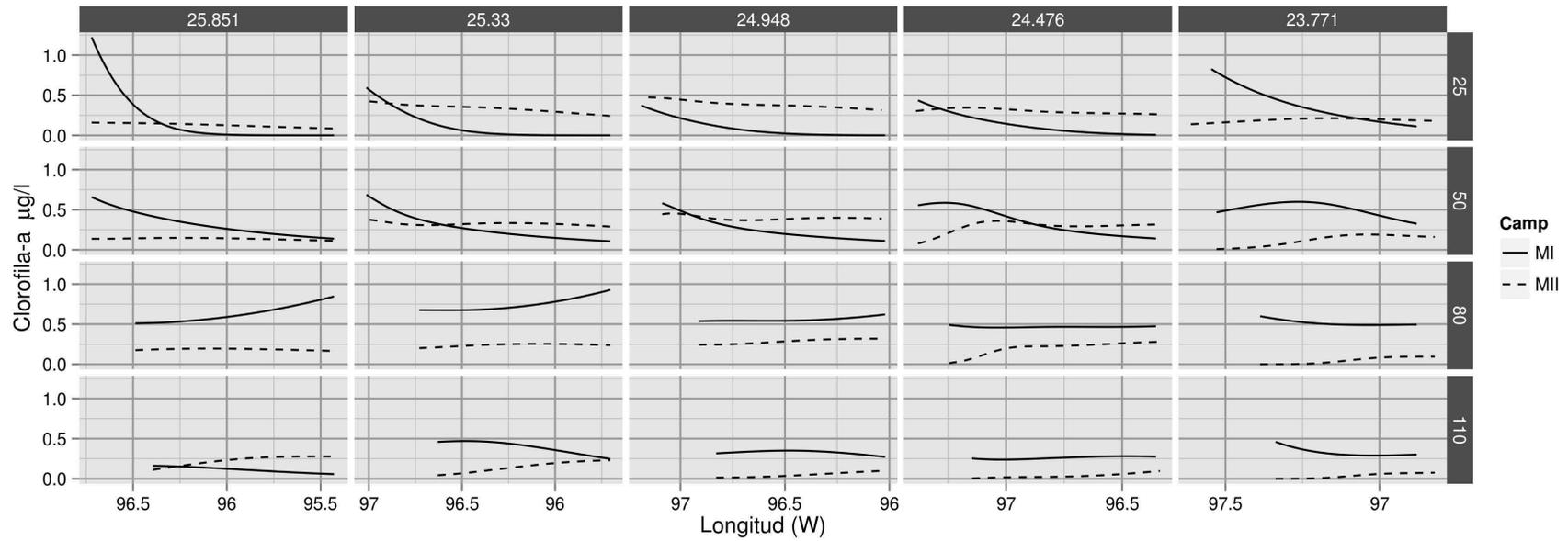


Figura 7: Arriba: Clorofila-a ajustada por el modelo aditivo en el gradiente longitudinal a diferentes profundidades y latitudes. Abajo: Perfiles en profundidad de clorofila-a ajustada en posiciones aproximadas de las estaciones muestreadas.

Tabla 3: Modelo aditivo de la concentración de clorofila-a en la columna de agua. GLE: grados de libertad estimados, $te()$ indica un producto tensor.

(Intercepto)	-2.204*** (0.013)
CampMII	-11.608*** (1.280)
GLE: $te(\text{Longitud}, \text{Profundidad}): \text{CampMI}$	23.71***
GLE: $te(\text{Longitud}, \text{Profundidad}): \text{CampMII}$	23.41***
GLE: $te(\text{Latitud}, \text{Profundidad}): \text{CampMI}$	19.44***
GLE: $te(\text{Latitud}, \text{Profundidad}): \text{CampMII}$	19.77***
R^2	0.802
Num. obs.	63469
Num. suavizantes	4

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

extiende hacia el norte. Entre junio y septiembre la cantidad de clorofila-a fue relativamente homogénea y los valores más altos se encontraron en la zonas más cercanas a la costa; durante este periodo también se presentaron los promedios de clorofila-a más bajos. Durante octubre-noviembre, los valores de clorofila-a se incrementaron, principalmente en la parte norte y, en menor medida, la sur.

En la Fig. 9 se muestra la velocidad (ms^{-1}) promedio de las corrientes de la zona, a cinco metros de profundidad (del modelo HYCOM), para los meses de julio de 2010 y enero de 2011; también se muestra la concentración promedio de clorofila-a para los mismos meses. Durante julio 2010 se destacó un giro anti-ciclónico al sur del área estudiada. Dentro de dicho giro se presentaron concentraciones de clorofila-a por debajo de $0.1 \mu g/l$, especialmente en el centro del giro. Las concentraciones de clorofila-a más elevadas se encontraron dentro de la plataforma continental, por debajo de los 50 metros de profundidad, especialmente frente a la desembocadura de los ríos principales. Durante enero del 2011, aún se encontró el giro mencionado con anterioridad, si bien con velocidades menores a las encontradas durante julio del 2010. En enero del 2011 se presentaron concentraciones de clorofila-a cercanas a los valores promedio para dicha fecha (Fig. 8).

En la Fig. 10 se muestran las primeras cuatro funciones ortogonales empíricas (FOEs) en espacio (A), y de los componentes principales (CPs) en el tiempo (B), obtenidos por la descomposición en valores singulares de la matriz de varianza-covarianza de los valores de clorofila-a satelitales. Los primeros cuatro FOEs/CPs explican el 67.05 % de la varianza total. La línea negra en cada mapa rodea la zona de estudio dentro de la cual se realizaron los muestreos para la campaña MI. Se escogieron estas cuatro FOEs/CPs por la cantidad de varianza que recolectaron, además de que los pares subsecuentes explicaron poca varianza, su interpretación fue más complicada, y comenzaron a ser redundantes. La Fig. 11 muestra la varianza explicada por los primeros 10 FOEs/CPs, nótese cómo del cuarto componente en adelante la varianza explicada por cada uno comienza a ser muy similar.

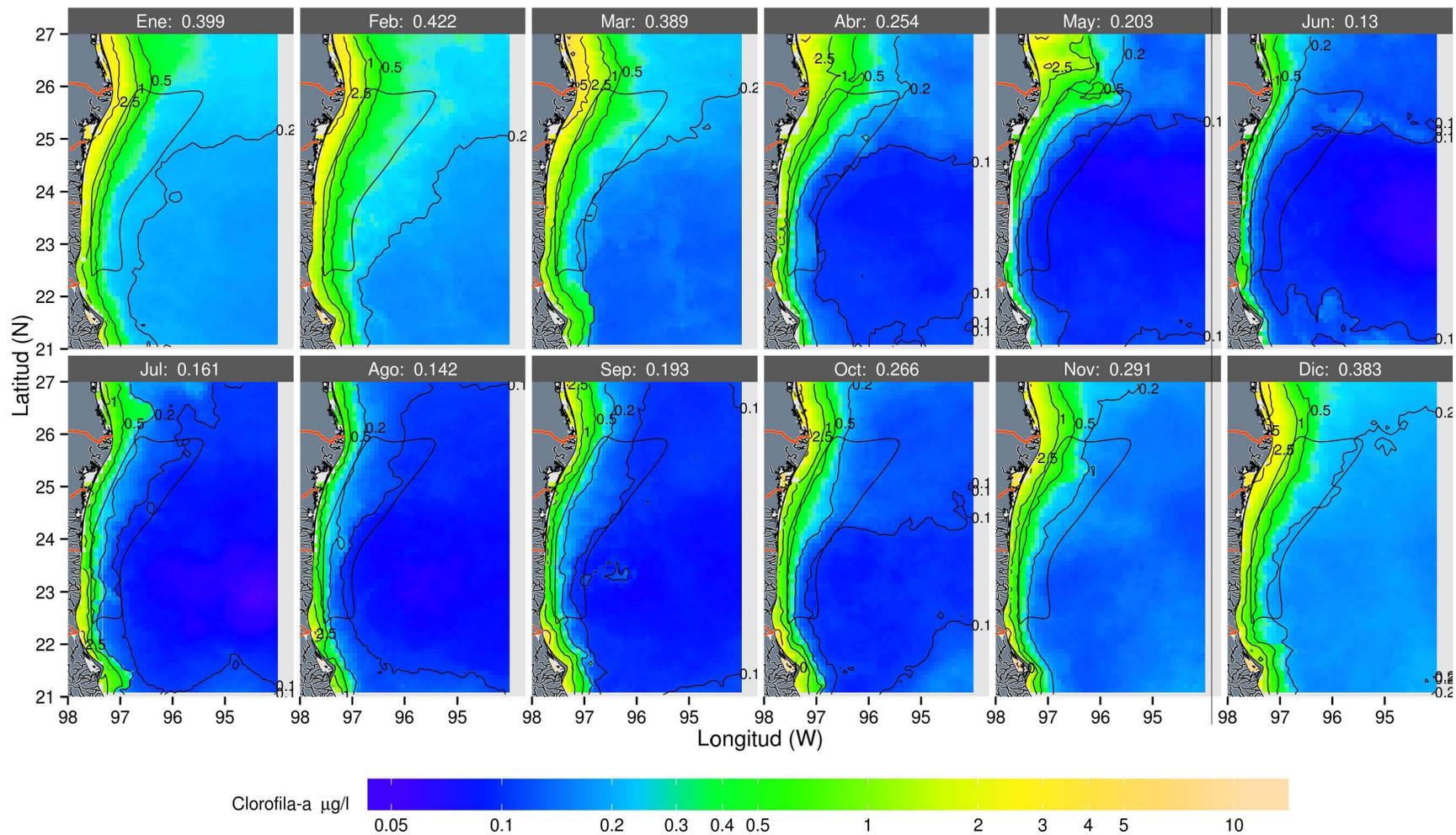


Figura 8: Promedios mensuales de la concentración de clorofila-a para los años 2003-2011. Las etiquetas indican el promedio de clorofila-a registrado dentro del área de estudio para cada mes. Se enmarca el área de muestreo de la campaña MI

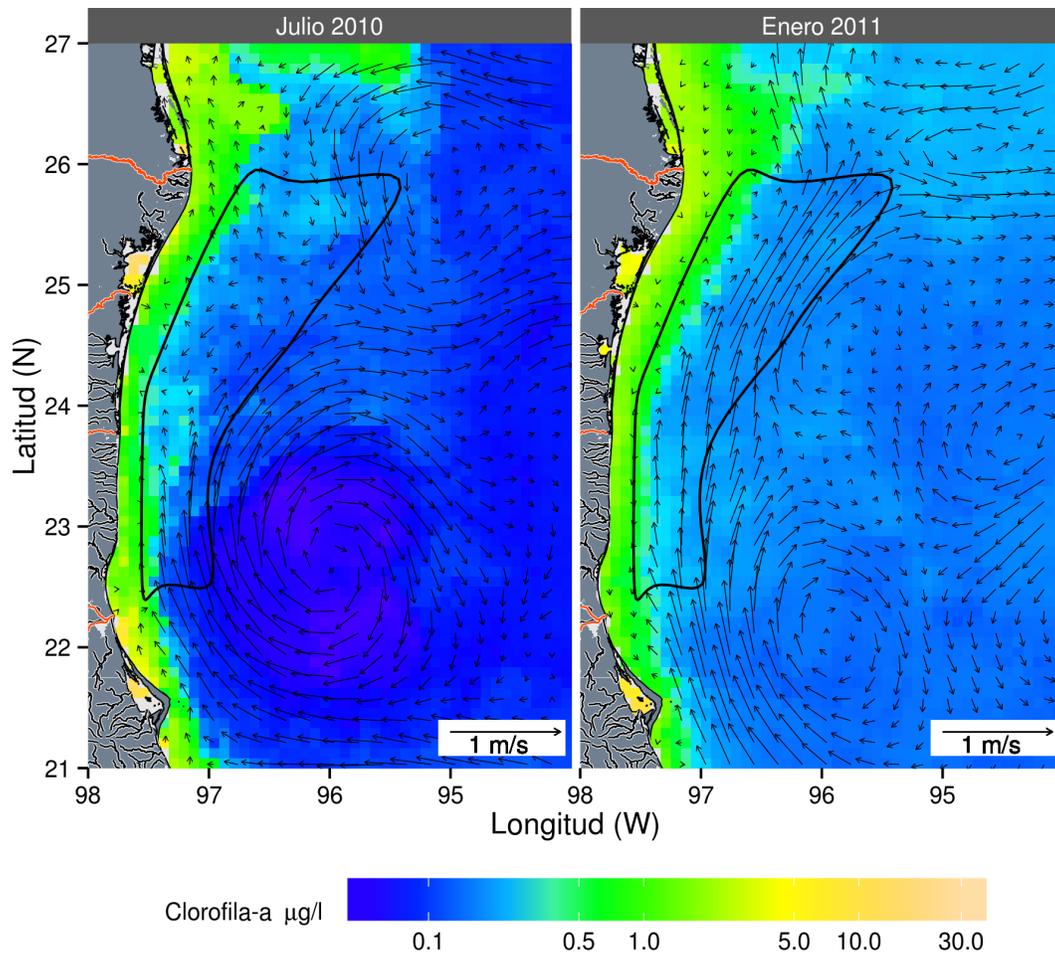


Figura 9: Valores promedio de concentración de clorofila-a, e intensidad de corrientes superficiales (5 m) durante Julio del 2010 y Enero del 2011.

El primer par de FOEs/CPs recolectó 51.88 % de la varianza total. El CP fue dominado por cargas negativas durante otoño-invierno; durante primavera-verano las cargas dominantes fueron positivas. Por su parte, la FOE presentó valores negativos en su totalidad. Esto implica que, durante primavera-verano, se pueden esperar concentraciones de clorofila-a empobrecidos, con respecto a la concentración media de los años analizados. En cambio, durante otoño-invierno, se pueden esperar concentraciones de clorofila-a elevadas con respecto al promedio, especialmente frente a la costa.

El segundo par explicó 7.06 % de la varianza. La FOE correspondiente mostró, en la frontera entre las plataformas LATEX y TAVE, valores altamente negativos. En el resto de la zona de estudios, los valores de la FOE fueron cercanos a cero. El CP asociado mostró las cargas más negativas durante primavera, lo que indica que en esta estación, y en la zona con valores negativos en la FOE, se pueden encontrar concentraciones de clorofila-a elevadas, lo cual es reflejo de la advección de clorofila-a costa afuera, debido a la confluencia de corrientes que se da en la región durante la primavera.

El tercer par explicó 5.23 % de la varianza total de los datos. La FOE mostró una zona con cargas positivas cercanas a la costa y que son mayores en la costa sur de la zona de

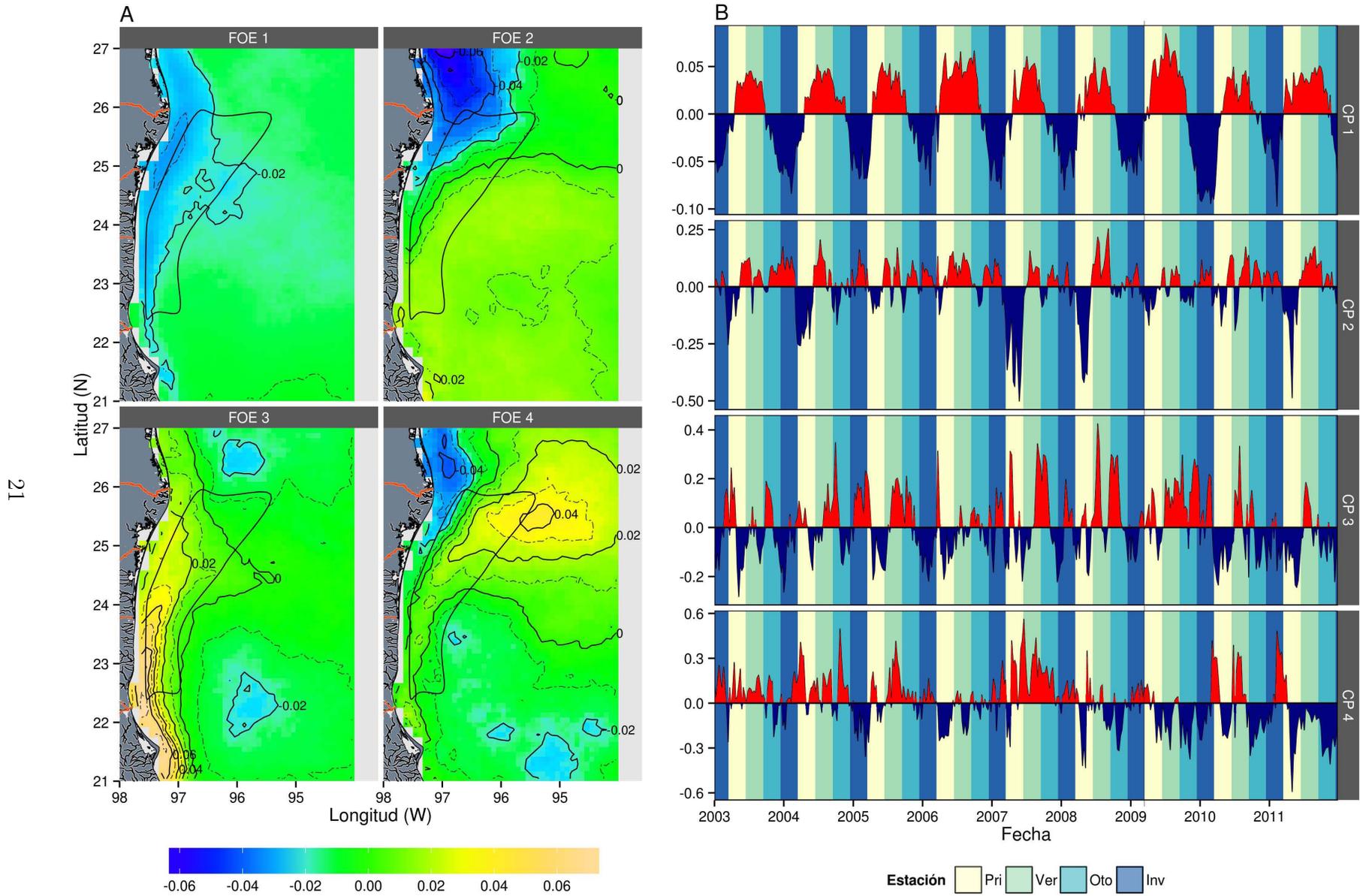


Figura 10: Reconstrucción de las primeras cuatro FOEs / CPs obtenidas por la descomposición en valores singulares. A) Reconstrucción en espacio, B) Reconstrucción en tiempo.

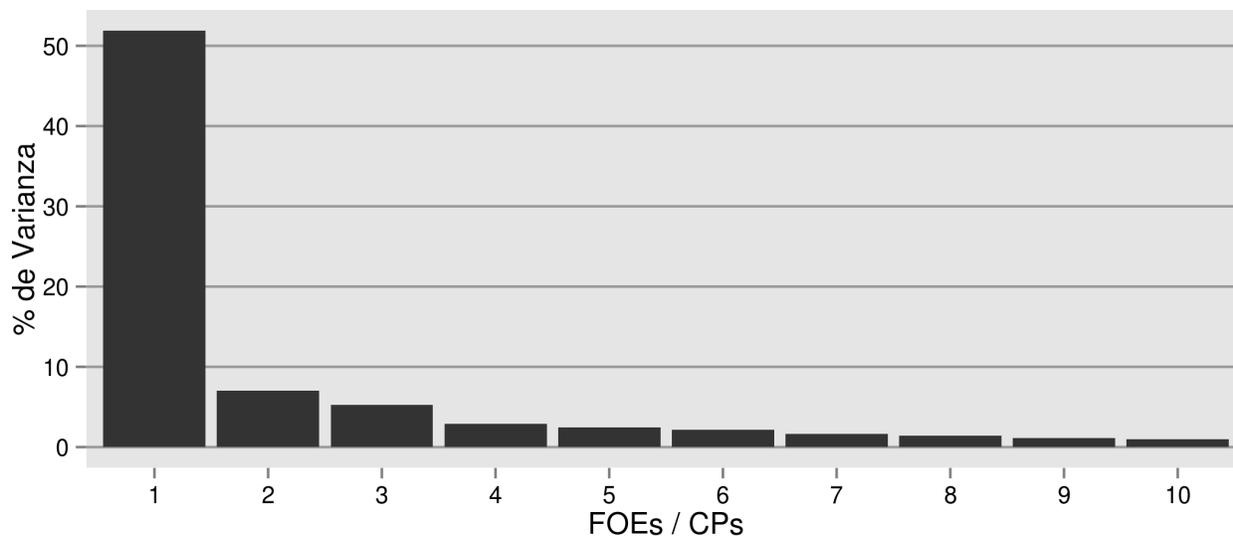


Figura 11: Porcentaje de varianza explicada por los primeros 10 FOEs / CPs de la descomposición en valores singulares.

estudio. En el resto del área de estudio se encontraron valores cercanos a cero, excepto por dos parches ligeramente negativos al sur y al norte. Las cargas positivas del CP asociado se presentaron principalmente durante verano y otoño, en algunos casos también durante el invierno. Lo anterior implica que, durante dicho periodo de tiempo, en la zona oeste-suroeste del área analizada, se pueden esperar valores relativamente elevados de clorofila-a, lo cual es debido al incremento de las descargas fluviales.

Finalmente, el cuarto par recolectó 2.87 % de la varianza. La FOE mostró una región con valores positivos en el noreste del área analizada. El CP asociado señaló que en dicha región se presentaron concentraciones de clorofila-a relativamente elevadas, principalmente durante el año 2007, pero también en los años 2003-2005. Estos valores reflejan concentraciones altas de clorofila-a debido a la advección a causa de eddies. En la zona noroeste del área analizada, dentro de la plataforma continental, se presentaron valores negativos en la FOE. El CP indicó que en esta región se encontraron concentraciones relativamente elevadas de clorofila-a principalmente durante primavera. Lo anterior fue más acentuado durante el periodo 2008-2011, En dichos años también se detectaron, en la región dentro de la plataforma, concentraciones relativamente elevadas de clorofila-a durante otoño.

6. Discusión

6.1. Carbono orgánico en sedimentos

Los porcentajes de C_{org} cuantificados en las muestras de sedimentos de las campañas MI y MII son similares a los reportados con anterioridad para la misma región (Escobar-Briones y García-Villalobos 2009). Se ha reconocido que el porcentaje de C_{org} en sedimentos decrece conforme aumenta la profundidad o distancia a la costa (Wollast 1998; Escobar-Briones y García-Villalobos 2009). Los porcentajes de C_{org} en sedimentos de la campaña MI siguieron este patrón, pero no así los de la campaña MII. En MII se observó un incremento,

en el porcentajes de C_{org} , en los sedimentos de las zonas con profundidades mayores a 1000 m, aproximadamente entre las latitudes 24.5° y 25° N. Este patrón resulta interesante debido a que, en la misma región, durante la campaña MI, se presentaron los menores porcentajes de C_{org} . Más importante aún, a dichas profundidades, y con una distancia a la costa relativamente grande, se esperaría que el porcentaje de C_{org} se mantuviera bajo. Una posible explicación para la diferencia del patrón de porcentaje de C_{org} , entre ambas campañas, es la influencia de la corriente marina que corre paralela a la costa de la plataforma TAVE, y que se extiende hasta la plataforma LATEX. Durante la mayor parte del año, esta corriente se desplaza de norte al sur, pero durante el verano la corriente se invierte y se desplaza de sur a norte. Esta inversión genera una zona de confluencia en la frontera de las plataformas LATEX y TAVE, que a su vez arrastra agua costa afuera (Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009). El agua arrastrada puede llevar, entre otras cosas, materia orgánica al mar abierto, lo que a su vez puede incrementar la cantidad de carbono que llega a los sedimentos de esta región. El agua arrastrada también puede contener otros materiales de origen terrígeno, por ejemplo, materia orgánica producida en el continente, o sedimentos de diversos tamaños.

En ambas campañas fue notoria una zona de mayor concentración de C_{org} cerca de la desembocadura del río Soto la Marina, la cual fue mayor en la campaña MII. Sin embargo, las estaciones más cercanas a la costa (50 m), del transecto localizado frente al río Soto la Marina, presentaron porcentajes de C_{org} bajos en comparación con las estaciones de 100 y 200 m de profundidad del mismo transecto. La estación de 50 metros, en el transecto localizado frente al río Bravo, también mostró porcentajes reducidos de C_{org} en comparación con las estaciones de 100-300 m en MI, y el resto del transecto en MII. Este patrón puede deberse a que en las regiones más cercanas a la desembocadura de los ríos los sedimentos son de mayor tamaño, ya que los sedimentos más grandes están relacionados con un incremento en la tasa de descomposición de la materia orgánica (Emerson y Hedges 2003). Esta hipótesis fue soportada por el análisis de componentes principales. Si se observa el panel correspondiente a los puntajes de CR3, de la Fig. 3, es posible observar que la distribución del porcentaje de C_{org} en sedimentos, y la distribución de los puntajes, guardan cierta similitud, aunque cabe mencionar que en dicho componente, ni el C_{org} , ni MO, presentaron cargas considerables (esto contraste con el CP4, donde limos y arenas sí están correlacionadas, negativamente, con C_{org} y MO). Como se abordó en la sección de resultados, los puntajes positivos están correlacionados con partículas relativamente grandes (limos en primer lugar y después arenas), mientras que los negativos con partículas pequeñas (arcilla). Las zonas con puntajes positivos son también aquellas en donde se presentan los porcentajes más bajos de C_{org} (esto es más notorio en la zona noreste de la campaña MI). La presencia de partículas relativamente grandes en la zona noroeste también puede ser explicada por la advección de agua proveniente de la plataforma de LATEX y al transporte lateral provocada por la confluencia de corrientes ya mencionada.

Otra posible explicación de la distribución del C_{org} es la concentración de oxígeno disuelto en el agua de fondo ya, que se ha encontrado que el ambas variables pueden estar negativamente correlacionadas (Emerson y Hedges 2003). En la tabla 1, C_{org} presentó las mayores cargas en CR2, dentro de este componente, el oxígeno disuelto también presenta una carga elevada, pero contraria a la del C_{org} , lo cual sugiere que el porcentaje de C_{org} en sedimentos decrece al incrementarse la cantidad de oxígeno disuelto en el agua de fondo.

Los sedimentos provenientes del continente también pueden tener un papel importante en la concentración de C_{org} en los sedimentos del noroeste del Golfo de México, especialmente en las regiones cercanas a las desembocaduras de los ríos. Dos indicadores que han sido ampliamente utilizados para determinar la influencia terrígena en el C_{org} de sedimentos son el $\delta^{13}C$ y la proporción entre C_{org} y N_T (C/N) (Meyers 1994; Goñi *et al.* 1998; Hu *et al.* 2006; Escobar-Briones y García-Villalobos 2009). Durante la campaña MI, el rango de valores de $\delta^{13}C$ fue de -21.66‰ a -20.57‰, y el de C/N de 1.9 a 14.88. Por otro lado, durante MII, el $\delta^{13}C$ presentó valores dentro del rango -21.33‰ a -20.16‰, y la proporción C/N se mantuvo en el intervalo 7.25 a 16.50. Los valores de $\delta^{13}C$ de ambas campañas se encontraron dentro del rango de valores correspondientes a la producción marina (-21‰ a -22‰) (Meyers 1994; Alling *et al.* 2008). Los valores siguen una gradiente de profundidad, los valores más reducidos en $\delta^{13}C$ se encontraron más cercanos a la costa, posiblemente indicado una mayor influencia terrestre (Fig. 12 A). Los valores de C/N también presentan valores que indican una mayor influencia de producción marina (4-10) (Meyers 1994), pero hubo valores que se acercaron al rango que indica producción primaria terrígena (≥ 20), éstos se encontraron principalmente frente a la desembocadura del río Soto la Marina, durante la campaña MII (Fig. 12 B). A pesar de que ambas variables son indicadoras de la influencia terrígena, los patrones de $\delta^{13}C$ y C/N fueron diferentes entre ellos (Fig. 12). La proporción C/N distingue la producción primaria terrestre y la marina debido a que las plantas terrestres presentan un alto contenido de celulosa, mientras que los organismos marinos, responsables de la producción primaria, carecen de dicho compuesto (Meyers 1994). Por otro lado, el $\delta^{13}C$ distingue la producción primaria terrestre de la oceánica debido a las diferencias enzimáticas entre las distintas rutas metabólicas utilizadas por las plantas terrestres y el plancton, que de manera diferente discriminan el $\delta^{13}C$ que es incorporado a las células; las señales isotópicas de las tres rutas metabólicas utilizadas por las plantas (el ciclo de Calvin, el de Hatch-Slack, y el metabolismo ácido de las crasuláceas) son tan diferentes que pueden ser utilizados para distinguir el origen de la producción primaria (Meyers 1994; Marshall *et al.* 2007). Se ha sugerido que, en el norte del Golfo de México, la influencia terrestre en la concentración de C_{org} en sedimentos puede estar subestimada debido a que las señales isotópicas de $\delta^{13}C$ de los sedimentos son el resultado de la mezcla de material orgánico proveniente de plantas terrestres con diferentes rutas metabólicas, además del aportado por la producción primaria oceánica (Goñi *et al.* 1998). La relativa homogeneidad en el patrón espacial de los valores observados de $\delta^{13}C$, comparados con los de C/N (Fig. 12), puede ser el resultado de la mezcla del material orgánico producido en la columna de agua, con material orgánico terrestre producido por plantas con diferentes rutas metabólicas. En las región norte del área de estudio, esta mezcla de componentes puede ser aún más compleja debido al material advectado desde la plataforma LATEX, esto es soportado por la Fig. 12 B, donde se observó un cambio significativo en los valores de C/N entre ambas campañas, especialmente al este de los transectos I-IV.

En relación con el tamaño de los sedimentos y la influencia terrestre, la distancia a la costa también puede jugar un papel importante. Wollast (1998) resume las diferencias de depositación de carbono entre la zona costera y mar abierto. De manera general, las zonas costeras tienen una mayor tasa de depositación y secuestran una mayor cantidad de carbono que las regiones oceánicas. En este estudio, la longitud geográfica, y la distancia a la costa, presentaron una correlación mayor a 0.9, por lo que ambas variables pueden considerarse como equivalentes. Cabe mencionar que no es conveniente utilizar ambas variables (longitud

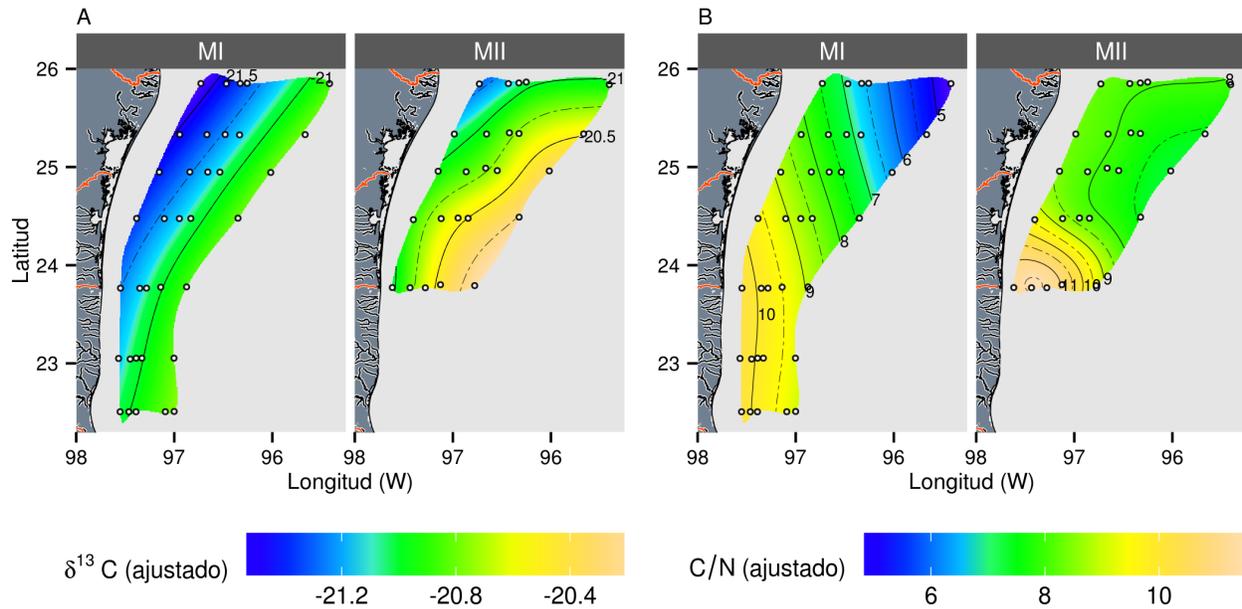


Figura 12: Valores de A) $\delta^{13}\text{C}$, y B) C/N, ajustados con un modelo aditivo para MI y MII.

y distancia a la costa) para ajustar el C_{org} , pues puede provocar problemas de colinearidad (Zuur *et al.* 2010), razón por la cuál se optó por utilizar sólo la longitud (además de que la longitud tiene la misma escala que la latitud). Por esta misma razón la profundidad no fue utilizada como variable independiente (la correlación con la longitud fue de 0.6).

Se ha mencionado que el porcentaje de C_{org} mostró diferencias significativas, en puntos específicos del área de muestreo, entre ambas campañas realizadas. Pero algo que es importante remarcar es que el hecho de haber utilizado el periodo de muestreo (campañas) como variable categórica hace imposible utilizar los resultados del modelo para realizar predicciones o generar escenarios futuros (lo mismo aplica para el modelo realizado para clorofila-a en la columna de agua). Esto es así debido a que sólo se cuenta con una sólo red de muestreo para ambas estaciones muestreadas. Como se mencionó anteriormente, la cantidad de materia orgánica en la columna de agua puede variar debido a una gran cantidad de procesos, que pueden tener una regularidad estacional o no.

6.2. Clorofila-a en columna de agua

La clorofila-a se encontró distribuida en un gradiente tridimensional (longitud, latitud y profundidad), esto hizo que su estudio fuera relativamente más complejo que el del C_{org} en sedimentos. En un principio se buscó ajustar los valores de clorofila-a utilizando las tres variables (longitud, latitud y profundidad en la columna de agua) y la interacción entre estas tres. Este procedimiento resultó infructuoso, pues los valores ajustados obtenidos variaban considerablemente de los valores observados. Por esta razón se utilizaron sólo la interacción entre profundidad-latitud y profundidad-longitud para la realización de este modelo. Por otro lado, se decidió utilizar un modelo generalizado con distribución normal y función liga

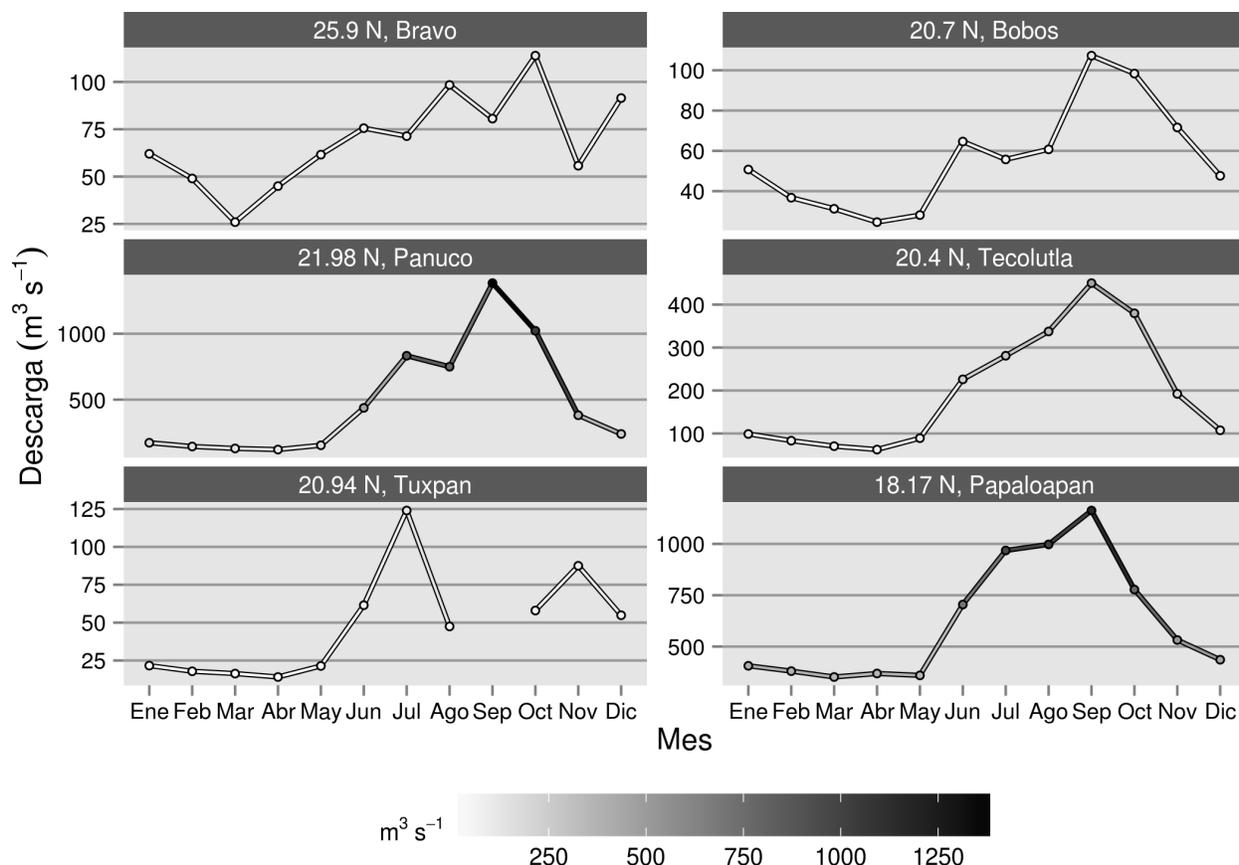


Figura 13: Descarga mensual promedio de ríos que desembocan en el oeste del Golfo de México, ordenados por latitud. La escala de color se agregó para remarcar la diferencia en la escala de cada panel y como ayuda visual.

logarítmica. Esto es equivalente a transformar la variable de respuesta (clorofila-a) tomando su logaritmo. La razón por la que se utilizó este modelo fue porque aquel con función liga “identidad” (equivalente a no transformar la variable de respuesta) mostró violaciones a los supuestos de normalidad y heterogeneidad de varianza. La aplicación del modelo generalizado con liga logarítmica logró aliviar sólo moderadamente dichos problemas.

Una de las principales diferencias entre ambas campañas es que durante MI se encontraron valores muy altos ($> 2.0 \mu\text{g/l}$) de clorofila-a frente a las desembocaduras del río Bravo y Soto la Marina, en las estaciones más cercanas a la costa. Esta característica sólo puede ser observada durante la campaña MI y a profundidades entre 5-25 metros. La época de lluvias y de mayor descarga de los ríos en el Golfo se presenta desde abril con máximos en septiembre, como se muestra en la Fig. 13 (datos obtenidos de la página River Discharge Database <http://www.sage.wisc.edu/riverdata/>). Es evidente que estos máximos de clorofila-a son influenciados por la descarga fluvial, pero los datos disponibles no permiten discernir la influencia que los ríos ejercen sobre el sistema. Esto podría investigarse con la señal isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ en el material suspendido en la columna de agua, desafortunadamente, no se cuentan con tales mediciones.

Durante la campaña MII, los valores de clorofila-a máximos ($\sim 0.3\text{-}0.4 \text{ mg/l}$) se mantuvie-

ron relativamente constantes por arriba de los 80 metros de profundidad, a lo largo de toda la zona de muestreo. A partir de dicha profundidad, los valores de clorofila-a comenzaron a decrecer. Esto no fue así para la campaña MI donde, a excepción de la zona frente a la desembocadura de los ríos Bravo y Soto la Marina, los valores máximos para toda la campaña se encontraron aproximadamente a los 80 metros de profundidad, a esta profundidad, en la zona noreste de la zona de muestreo, se observó una concentración relativamente alta de clorofila-a ($\sim 1.1-1.4$ mg/l). Este patrón probablemente se debe a que durante invierno (periodo en el que se llevó a cabo el muestreo de MII) el agua del Golfo se encontraba mezclada debido a la influencia de los vientos del norte, lo que estimuló el ascenso de nutrientes a la superficie, por ende, los valores más altos de clorofila-a se encontraron en profundidades relativamente someras. Por otro lado, durante verano (cuando se llevó a cabo la campaña MI) la columna de agua se estratifica, lo que aumenta la profundidad a la que los nutrientes se encuentran disponibles y, por consiguiente, los máximos de clorofila-a. La influencia de los ríos también es notable debido a que, en los puntos más cercanos a la costa, los valores de clorofila-a en MI sólo fueron más altos que los de MII en las latitudes cercanas a las desembocaduras de ríos. Durante MI también se observaron posibles ascensos de agua, en sitios específicos del área de estudio, debido a la temporada de huracanes. Si bien estos ascensos llevaron nutrientes hacia la parte superior de la columna de agua, no se apreció un aumento en de clorofila-a en los sitios mencionados, aunque esto último puede ser debido a que no pasó suficiente tiempo para que los organismos tomaran los nutrientes y aumentaran el tamaño de su población.

6.3. Patrones de clorofila-a a partir de datos satelitales

Tanto los mapas de promedios mensuales de clorofila-a en superficie, como los pares de FOEs y CPs, mostraron que los valores más altos de clorofila-a en la zona de estudio se encontraron predominantemente durante el invierno, en especial en las zonas más cercanas a la costa. Por otro lado, las zonas más profundas, y alejadas a la costa, se caracterizaron por tener los valores más bajos de clorofila-a. Se reconocen tres procesos que pueden dar lugar a un cambio en la concentración de clorofila-a en aguas superficiales.

En primer lugar se encuentra la inversión en verano de la corriente proveniente de la plataforma LATEX. Esto se puede apreciar en el segundo par de FOE/CP de la Fig. 10. La zona con los valores más negativos muestra la zona donde ocurre la confluencia debido a la inversión de la corriente, y representan valores relativamente altos de clorofila-a. Debido a la inversión de la corriente, provocada a su vez por el cambio en el patrón de los vientos, el agua proveniente de la plataforma LATEX no puede penetrar a la plataforma TAVE y el choque de corrientes opuestas forman una zona de confluencia que advecta la clorofila-a costa afuera (Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009). Durante primavera y verano, época en que la corriente que fluye paralela a la costa se invierte y desplaza aguas costa arriba, es posible observar un decremento en los valores de clorofila-a, primero en la zona sur y posteriormente en toda la costa (Fig. 8). Este fenómeno puede ser el causante de las diferencias encontradas con respecto al porcentajes de C_{org} entre las campañas MI y MII y en el patrón de distribución de clorofila-a observado en la columna de agua durante la campaña MI. No sólo eso, sino que también puede influir en el patrón detectado por el tercer componente rotado del análisis de componentes principales (Fig. 3), donde se observó que en la zona noreste hay valores relativamente elevados de arenas y limos que, presumiblemente, provienen del río Bravo.

Balsam y Beeson (2003) muestra que en las inmediaciones de este río hay un parche donde los sedimentos predominantes son arenas, este parche está rodeado por sedimentos arcillosos; nuevamente, la zona arenosa se encuentra dentro del área afectada por el transporte lateral. Si bien estos autores muestran que el contenido de arenas en sedimentos es mayor hasta poco más de los 200 metros de profundidad, es posible que el transporte lateral aumente la concentración de arenas en la parte profunda. Más aún, el transporte puede afectar la concentración de arenas de diferente manera, en distintas épocas del año, debido a que el arrastre lateral sólo se presenta durante verano. El transporte lateral también puede ser diferente entre distintos años, en parte provocado por la influencia de eddies en la zona.

El segundo proceso es la influencia fluvial. La tercer FOE mostró una zona con valores positivos frente a la costa, en la zona sur (Fig. 10). Estos valores corresponden a concentraciones relativamente elevadas de clorofila-a durante verano-otoño, según lo mostró el CP asociado. Como se ve en la Fig. 13, las descargas de los ríos comienza a aumentar en verano y alcanza su máximo cerca del final de esta estación. Durante el otoño la descarga sigue presentando valores considerables. Si bien los ríos representados en la figura corresponden a latitudes más al sur de la zona mostrada en la Fig. 10, los ríos que sí se encuentran dentro de la zona de estudio muestran la misma tendencia, por lo que es de suponer que la descarga de ríos en el área analizada siga el mismo patrón. Por otro lado, es posible que parte de la clorofila-a encontrada durante esta época sea advectada desde la zona sur debido a la inversión de la corriente durante verano. La figura muestra también que, entre las latitudes 24° - 25° N, existe una zona con valores ligeramente positivos que se extienden hacia el este, un patrón similar es descrito por la primera FOE y en la Fig. 8 los meses de verano muestran, si bien sutilmente, dicho patrón.

El tercer proceso es la alteración de los patrones de circulación por la formación de giros y el impacto de eddies en la plataforma del noroeste del Golfo de México. La manera en que dichos fenómenos alteran la circulación en esta zona ya ha sido descrita con anterioridad (Vidal *et al.* 1992; Vidal *et al.* 1994; Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009). La interacción entre giros con diferentes direcciones puede dar lugar a la advección de agua y dispersión de la clorofila, como se ha reportado en otras secciones del Golfo de México (Toner *et al.* 2003). Haciendo uso de imágenes satelitales de clorofila-a y valores de altimetría del océano, Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) reportaron que durante los años 2005-2007, en el noroeste del Golfo de México, eddies ciclónicas al norte interactúan con eddies anticiclónicas al sur, advectando clorofila-a costa afuera. Este fenómeno puede ser percibido en la Fig. 10 (FOE/CP 4), donde al noreste del área de estudio se observan valores relativamente elevados de clorofila-a, especialmente durante los años 2003-2007. El análisis sugiere que durante 2010-2011 se presentaron fenómenos similares, pero con menor intensidad, posiblemente causados por giros asociados a tormentas o causados por los vientos del norte.

La descomposición en valores singulares es una herramienta útil para la detección de patrones espacio-temporales de una o más variables de interés. Si bien este tipo de estudios ya se han llevado a cabo en el Golfo de México, éstos por lo general abarcan la región entera del Golfo (Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009; Salmerón-García *et al.* 2010). En este trabajo se decidió analizar sólo una región aledaña a la zona de muestreo, esto se hizo con el fin de ignorar otras características de importancia en el Golfo que podrían oscurecer los procesos de mayor relevancia para la zona de estudio. A partir de este análisis, y de los mapas de clorofila-a y de corrientes, se reconoce que la zona norte-noreste del área de estudio, y

la localizada frente a la desembocadura del río Soto la Marina, se encuentra sujeta a una variación más alta en comparación al resto del de los sectores.

6.4. Factores que afectan la interacción entre los ambientes pelágico y béntico en el noroeste del Golfo de México

La distribución de C_{org} en sedimentos superficiales del noroeste del Golfo de México presentó cambios entre las dos campañas muestreadas. Esto es indicio de que existen factores que afectan la depositación de carbono, y que éstos actúan lo suficientemente rápido como para causar diferencias significativas en el porcentaje de C_{org} de sedimentos en poco menos de seis meses. Ésto es más notorio en la zona norte - noreste del área de estudio, y frente a la desembocadura del río Soto la Marina.

Se presume que los cambios en la zona norte están relacionados a la advección de sedimentos costa afuera, causada por la confluencia de corrientes costeras, con direcciones opuestas, durante el verano (Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009). En esta misma zona se presentaron variaciones estacionales de clorofila-a en aguas superficiales, como lo mostraron los valores de clorofila-a a partir de imágenes satelitales y la descomposición en valores singulares de los mismos (Fig. 8 y 10). Esta variación es más fuerte durante primavera y verano, y mayor aún en los años en los que se presentaron eddies.

Las campañas MI y MII tienen una separación temporal de poco menos de seis meses (MI: julio-agosto, 2010; MII: enero-febrero, 2011). El hecho de que se hayan encontrado diferencias en el porcentaje de C_{org} , en las estaciones profundas y entre ambas campañas, es interesante debido a que las zonas profundas tienen una tasa de sedimentación más baja y una tasa de remineralización alta. Santschi y Rowe (2008) muestra, para el norte del Golfo de México, tasas de sedimentación que van de a 3 a 15 cm kyr⁻¹, las tasas más bajas presentándose a mayor profundidad. Por otro lado, se estima que sólo un 1.5 % de la producción primaria oceánica alcanza el bentos en las zonas profundas debido a la remineralización en la columna de agua (Wollast 1998; Seiter *et al.* 2004). La región norte - noreste del área de estudio presentó diferencias significativas en la proporción de C_{org} en sedimentos entre las dos campañas, pero también es la región más alejada a la costa y tiene profundidades relativamente grandes. Una posible explicación a estas diferencias es el transporte lateral que sufren los sedimentos costeros debido a las corrientes marinas (Seiter *et al.* 2004). Sin embargo, Antoine (1972) menciona que el piso oceánico del noroeste del Golfo de México presenta pliegues que han impedido el transporte de sedimentos hacia la cuenca del Golfo. Otra posible explicación son las diferencias estacionales de concentración de materia orgánica en la columna de agua, provocadas por diferencias, también estacionales, de producción primaria oceánica producida *in situ*, producción primaria oceánica transportada por corrientes oceánicas, y producción primaria terrestre exportada por los ríos de la región.

Debido a que en el área de estudio se desconocen aspectos como la tasa de sedimentación, o la de descomposición de materia orgánica en la columna de agua, no es posible estimar el tiempo que tardan los sedimentos en reflejar las variaciones de materia orgánica de la zona fótica. Para entender el flujo de materia desde la superficie hasta los sedimentos es necesario conocer la tasa de sedimentación de la zona, para lo cual pueden utilizarse distintos métodos, como las trampas de sedimentos, o el fechamiento por isótopos radioactivos (Wang y Druffel

2001; Nagao *et al.* 2005; Griffith *et al.* 2010).

La región noroeste del Golfo de México presenta varias fuentes de materia orgánica, por lo que también es necesario identificar la aportación de cada una de ellas a los sedimentos. Los análisis de isótopos estables, y la proporción entre el C_{org} y N_T en sedimentos, aportan información útil referente a si la materia orgánica proviene de la producción marina o terrestre, sin embargo, varios factores pueden afectar las proporciones de isótopos o la de C/N (Goñi *et al.* 1998). Los biomarcadores son una herramienta alternativa que puede utilizarse para diferenciar el origen de la materia orgánica y puede revelar información adicional sobre el tipo de organismos responsables de la producción primaria (Goñi *et al.* 1998; He *et al.* 2010; Xing *et al.* 2011).

7. Conclusiones

La concentración de C_{org} varía en el gradiente espacial y depende tanto de la longitud como de la latitud. En el gradiente longitudinal, el C_{org} tiende a decrecer conforme decrece la longitud, esto es debido a que con el decremento de la longitud aumentan la distancia a la costa y la profundidad de la columna de agua. En el gradiente latitudinal, el porcentaje de C_{org} en sedimentos puede variar debido a la presencia de ríos o por la influencia de procesos oceánicos que se llevan a cabo sólo en determinadas latitudes. Debido a la estacionalidad de estos procesos, el porcentaje de C_{org} que es depositado en el sedimento también puede variar en el tiempo.

Frente de la desembocadura de los ríos Bravo y Soto la Marina se pueden encontrar regiones con valores relativamente reducidos de C_{org} en los sedimentos. Conforme aumenta la distancia a la desembocadura, los valores repuntan y en las zonas más profundas vuelven a decrecer. El incremento relativo de arenas y limos en sedimentos por la aportación de los ríos puede ser una posible explicación a este fenómeno. La advección de agua desde la plataforma LATEX puede ser otra fuente de sedimentos grandes en la zona norte de la plataforma TAVE y las zonas profundas aledañas.

En la columna de agua también se pueden observar diferencias en la cantidad de material orgánico entre ambas campañas. Las diferencias pueden encontrarse tanto en el gradiente longitudinal, latitudinal y de profundidad. Dicha variación puede ser causada por una combinación de factores, tales como la influencia fluvial, periodos de estratificación y mezcla, formación de surgencias, y el transporte de materia por acción de corrientes oceánicas. Estos factores presentan una variación temporal, lo que se ve reflejado en el contenido de materia orgánica en la columna de agua.

Con el fin de realizar una descripción más a fondo del proceso de acoplamiento en la región estudiada, y del Golfo de México en general, es necesario realizar más estudios que se enfoquen no sólo a describir la cantidad de material orgánico en sedimentos y columna de agua. Información como el origen de los sedimentos, la tasa de sedimentación, remineralización, y descomposición de materia orgánica en la columna de agua, o la resuspensión y transporte lateral de sedimentos, son aspectos fundamentales para el estudio del proceso de acoplamiento, pero para los cuales se cuenta con poca información para el noroeste del Golfo de México.

Agradecimientos

En primer lugar a mis tutores, por todos sus comentarios y recomendaciones.

A Alfonso Vázquez Botello y el laboratorio de contaminación marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), UNAM, por la cuantificación hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos.

A Jorge Zavala Hildalgo, Ángel Ruíz Angulo y Rosario Romero Centeno, del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, por su ayuda con el procesamiento de datos hidrográficos.

A Patricia Girón García, Instituto de Geología, UNAM, por la cuantificación de metales pesados en sedimentos.

A Pedro Morales y Edith Cienfuegos del Laboratorio de Espectrometría de Masas de Isótopos Estables del Instituto de Geología, UNAM, por la cuantificación del $\delta^{13}\text{C}_{\text{CVPDB}}$.

A Adriana Vega García, Arturo Carranza Edwards y Eduardo Morales, del Laboratorio de Sedimentología del ICMyL, UNAM, que realizaron la clasificación granulométrica de los sedimentos.

A Martín Merino Ibarra y el laboratorio de biogeoquímica acuática, ICMyL, UNAM, que llevaron a cabo la cuantificación de clorofila-a a partir de las muestras de agua.

A Carlos Illescas Monterroso, por toda su ayuda y sus comentarios.

A mi familia, por todo su apoyo.

A todos mis amigos, por sus comentarios y opiniones. A los que no comentaron ni opinaron también. Un especial agradecimiento a Guadalupe Juárez por las correcciones ortográficas.

A los desarrolladores de software libre y abierto en todos lados, por proporcionar las herramientas que permitieron la realización de este trabajo. Un especial agradecimiento a las comunidades de Linux, Ubuntu, R y \LaTeX . También a las comunidades y usuarios de Stack Exchange y Stack Overflow (y otras que posiblemente no recuerde).

Referencias

- Alling, V., Humborg, C., Mörth, C.-M., Rahm, L. y Pollehne, F. (2008). «Tracing terrestrial organic matter by $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{13}\text{C}$ signatures in a subarctic estuary». En: *Limnology and Oceanography* 53.6, págs. 2594-2602.
- Ambrose, W. G. y Renaud, P. E. (1995). «Benthic response to water column productivity patterns: Evidence for benthic-pelagic coupling in the Northeast Water Polynya». En: *Journal of Geophysical Research* 100.C3, págs. 4411-4421.
- Antoine, J. W. (1972). «Structure of the Gulf of Mexico». En: *Oceanographic Studies, Volume 3: Contributions on the geological and geophysical oceanography of the Gulf of Mexico*. Ed. por R. Rezak y V. Henry. Houston: Gulf Publishing Company, pág. 303.
- Balsam, W. L. y Beeson, J. P. (2003). «Sea-floor sediment distribution in the Gulf of Mexico». En: *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 50.12, págs. 1421-1444.
- Beckers, J. M. y Rixen, M. (2003). «EOF Calculations and Data Filling from Incomplete Oceanographic Datasets*». En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20.12, págs. 1839-1856.
- Dale, A. W. y Prego, R. (2002). «Physico-biogeochemical controls on benthic-pelagic coupling of nutrient fluxes and recycling in a coastal upwelling system». En: *Marine Ecology Progress Series* 235.2, págs. 15-28.
- Danovaro, R. (1999). «Biochemical composition of sedimentary organic matter and bacterial distribution in the Aegean Sea: trophic state and pelagic-benthic coupling». En: *Journal of Sea Research* 42.2, págs. 117-129.
- Duineveld, G. C. A. *et al.* (2000). «Benthic-pelagic coupling in the oligotrophic Cretan Sea». En: *Progress In Oceanography* 46.2-4, págs. 457-481.
- Emerson, S. y Hedges, J. (2003). «Sediment Diagenesis and Benthic Flux». En: *Treatise on Geochemistry. Volume 6: The Oceans and Marine Geochemistry*. Ed. por H. Elderfield. Oxford, UK: Elsevier. Cap. 11, págs. 293-319.
- Escobar-Briones, E. G. y García-Villalobos, F. J. (2009). «Distribution of total organic carbon and total nitrogen in deep-sea sediments from the southwestern Gulf of Mexico». En: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 61.1, págs. 73-86.
- Escobar-Briones, E. G. y Soto, L. A. (1997). «Continental shelf benthic biomass in the western Gulf of Mexico». En: *Continental Shelf Research* 17.6, págs. 585-604.
- Giordani, P. (2002). «Gradients of benthic-pelagic coupling and carbon budgets in the Adriatic and Northern Ionian Sea». En: *Journal of Marine Systems* 33-34, págs. 365-387.
- Goñi, M. A., Ruttenberg, K. C. y Eglinton, T. I. (1998). «A reassessment of the sources and importance of land-derived organic matter in surface sediments from the Gulf of Mexico». En: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62.18, págs. 3055-3075.
- Grebmeier, J. M., McRoy, C. P. y Feder, H. M. (1988). «Pelagic-benthic coupling on the shelf of the northern Bering and Chukchi Seas. I. Food supply source and benthic bio-mass». En: *Marine Ecology Progress Series* 48, págs. 57-67.
- Griffith, D. R., Martin, W. R. y Eglinton, T. I. (2010). «The radiocarbon age of organic carbon in marine surface sediments». En: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74.23, págs. 6788-6800.

- Hannachi, A. (2004). *A primer of EOF analysis of climate data*. <http://www.met.reading.ac.uk/~han/Monitor/eofprimer.pdf>. Department of meteorology, University of Reading.
- Hartmann, L. C. (2014). *Matrix Methods for Analysis of Structure in Data Sets*. URL: http://www.atmos.washington.edu/~dennis/552_Notes_4.pdf (visitado 22-01-2014).
- He, B., Dai, M., Huang, W., Liu, Q., Chen, H. y Xu, L. (2010). «Sources and accumulation of organic carbon in the Pearl River Estuary surface sediment as indicated by elemental, stable carbon isotopic, and carbohydrate compositions». En: *Biogeosciences* 7.10, págs. 3343-3362.
- Hu, J., Peng, P., Jia, G., Mai, B. y Zhang, G. (2006). «Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China». En: *Marine Chemistry* 98.2-4, págs. 274-285.
- Jeffrey, S. y Humphrey, G. (1975). «New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a1, b1, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton.» En: *Biochem. Physiol. Pflanz.* 167, págs. 191-194.
- Liu, K., Chen, Y., Tseng, C., Lin, I., Liu, H. y Snidvongs, A. (2007). «The significance of phytoplankton photo-adaptation and benthic–pelagic coupling to primary production in the South China Sea: Observations and numerical investigations». En: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 54.14-15, págs. 1546-1574.
- Longhurst, A. (1983). «Benthic-pelagic coupling and export of organic carbon from a tropical Atlantic continental shelf–Sierra Leone». En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 17.3, págs. 261-285.
- Manzano-Sarabia, M. M. y Salinas-Zavala, C. A. (2008). «Seasonal and inter-annual variability in chlorophyll-a and sea surface temperature in the western Gulf of Mexico: 1996-2007». En: *INCI* 33.9.
- Marshall, J. D., Brooks, J. R. y Lajtha, K. (2007). «Sources of variation in the stable isotopic composition of plants». En: *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Ed. por R. H. Michener y K. Lajtha. Second edi. Blackwell Publishing Ltd. Cap. 2, págs. 22-60.
- Martínez-López, B. y Zavala-Hidalgo, J. (2009). «Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico». En: *Journal of Marine Systems* 77.1-2, págs. 1-20.
- Meyers, P. A. (1994). «Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter». En: *Chemical Geology* 114.3-4, págs. 289-302.
- Nagao, S., Usui, T., Yamamoto, M., Minagawa, M., Iwatsuki, T. y Noda, A. (2005). «Combined use of $\Delta^{14}\text{C}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values to trace transportation and deposition processes of terrestrial particulate organic matter in coastal marine environments». En: *Chemical Geology* 218.1-2, págs. 63-72.
- Ortiz-Hernández, M. L., Sánchez-Salinas, E. y Gutiérrez, M. E. (1993). *Análisis de suelos: fundamentos y técnicas. Parte I*. Cuernavaca, Morelos, México: Universidad Autónoma Del Estado de Morelos, pág. 104.
- Quinn, G. P. y Keough, M. J. (2002). *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge University Press, pág. 537.
- R Core Team (2013). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

- Raffaelli, D. *et al.* (2003). «The ups and downs of benthic ecology: considerations of scale, heterogeneity and surveillance for benthic–pelagic coupling». En: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 285-286.2003, págs. 191-203.
- Rathburn, A. E., Perez, M. E. y Lange, C. B. (2001). «Benthic-pelagic coupling in the Southern California Bight: Relationships between sinking organic material, diatoms and benthic foraminifera». En: *Marine Micropaleontology* 43.3-4, págs. 261-271.
- Salmerón-García, O., Zavala-Hidalgo, J., Mateos-Jasso, A. y Romero-Centeno, R. (2010). «Regionalization of the Gulf of Mexico from space-time chlorophyll-a concentration variability». En: *Ocean Dynamics* 61.4, págs. 439-448.
- Santschi, P. H. y Rowe, G. T. (2008). «Radiocarbon-derived sedimentation rates in the Gulf of Mexico». En: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 55.24-26, págs. 2572-2576.
- Seiter, K., Hensen, C., Schröter, J. y Zabel, M. (2004). «Organic carbon content in surface sediments—defining regional provinces». En: *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 51.12, págs. 2001-2026.
- Signoret, M., Bulit, C. y Pérez, R. (1998). «Patrones de distribución de clorofila-a y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe». En: *Hidrobiológica* 8.2, págs. 81-88.
- Soetaert, K., Middelburg, J. J., Herman, P. M. J. y Buis, K. (2000). «On the coupling of benthic and pelagic biogeochemical models». En: *Earth-Science Reviews* 51.1-4, págs. 173-201.
- Soto, L. A. y Escobar-Briones, E. G. (1995). «Coupling mechanisms related to benthic production in the SW Gulf of Mexico». En: *Biology and ecology of shallow coastal waters: proceedings of the 28th European Marine Biology Symposium*. Ed. por A. Eleftheriou, C. Smith y A. D. Ansell. Olsen & Olsen, págs. 233-242.
- Toner, M., Kirwan, A. D., Poje, A. C., H., K. L., Muller-Karger, F. E. y Jones, C. K. R. T. (2003). «Chlorophyll Dispersal by Eddy-Eddy Interactions in the Gulf of Mexico». En: *J. Geophys. Res.* 108.
- UNESCO (1976). «Guide to Operational Procedures for the IGOSS Pilot Project on Marine Pollution (Petroleum) Monitoring». En: pág. 50.
- Vázquez, A. *et al.* (2011). «Contaminación Marina». En: *Marco Ambiental de las Condiciones Oceanográficas en el Sector NW de la ZEE de México en el Golfo de México (MARZEE). Reporte técnico I*. Ed. por L. A. Soto. UNAM. INECC. México.
- Vidal, V. M. V., Vidal, F. V. y Perez-Molero, J. M. (1992). «Collision of a Loop Current Anticyclonic Ring Against the Continental Shelf Slope of the Western Gulf of Mexico». En: *J. Geophys. Res.* 97.C2, págs. 2155-2172.
- Vidal, V. M. V., Vidal, F. V., Hernández, A. F., Meza, E. y Pérez-Molero, J. M. (1994). «Baroclinic flows, transports, and kinematic properties in a cyclonic-anticyclonic-cyclonic ring triad in the Gulf of Mexico». En: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 99.C4, págs. 7571-7597.
- Walkley, A. (1947). «A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils—effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents». En: *Soil Science* 63.4, págs. 251-264.
- Wang, X.-C. y Druffel, E. R. M. (2001). «Radiocarbon and stable carbon isotope compositions of organic compound classes in sediments from the NE Pacific and Southern Oceans». En: *Marine Chemistry* 73.1, págs. 65-81.

- Wickham, H. (2009). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer New York.
- Wilhelm, O. y Ewing, M. (1972). «Geology and History of the Gulf of Mexico». En: *Geological Society of America Bulletin* 83.3, pág. 575.
- Wollast, R. (1998). «Evaluation and comparison of the global carbon cycle in the coastal zone and in the open ocean». En: *The Global Coastal Ocean - Processes and Methods*. Ed. por K. H. Brink y A. R. Robinson. New York: JohnWiley & Sons. Cap. 9, págs. 213-252.
- Wood, S. N. (2004). «Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models». En: *Journal of the American Statistical Association* 99.467, págs. 673-686.
- Xing, L., Zhang, H., Yuan, Z., Sun, Y. y Zhao, M. (2011). «Terrestrial and marine biomarker estimates of organic matter sources and distributions in surface sediments from the East China Sea shelf». En: *Continental Shelf Research* 31.10, págs. 1106-1115.
- Xue, Z., He, R., Fennel, K., Cai, W.-J., Lohrenz, S. y Hopkinson, C. (2013). «Modeling ocean circulation and biogeochemical variability in the Gulf of Mexico». En: *Biogeosciences Discussions* 10.5, págs. 7785-7830.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L. y O'Brien, J. J. (2003). «Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model». En: *Journal of Geophysical Research* 108.C12, págs. 1-19.
- Zavala-Hidalgo, J., Gallegos-García, A., Martínez-López, B., Morey, S. L. y O'Brien, J. J. (2006). «Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico». En: *Ocean Dynamics* 56.3-4, págs. 333-338.
- Zuur, A. F. (2012). *A Beginner's Guide to Generalized Additive Models with R*. United Kingdom, Newburgh: Highland Statistics LTD., pág. 188.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N. y Elphick, C. S. (2010). «A protocol for data exploration to avoid common statistical problems». En: *Methods in Ecology and Evolution* 1.1, págs. 3-14.

Referencias digitales

- <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>
- <http://hycom.org/>
- <http://www.sage.wisc.edu/riverdata/>
- <http://gcoos.tamu.edu/products/topography/Introduction.html> (Batimetría y línea de costa del Golfo de México).
- <http://www.geowebrum.org/index.php/acervo/shape-cartografico> (Ríos de México)