



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

VARIABILIDAD DE FLUJOS A TRAVÉS Y A LO LARGO DE
LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL GOLFO DE MÉXICO
Y SU SENSIBILIDAD A FORZAMIENTOS ATMOSFÉRICOS

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

JUAN MANUEL NIEBLAS PIQUERO

TUTOR:

DR. JORGE ZAVALA HIDALGO
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

México, CDMX, Mayo, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Dedicatoria y Agradecimientos

Dedicado este trabajo a:

Los seres vivos que amo.

Agradezco a:

Fondo Sectorial CONACyT - SENER - Hidrocarburos, proyecto 201441 por el financiamiento a esta investigación. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM).

Los recursos de supercómputo de la UNAM (supercomputadora Miztli) proporcionados a través del proyecto LANCAD-UNAM-DGTIC-110 y a la gente involucrada por el apoyo en este proyecto.

A mi país (CONACYT) y a la UNAM por brindarme la oportunidad de tener una formación profesional.

Al Dr. Jorge Zavala Hidalgo por el enorme compromiso y su infinita paciencia que incentiva continuamente mi pasión por la vida.

A mis amados familiares por ser mi elemento natural.

Al grupo IOA y la gente de Sukhavati por brindarme un hogar de infinita sustancia.

Al espacio y tiempo con mi hermano Rafael Vega y las enseñanzas compartidas con Gabriela Acosta.

A Sofía Garnica por ser un faro de sonrisas.

Índice general

Dedicatoria y Agradecimientos	III
Contenido	IV
Lista de Figuras	VII
Abreviaciones	XIII
Resumen	XV
I Introducción	1
I.1 Circulación	1
I.2 Plataforma Continental	4
I.3 Hipótesis	9
I.4 Objetivos	9
I.4.1 Objetivos particulares	10
I.5 Justificación	11
II Antecedentes	13
II.1 Ecuaciones de movimiento	13
II.2 Transporte de Ekman	15
II.3 Modelos numéricos en el GoM	18
II.4 HYCOM	18
II.4.1 Coordenadas verticales	20
II.4.2 Malla del Modelo y pasos de tiempo	20
III Metodología	23
III.1 Simulación con HYCOM	23
III.1.1 Características de la simulación con HYCOM	23
III.1.2 Forzamientos	23
III.2 Cálculo de isóbatas	24
III.2.1 Puntos de interés	24
III.3 Transporte a través de las isóbatas de la plataforma continental	26
III.4 Transporte a lo largo de las isóbatas de la plataforma continental	28
III.4.1 Divergencia de la circulación en las plataformas del GoM	29
III.4.2 Esfuerzo del viento	30
III.4.3 Medias móviles	30
IV Resultados	33
IV.1 Transporte a lo largo de la plataforma continental	33

IV.2 Transporte a través de la plataforma continental	41
IV.2.1 Promedios mensuales de transportes diarios	42
IV.2.2 Promedios mensuales de transportes horarios	50
IV.3 Temperatura	53
V Discusión	59
V.1 Discusión	59
V.1.1 Cambios en la circulación a lo largo de la plataforma continental	61
V.1.2 WFS	61
V.1.3 MAFLA	63
V.1.4 LATEX	63
V.1.5 TAVE	65
V.1.6 BC	66
VI Conclusiones	69
VI.1 Conclusión	69
VI.2 Trabajo futuro	72
A Promedios mensuales de transportes horarios (2000 - 2013)	75
Bibliografía	101

Índice de figuras

I.1	Batimetría del Golfo de México. Puntos de interés sobre las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m en la Plataforma Oeste de Florida (A-verde), Plataforma de Misisipi-Alabama (B-amarillo),plataforma de Luisiana-Texas (C-azul cielo), la plataforma Tamaulipas-Veracruz (D-rojo), y el Banco de Campeche (E-magenta)	2
I.2	Circulación del GoM que ilustra las corrientes y giros más importantes. El giro de Campeche (BC), la Corriente de Frontera Oeste (WGAG), el Giro anticiclónico al oeste del Golfo (WGAG), los remolinos de la Corriente del Lazo (LCE) y la Corriente del Lazo (LC). Tomado de Zavala-Hidalgo et al (2002)	3
I.3	Trayectorias que muestran el movimiento de dos derivadores (<i>drifters</i>) en superficie influenciado por dos grandes anillos de núcleos cálidos (anciclónicos). Cerca de la parte superior de la figura, las trayectorias azul y negra comienzan en aguas poco profundas y se mueven en sentido antihorario. Los contornos topográficos de la superficie del mar (SSH) se espacian cada 5cm (Tomado de Sturges, 2005).	5
II.1	Espiral de Ekman (tomado de Cushman, 2006).	17
II.2	Coordenadas verticales z, isopicnas (ρ) y sigma (σ) (Tomada de Bleck, R., Halliwell, G. R., Wallcraft, A. J., Carroll, S., Kelly, K., Rushing, K.,2002).	20
II.3	Malla Arakawa C. Coordenadas horizontales.	21
III.1	Ilustración del transporte a través de las secciones superficial y subsuperficial de la plataforma interna (20 y 30m), intermedia (50m) y externa (200m).	28
III.2	Ilustración del transporte en superficie a lo largo de la plataforma interna (20 y 30m), intermedia (50m) y externa (200m).	29
IV.1	Promedio mensual del transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 20m del GoM. Tonos rojos antihorarias (costa abajo); verde-azul-morado en dirección horaria (costa arriba). Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés.	34
IV.2	Promedio mensual del transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 30m del GoM. Tonos rojos antihorarias (costa abajo); verde-azul-morado en dirección horaria (costa arriba). Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés.	35
IV.3	Promedio mensual del transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 50m del GoM. Tonos rojos antihorarias (costa abajo); verde-azul-morado en dirección horaria (costa arriba). Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés.	36
IV.4	Promedio mensual del transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 200m del GoM. Tonos rojos antihorarias (costa abajo); verde-azul-morado en dirección horaria (costa arriba). Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés.	37

IV.5	Transporte promedio mensual en el GoM a lo largo de isóbatas 30, 50 y 200m. Transporte costa abajo (naranja-rojo) con la costa a la izquierda y transporte costa arriba (verde-azul-morado) con la costa hacia la derecha.	38
IV.6	Diagrama Hovmuller de la divergencia mensual en el GoM a lo largo de isóbatas 30, 50 y 200m. En naranja-rojo la divergencia, en verde-azul-morado convergencia. Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés .	39
IV.7	Divergencia a lo largo de isóbatas de 30, 50 y 200m en el GoM. En naranja-rojo la divergencia, en verde-azul-morado convergencia.	40
IV.8	Promedio mensual del esfuerzo del viento (1992-2012) a lo largo de los puntos de interés de la isóbata de 50m. Valores positivos en dirección antihoraria.	41
IV.9	Surgencia (cyan) y hundimiento (rojo) mensual en el GoM sobre las isóbatas de 30, 50 y 200m. En blanco las regiones con transporte costa adentro-afuera en toda la columna de agua.	43
IV.10	Diagrama Hovmuller de la surgencia (azul) y hundimiento (rojo) en el GoM a lo largo de isóbatas de 30, 50 y 200m.	44
IV.11	Transporte costa adentro (rojo) y costa afuera (azul) mensual en toda la columna de agua sobre las isóbatas 30, 50 y 200m del GoM.	45
IV.12	Diagrama Hovmuller del transporte costa adentro (amarillo) y costa afuera (cyan) en toda la columna de agua (superficie a fondo) mensual en las isóbatas 30, 50 y 200m del GoM.	46
IV.13	Diagramas Hovmuller del promedio anual del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y el transporte costa afuera verde-azul-morado.	47
IV.14	Diagramas Hovmuller del promedio anual del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y el transporte costa afuera verde-azul-morado.	48
IV.15	Diagramas Hovmuller del promedio anual del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y el transporte costa afuera verde-azul-morado.	49
IV.16	Diagramas Hovmuller del promedio anual del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM, integrada desde superficie a 20m y de 20m hasta los 50m de profundidad. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y transporte costa afuera verde-azul-morado.	50
IV.17	Diagramas Hovmuller del promedio horario (2000-2013) para el mes de Julio del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y el transporte costa afuera verde-azul-morado.	52
IV.18	Diagrama Hovmuller del promedio horario (2000-2013) para el mes de Septiembre del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y transporte costa afuera verde-azul-morado.	52
IV.19	Temperatura promedio sobre la isóbata de 20m del GoM (1992-2012). Sección superficial (0 a 10m) y de fondo (10 a 20m).	54
IV.20	Temperatura promedio sobre la isóbata de 30m del GoM (1992-2012). Sección superficial (0 a 20m) y de fondo (20 a 30m).	55
IV.21	Temperatura promedio sobre la isóbata de 50m del GoM (1992-2012). Sección superficial (0 a 20m) y de fondo (20 a 50m).	56
IV.22	Temperatura promedio sobre la isóbata de 200m del GoM (1992-2012). Sección superficial (0 a 20m) y de fondo (20 a 50m).	57
V.1	Transporte promedio a lo largo de las plataformas interna, intermedia y externa del GoM para el mes de Julio. En rojo circulación antihoraria y en azul cielo circulación horaria.	62

V.2	Transporte promedio a lo largo de las plataformas interna, intermedia y externa del GoM para el mes de Septiembre. En rojo circulación antihoraria y en azul cielo circulación horaria.	62
V.3	Transporte promedio a través de las isóbatas 20, 30, 50 y 200m del GoM para el mes de Julio. Se representan dos flechas; en superficie (rojo) y subsuperficie (azul cielo).	64
V.4	Transporte promedio a través de las isóbatas 20, 30, 50 y 200m del GoM para el mes de Septiembre. Se representan dos flechas; en superficie (rojo) y subsuperficie (azul cielo).	64
V.5	Representación esquemática del transporte de masa a través de la plataforma debido a la convergencia de masa a lo largo del suroeste de LATEX (de Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).	67
V.6	Representación esquemática del transporte de masa a través de la plataforma debido a la convergencia de masas a lo largo de la Bahía de Campeche (de Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).	67
A.1	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Enero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	75
A.2	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Febrero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	76
A.3	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Marzo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	76
A.4	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Abril. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	77
A.5	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Mayo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	77
A.6	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Junio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	78
A.7	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Julio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	78
A.8	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Agosto. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	79
A.9	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Septiembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	79
A.10	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Octubre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	80
A.11	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Noviembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	80

A.12	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Diciembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	81
A.13	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Enero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	81
A.14	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Febrero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	82
A.15	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Marzo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	82
A.16	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Abril. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	83
A.17	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Mayo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	83
A.18	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Junio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	84
A.19	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Julio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	84
A.20	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Agosto. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	85
A.21	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Septiembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	85
A.22	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Octubre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	86
A.23	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Noviembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	86
A.24	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Diciembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	87
A.25	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Enero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	87
A.26	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Febrero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	88
A.27	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Marzo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	88
A.28	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Abril. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	89

A.29	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Mayo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	89
A.30	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Junio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	90
A.31	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Julio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	90
A.32	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Agosto. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	91
A.33	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Septiembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	91
A.34	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Octubre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	92
A.35	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Noviembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	92
A.36	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Diciembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	93
A.37	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Enero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	93
A.38	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Febrero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	94
A.39	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Marzo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	94
A.40	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Abril. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	95
A.41	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Mayo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	95
A.42	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Junio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	96
A.43	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Julio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	96
A.44	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Agosto. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	97
A.45	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Septiembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	97

A.46	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Octubre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	98
A.47	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Noviembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	98
A.48	Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Diciembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.	99

Abreviaciones

HYCOM	HY brid C oordinate O ceanographic M odel
BOC	Banco de Campeche
BTS	B ottom T emperature S now
CL	Corriente de Lazo
EROS	Sistema de Observación de Recursos de la Tierra
GOM	Golfo de México
INEGI	Instituto Nacional de E stadística y G eografía
LATEX	Plataforma de Texas y Luisiana
LIDAR	L ight D etection A nd R anging
MAFLA	Plataforma de Mississippi Alabama y Florida
NASA	N ational A eronautics and S pace A dministration
RGB	Colores primarios (Rojo, verde y azul)
SIG	Sistema de I nformación G eográfica
TOA	T op o f A tmosphere
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
WFS	Plataforma al Oeste de Florida
WRF	W eather R esearch and F orecasting model

Resumen

El intercambio de baja frecuencia, a escala mensual, de masas de agua entre la plataforma continental del Golfo de México (GoM) y las regiones oceánicas es analizado a partir de los datos de una simulación de 21 años de alta resolución, realizada con el modelo numérico HYCOM (Hybrid Coordinate Oceanic Model). Se realizó una simulación con la versión 2.2.98 en una malla de 541x385 celdas $1/25^\circ$ en dirección zonal de todo el GoM. Para este fin, se obtuvieron los transportes a través de las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m; los transportes a lo largo de la plataforma, la divergencia/convergencia a lo largo de la isóbatas, y las condiciones de surgencia/hundimiento en las diferentes regiones del GoM: Plataforma al Oeste de Florida (WFS), plataforma de Mississippi-Alabama-Florida (MAFLA), la plataforma de Veracruz y Tamaulipas (TAVE), la plataforma de Texas y Luisiana (LATEX) y el Banco de Campeche (BC). También se analiza el promedio de la variabilidad diurna de los transportes través de la plataforma continental del GoM, con las salidas horarias de 13 años (2000-2013), con el propósito de estudiar la variación diurna de los transportes a través de la plataforma.

Los resultados del transporte a lo largo de la plataforma continental del GoM indican que durante el año la circulación con dirección horaria es predominante, aunque existe una inversión estacional a circulación antihoraria en algunas zonas de la plataforma del GoM. Las plataformas interna e intermedia tienen una inversión estacional en la plataforma de LATEX y TAVE, mientras que en la plataforma externa una inversión septembrina ocurre en la plataforma TAVE y el BC. Esta circulación antihoraria en la plataforma externa del oeste del Banco de Campeche y en el talud adyacente es una característica que no ha sido reportada con anterioridad. La duración de este cambio en la circulación ocurre en diferentes periodos de tiempo en las plataforma interna, intermedia y externa.

Los promedios mensuales de los transportes a través de las isóbatas en la región norte y oeste del GoM muestran que en la capa superior de la plataforma interna (isóbata 20 y 30 m) la dirección es principalmente costa adentro a lo largo del año, y es costa afuera (surgencia) en el sur del GoM, en la plataforma de la Bahía de Campeche y en el BC. En la WFS predomina el hundimiento durante primavera y verano, en LATEX en invierno y primavera y en TAVE y MAFLA la mayor parte del año. Por otra parte, las condiciones de surgencia sobre la isóbata de 30 m ocurren en LATEX durante el verano y en el BC todo el año. Sobre la isóbata de 20 m hay surgencia al este del Río Misisipi la mayor parte del año y en el BC durante el verano.

Para la plataforma intermedia, el transporte en superficie a través de la plataforma (0 a 20 m) es costa adentro al centro y norte del GoM, la mayor parte del año; en el sur del golfo se presenta de enero a junio, al oeste y noroeste del BC es costa adentro todo el año. El transporte costa afuera se observa al sur de Texas de febrero a junio, en la Bahía de Campeche y al norte del BC todo el año, donde es predominante. Durante el verano se observa surgencia en LATEX. En MAFLA, al este del Río Misisipi la surgencia se presenta durante el invierno y a principios de primavera. También se detecta surgencia al norte y oeste del BC en invierno y primavera.

Los resultados indican que plataforma externa (isóbata de 200 m) del GoM presenta un transporte costa adentro/afuera con mayor frecuencia que en las plataformas internas e intermedia. Siendo costa adentro predominantemente en WFS, TAVE y al oeste del BC. Por otro lado, el transporte costa afuera aparece todo el año al sur de Texas, en el sur de la Bahía de Campeche y al Norte del BC. La surgencia en la plataforma externa del GoM se presenta en LATEX en verano, en la Bahía de Campeche y al norte del BC. El fenómeno de hundimiento disminuye su frecuencia en comparación con las plataformas internas, ocurriendo en MAFLA en primavera y verano; y en Veracruz y algunas regiones del BC, donde se observan la mayor parte del año.

Los resultados de los análisis de transportes horarios muestran por primera vez a escala de todo el GoM, el impacto diurno en la circulación. Al observar el transporte horario mensual a través de la plataforma continental, se encontró que en superficie y subsuperficie hay una señal diurna muy clara donde la componente de la corriente perpendicular a las isóbatas analizadas cambia a lo largo del ciclo diurno y en ocasiones incluso cambia de signo donde se muestra una posible influencia de la brisa. En el promedio de los años analizados (2000 - 2013), la condición de surgencia se alterna con una condición de hundimiento en las horas complementarias a las de surgencia. A diferencia de las plataformas internas donde las direcciones del transporte en superficie y subsuperficie proporcionan condiciones de surgencia y hundimiento; el transporte en la isóbata de 200 m muestra una entrada o salida de agua en toda la columna de agua analizada.

Capítulo I

Introducción

El Océano Atlántico es un cuerpo de agua salada que cubre aproximadamente una quinta parte de la superficie del planeta Tierra y separa a los continentes de Europa y África con América del Norte y Sudamérica. Al oeste del Océano Atlántico Norte se encuentra el Golfo de México (GoM). Esta región marítima presenta una fisiografía compleja (Figura I.1) y se encuentra casi completamente rodeada por los litorales de los países de México, Estados Unidos (EU) y Cuba.

Los recursos naturales de la cuenca del GoM han sustentado vida en la región. Las aguas costeras apoyan a las pesquerías comerciales y deportivas. Las playas brindan recreación a millones de personas y sustentan la economía en numerosas comunidades costeras. Sus humedales fomentan la industria marisquera. Además, el petróleo y el gas son explotados en el GoM. Para administrar correctamente estos recursos, es primordial entender la circulación del Golfo (Sturges, W., Lugo Fernandez, A., Shargel, M.D., 2005).

I.1. Circulación

El GoM es una cuenca altamente estratificada cuya dinámica sigue en gran medida un sistema de dos capas (Pérez-Brunius, P., H. Furey, A. Bower, P.Halmilton, J.Candela, P. García-Carrillo, and R. Leben, 2018). Una capa superficial (arriba de los 1000m) que se caracteriza por flujos intensos en superficie, y una capa inferior (>1200m hasta el fondo) que muestra corrientes que varían poco con la profundidad (Hamilton, 2009). La circulación oceánica en el GoM se debe en gran medida al viento y al transporte de masas a través del Canal de Yucatán y del Estrecho de Florida (Hurburt y Thompson, 1980)

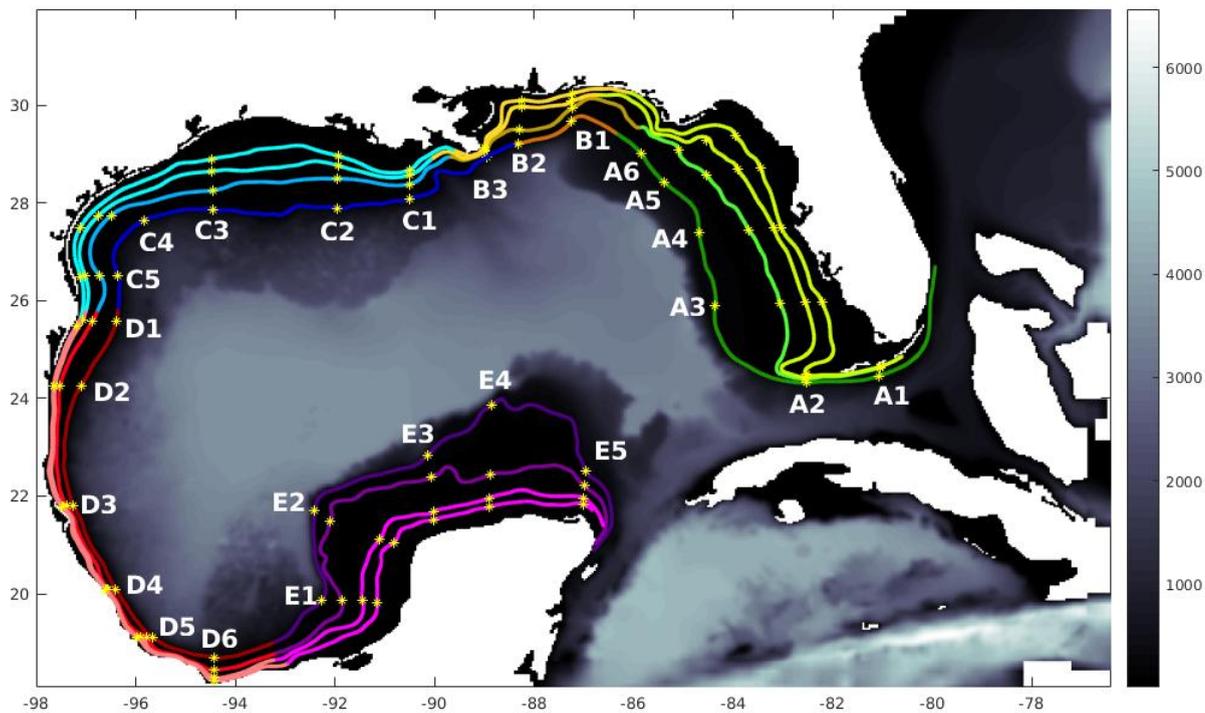


Figura I.1: Batimetría del Golfo de México. Puntos de interés sobre las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m en la Plataforma Oeste de Florida (A-verde), Plataforma de Misisipi-Alabama (B-amarillo), plataforma de Luisiana-Texas (C-azul cielo), la plataforma Tamaulipas-Veracruz (D-rojo), y el Banco de Campeche (E-magenta)

Las corrientes en el GoM son dominadas por la Corriente del Lazo (CL) y sus remolinos asociados que forman parte de la corriente occidental de frontera del giro subtropical en el Atlántico Norte (Figura I.2). La CL se forma a medida que las aguas que fluyen hacia el norte desde el Mar Caribe, giran hacia el este ya en el golfo, posteriormente al sur y una vez más hacia el este para fluir hacia el Atlántico a través del Estrecho de Florida, entre Cuba y Florida. Al entrar por el Canal de Yucatán confluyen diferentes masas de agua: 1) El agua Subtropical Subsuperficial del Caribe (ASSC) se encuentra en la capa superior, 2) El Agua Intermedia Antártica (AIA) en una capa intermedia y, 3) El agua Profunda Noroatlántica (APNA). Una vez que el ASSC se encuentra en el Golfo se originan dos nuevas masas de agua; el Agua Subtropical Subsuperficial del Golfo de México (ASSGM) y el Agua Común del Golfo (ACGM) (Monreal-Gómez, M.A. y D.A. Salas de León, Velasco-Mendoza, H., 2004). Por tanto, el agua cálida y salina llega al Canal de Yucatán agua cálida y es llevada hacia el estrecho de la Florida (Sturges, W., Lugo Fernandez, A., Shargel, M.D., 2005). Penetra al norte del golfo girando en el sentido horario formando un meandro que se expande y contrae en la cuenca oriental (Oey, 2005) y de este se desprenden, casi aleatoriamente remolinos, que se desplazan hacia el oeste, impulsando la circulación en casi todo el GoM.

Los intervalos de tiempo en que la CL arroja estos grandes giros anticiclónicos (con un diámetro

aproximado de 200-300km) son irregulares, variando entre 4 y 12 meses, aunque los hay de mayor duración (Hall y Leben, 2016). Los remolinos de la CL viajan hacia el oeste a través del golfo hasta que se disipan. Tienen una velocidad de desplazamiento que varía de 2-5km por día (Elliott, 1982; Sturges y Leben, 2000) con velocidades tangenciales de más de 1 m s^{-1} (Hulburt y Thompson, 1980; Vukovich, 1995). La disipación de remolinos involucra una mezcla vertical inducida por los flujos de aire-mar y la interacción con el occidente del golfo, siendo esta región de alta variabilidad (Vidal, 1994). En el norte del golfo predominan los valores negativos del rotacional del viento que interactúa con la superficie del océano y genera un giro anticiclónico que tiene asociada una corriente occidental de frontera (Surges y Blaha, 1976). Por otro lado, en el sur del GoM, el rotacional del esfuerzo del viento es positivo, y encontramos el Giro de Campeche, que es un giro ciclónico semipermanente en la capa superficial y con una variación estacional (Sturges, 1993).

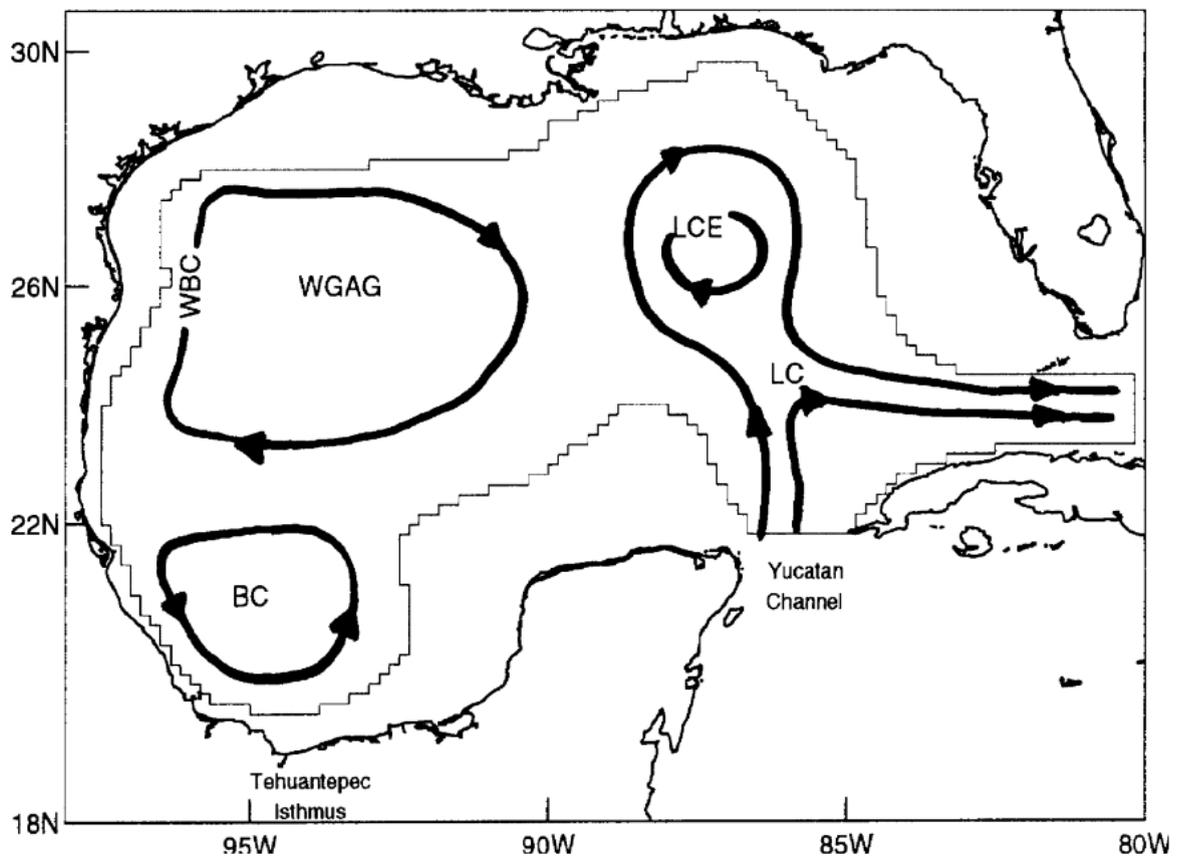


Figura I.2: Circulación del GoM que ilustra las corrientes y giros más importantes. El giro de Campeche (BC), la Corriente de Frontera Oeste (WGAG), el Giro anticiclónico al oeste del Golfo (WGAG), los remolinos de la Corriente del Lazo (LCE) y la Corriente del Lazo (LC). Tomado de Zavala-Hidalgo et al (2002)

I.2. Plataforma Continental

La plataforma continental del GoM es una superficie situada bajo el mar cercana a la costa que extiende sus fronteras hasta los 200m de profundidad (varía por zona) donde se encuentra el talud de la plataforma continental que la separa del fondo oceánico. El flujo cerca de los bordes exteriores de la plataforma continental crean un área donde los nutrientes (o contaminantes) de fuentes continentales, se intercambian con aguas profundas. Hamilton y Lee (2013), en un experimento realizado a los bordes de la plataforma continental muestran como los remolinos pueden invadir el borde de la plataforma y dominar la circulación en esta área. Por lo general, los remolinos van a la deriva, pero en ocasiones quedan atrapados por la topografía y se quedan allí durante un mes o más.

La transferencia de parcelas de agua entre la plataforma y el mar profundo es un tópico complicado, dado que involucra intercambio turbulento. Walker (2005) discute el flujo de una plataforma en particular ubicada al noroeste del GoM llamada la plataforma de Luisiana y Texas (LATEX). Empleando derivadores (drifters), para ilustrar cómo las partículas se mueven, muestra que el derivador superficial no solo sale de la plataforma para ser llevado alrededor de un gran giro anticiclónico, sino que también es traído de regreso a la plataforma por otro giro anticiclónico (Figura I.3).

El comportamiento de los flujos dentro de la plataforma continental se distinguen por una circulación a lo largo de un ciclo anual, modulada por los siguientes factores:

1. **Dimensiones de cada plataforma:** Los taludes entre el quiebre de la plataforma y la planicie abisal tienen diferentes pendientes, siendo algunos suaves como los del norte del Golfo y los que se encuentran al sur y suroeste de la Bahía de Campeche (Figura I.1). En el escarpe de Campeche, al Este de la Bahía de Campeche, los taludes son muy empinados. De los 854,516 km^2 que cubre la plataforma continental en el GoM, la parte occidental cuenta con 20 km de ancho, haciéndola una plataforma angosta; al norte de la Península Yucateca se ensancha a 250km, siendo el Banco de Campeche (BC) una de las plataformas continentales más extensas y con un fondo de pendiente muy suave, talud pronunciado y un tanto uniforme, excepto en la zona del Cañón de Campeche. La plataforma de Veracruz y Tamaulipas (TAVE) es muy estrecha. Al norte de ella, la plataforma se ensancha frente a la plataforma de Texas y Luisiana (LATEX) hasta llegar a la plataforma de Misisipi-Alabama-Florida (MAFLA) colindante al Cañón de Soto. Al llegar a la plataforma Oeste de Florida (WFS) esta se ensancha.

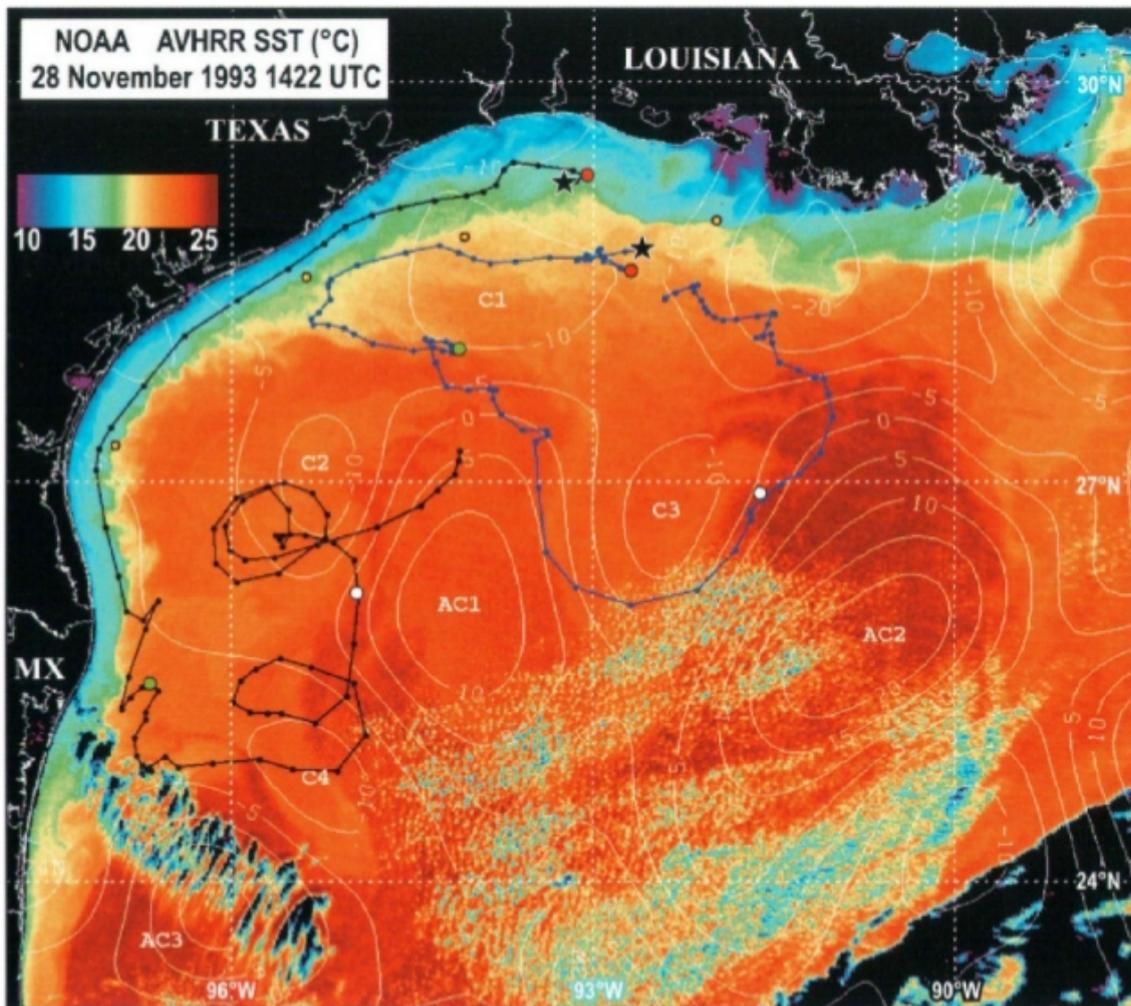


Figura I.3: Trayectorias que muestran el movimiento de dos derivadores (*drifters*) en superficie influenciado por dos grandes anillos de núcleos cálidos (anciclónicos). Cerca de la parte superior de la figura, las trayectorias azul y negra comienzan en aguas poco profundas y se mueven en sentido antihorario. Los contornos topográficos de la superficie del mar (SSH) se espacian cada 5cm (Tomado de Sturges, 2005).

2. **Variación del componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa:** Las estaciones al Norte de América exhiben distintos climas. El clima invernal de latitudes medias se caracteriza por estar dominadas por los sistemas sinópticos que se propagan hacia el este. Estos frentes fríos llevan vientos del norte al GoM, con masas de aire frías y secas. El clima de verano es diferente ya que la región exhibe patrones de clima tropical, con vientos dominantes del este y sureste con temperaturas mucho más cálidas (Morey, S., Zavala-Hidalgo J., O'Brien, J., 2005). El esfuerzo del viento en el Golfo cuenta con una fuerte componente estacional, hacia el noroeste en el verano y hacia el suroeste en el invierno (Zavala, 1997). Por ello, los vientos tienen una estacionalidad importante, la cual se ve reflejada en la circulación de las costas de Texas, Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y

del Oeste de Florida.

3. **Desembocadura de ríos:** Las aguas con baja salinidad que se encuentran cerca de la zona costera pueden provenir de la descarga de ríos, sobre todo cerca de sus desembocaduras y en los meses en que la circulación por viento favorece un patrón antihorario. Al norte del GoM se encuentra el Río Misisipi que comparte cuenca con el Río Atchafalaya, contribuyendo con un promedio anual de $20,000 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua dulce al promedio total de agua dulce que entra al GoM que es de $30,000 \text{ m}^3/\text{s}$. La Bahía Mobile, en Alabama, es otra zona con una gran contribución de agua dulce en el Norte. Otros ríos pequeños locales modifican el campo de salinidad a lo largo de las costas de Texas y México. Entre los ríos importantes en México están: El Río Bravo que separa a las plataformas LATEX y TAVE, los ríos Pánuco, Tuxpan, Jamapa y Papaloapan hasta llegar al Río Grijalva-Usumacinta en el estado de Tabasco (*Comisión Nacional del Agua, 2002*) el cual es el que tiene el mayor efecto en la Bahía de Campeche. Las descargas de ríos en el GoM tienen una señal estacional muy alta, en el norte el pico es durante los meses de primavera debido al derretimiento de nieve en el norte de los EU (Morey, S., Zavala-Hidalgo J., O'Brien, J., 2005) y durante el verano en las costas de México. La descarga de los ríos a lo largo de la costa también contribuye a la flotabilidad del agua cerca de la costa y favorece al gradiente de densidad positivo a través de la plataforma lejos de la costa, originando una circulación que va costa abajo (con la costa a la derecha del flujo en el Hemisferio Norte) alrededor del GoM.
4. **Interacción con la dinámica del océano profundo:** Los giros liberados por la CL hacen que la dinámica al oeste del GoM tenga un comportamiento distinto y se caracteriza en dos regiones (Zavala, 1997): En la región noroeste que presenta una circulación anticiclónica y se presentan remolinos de mesoescala (Brooks y Legeckis, 1982) y en la Bahía de Campeche que presenta una la circulación ciclónica (Vázquez, 1993). Al interactuar con la plataforma continental externa, que se extiende aproximadamente a los 200m de profundidad, se generan flujos en la costa (Müller-Biggs, 1991; Müller-Karger, 1994) formando corrientes que confluyen y se generan transporte costa dentro y costa afuera (Zavala-Hidalgo, 2003) debido a su forma cóncava.

Los diferentes estudios sobre la circulación que se han realizados en el GoM determinan una lógica específica por cada región del GoM. Sturges y Blaha (1976) propusieron que al norte de la Bahía de Campeche, el rotacional del esfuerzo del viento, junto con la dinámica de la rotación y curvatura de la Tierra, generan una Corriente Occidental de Frontera (COF) semi permanente sobre el talud del Oeste del GoM y un giro semi permanente, de gran escala en el norte y centro

del golfo en forma análoga a las cuencas oceánicas. Sin embargo, su identificación es complicada ya que la región está poblada de remolinos anticiclónicos y ciclónicos. Una consecuencia de esta circulación es una corriente hacia el norte, sobre el talud continental, cercano a Tamaulipas y el sur de Texas; mientras que en el talud continental, frente a la zona oriental de LATEX, una circulación hacia el este predomina, en lo que serían secciones del giro anticiclónico del GoM.

Igualmente, se ha detallado la presencia semi-permanente de un giro ciclónico centrado en 19.8°N , 95.3°W (Vázquez de la Cerda, 2005; Pérez-Brunius, 2013) llamado Giro de Campeche (aunque está frente a Veracruz), que es más intenso en su lado Oeste. La importancia relativa de los distintos forzamientos en su origen no está del todo comprendida, así como tampoco su variación estacional. Se ha mostrado que el rotacional del esfuerzo del viento en la región favorece su desarrollo y también se ha mencionado a la circulación anticiclónica como forzamiento (Vázquez de la Cerda, 2005).

Basados en observaciones y simulaciones numéricas, diversos estudios han mostrado una importante estacionalidad en la circulación de la plataforma interna. Weisberg (2009) menciona que la circulación sobre la plataforma interna de la WFS se caracteriza por corrientes hacia el norte durante el verano y hacia el sur entre otoño y primavera (Hetland, 1999). También ha mostrado que la circulación en las regiones de la plataforma interna e intermedia de LATEX es antihoraria, hacia el oeste y suroeste, la mayor parte del año, excepto en julio y agosto cuando la corriente se revierte (Nowlin, 1998; Nowlin, 2005). En su plataforma externa, cerca del quiebre de la plataforma, predomina una circulación anticiclónica.

En las plataformas continentales mexicanas del GoM, aunque con menos observaciones que en la parte estadounidense del GoM, se ha encontrado que en la plataforma interna de TAVE la circulación media es hacia el sur entre septiembre y marzo y hacia el norte de mayo a agosto, siendo abril el mes de transición (Zavala-Hidalgo, et al., 2003; Allende-Arandía, et al., 2014). En el BC, al norte del Estado de Yucatán, la circulación predominante es hacia el oeste. En la zona Oeste del BC, frente al litoral del Campeche, la circulación predominante es hacia el sur a lo largo del año (Zavala-Hidalgo, et al., 2003). Como consecuencia, se generan transportes perpendiculares costa afuera durante los meses de otoño e invierno debido a la confluencia de corrientes en el sur del GoM, que se dirigen hacia la Bahía de Campeche (Zavala-Hidalgo, et al., 2003). El transporte de Ekman lleva aguas superficiales hacia la costa cuando el viento es paralelo a la costa, y esta se encuentra a su derecha. Esta es una condición común durante el otoño-invierno en las plataformas de TAVE y LATEX. En la plataforma de WFS la condición favorable para el transporte de aguas

superficiales hacia la costa ocurre durante el verano (Weisberg, 2009). Cuando el viento tiene estas características hay subsidencia.

Cuando el transporte de Ekman mueve las aguas superficiales hacia la costa, el agua se acumula y se hunde generando un proceso inverso a la surgencia conocido como hundimiento costero. El hundimiento también ocurre en regiones dentro del océano donde la circulación es anticiclónica. Los anillos cálidos en estas regiones giran en el sentido de las agujas del reloj creando convergencia superficial. Cuando estas aguas superficiales convergen, empujan el agua superficial hacia abajo. Otra forma en que puede ocurrir el hundimiento es por el viento que conduce el agua superficial del mar hacia la costa. Si las condiciones hidrográficas del fondo son favorables para que el agua fría se dirija hacia la costa y se mezcle con la superficial, la surgencia se manifestará como un cambio en la temperatura de la superficie del mar (Weisberg, 2000).

La importancia de la surgencia y el hundimiento en el océano se debe a su influencia en la temperatura superficial del mar, y al aporte o no de nutrientes que determina la productividad biológica. Algunas veces, las aguas de surgencia están confinadas a las de la capa de mezcla dependiendo del espesor de la capa cálida. Cuando la termoclina es poco profunda, las aguas de surgencia suelen ser ricas en compuestos de nitratos y fosfatos, entre otros. Este transporte de nutrientes hacia la superficie, donde está presente la luz solar, da como resultado el crecimiento de las poblaciones de fitoplancton. Por otro lado, en las zonas de hundimiento costero, se reduce la productividad biológica y se transporta calor, materiales disueltos y aguas superficiales ricas en oxígeno disuelto a mayores profundidades (Vallis, G. K., 2012).

Por otra parte, uno de los principales problemas a los que se enfrenta la cuenca del GoM son la contaminación de agua y los sedimentos en suspensión, el aumento de la turbidez y nutrientes, la reducción en la descarga de agua dulce y su calidad, así como la pérdida de biodiversidad y el deterioro a la salud pública. En casos específicos, el delta del Misisipi ha estado sujeto a múltiples presiones ambientales, como la alta tasa de ascenso relativo del nivel medio del mar (+ de 10 mm/año), el deterioro de la calidad del agua (altos niveles de contaminación orgánica e inorgánica) y la hipoxia sobre la plataforma continental nerítica con 10,000 a 20,000 km^2 de Zona con Hipoxia (Rabalais, N. N., Turner, R. E., and Scavia, D., 2002).

La interacción entre el océano profundo y la plataforma del GoM hacen que sea fundamental el análisis de los procesos dinámicos que ocurren en superficie y en el fondo. Los transportes a través de las isóbatas son normalmente flujos secundarios que ocurren a la sombra de un flujo a lo largo de la costa más energético (Brick, 2016). Normalmente, las corrientes a lo largo de la costa dominan los campos de flujos en tiempos de escala mayor a 1 día, pero los gradientes a través de

la plataforma de temperatura, salinidad, o materiales disueltos nos muestran que las corrientes a través de la plataforma, aunque sea débiles, tienen gran impacto. El problema del intercambio a través de la plataforma involucra un rango de fenómenos y diferentes procesos de mezcla que ocurren en cada tiempo y locación, además de que se trata de entender un componente de flujo débil y ageostrófico que es difícil de observar en la naturaleza (Smith, 1981).

Por ello, se pretende analizar los transportes promedio de baja frecuencia a partir de los datos de una simulación de 21 años (1992-2012) realizada con el modelo numérico de alta resolución HYCOM (Hybrid Coordinate Oceanic Model). Los transportes a través de las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m; los transportes a lo largo de la plataforma, la divergencia/convergencia, y las condiciones de surgencia/hundimiento son estudiadas a partir del análisis superficial y subsuperficial en una escala temporal anual. Al evaluar con la variabilidad anual de los flujos en la plataforma continental del GoM, se encuentran las zonas con mayor interacción entre las aguas superficiales y subsuperficiales del océano profundo y las plataformas. Se analizan las capas superficial y subsuperficial a partir de la detección de zonas de surgencia/hundimiento, se observa la circulación predominante costa abajo/arriba a lo largo de las plataformas continentales del GoM junto con el esfuerzo del viento en la plataforma intermedia (50m) y se localizan las regiones donde las corrientes divergen/convergen. La contribución de este estudio radica en el análisis de los procesos dinámicos en la plataforma continental del GoM y la temporalidad en que ocurren y las similitudes y diferencias entre las plataformas interna, intermedia y externa.

I.3. Hipótesis

H0.- Existe una inversión estacional a lo largo de la plataforma continental del GoM.

H1.- Debido a la fisiografía del GoM y el forzamiento del viento se desarrollan zonas de convergencia y divergencia que generan transportes perpendiculares a la plataforma continental influyendo en la distribución de nutrientes y contaminantes en el Golfo.

I.4. Objetivos

Conocer con mayor detalle la circulación en la plataforma continental del GoM mediante el análisis de los transportes de baja frecuencia calculados a partir de los datos diarios de una simulación de 21 años (1992-2012) y horarios (2000-2013) realizada con el modelo numérico de alta resolución HYCOM.

I.4.1. Objetivos particulares

1. Calcular el transporte a través y a lo largo de la plataforma del GoM sobre las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m y su variabilidad a lo largo del ciclo estacional.
2. Identificar las regiones y épocas del año en que ocurren los transportes perpendiculares a la costa.
3. Identificar las regiones y épocas en que predominan condiciones de surgencia o hundimiento (subsistencia).
4. Conocer las similitudes y diferencias de la circulación sobre las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m.

I.5. Justificación

Se realiza este estudio con la finalidad de comprender la circulación en la plataforma continental del GoM analizando los transportes de baja frecuencia en las plataformas interna, intermedia y externa. El desacoplamiento de los flujos sobre la pendiente y el ascenso de los mismos en las plataformas amplias del GoM (Boicourt, 1998) se deben a la temporalidad del esfuerzo del viento, el cual es diferente en cada región, donde se generan corrientes que convergen y modifican la dirección y proporción del flujo a través de ella (Gill, 1982). Al estudiar la circulación sobre las plataformas del GoM y las condiciones de hundimiento y surgencia donde las aguas superficiales se alejan de la costa y las sub-superficiales se dirigen hacia la costa (surgencia) y viceversa (hundimiento), se pretende encontrar zonas donde se favorece, o no, el ascenso de aguas ricas en nutrientes.

Capítulo II

Antecedentes

II.1. Ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones de Navier-Stokes para un sistema de referencia en rotación que gobiernan un flujo oceánico idealizado son:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} + \rho 2\vec{\Omega} \times \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (\text{II.1})$$

La aceleración del fluido está representada por el primer término izquierdo, donde $\frac{Du}{Dt}$ es la derivada material que relaciona las variaciones temporales y espaciales del campo de velocidad, el campo escalar de densidad es $\rho = \rho(x, y, z, t)$, el vector de velocidad $\vec{u}(x, y, z, t) = (u, v, w)$. La contribución de la Fuerza de Coriolis se representa en el segundo término de la izquierda, donde el vector de rotación se define como $\vec{\Omega} = (0, \Omega \cos\phi, \Omega \sin\phi)$, donde $\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{rads}^{-1}$ y ϕ es la latitud. El gradiente de presión ∇p de la derecha de la ecuación representa la variación espacial de la presión, donde $p = p(x, y, z, t)$ es el campo de presión. En $\rho \vec{g}$ se incluye el peso de la parcela de agua, en la que la constante de aceleración gravitacional $\vec{g} = (0, 0, -g)$ y el último término representa la disipación del movimiento en pequeñas escalas, siendo μ el coeficiente de viscosidad turbulenta.

Fuerza del gradiente presión y Coriolis

La fuerza dominante que actúa sobre una parcela de agua en el océano es la gravedad. El peso del agua induce la presión en profundidad. La gravedad resulta en una fuerza que hace que el

agua se hunda a partir de la diferencia de densidades. Debido a las variaciones de peso del agua en distintas regiones del océano y a la existencia de una pendiente en la superficie del agua se generan gradientes horizontales de presión.

La ecuación de continuidad para un fluido está dada por la ecuación:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0, \quad (\text{II.2})$$

En zonas profundas del océano la presión tiene muy poco efecto en la densidad de una parcela de agua. Si se considera un fluido incompresible donde los cambios de densidad entre una vecindad de parcelas son despreciables, la ecuación de continuidad resulta en:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0, \quad (\text{II.3})$$

también conocida como la ecuación de conservación de masa, obtenida a partir de la simplificación de la ecuación de continuidad. En ausencia de otras fuerzas una parcela se moverá de mayor a menor presión y la aceleración será proporcional al gradiente de presión.

Debido a la rotación del planeta, aparecen fuerzas aparentes donde las parcelas moviéndose sufren de una aceleración. Este cambio de dirección es atribuido a la aceleración de Coriolis.

La aceleración de una parcela del fluido en un sistema de coordenadas que rota (Ω) es

$$a_{fijo} = \frac{d\mathbf{u}}{dt}_{fijo} = \frac{d\mathbf{u}}{dt}_{fijo} + 2\Omega \times \mathbf{u} + \Omega \times (\Omega \times R) \quad (\text{II.4})$$

Donde \mathbf{u} es la velocidad en un sistema de coordenadas fijo en la Tierra y R es la distancia al centro de la Tierra. A este cambio de la velocidad en el tiempo en un sistema en rotación se le suman la aceleración de Coriolis $2\Omega \times \mathbf{u}$ y la aceleración centrífuga $\Omega \times (\Omega \times R)$.

La fuerza centrífuga generada por la rotación de la Tierra causa una fuerza hacia afuera del eje de rotación que distorsiona el equilibrio esférico y por ello el planeta se achata en los polos. El resultado es una superficie con el nombre de geoide. Esta superficie es perpendicular a la dirección de la gravedad formando una superficie equipotencial.

El geoide es una superficie geopotencial constante. Las desviaciones de la superficie oceánica con respecto al geoide producen gradientes de presión horizontales, los cuales determinan las corrientes oceánicas en superficie. Una de esas fuerzas es el esfuerzo del viento que transfiere momento a los mares, y es transmitido hacia profundidades mayores.

II.2. Transporte de Ekman

Se considera que un flujo en el océano es primordialmente horizontal ya que, las distancias verticales son, en general, mucho menores que las horizontales. La fricción entre el fondo y el flujo es significativa y reduce la velocidad del flujo en la vecindad del fondo.

En la superficie del océano, donde el agua está sujeta al esfuerzo del viento. Los vientos crean una capa límite oceánica donde el océano se comporta diferente que en el resto de la columna de agua. El cociente entre el término de Coriolis y la disipación vertical de las ecuaciones de momento se le llama número de Ekman (Cushman, 2011) y es una medida de la competencia entre la fricción vertical y la fuerza de Coriolis:

$$Ek = \frac{\nu_E}{\Omega H^2} \quad (\text{II.5})$$

donde Ω es la velocidad angular de la Tierra, H es la escala de profundidad del movimiento y ν_E el coeficiente de viscosidad vertical. Éste juega un papel secundario en el balance de fuerzas en el interior debido a que los flujos geofísicos se caracterizan por un número de Ekman pequeño fuera de la capa límite ($\sim 10^{-4}$).

Los fluidos se comportan de dos maneras: lejos de las fronteras, donde la fricción es despreciable, mientras que a una distancia corta de las fronteras, llamada capa límite, la fricción actúa para llevar la velocidad finita del interior a cero en la pared. El grosor de la capa límite d es tal que el número de Ekman es del orden de uno, permitiendo la fricción sea una fuerza dominante:

$$\frac{\nu_E}{\Omega d^2} \sim 1 \quad (\text{II.6})$$

lo que implica que:

$$d \sim \left(\frac{\nu_E}{\Omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.7})$$

Debido al efecto de Coriolis, la capa límite de flujos geofísicos es llamada *capa de Ekman* y es diferente de la capa límite en flujos que no rotan. La existencia de la rotación limita el efecto de la frontera sobre el comportamiento del fluido a una capa muy angosta comparada con la altura de la columna.

Capa de Ekman en la superficie oceánica

Considerando una región del océano con un campo de flujo interno (\bar{u}, \bar{v}) sujeto a un esfuerzo del viento (τ^x, τ^y) a lo largo de la superficie. Suponiendo condiciones estables, un fluido homogéneo, y un interior geostrófico, se obtienen las siguientes ecuaciones y las condiciones de frontera para el campo del flujo (\bar{u}, \bar{v}) en la superficie de la capa de Ekman:

$$-f(v - \bar{v}) = \nu_E \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{II.8})$$

$$+f(u - \bar{u}) = \nu_E \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (\text{II.9})$$

$$(z = 0) : \rho_0 \nu_E \frac{\partial u}{\partial z} = \tau^x, \rho_0 \nu_E \frac{\partial v}{\partial z} = \tau^y \quad (\text{II.10})$$

$$(z \rightarrow -\infty) : u = \bar{u}, v = \bar{v} \quad (\text{II.11})$$

la solución a este problema es

$$u = \bar{u} + \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 f d} e^{z/d} \left[\tau^x \cos \left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4} \right) - \tau^y \sin \left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (\text{II.12})$$

$$v = \bar{v} + \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 f d} e^{z/d} \left[\tau^x \sin \left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4} \right) - \tau^y \cos \left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (\text{II.13})$$

En el que la salida del flujo interior $(\bar{h} - u, (u - \bar{u}))$ se debe exclusivamente al esfuerzo del viento. Además, este componente de flujo impulsado por el viento es inversamente proporcional a la

profundidad de la capa Ekman, d , y puede ser muy grande. Físicamente, si el fluido no tiene viscosidad (pequeño ν , por lo tanto, corto d), un esfuerzo superficial moderado puede generar grandes velocidades de deriva.

El transporte horizontal impulsado por el viento en la capa superficial de Ekman tiene los siguientes componentes:

$$U = \int_{-\infty}^0 (u - \bar{u}) dz = \frac{1}{\rho_0 f} \tau^y \quad (\text{II.14})$$

$$V = \int_{-\infty}^0 (v - \bar{v}) dz = \frac{1}{\rho_0 f} \tau^x \quad (\text{II.15})$$

Que está orientado perpendicularmente al esfuerzo del viento, a la derecha en el hemisferio Norte y a la izquierda en el hemisferio Sur.

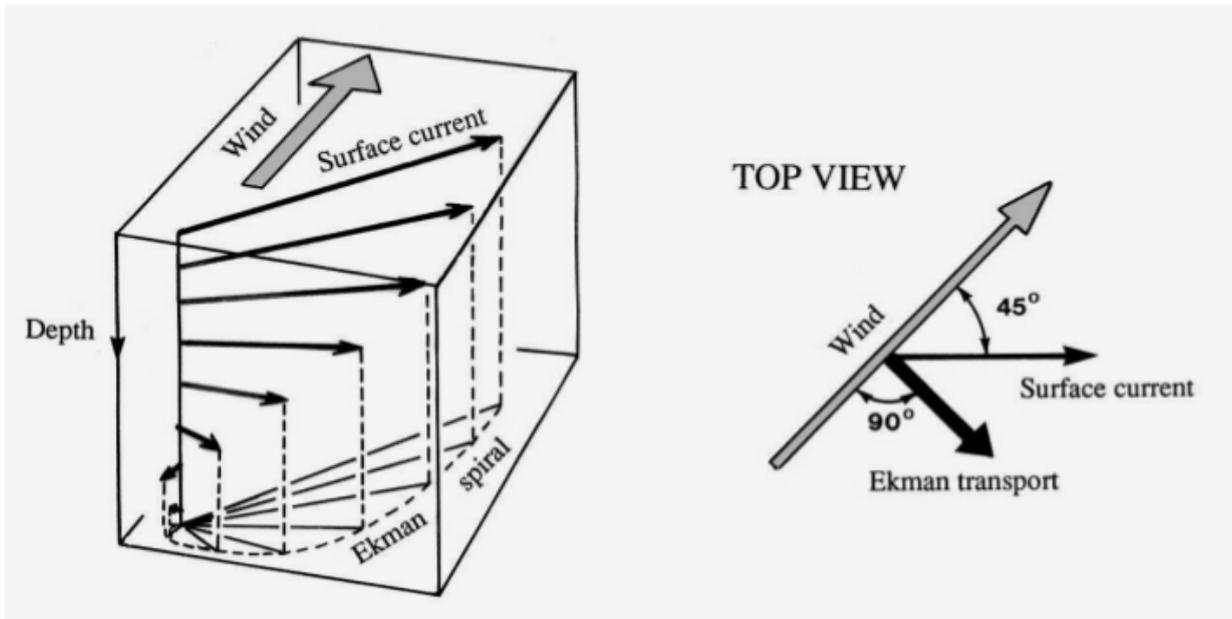


Figura II.1: Espiral de Ekman (tomado de Cushman, 2006).

El agua en la superficie del océano se desvía en ángulo con respecto a la dirección del viento, el agua debajo del agua de la superficie gira más, y el agua de las profundidades gira todavía más. Esto crea una espiral de agua móvil que alcanza 100 a 150 m de profundidad, llamada espiral Ekman (Figura II.1). La dirección promedio de toda esta agua en movimiento es aproximadamente en ángulo recto con la dirección del viento. El transporte de Ekman, en respuesta a los vientos, juega un rol fundamental en la circulación oceánica a gran escala.

II.3. Modelos numéricos en el GoM

Las campañas oceanográficas se limitan a trabajos multidisciplinarios debido a su alto costo. En ellas, es fundamental la medición *insitu* de la temperatura, salinidad, velocidad, etc. Otra herramienta menos costosa que se utiliza para describir la dinámica oceánica son los modelos numéricos. Su utilidad ha sido fundamental para el estudio de procesos oceanográficos.

Estos modelos numéricos son un compendio de métodos matemáticos que resuelven ecuaciones sin soluciones analíticas. Siendo la dinámica de fluidos una de las disciplinas que impulsaron el desarrollo computacional, el uso de simulaciones numéricas ha aumentado en las ciencias de la Tierra y han permitido evaluar procesos físicos de gran escala.

En particular, el estudio hidrodinámico con modelos numéricos en el GoM se inició en la década de los ochenta. Los procesos costeros, remolinos, mareas, efectos de tormentas tropicales (Lewis, 1992) y en especial, el estudio de la CL (Hurlburt y Thompson, 1980) han sido fenómenos estudiados con esta herramienta. Hurlburt y Thompson (1980) simularon por primera vez la CL con un modelo que utilizaba diferencias finitas y se basaba en las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática.

Hay un gran número de modelos que emplean diferencias finitas y se distinguen entre ellos por el sistema de coordenadas verticales. Entre las coordenadas verticales más comunes se encuentran las coordenadas z que utilizan como referencia las superficies equipotenciales para definir el origen de la coordenada z (profundidad). Igualmente, se emplean las coordenadas σ que siguen la batimetría del lecho marino y son apropiadas para regiones costeras. Para modelar el océano intermedio, que se encuentra estratificado por diferentes densidades, se utilizan las coordenadas isopícnas. Otro tipo de modelos aplica coordenadas verticales híbridas, donde emplea coordenadas z en la superficie, en el océano intermedio aplica coordenadas isopícnas, y en el fondo se ajustan a la batimetría como las coordenadas σ .

II.4. HYCOM

La física del GoM fue simulada con el modelo numérico HYCOM (Hybrid-Coordinate Ocean Model). Al igual que MICOM (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model), el HYCOM es un modelo de ecuaciones primitivas que contiene 5 ecuaciones prognósticas, dos para los componentes de velocidad horizontales, una ecuación de continuidad de masa o tendencia del grosor de capa,

y dos ecuaciones de conservación para el par de variables termodinámicas, como la sal y la temperatura o la sal y la densidad.

En el marco de coordenadas híbridas, es necesario formular las ecuaciones dinámicas en términos de una coordenada vertical arbitraria, denotada aquí con la letra s . Aunque las capas de coordenadas en el modelo están forzadas a coincidir con capas isopícnicas en la mayoría del dominio de la malla, no se permitirá ninguna referencia explícita a la identidad $s = \rho$, ya que esto haría que las ecuaciones no sean adecuadas para las regiones no isopícnicas de la malla (Bleck, 1981). Las ecuaciones del modelo, escritas en coordenadas (x,y,s) , siendo s una coordenada vertical no especificada, son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t_s} + \nabla_s \frac{\mathbf{v}^2}{2} + (\zeta + f) \mathbf{k} \times \mathbf{v} + \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p} + \nabla_s M - p \nabla_s \alpha \\ = -g \frac{\partial \tau}{\partial p} + \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \mathbf{v} \right), \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right) + \nabla_s \cdot \left(\mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0, \quad (\text{II.17})$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \nabla_s \cdot \left(\mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) = \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \theta \right) + \mathcal{H}_\theta, \quad (\text{II.18})$$

donde el vector de velocidad horizontal es $\mathbf{v} = (u, v)$, p es la presión, θ representa cualquiera de las variables de los modelos termodinámicos, $\alpha = \rho_{pot}^{-1}$ es el volumen potencial específico, $\zeta \equiv \frac{\partial v}{\partial x_s} - \frac{\partial u}{\partial y_s}$ es la vorticidad relativa, el potencial de Montgomery es $M \equiv gz + p\alpha$, el geopotencial es $gz \equiv \phi$, para el parámetro de Coriolis f , el vector unitario vertical es \mathbf{k} , v es una variable del coeficiente de viscosidad/difusividad de remolino, y τ es el vector de esfuerzo de cizalladura inducido por viento y/o arrastre de fondo. \mathcal{H}_θ representa la suma de los términos de fuente diabática, incluyendo la mezcla diapicna, actuando en θ . Los subíndices indican qué variable se mantiene constante durante la diferenciación parcial. Las distancias en dirección x, y , así como su derivado del tiempo $\dot{x} \equiv u$ y $\dot{y} \equiv v$, son medidos en la proyección al plano horizontal. Esta convención hace que el sistema coordenado no sea paralelo en el espacio 3-D, pero elimina los términos métricos relacionados con la pendiente de la superficie s (Bleck, 1978).

II.4.1. Coordenadas verticales

Ningún algoritmo de mezcla vertical ha podido proveer una perfecta representación de la mezcla del océano y su influencia en la circulación oceánica y climatología. Para ello, se implementó un algoritmo en HYCOM 2.2.98 para el ajuste de coordenadas verticales. Se diseñó para que las coordenadas isopícnas verticales ρ presentes en el interior del océano, cambiaran suavemente a coordenadas z cercanas a la superficie que son regiones completamente mezcladas, a coordenadas sigma (σ) en regiones de agua somera, y de vuelta a un nivel de coordenadas en agua muy somera para prevenir que las capas no se adelgacen (Figura II.2).



Figura II.2: Coordenadas verticales z , isopícnas (ρ) y sigma (σ) (Tomada de Bleck, R., Halliwell, G. R., Wallcraft, A. J., Carroll, S., Kelly, K., Rushing, K., 2002).

Las coordenadas híbridas extienden el rango geográfico a la aplicación de los modelos tradicionales de coordenadas isopícnas hacia mares costeros someros y partes no estratificadas en el mundo oceánico. Mantiene las ventajas de un modelo isopícnico en regiones estratificadas mientras que permite más resolución vertical cerca de la superficie y en zonas someras cercanas a la costa, además provee una mejor representación de la física del océano superior.

II.4.2. Malla del Modelo y pasos de tiempo

Para su resolución espacial horizontal se utiliza una malla Arakawa-C ortogonal generalizada. La malla en HYCOM fue convertida a coordenadas Cartesianas estándar (Figura II.3), con el eje- x

apuntando al Este y el eje-*y* hacia el Norte.

```
Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q
U P U P U P U P U P U P U P U
Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q
U P U P U P U P U P U P U P U
Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q
U P U P U P U P U P U P U P U
Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q
U P U P U P U P U P U P U P U
Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q
U P U P U P U P U P U P U P U
Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q
U P U P U P U P U P U P U P U
Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q
U P U P U P U P U P U P U P U
Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q V Q
U P U P U P U P U P U P U P U
```

Figura II.3: Malla Arakawa C. Coordenadas horizontales.

El esquema numérico en el tiempo que emplea HYCOM es salto de rana (leapfrog), con suavizado de tiempo.

Capítulo III

Metodología

III.1. Simulación con HYCOM

III.1.1. Características de la simulación con HYCOM

Se realizó una simulación con la versión 2.2.98 del modelo oceánico HYCOM en una malla horizontal de 541x385 celdas a $1/25^\circ$ de resolución en la dirección zonal. Cuenta con 27 capas híbridas (coordenadas z , isopícnica y sigma) en la vertical que resuelven la superficie y la capa de mezcla con coordenadas z (metros), el océano profundo con coordenadas sigma y el mar estratificado, entre la superficie y el fondo, con coordenadas isopícnicas. La salinidad y temperatura se determinaron a partir de climatologías mensuales del WOA-Levitus (World Ocean Atlas).

III.1.2. Forzamientos

Se emplearon forzantes climatológicos en las fronteras del modelo. Los forzamientos atmosféricos provienen de las salidas del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) generadas por el grupo de Interacción Océano-Atmósfera del CCA (Centro de Ciencias de la Atmósfera) de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). También se utilizaron las componentes de viento para el cálculo del esfuerzo del viento a lo largo de la isóbata de 50m (Capítulo 3).

Como forzantes climatológicas mensuales en el océano se tienen: Forzamientos en las fronteras abiertas (climatología proveniente del HYCOM global); campos de temperatura y salinidad de Levitus para las condiciones iniciales; y la descarga de 41 ríos a lo largo de la costa del GoM.

Igualmente se produjeron climatologías para la radiación fotosintética superficial en el GoM de SeaWIFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor).

Después de pre-procesar la base de datos, se calculó el periodo de simulación dividido en tres etapas: arranque del modelo o spin up de 10 años y simulaciones para el periodo requerido, 21 años. El gran trabajo de cómputo (4TB de datos resultados) se logró gracias al acceso al cluster Ometéotl del CCA y al uso de la supercomputadora Miztli de la UNAM, donde se procesaron y almacenaron 21 años de salidas diarias (1992-2012) y 13 años de salidas horarias (2000-2013) con el modelo HYCOM (V2.2.98). Se empleó esta versión debido al eficiente uso de recursos computacionales, el desprendimiento de remolinos de la CL en toda la simulación, la corrección de temperatura superficial, el intercambio con las forzantes atmosféricas, y un mejor detalle en la estructura vertical.

Las salidas de las variables se recopilaron en archivos netcdf (network Common Data Form) diarios (21 años) y horarios (13 años), que proporcionan las variables de longitud, latitud, profundidad, densidad potencia, componentes de velocidad U y V, temperatura y salinidad.

III.2. Cálculo de isóbatas

Una isóbata es una curva de nivel que representa cartográficamente los puntos con la misma profundidad del océano, en este caso, del GoM. Nos interesan las profundidades menores a los 200m ya que es la profundidad donde normalmente se presenta el quiebre de la plataforma. La isóbatas de 20, 30 y 50m (Figura I.1) están dentro de la plataforma continental del GoM que son importantes para comprender el funcionamiento en la plataforma interna e intermedia.

Para este estudio, cada isóbata fue suavizada y dividida en equidistancias de 1km. La isóbata de 20m contiene 4400 puntos (o km), la isóbata de 30m consta de 4548 puntos, la isóbata de 50m de 4589 puntos y la isóbata de 200m, la más extensa, de 4889 puntos a lo largo del GoM.

III.2.1. Puntos de interés

Como parte del análisis por plataforma continental, se observan los siguientes puntos de interés en las cuatro isóbatas:

1. Plataforma WFS:

- A1 - Bahía de Florida
- A2 - Dry Tortugas
- A3 - 10,000 Islas
- A4 - Tampa
- A5 - Big Bend
- A6 - Noroeste de Florida

2. Plataforma MAFLA:

- B1 - Cañón de Soto
- B2 - Chandeleur
- B3 - Este del Río Misisipi

3. Plataforma LATEX:

- C1 - Oeste del Río Misisipi
- C2 - Atchafalaya
- C3 - Galveston
- C4 - Corpus Christi
- C5 - Brownsville

4. Plataforma TAVE:

- D1 - Río Bravo
- D2 - Laguna Madre
- D3 - Laguna de Tamiahua
- D4 - Laguna Verde
- D5 - Ciudad de Veracruz
- D6 - Coatzacoalcos

5. Plataforma BC:

- E1 - Cayo Arcas
- E2 - Cayo Arenas
- E3 - Alacranes
- E4 - Norte de la Península de Yucatán

- E5 - Cabo Catoche

A partir del cálculo del volumen de agua transportado a lo largo de la plataforma continental y a través de ella, se analiza la dinámica de la plataforma interna con base en los datos interpolados en la isóbata de 20 y 30m, los datos de la isóbata de 50m permiten estudiar el comportamiento de la plataforma intermedia, mientras que la isóbata de 200m caracteriza el funcionamiento en la plataforma externa del GoM (Figura I.1).

Para su análisis, en cada isóbata se secciona la columna de agua en la parte superficial y subsuperficial de la siguiente manera:

1. Plataforma interna (isóbata 20m):

- Sección de 0 a 10m en la vertical
- Sección de 10 a 20m en la vertical

2. Plataforma interna (isóbata 30m):

- Sección de 0 a 20m en la vertical
- Sección de 20 a 30m en la vertical

3. Plataforma intermedia (isóbata 50m):

- Sección de 0 a 20m en la vertical
- Sección de 20 a 50m en la vertical

4. Plataforma externa (isóbata 200m):

- Sección de 0 a 20m en la vertical
- Sección de 20 a 50m en la vertical

III.3. Transporte a través de las isóbatas de la plataforma continental

Una partícula del fluido lleva una velocidad \vec{v} tangente a la línea de corriente. Para expresar la cantidad total de agua que se transporta por las corrientes, se calcula el flujo total a través de

una área rectangular perpendicular al transporte, la expresión de transporte (Q) está dada por la siguiente ecuación:

$$Q = \int_0^z \int_S^{S1} \vec{u} \cdot \vec{n} dsdz, \quad (\text{III.1})$$

La integral en profundidad z del punto S al $S1$, donde \vec{u} es el componente de velocidad (u,v), \vec{n} corresponde al vector normal unitario perpendicular a de cada punto a lo largo de las isóbatas.

En el caso particular de este trabajo, se estudia la dinámica de la plataforma continental a partir del transporte que pasa a través de ella. Para ello, se realiza un cálculo por separado:

1. Coordenadas de isóbatas a una equidistancia de 1000m: La equidistancia del punto S al $S1$ de 1000m corresponde a los datos de las extraídos de la isóbatas 20, 30, 50 y 200m, del Golfo de México.
2. Componentes de la velocidad (u,v) \vec{u} : Se realizan promedios diarios y mensuales de veintiún años de componentes meridionales y zonales diarios (simulación en HYCOM) sobre las isóbatas 20, 30, 50 y 200m del GoM.
3. Cálculo del Vector Normal Unitario \vec{n} : Se calcula el vector normal unitario de cada punto, cada 1km, sobre las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m.
4. Área A : Área rectangular producto de la equidistancia horizontal entre los puntos de las isóbatas (1km) con las diferentes profundidades en z , equidistantes a cada 10m.

Al integrar el transporte en la sección superficial y subsuperficial como se muestra en la figura III.1 se obtienen transportes costa adentro y costa afuera a través de la plataforma continental. En la capa superficial se inicia con la acción del viento sobre el agua cercana a la superficie del océano, causando el movimiento de ésta. Las secciones superficiales y subsuperficiales (profundo) en la plataforma interna e intermedia se consideran hasta el fondo (hasta los 20, 30 y 50m), mientras que en la plataforma externa, la sección subsuperficial se considera hasta los 50m para comparar los resultados con las plataformas internas e intermedia. Se observan los resultados en ambas secciones con el objetivo de identificar las zonas de surgencia (costa afuera en superficie y costa adentro en el fondo), hundimiento (costa adentro en superficie y costa afuera en el fondo), o con flujos costa adentro y hacia afuera en toda la columna integrada.

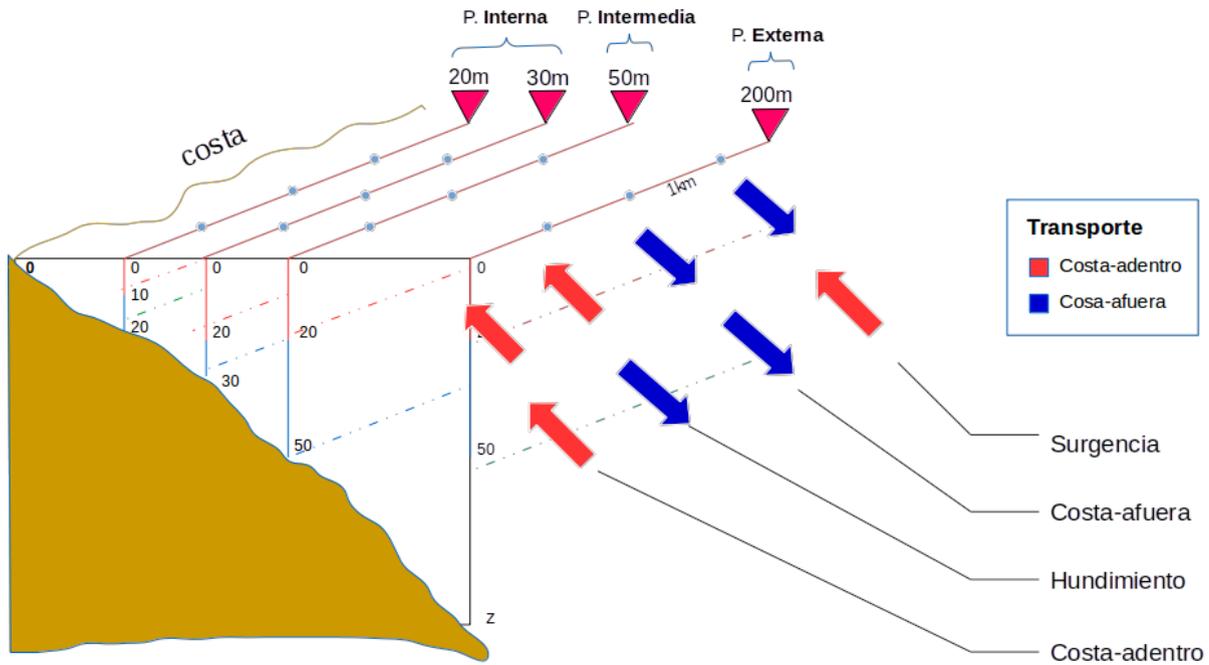


Figura III.1: Ilustración del transporte a través de las secciones superficial y subsuperficial de la plataforma interna (20 y 30m), intermedia (50m) y externa (200m).

III.4. Transporte a lo largo de las isóbatas de la plataforma continental

Para el cálculo del transporte a lo largo de la plataforma continental se integra del punto S al S1 en superficie, donde se realiza el producto punto de la componente de velocidad (u,v) \vec{u} con el vector normal unitario de S en dirección al punto S1 a lo largo de las isóbatas analizadas.

$$Q = \int_S^{S1} \vec{u} \cdot \vec{n} ds, \tag{III.2}$$

Los cálculos se realizaron comenzando por la plataforma WFS en sentido antihorario, sobre las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m, hasta la plataforma del BOC, cercano al Cabo Catoche.

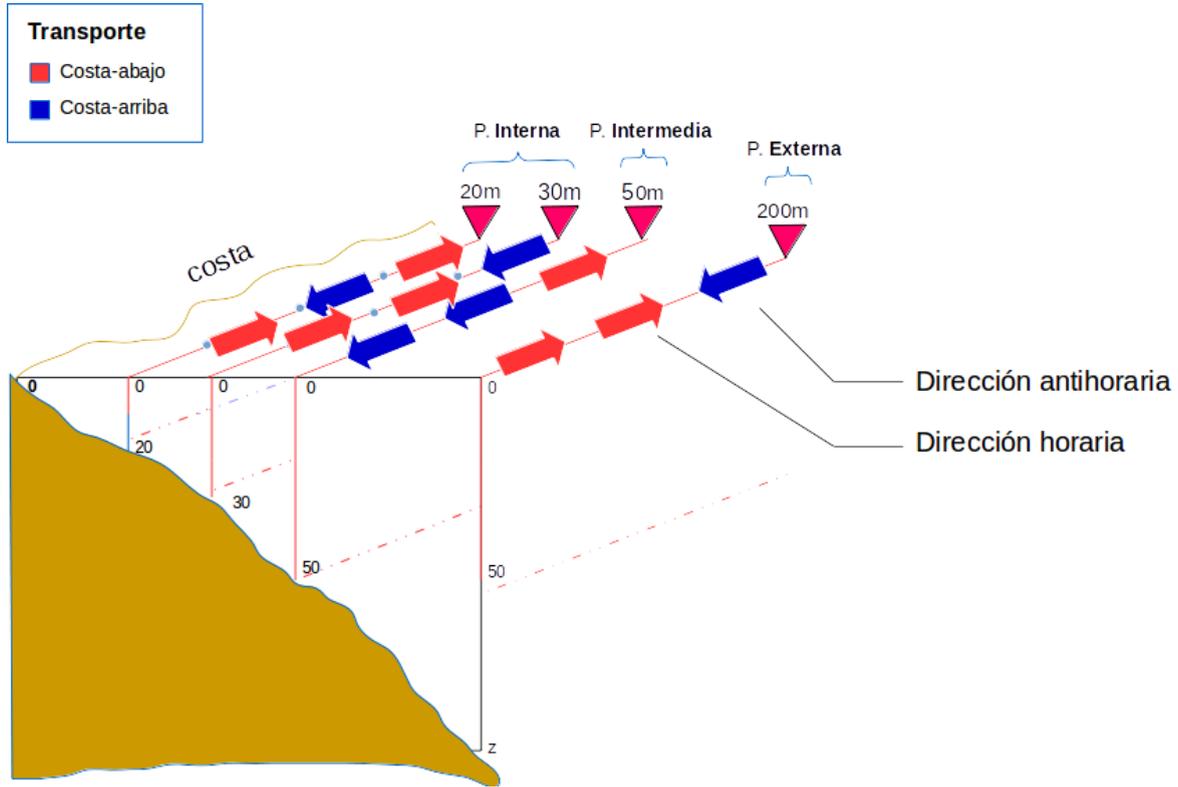


Figura III.2: Ilustración del transporte en superficie a lo largo de la plataforma interna (20 y 30m), intermedia (50m) y externa (200m).

III.4.1. Divergencia de la circulación en las plataformas del GoM

A partir de los resultados del transporte a lo largo de la plataforma se calcula la divergencia en las isóbatas 30, 50 y 200m. Se pueden estimar las derivadas de una región, donde asumimos que la densidad es prácticamente uniforme:

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{u_b - u_a}{x_b - x_a} \quad (\text{III.3})$$

La divergencia horizontal se calcula con la siguiente ecuación:

$$\nabla_H \cdot \vec{V} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} \quad (\text{III.4})$$

Nos interesa calcular la divergencia (convergencia) de la componente a lo largo de la costa, siendo \vec{V}_p el transporte a lo largo de la plataforma. La divergencia se representa de la siguiente manera:

$$\nabla_H \cdot \vec{V}_p = \left(\frac{du}{dx} \right)_p \approx \frac{\vec{V}_p(S_0 + 1) - \vec{V}_p(S_0)}{\Delta x_p} \quad (\text{III.5})$$

Donde S_0 es la posición a lo largo de la isóbata y Δx_p es la distancia entre cada punto calculado (1 km en este caso).

III.4.2. Esfuerzo del viento

Con el objetivo de obtener el esfuerzo del viento a lo largo de la isóbata de 50m, se interpolaron las componentes del viento ($U10, V10$) procedentes de los forzamientos atmosféricos del WRF de los mismos años analizados (1992 al 2012) a esta isóbata para poder calcular lo siguiente:

1. Magnitud del viento:

$$MV = \sqrt{U10^2 + V10^2}, \quad (\text{III.6})$$

2. Constante C_d :

$$C_d = (2.7/MV) + 0.142 + (0.0764 * MV) * 0.0001, \quad (\text{III.7})$$

3. Esfuerzo del viento N-S:

$$\tau_y = \rho_{aire} C_d * V10 * MV \quad (\text{III.8})$$

4. Esfuerzo del viento E-W:

$$\tau_x = \rho_{aire} C_d * U10 * MV \quad (\text{III.9})$$

5. Esfuerzo del viento a lo largo de la isóbata de 50m:

$$\tau_{50} = VNU_{50} \cdot \tau = \langle x, \tau_x \rangle \cdot \langle y, \tau_y \rangle \quad (\text{III.10})$$

donde ρ_{aire} corresponde a la densidad del aire ($1.2kg/m^3$).

III.4.3. Medias móviles

Los promedios diarios (21 años) y horarios (13 años) de transporte a través y a lo largo de la plataforma continental fueron promediados mensualmente para observar la variabilidad a lo largo de un ciclo anual de flujos en el GoM. Los promedios resultantes fueron pos-procesados con un filtro de medias móviles que construye una nueva serie a partir de la media de un número

determinado de datos, donde sucesivamente se coloca un dato nuevo y sustituyendo, al mismo tiempo, el más antiguo de los datos incluidos en la media anterior.

Una media móvil de orden s calcula una serie que para cada momento t tome el siguiente valor: $M_t = \frac{y_t + y_{t-1} + \dots + y_{t-s+1}}{s}$. Con ello, las fluctuaciones de alta frecuencia se suavizan, resaltando los ciclos de largo plazo que en este caso, nos ayudan para una mejor visualización de los resultados obtenidos.

Capítulo IV

Resultados

IV.1. Transporte a lo largo de la plataforma continental

Los transportes a lo largo de la plataforma continental del GoM tienen un fuerte componente estacional pero con diferencias regionales. Para poder evaluar su comportamiento, se considera cada plataforma (WFS, MAFLA, LATEX, TAVE, BC) del GoM a lo largo de un ciclo anual (promedios mensuales de 21 años simulados en el modelo HYCOM). Consideramos la dirección del transporte costa abajo (valores positivos en colores naranja-rojo) cuando tenemos la costa hacia la derecha, y costa arriba (valores negativos en color verde-azul-morado) con la costa hacia la izquierda. Comenzando el análisis de norte a sur (Figura I.1).

En la plataforma interna de la WFS predomina un transporte costa arriba, donde la circulación es horaria. Es hasta LATEX, donde la circulación cambia a ser antihoraria en el mes de septiembre y llega hasta la Bahía de Campeche. En LATEX la circulación antihoraria dura hasta abril, y en Veracruz culmina en febrero. El transporte costa arriba predomina todo el año en BC (Figura IV.1 y Figura IV.2).

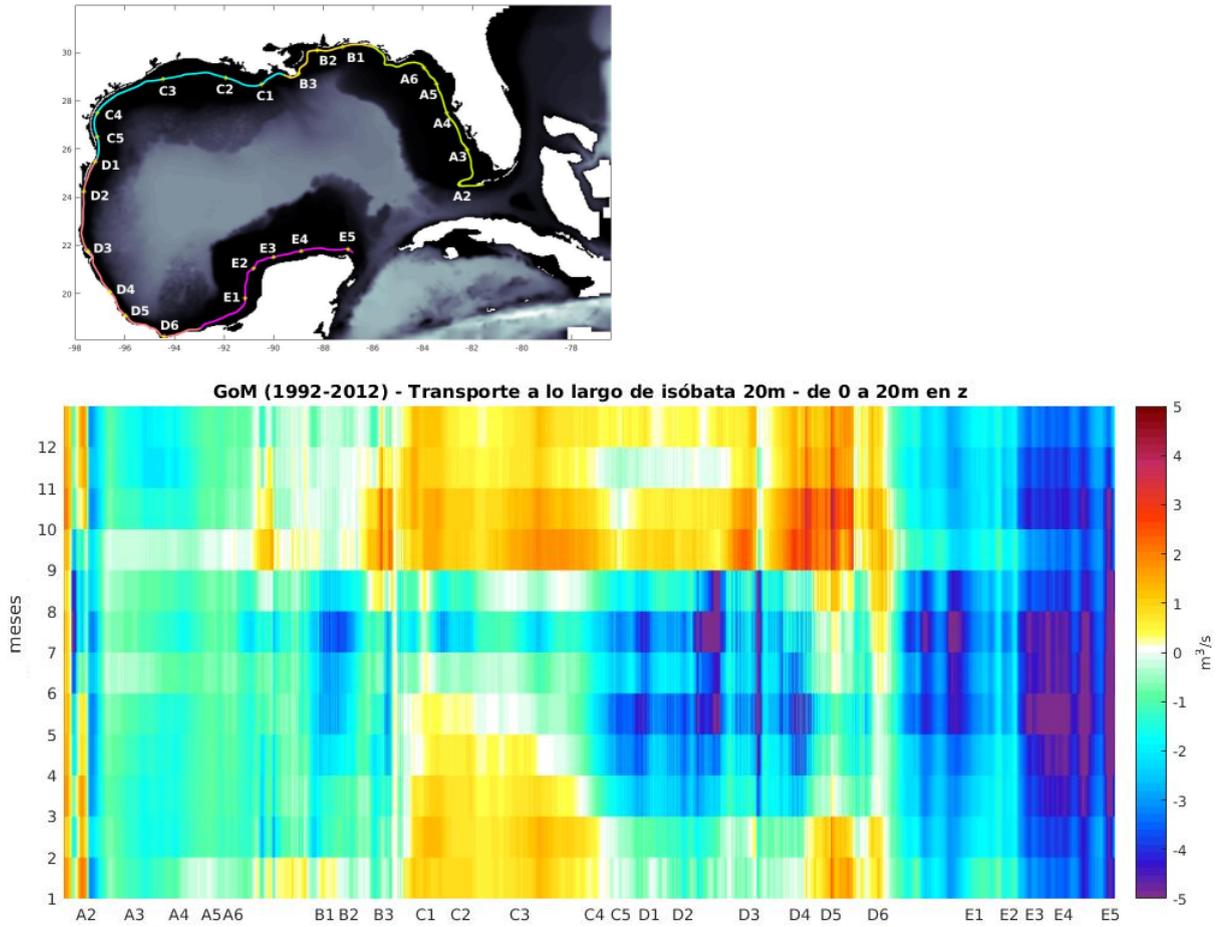


Figura IV.1: Promedio mensual del transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 20m del GoM. Tonos rojos antihorarias (costa abajo); verde-azul-morado en dirección horaria (costa arriba). Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés.

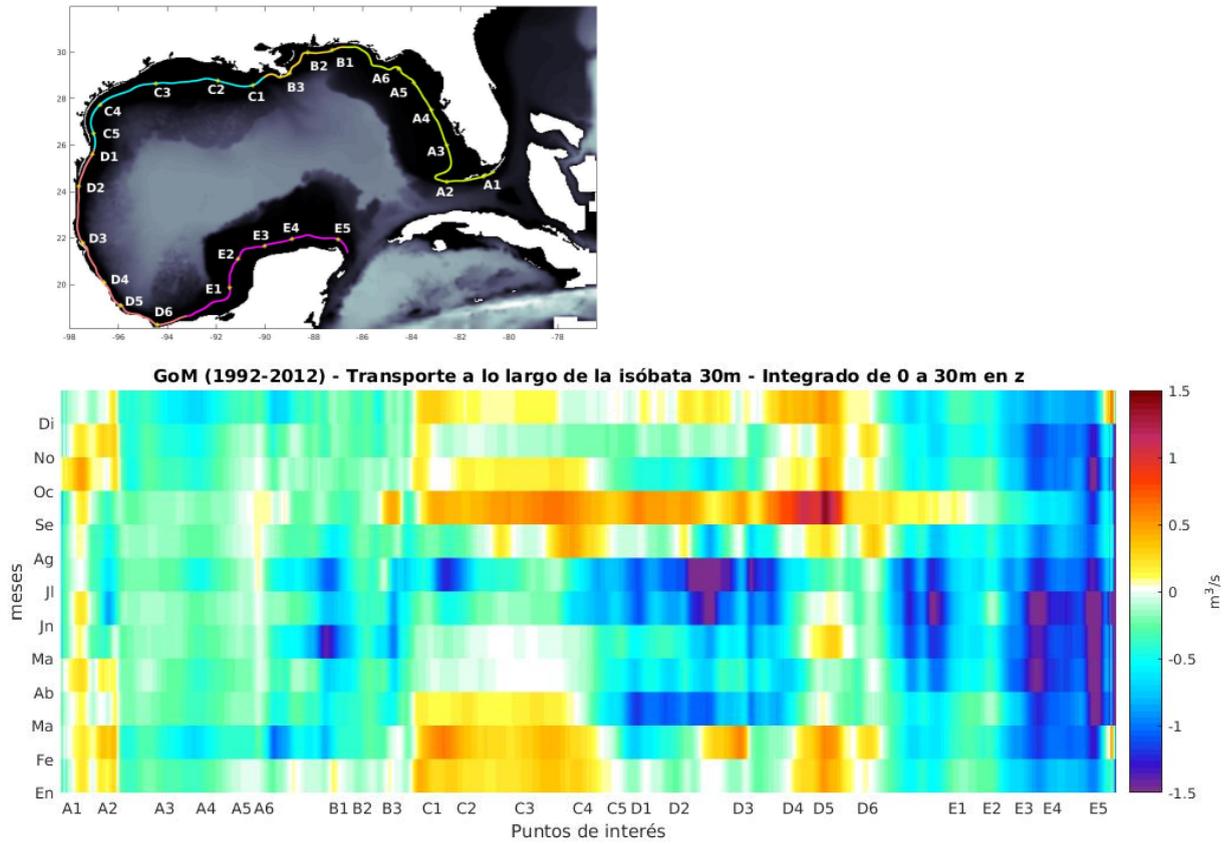


Figura IV.2: Promedio mensual del transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 30m del GoM. Tonos rojos antihorarias (costa abajo); verde-azul-morado en dirección horaria (costa arriba). Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés.

Durante el verano la circulación en la plataforma intermedia de la WFS se invierte a antihoraria. En LATEX y en TAVE la circulación es horaria predominantemente, y es hasta agosto-septiembre que se invierte a antihoraria llegando a febrero en la plataforma de Veracruz. Este transporte costa abajo de agosto-septiembre llega hasta el oeste y noroeste de la plataforma del BC (Figura IV.3).

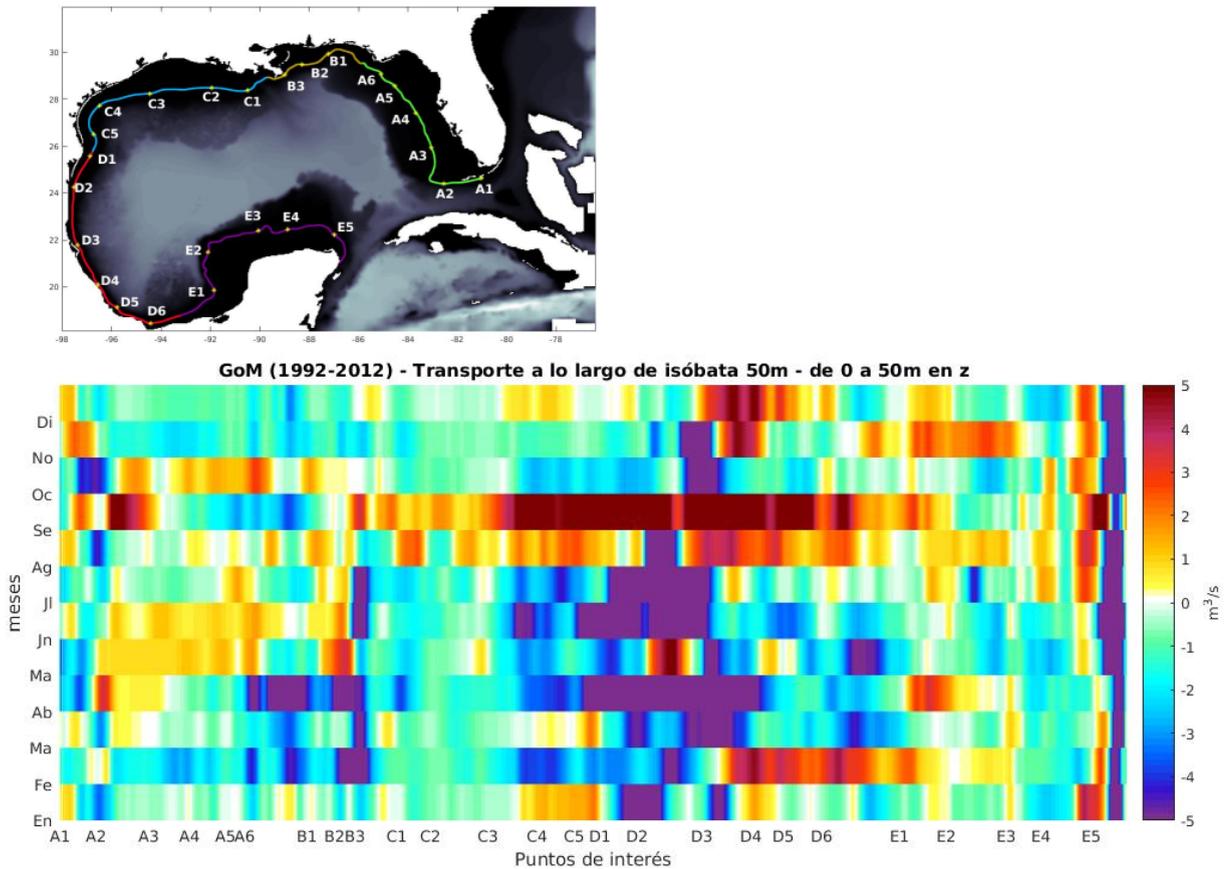


Figura IV.3: Promedio mensual del transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 50m del GoM. Tonos rojos antihorarias (costa abajo); verde-azul-morado en dirección horaria (costa arriba). Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés.

En la plataforma externa, el transporte costa arriba se presenta todo el año en la WFS y LATEX. Es hasta Veracruz, de agosto a junio, que el transporte cambia a costa abajo, lo que puede deberse a la influencia del ciclón de Veracruz. En la plataforma al sur de la Bahía de Campeche; también se invierte en agosto y se mantiene la circulación antihoraria hasta diciembre. Al norte de BC la circulación es antihoraria todo el año y cambia a horaria en el borde noreste de BC (Figura IV.4).

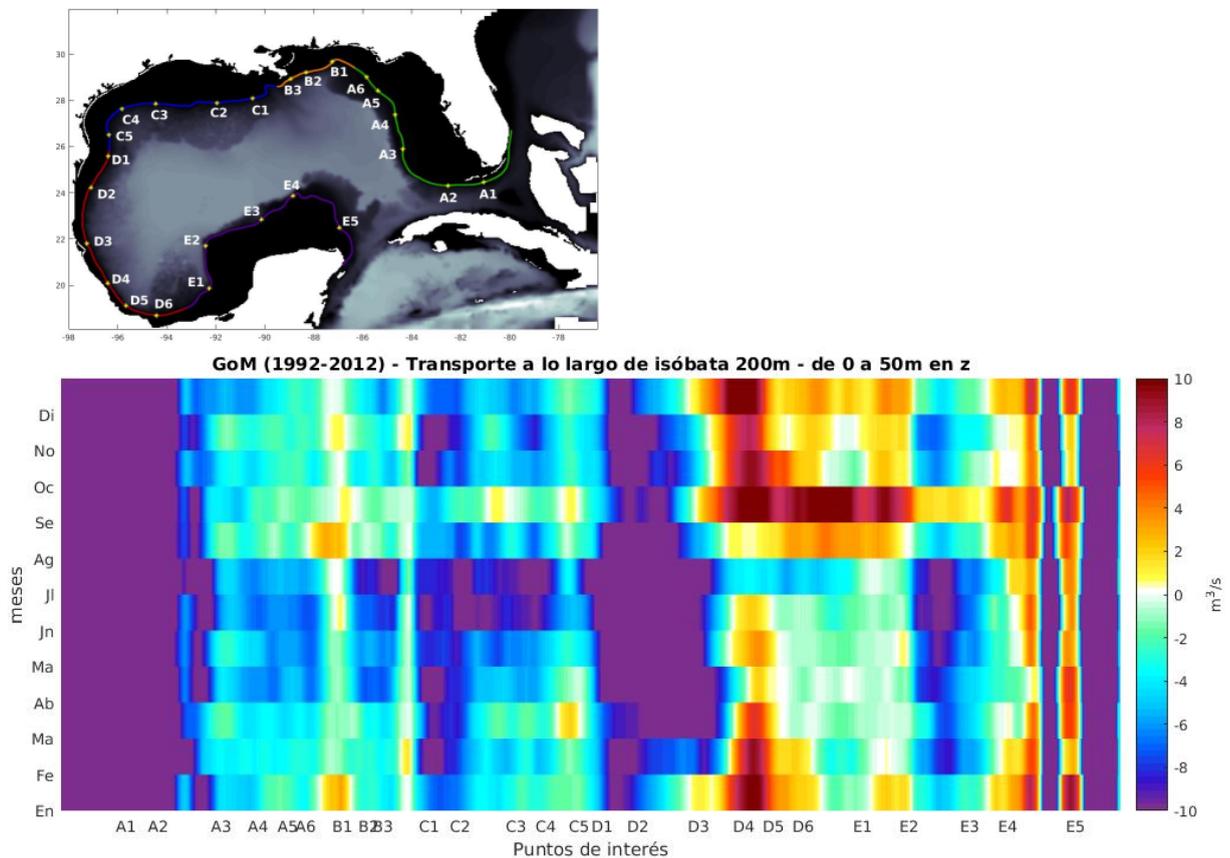


Figura IV.4: Promedio mensual del transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 200m del GoM. Tonos rojos antihorarias (costa abajo); verde-azul-morado en dirección horaria (costa arriba). Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés.

Como se muestra en los siguientes diagramas (Figura IV.6 y Figura IV.7), los valores positivos (naranja-rojo) son de divergencia y los negativos (verde-azul-morado) convergencia en superficie. La convergencia en la plataforma interna (Figura IV.7) se presenta en A2 todo el año, en A4 de julio a septiembre, en B2 en verano, C1 al oeste del Misisipi se observa todo el año; en Veracruz (D5) de octubre a marzo, al oeste de BC (E1) y en el borde este (E5) todo el año. En la plataforma intermedia (Figura IV.7) ocurre convergencia al noroeste de WFS (A6) de enero a agosto al igual que en el Cañón de Soto (A6); en MAFLA (B2) de febrero a abril, mientras que al este del Río Misisipi (A3) de abril a agosto. En LATEX (C3) la convergencia es un fenómeno que ocurre en verano, al igual que en TAVE (D2) que se extiende todo el año, siendo más intensa de mayo a septiembre; en D6 ocurre todo el año al igual que en BC (E2, E4 y E5). La divergencia y convergencia en la isóbata de 200m se asemeja a la de la plataforma interna.

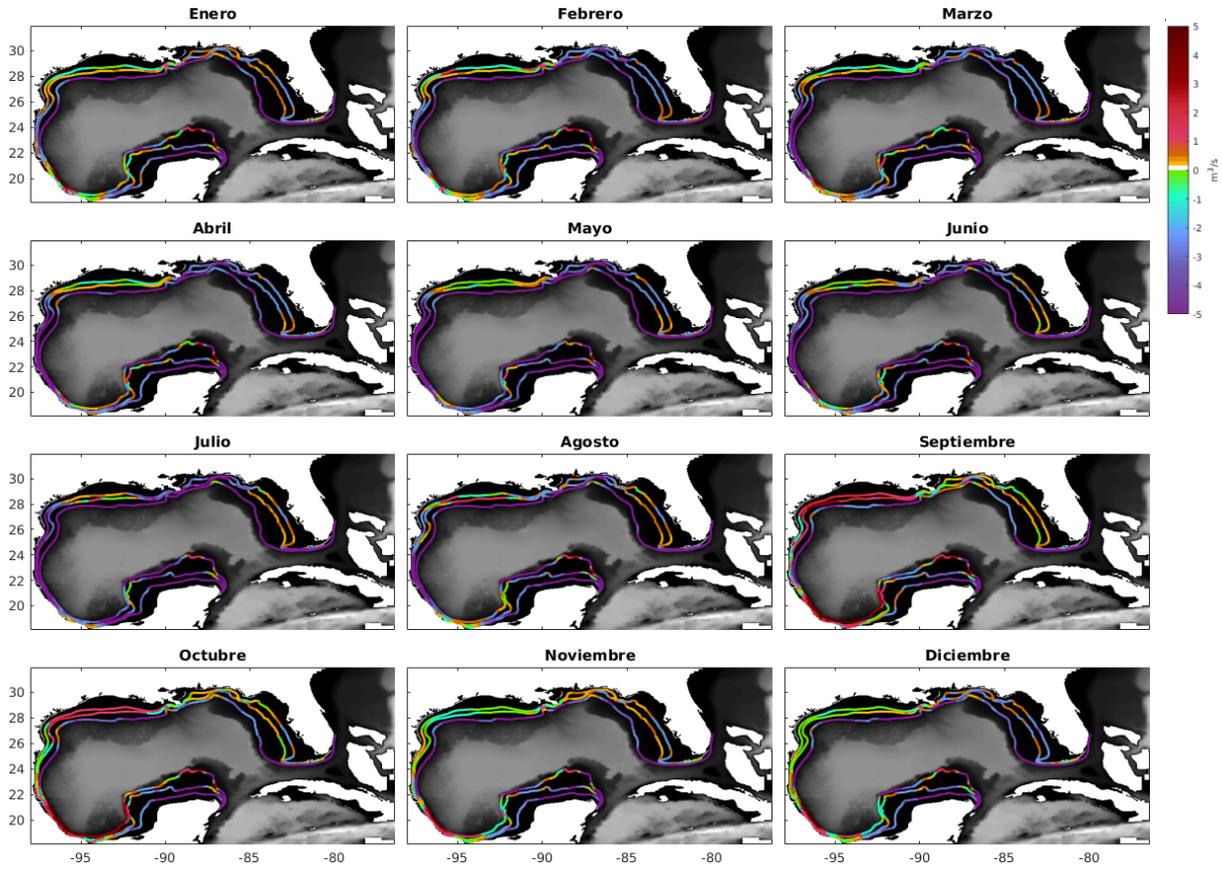


Figura IV.5: Transporte promedio mensual en el GoM a lo largo de isóbatas 30, 50 y 200m. Transporte costa abajo (naranja-rojo) con la costa a la izquierda y transporte costa arriba (verde-azul-morado) con la costa hacia la derecha.

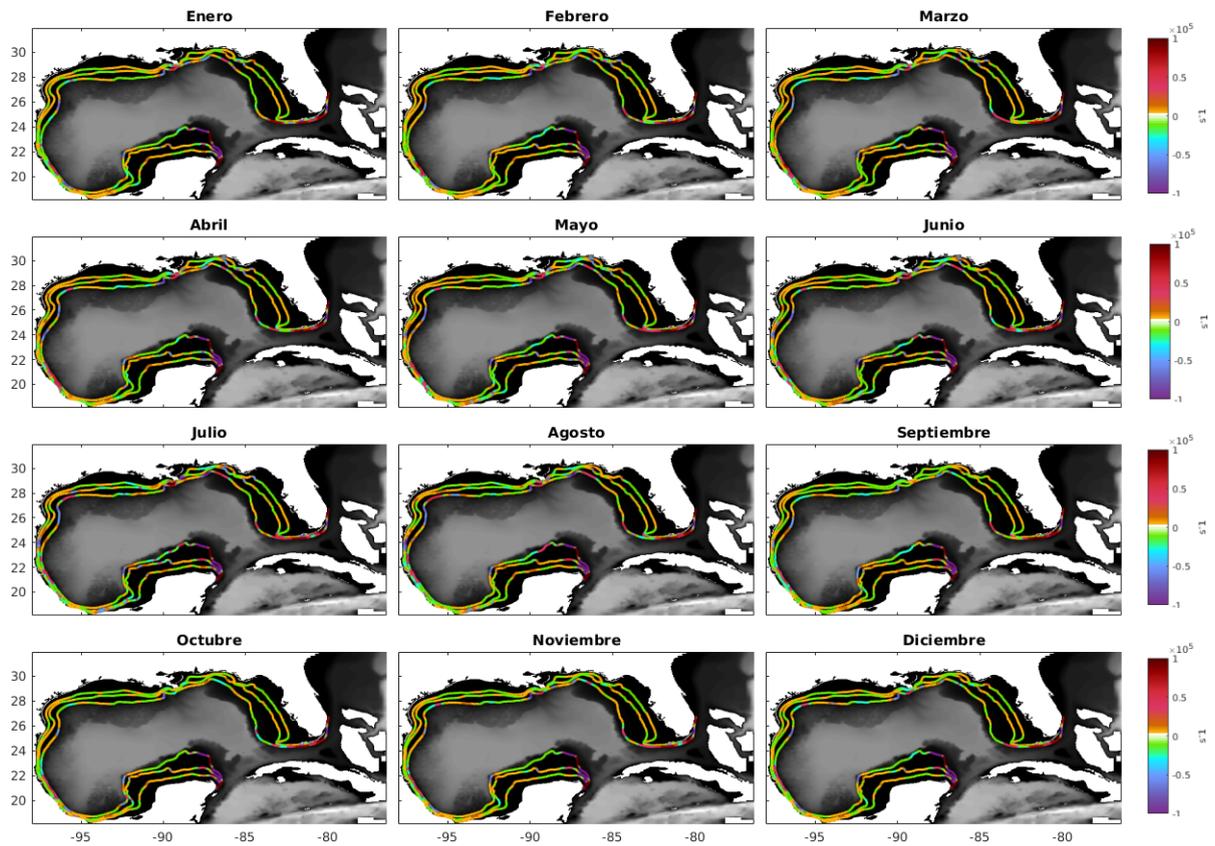


Figura IV.6: Diagrama Hovmuller de la divergencia mensual en el GoM a lo largo de isóbatas 30, 50 y 200m. En naranja-rojo la divergencia, en verde-azul-morado convergencia. Mapa en extremo superior izquierdo muestra los puntos de la isóbata de interés

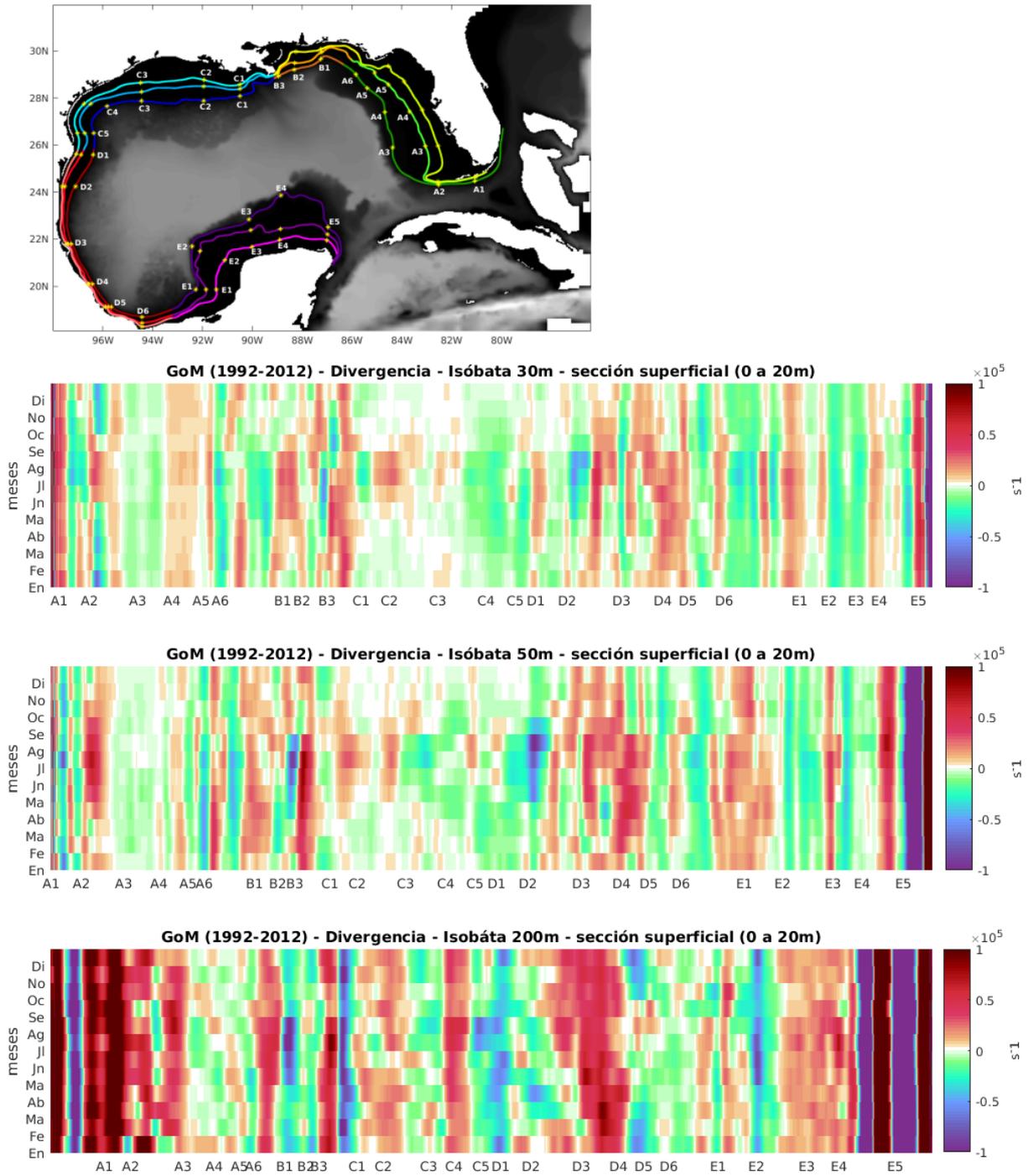


Figura IV.7: Divergencia a lo largo de isóbatas de 30, 50 y 200m en el GoM. En naranja-rojo la divergencia, en verde-azul-morado convergencia.

Se puede observar en la Figura IV.8 como es que el esfuerzo del viento a lo largo de la isóbata de 50m muestra una dirección antihoraria de agosto a enero en la plataforma MAFLA y LATEX. Al igual que el transporte verticalmente integrado por unidad de área a lo largo de la isóbata de 50m del GoM (Figura IV.3), encontramos una dirección horaria en verano en la paltafoma de TAVE al igual que en BC todo el año.

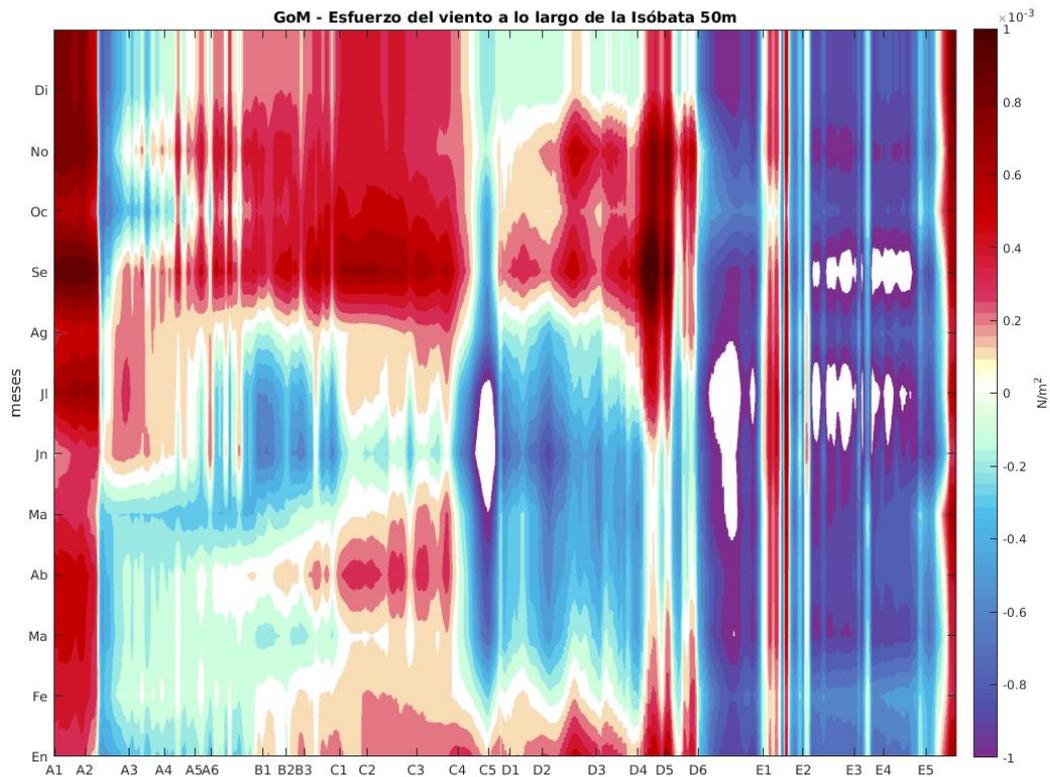


Figura IV.8: Promedio mensual del esfuerzo del viento (1992-2012) a lo largo de los puntos de interés de la isóbata de 50m. Valores positivos en dirección antihoraria.

IV.2. Transporte a través de la plataforma continental

Se realizaron dos cálculos de transporte a través y a lo largo de la plataforma continental con diferentes escala temporal para observar a detalle la circulación en la plataforma continental:

1. Salidas diarias (0:00 hrs GMT) de 21 años (1992-2012): Los datos diarios de 21 años de transporte a través y a lo largo de la plataforma continental fueron promediados mensualmente para observar la variabilidad anual en el GoM, procesados posteriormente con un filtro de medias móviles (Capítulo III) para una mejor representación visual.
2. Salidas horarias de 13 años (2000-2013): Se calculó el promedio de transportes a través y a lo largo de la plataforma continental horarios (2000-2013) post-procesados con un filtro de medias móviles.

Para observar el transporte a través de las isóbatas se realizan los siguientes diagramas Hovmuller a lo largo de las plataformas interna, intermedia y externa del GoM.

Diagramas Hovmuller del transporte a través de la isóbata:

1. Isóbata de 20m (Figura IV.9):

- Sección integrada de 0 a 10m de profundidad.
- Sección integrada de 10 a 20m de profundidad.

2. Isóbata de 30m (Figura IV.10):

- Sección integrada de 0 a 20m de profundidad.
- Sección integrada de 20 a 30m de profundidad.

3. Isóbata de 50m (Figura IV.11):

- Sección integrada de 0 a 20m de profundidad.
- Sección integrada de 20 a 50m de profundidad.

4. Isóbata de 200m en los primeros 50m (Figura IV.4):

- Sección integrada de 0 a 20m de profundidad.
- Sección integrada de 20 a 50m de profundidad.

IV.2.1. Promedios mensuales de transportes diarios

A partir del cálculo de transporte a través de las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m en la sección superficial y profunda, se realizan diagramas de surgencia (costa afuera en superficie y costa adentro en el fondo) y hundimiento (costa adentro en superficie y costa afuera en el fondo) mensual (Figura IV.9 y Figura IV.10) y se identificaron los lugares donde el flujo es costa adentro o hacia afuera en toda la columna de agua (Figura IV.11 y Figura IV.12)

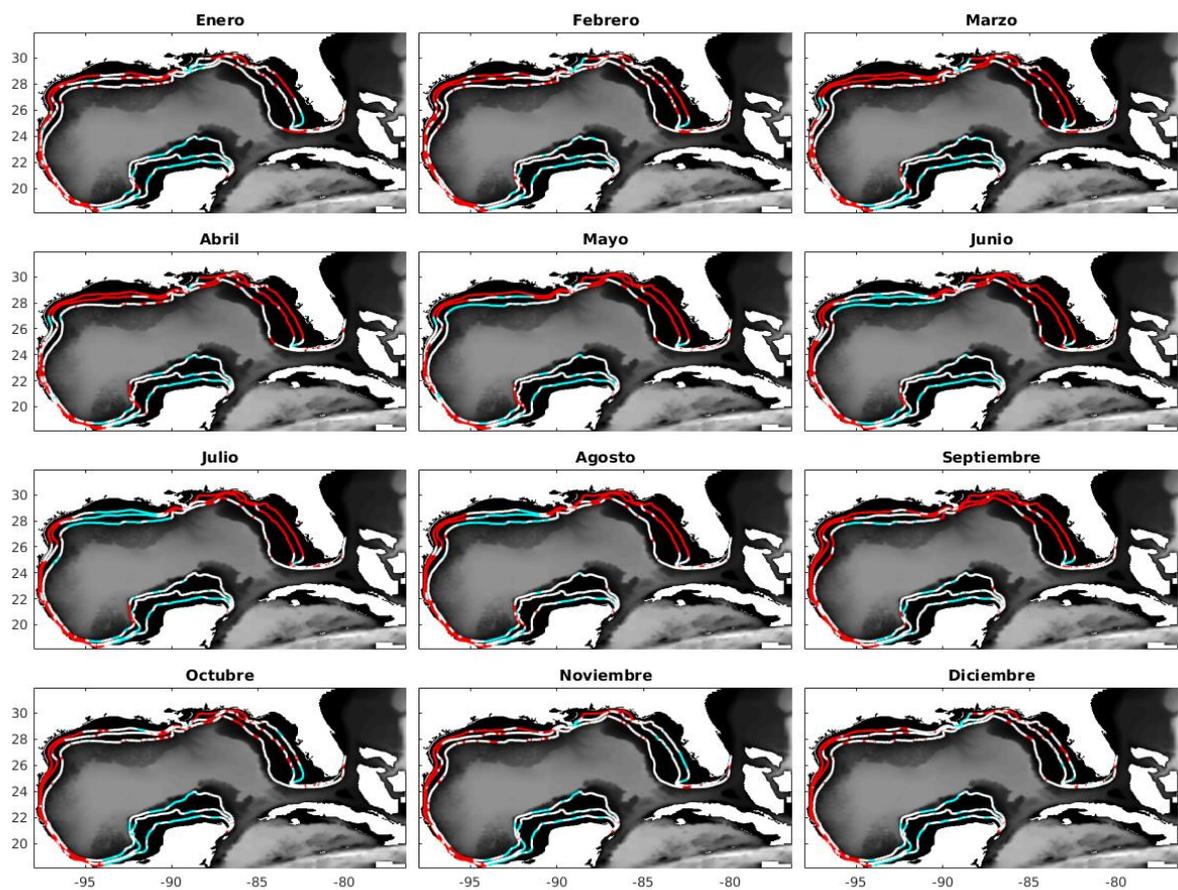


Figura IV.9: Surgencia (cyan) y hundimiento (rojo) mensual en el GoM sobre las isóbatas de 30, 50 y 200m. En blanco las regiones con transporte costa adentro-afuera en toda la columna de agua.

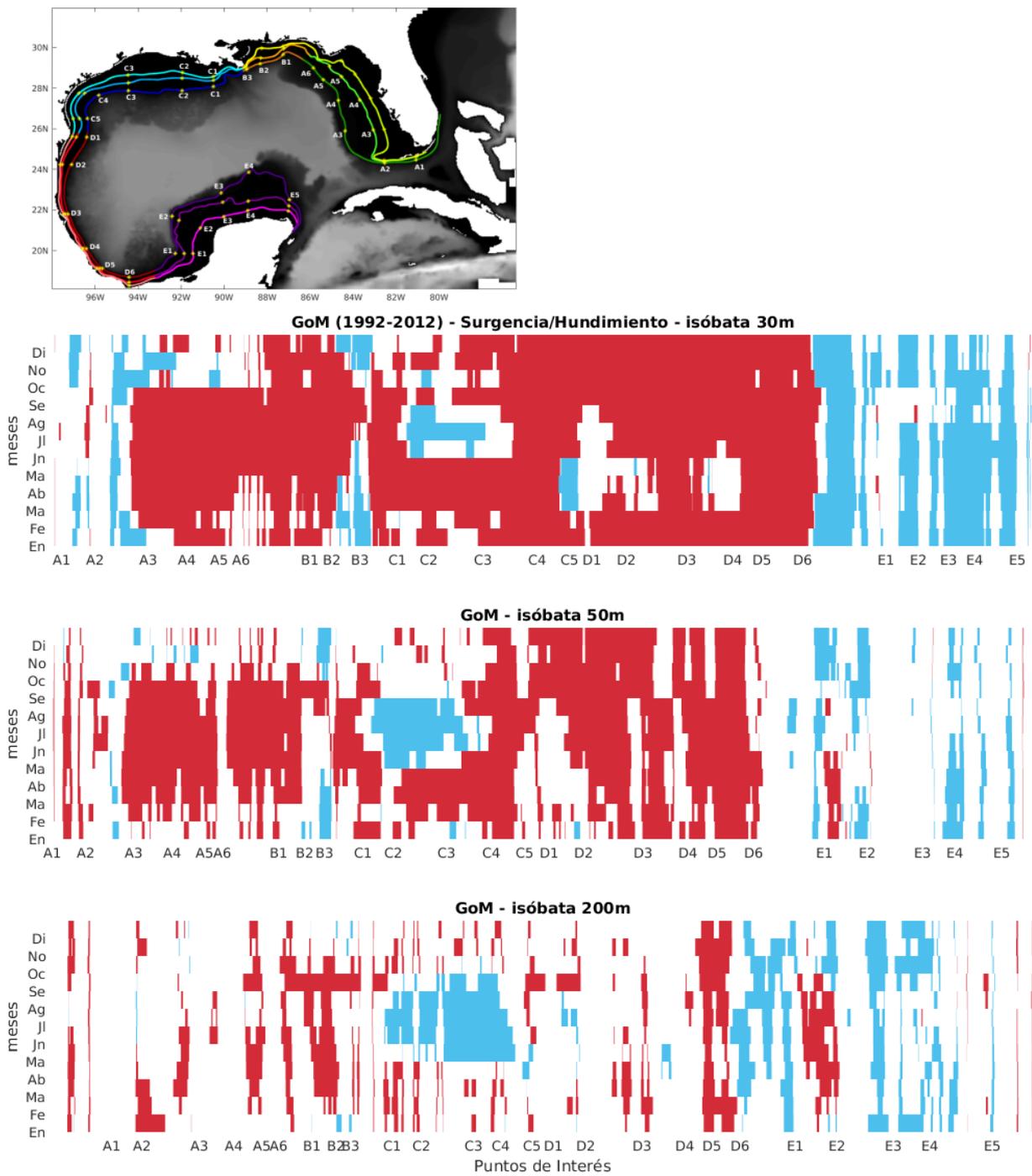


Figura IV.10: Diagrama Hovmuller de la surgencia (azul) y hundimiento (rojo) en el GoM a lo largo de isóbatas de 30, 50 y 200m.

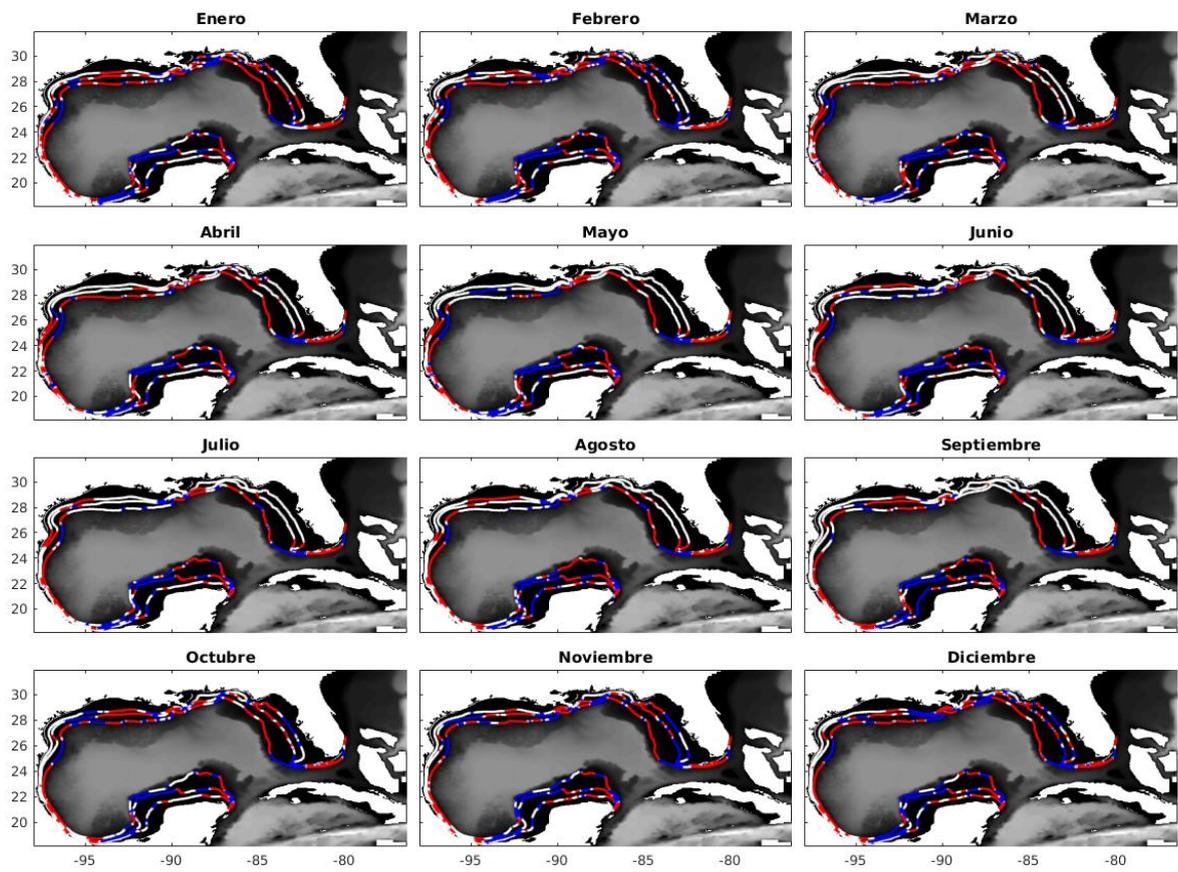


Figura IV.11: Transporte costa adentro (rojo) y costa afuera (azul) mensual en toda la columna de agua sobre las isóbatas 30, 50 y 200m del GoM.

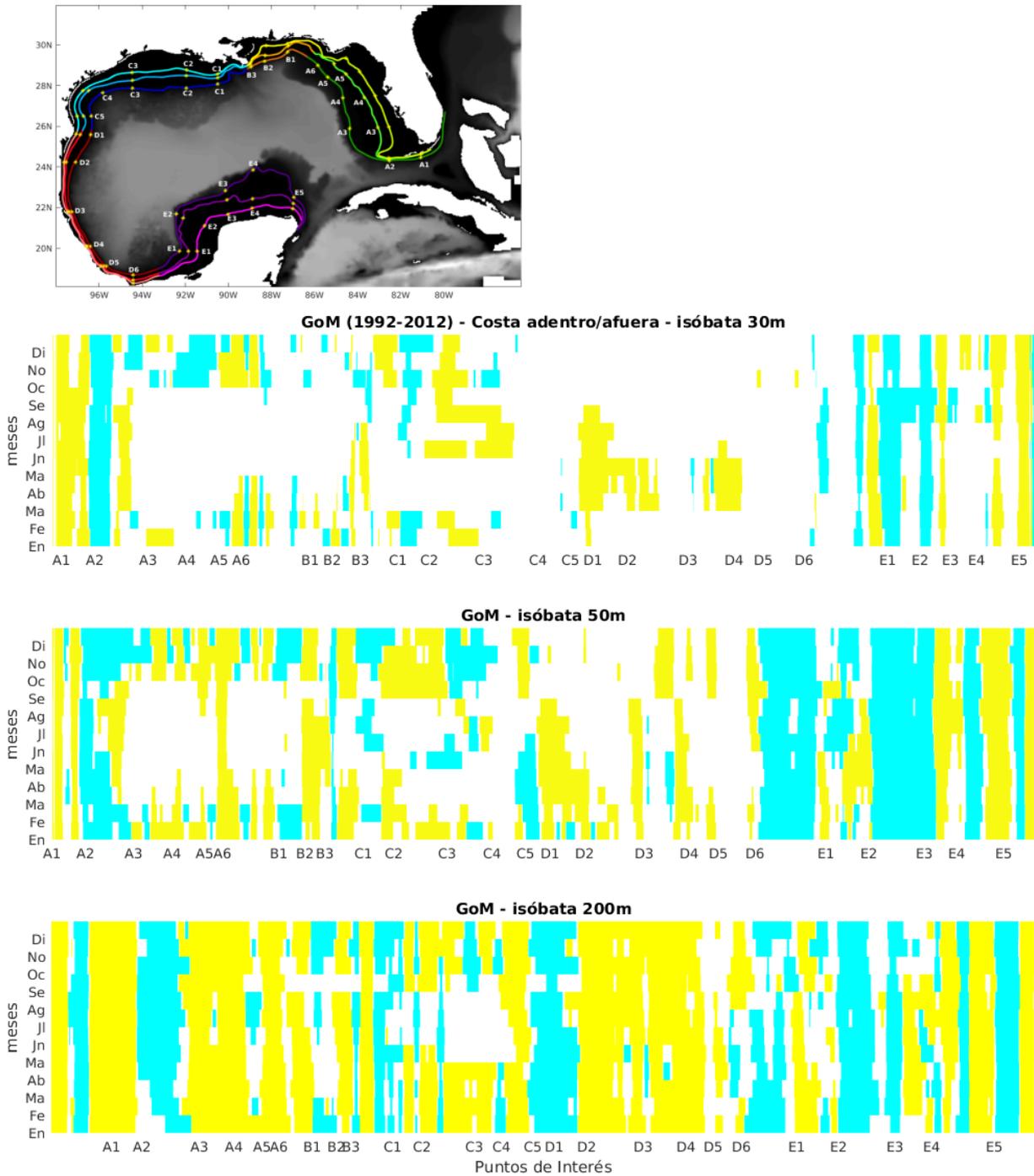


Figura IV.12: Diagrama Hovmuller del transporte costa adentro (amarillo) y costa afuera (cyan) en toda la columna de agua (superficie a fondo) mensual en las isóbatas 30, 50 y 200m del GoM.

Al ser la plataforma continental una zona somera, la dirección y el aporte de agua en las secciones: superficial y subsuperficial; están determinadas por la componente del viento a lo largo de la costa, las descargas de ríos, las marea y la circulación de aguas oceánicas (entre otras). El transporte en la capa superior (0 a 10m) sobre la isóbata de 20m es principalmente costa adentro todo el año en la región norte y oeste del GoM (Figura IV.13), al igual que en la capa superficial de la isóbata de

30m (Figura IV.14). Igualmente, ambas coinciden con la predominancia de transporte costa afuera en la capa superficial en el sur del GoM, en la Bahía de Campeche y el BC. Subsuperficialmente (20 a 30m), ocurre un transporte costa afuera en WFS, LATEX y TAVE y es costa adentro al sur del GoM.

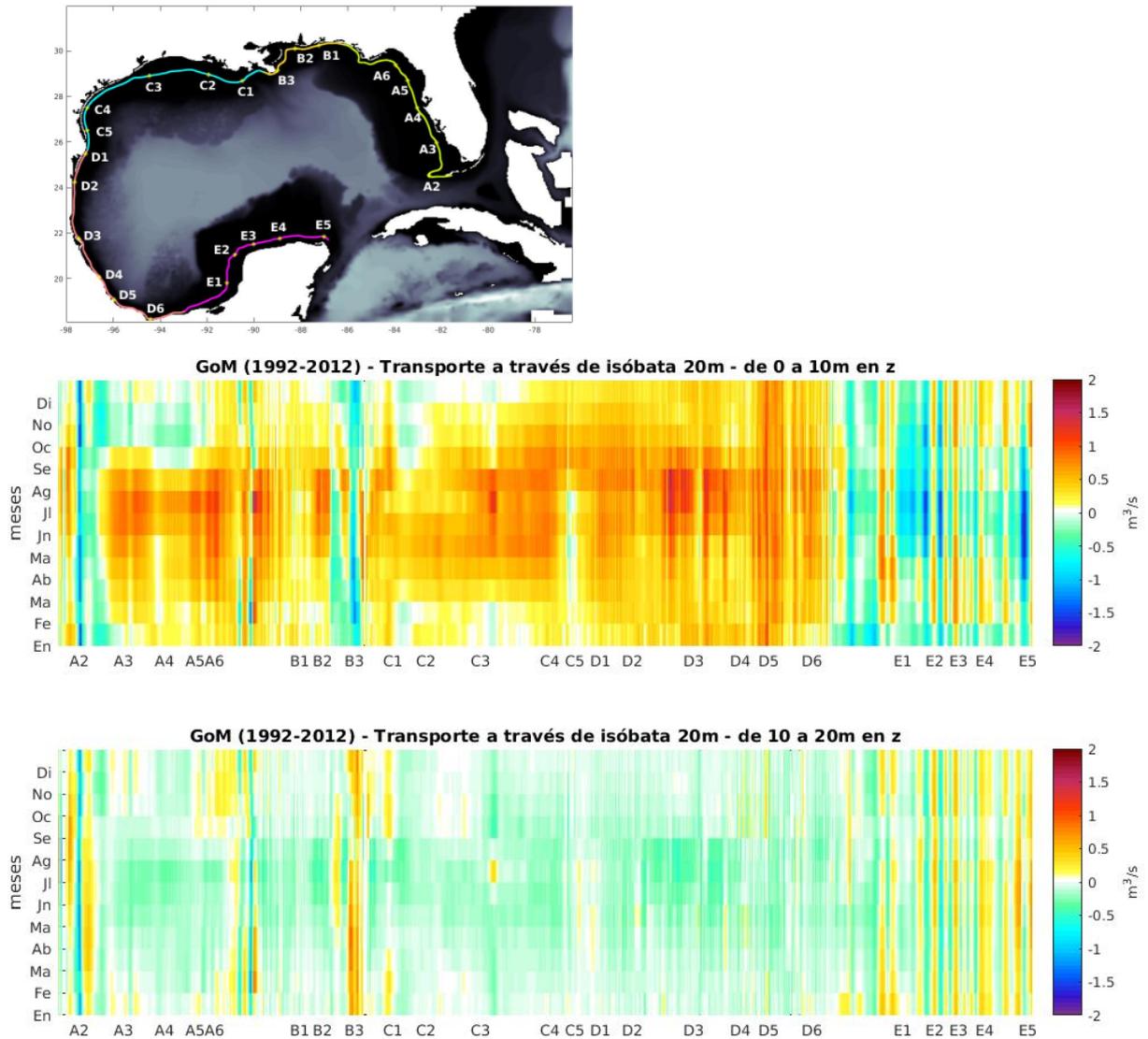


Figura IV.13: Diagramas Hovmuller del promedio anual del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y el transporte costa afuera verde-azul-morado.

Las diferencia en dirección de los transportes de las secciones superficial y subsuperficial nos indican la presencia de un fenómeno de surgencia/hundimiento (Figura IV.10). El hundimiento es el fenómeno que domina en la plataforma interna de la WFS (primavera y verano), en LATEX (invierno y primavera) y en TAVE y MAFLA (la mayor parte del año). Se puede ver una surgencia en verano en LATEX y en BC todo el año sobre la isóbata de 30m. En la isóbata de 20m, se observa

surgencia al este del Río Misisipi (B3) la mayor parte del año y en el BC predominantemente en verano.

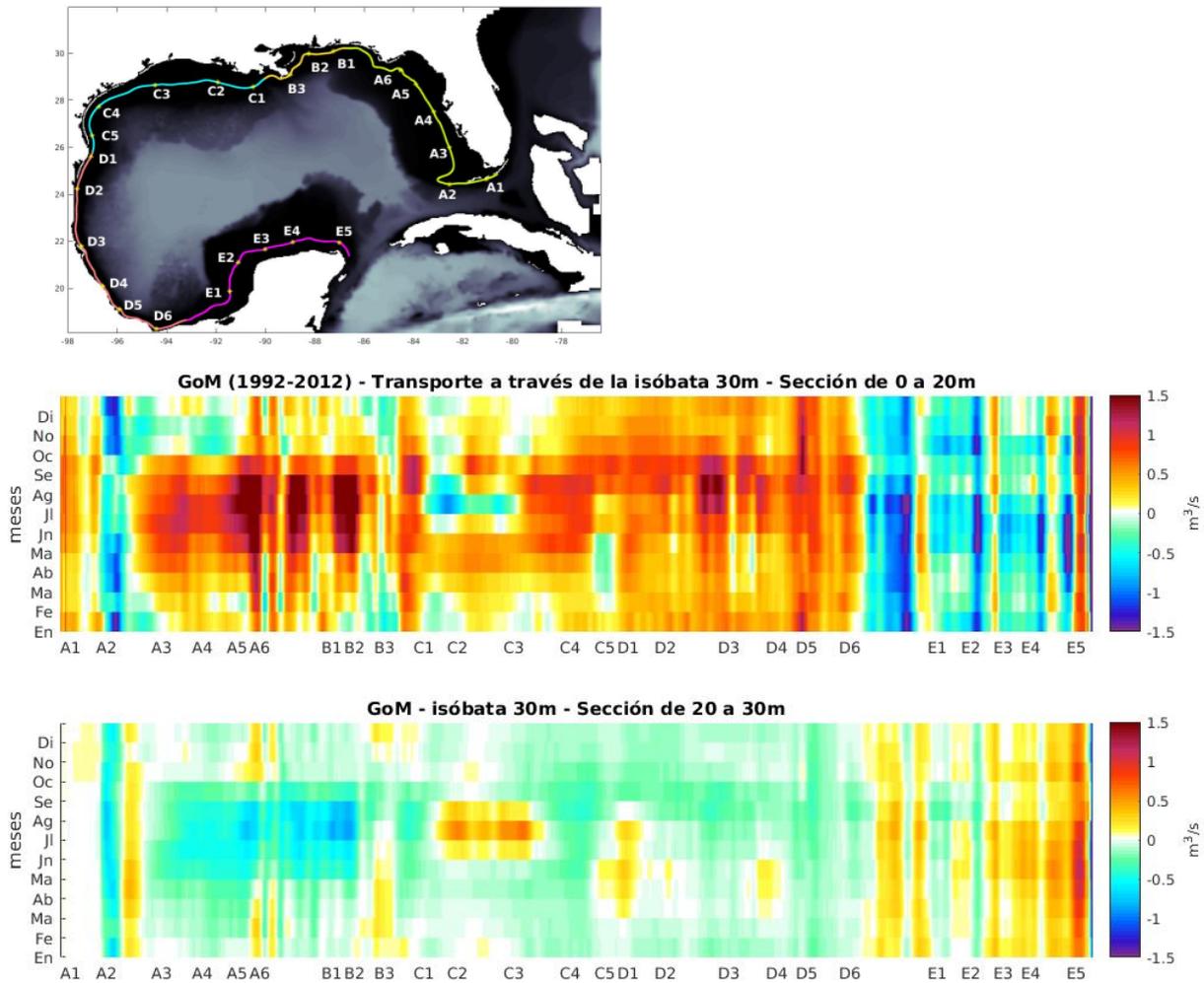


Figura IV.14: Diagramas Hovmuller del promedio anual del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y el transporte costa afuera verde-azul-morado.

En la plataforma intermedia (isóbata 50m) el transporte en superficie a través de la plataforma (0 a 20m) es costa adentro al centro y norte del GoM, en el sur del golfo de enero a primavera, al oeste de la Península de Yucatán y al noroeste de la misma todo el año (Figura IV.15). El transporte costa afuera se observa al sur de Texas de febrero a junio, en la Bahía de Campeche todo el año y al norte de BC, donde es predominante. La surgencia se puede observar el verano en LATEX; en MAFLA, al este del Misisipi, en invierno y principios de primavera. También se puede ver surgencia al Norte y Oeste de BC en donde se observa en invierno y primavera.

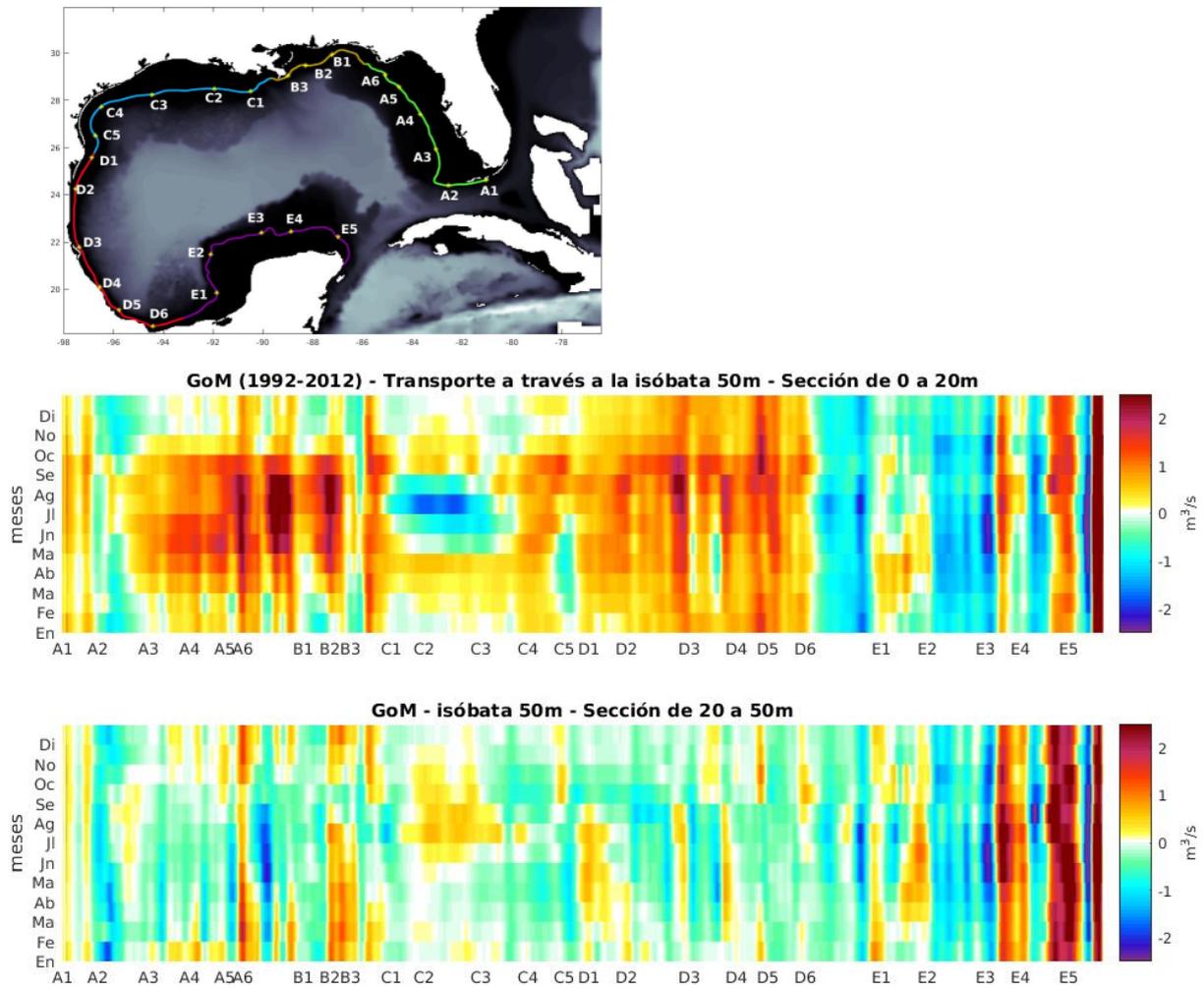


Figura IV.15: Diagramas Hovmuller del promedio anual del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y el transporte costa afuera verde-azul-morado.

En la plataforma externa el transporte costa adentro predomina en la WFS, en TAVE y al oeste del BC. Por otro lado, transporte costa afuera se presenta todo el año al sur de Texas, así como en la Bahía de Campeche y al Norte de BC (Figura IV.16). Se observa surgencia en LATEX en verano, también se pueden observar en algunas zonas de TAVE cercanas a la Bahía de Campeche y al norte del BC donde se presenta en algunas regiones, durante todo el año. En la plataforma externa el hundimiento disminuye su frecuencia en comparación con las plataformas internas, presentándose en MAFLA principalmente en los meses de primavera y verano, en Veracruz y en algunas regiones del BC en donde se observan durante todo el año. En la WFS se transporta agua costa adentro en toda la columna de agua la mayor parte del año, al igual que al norte de TAVE, mientras que en LATEX se observa de invierno hasta principios de primavera. Al contrario que en las zonas previamente mencionadas, el transporte de agua costa afuera se presenta en Tamaulipas

todo el año, al igual que en algunas regiones de la Bahía de Campeche y al noroeste y norte de BC.

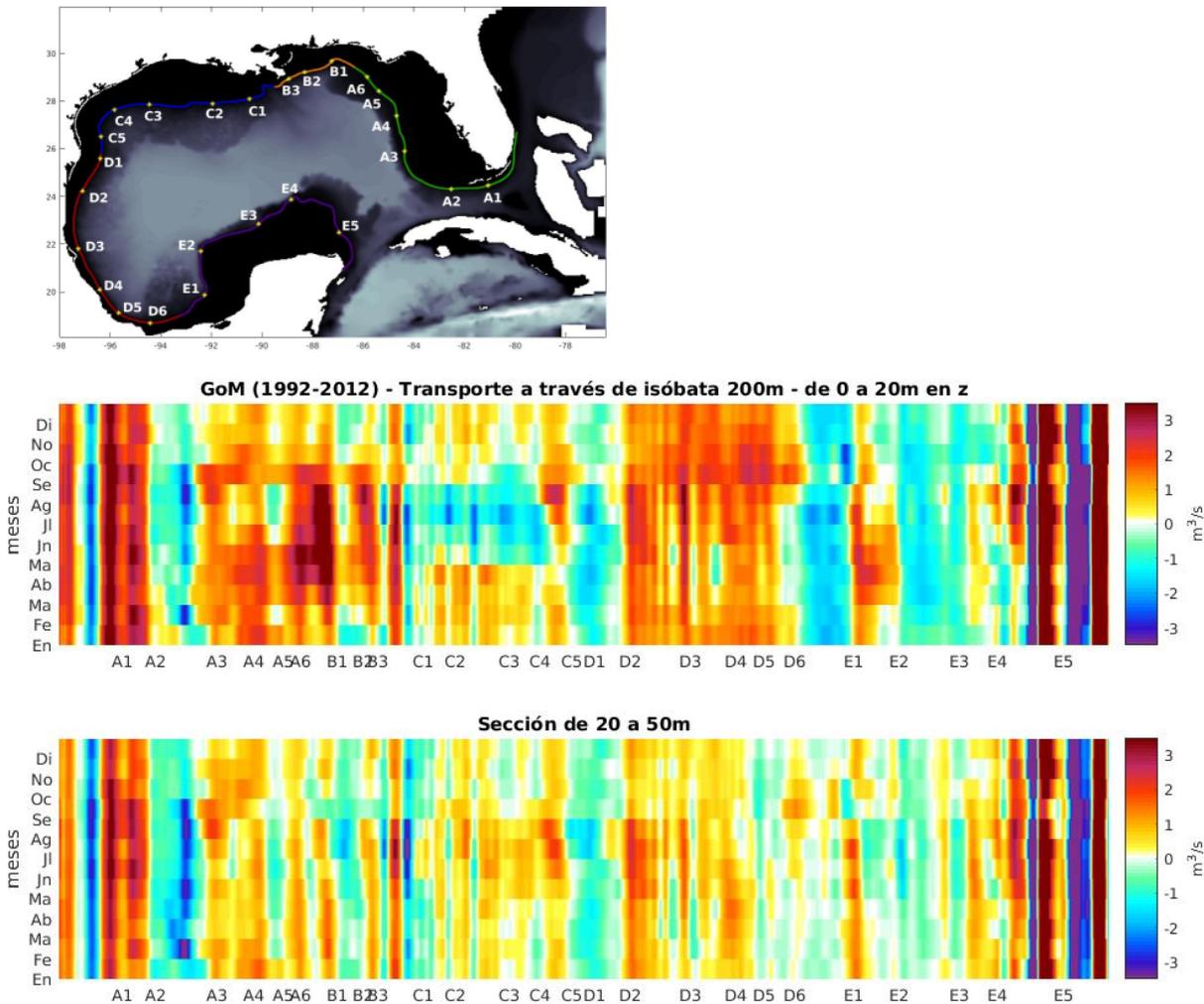


Figura IV.16: Diagramas Hovmuller del promedio anual del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM, integrada desde superficie a 20m y de 20m hasta los 50m de profundidad. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y transporte costa afuera verde-azul-morado.

IV.2.2. Promedios mensuales de transportes horarios

Los resultados de los transportes a través de la plataforma descritas en la sub-sección anterior mostraron regiones en donde predominan condiciones de surgencia y hundimiento. Sin embargo, algunas regiones en que se han observado surgencias en determinadas épocas del año no coincidieron con los resultados de la modelación numérica arriba descrita. Por esta razón se consideró como hipótesis que la componente diurna de estos transportes pudiera contribuir a esos procesos. Nótese que las corridas que se analizaron en las secciones y subsecciones anteriores se basaron en salidas diarias correspondientes a las 0:00 hrs GMT, que son las 18:00 hrs locales. Como solamente

se salvaron las salidas para las 0:00 hrs no fue posible analizar a partir de ellas el ciclo diurno. Por ello se decidió realizar una corrida de trece años (2000-2013) con salidas horarias de todos los días de los años 2000 al 2013 y analizar su parte superficial y subsuperficial.

Con la finalidad de observar la variabilidad diurna a partir de medias mensuales, el transporte a través de las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m se muestra en diagramas Hovmuller a partir de los promedios horarios de cada mes del promedio de los años 2000 al 2013 en su parte superficial y subsuperficial (Apéndice I).

Se encontró que tanto en superficie como subsuperficialmente hay una señal diurna muy intensa. Es decir, que la componente de la corriente perpendicular a las isóbatas analizadas cambia a lo largo del ciclo diurno y en ocasiones incluso cambia de signo. Entre superficie y subsuperficie encontramos direcciones opuestas del transporte costa adentro/afuera la mayor parte de año, pero con mayor intensidad entre abril y agosto, correspondiendo con los meses en que la circulación en el oeste del GoM tiene dirección horaria en la plataforma interna e intermedia.

Para ilustrar estos procesos se presentan y analizan los diagramas Hovmoller correspondientes a los meses de julio (Figura IV.17) y de septiembre (Figura IV.18) en la isóbata de 30m. Sin embargo, en el apéndice I se incluyen los diagramas correspondientes a todos los meses promediados.

Los resultados son muy interesantes pues muestran un intenso ciclo diurno desfasado para las diferentes regiones. Para el mes de julio, sobre la isóbata de 30m, es notoria la condición de surgencia en la WFS y en la plataforma MAFLA, desde alrededor de las 8 hrs GMT hasta las 20 hrs GMT, mientras que en LATEX el inicio de la condición de surgencia es alrededor de las 14 hrs GMT y su finalización a las 24 hrs GMT. En TAVE ocurre con un horario similar al de la WFS. Esto muestra la influencia de la brisa de tierra (viento de tierra hacia el mar). En la zona del BC no se observa una variación diurna tan importante como en las otras regiones mencionadas, pues predomina la condición de surgencia durante el ciclo diurno. Durante septiembre los patrones son similares pero la variabilidad diurna de la componente a través de la plataforma de las corrientes tienen considerablemente menor amplitud (Figura IV.18). La señal diurna se va debilitando a lo largo del otoño, disipándose en algunas regiones como en LATEX (ver Apéndice I). Esta condición se mantiene hasta marzo, siendo en abril cuando se observa la mayor amplitud de la señal diurna. La condición de surgencia descrita arriba se alterna con una condición de hundimiento en la horas complementarias a las de surgencia. Hay una asimetría en la intensidad de la condición de surgencia, siendo mayor en WFS y MAFLA y la de hundimiento siendo más intensa en LATEX. En TAVE es ligeramente más intensa la condición de hundimiento.

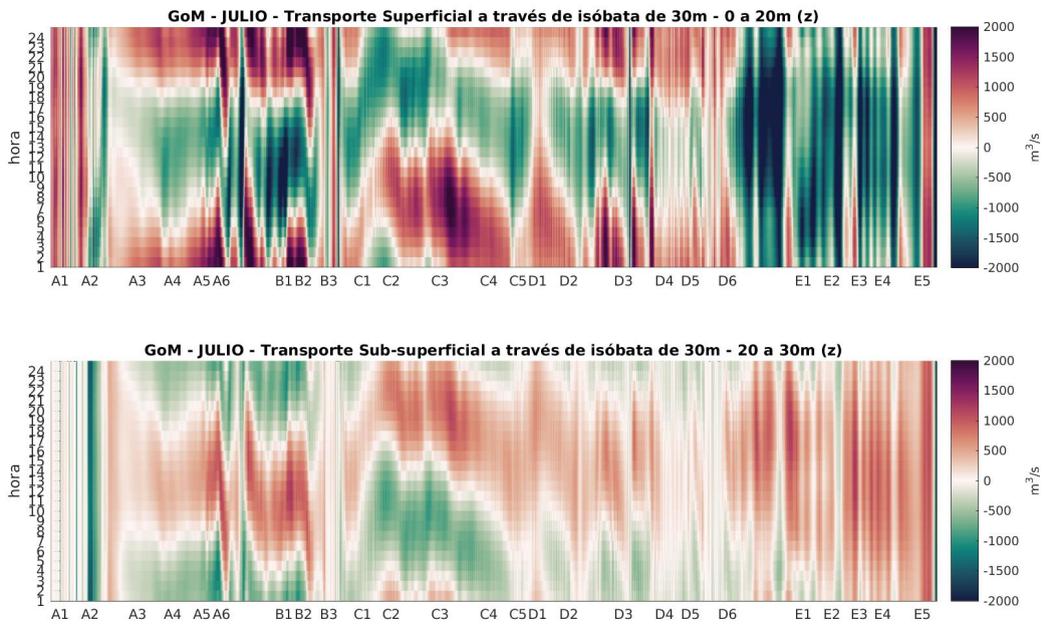


Figura IV.17: Diagramas Hovmuller del promedio horario (2000-2013) para el mes de Julio del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y el transporte costa afuera verde-azul-morado.

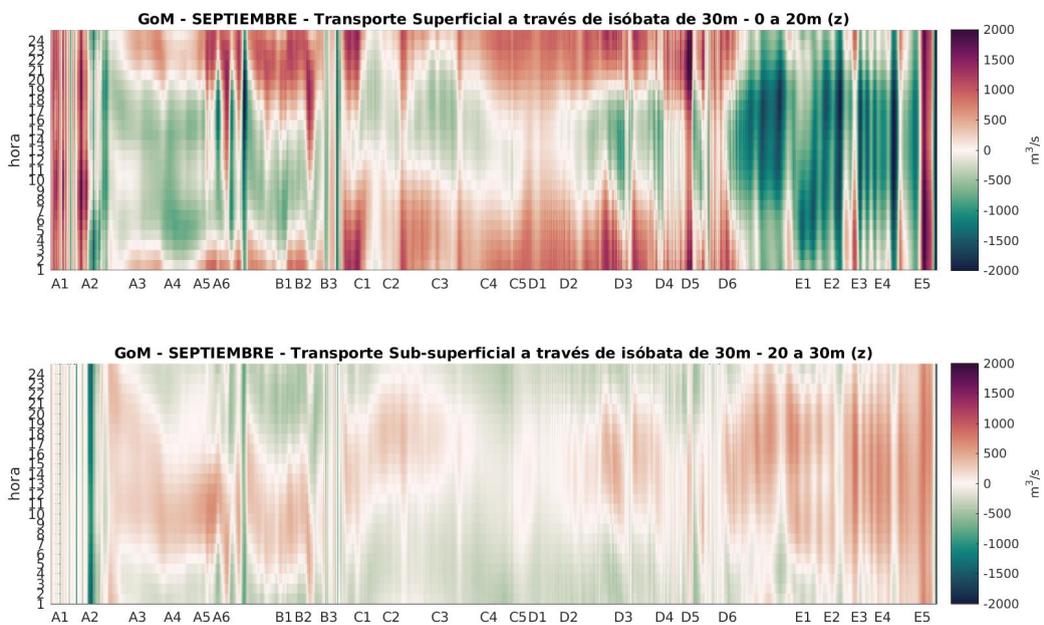


Figura IV.18: Diagrama Hovmuller del promedio horario (2000-2013) para el mes de Septiembre del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM. En amarillo y rojo el transporte costa adentro y transporte costa afuera verde-azul-morado.

La condición descrita en el párrafo anterior es similar sobre la isóbata de 20 m pero en general con

menor intensidad. Sobre la isóbata de 50 m el transporte a través de la superficie y subsuperficie son en el mismo sentido al este de Yucatán, en este caso costa adentro, a diferencia de la plataforma interna donde se aprecia una surgencia muy marcada. La señal diurna presenta cambios importantes con relación a los patrones observados sobre la isóbata de 30m, pero igualmente, encontramos direcciones opuestas del transporte costa adentro/afuera con mayor intensidad entre abril y septiembre. La señal diurna en la isóbata de 200m es perceptible en primavera y verano.

A diferencia de las plataformas internas donde las direcciones del transporte en superficie y subsuperficie proporcionan condiciones de surgencia y hundimiento; el transporte en la isóbata de 200 m muestra una notoria entrada o salida de agua en toda la columna de agua analizada. Las zonas con transporte costa afuera más representativas son el delta del Río Bravo (D1), en la Bahía de Campeche (D6-E1) y al oeste y norte del BC (E1-E4). Mientras tanto, el transporte costa adentro aparece en las zonas que cercanas a la CL de la WFS y BC, en LATEX y al norte de TAVE. La surgencia en esta plataforma externa se puede ver en verano en la WFS, TAVE y el BC.

IV.3. Temperatura

A partir de los promedios multianuales para cada mes de la temperatura, se realizan diagramas Hovmoller de las secciones superficial y subsuperficial interpoladas en las plataformas interna, intermedia y externa del GoM (Figura IV.19 a Figura IV.22).

Las salidas diarias de temperatura del modelo de los años 1992 al 2012 sobre las isóbatas de 20 (Figura IV.19) y 30m (Figura IV.20) muestran que de diciembre a abril las temperaturas son más bajas que en verano, especialmente en el norte del GoM en las plataformas de LATEX, MAFLA y WFS. Las plataformas de TAVE y BC cuentan con temperaturas más cálidas que al norte del GoM en invierno, siendo el BC la región con la temperatura más alta en esta temporada. La temperatura comienza a elevarse a partir de abril, un mes antes que en el norte del GoM siendo cálido en verano y mediados de otoño, donde se presenta un período de transición en el mes de noviembre.

En los meses de verano las temperaturas son cálidas, pero se presentan temperaturas bajas en la superficie por efecto de la surgencia. De mayo a julio ocurren bajas temperaturas superficiales en MAFLA (B2), entre LATEX y TAVE (C5-D1), en la plataforma TAVE (D3) y el BC (E1-E5). En la sección subsuperficial la temperatura asciende un mes después que en superficie, en MAFLA

(B1-B2), LATEX (C4-C5) y TAVE (D1-D5) donde la temperatura es más baja en los meses de verano. En el borde de BC (E5), cercano al Cabo Catoche, se observa que hay una temperatura baja todo el año que puede deberse al forzamiento directo creado por la Corriente de Yucatán (Figura IV.19 y Figura 20).

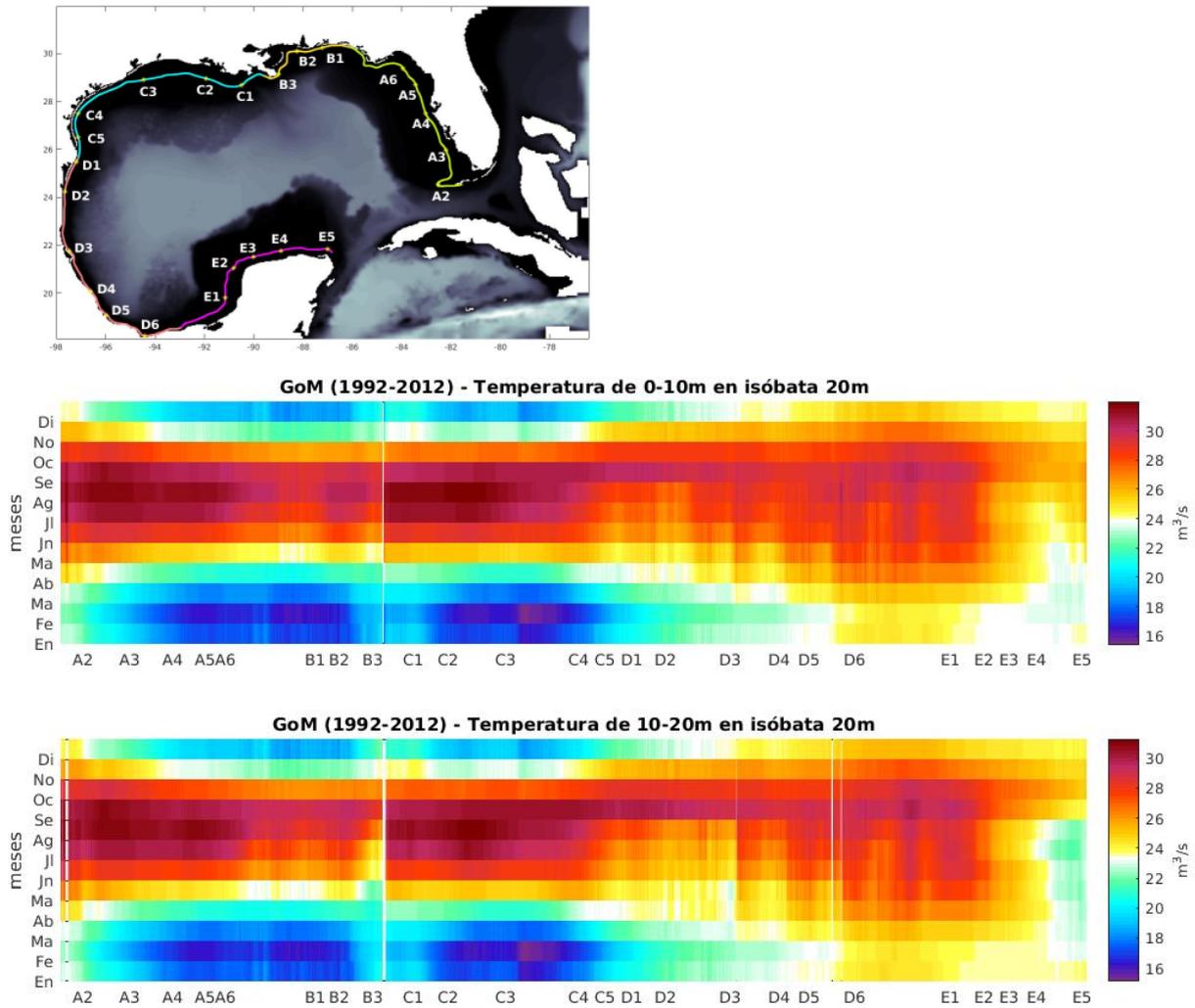


Figura IV.19: Temperatura promedio sobre la isóbata de 20m del GoM (1992-2012). Sección superficial (0 a 10m) y de fondo (10 a 20m).

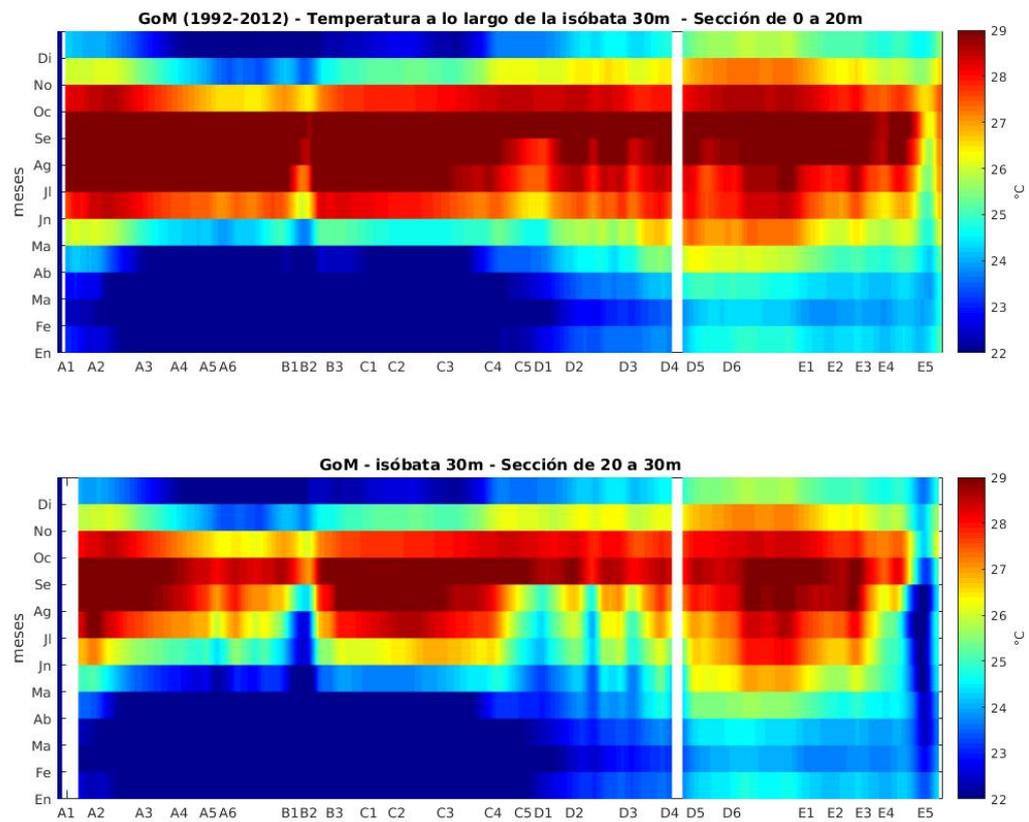


Figura IV.20: Temperatura promedio sobre la isóbata de 30m del GoM (1992-2012). Sección superficial (0 a 20m) y de fondo (20 a 30m).

Sobre la isóbata de 50m (Figura IV.21), la zonas en verano con temperaturas frías se asemejan a las mostradas en la isóbata de 30m del GoM (Figura IV.20). En la región de MAFLA la temperatura se mantiene fría hasta julio, un mes después que en la región, siendo aparente una surgencia al igual que en la frontera de LATEX y todo TAVE, que distan de la temperatura cálida aparente en el verano. En la sección profunda sobre la isóbata de 50m se aprecian temperaturas bajas hasta el mes de agosto, siendo más cálidas en octubre y noviembre en LATEX y al oeste de BC.

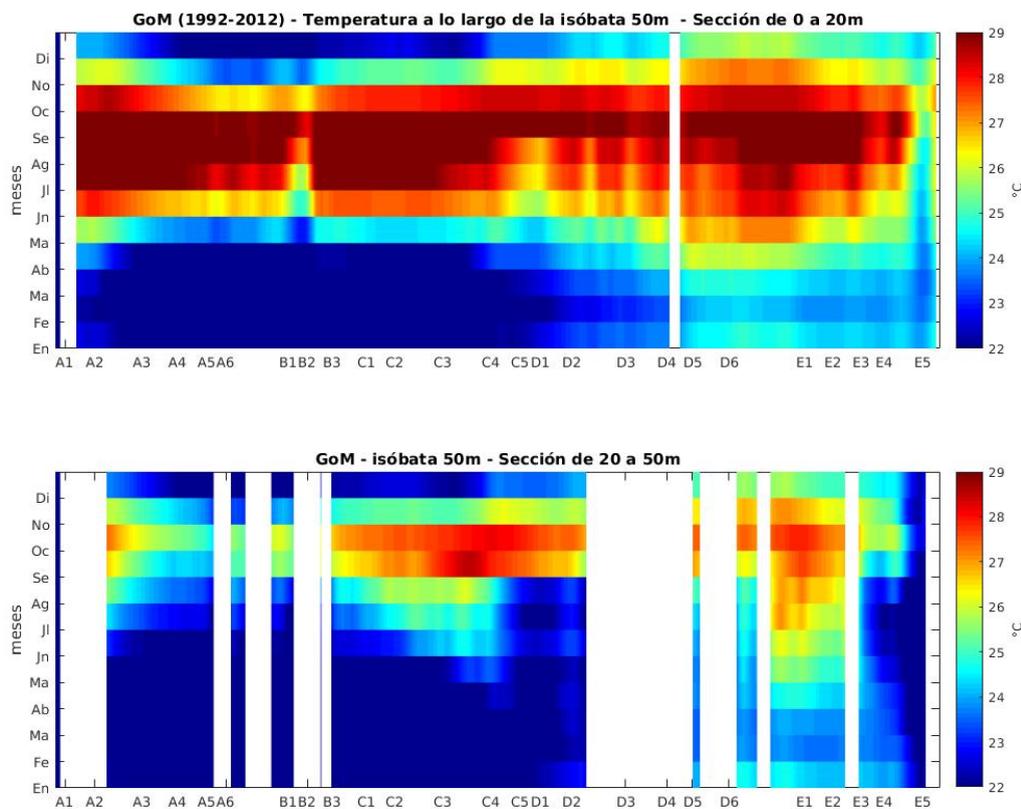


Figura IV.21: Temperatura promedio sobre la isóbata de 50m del GoM (1992-2012). Sección superficial (0 a 20m) y de fondo (20 a 50m).

En el límite externo de la plataforma que interactúa con el océano profundo, sobre la isóbata de 200m (Figura IV.22), las temperaturas superficiales frías (cálidas) a lo largo de los meses de invierno (verano). En la sección de fondo las temperaturas cálidas aparecen en julio, un mes después que en superficie, siendo octubre el mes con temperatura más homogénea en toda la plataforma del GoM con temperatura cálida. Las bajas temperaturas en la sección de fondo se presentan de diciembre a junio, extendiéndose en algunas zonas como el Big Bend (A5), al noroeste de la WFS (A6), en el Cañón de Soto (A6-B1), en todo MAFLA (B1-B3) y al este del

Río Misisipi, hasta el mes de agosto, en el norte del GoM. En TAVE coincide el mismo periodo de bajas temperaturas (D2-D6) hasta agosto. El borde este de BC se mantiene con temperaturas bajas hasta septiembre.

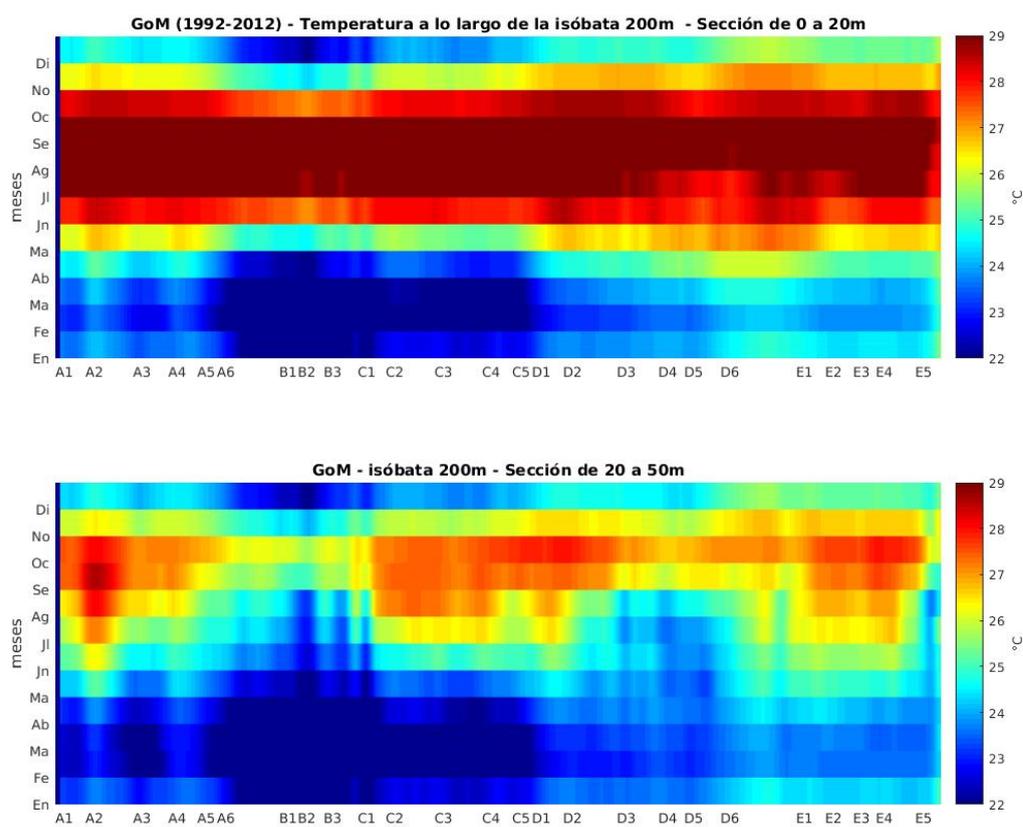


Figura IV.22: Temperatura promedio sobre la isóbata de 200m del GoM (1992-2012). Sección superficial (0 a 20m) y de fondo (20 a 50m).

Capítulo V

Discusión

V.1. Discusión

Las características de la circulación en la plataforma continental varían en diferentes escalas de tiempo: interanual, estacional, sinóptica y diurna. La circulación también varía debido a la influencia de los remolinos de mesoescala. Es sabido que sus principales forzantes son el esfuerzo del viento que genera corrientes a lo largo de la costa y que varían estacionalmente según la dirección de los vientos (Boicourt, 1998; Oey, 1995; Zavala-Hidalgo, 2003; Weisberg, 2005; Salmerón-García, 2011). Por otra parte, la fisiografía del golfo tiene una gran influencia en la circulación en la plataforma. En las plataformas más anchas, como las plataformas de LATEX, WFS y el BC, la circulación de la plataforma interna puede variar del comportamiento de la plataforma externa y sobre el talud. La plataforma de TAVE y en particular frente al Cañón de Soto son zonas angostas por lo que interactúan con el forzamiento del océano profundo.

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos:

1. Sobre las plataformas predomina una circulación con dirección horaria a lo largo de toda la plataforma continental del GoM.
2. Existe una inversión estacional en algunas zonas de la plataforma del GoM a circulación antihoraria de acuerdo con lo siguiente:
 - Plataforma interna (20 y 30m): LATEX (septiembre-junio) y TAVE (septiembre-marzo).

- Plataforma intermedia (50m): WFS y MAFLA (Mayo-junio), LATEX (agosto-septiembre), TAVE y BC (septiembre y febrero).
- Plataforma externa (200m): WFS (otoño), al Este del Río Misisipi (octubre a abril), LATEX (verano), Noreste del BC (todo el año).

3. Condición predominante de hundimiento:

- Plataforma interna (20 y 30m): WFS (primavera y verano), Cañón de Soto, TAVE y Bahía de Campeche (la mayor parte del año).
- Plataforma intermedia (50m): WFS (primavera y verano), Cañón de Soto, TAVE.
- Plataforma externa (200m): MAFLA (primavera y verano), Veracruz (la mayor parte del año), Oeste de BC (marzo a agosto).

4. Condición predominante de surgencia:

- Plataforma interna (20 y 30m): WFS (otoño), MAFLA (octubre a abril), LATEX (verano), BC (todo el año).
- Plataforma externa (200m): Bahía de Campeche (abril y verano).
- Impacto observable en la temperatura superficial: WFS y TAVE (verano).

5. Transporte costa afuera tiene mayor presencia en la plataforma externa

- Al noroeste de Dry Tortugas, en la WFS (la mayor parte del año).
- En la región de confluencia que se genera entre las plataformas LATEX y TAVE, cercana al Río Bravo (la mayor parte del año).
- Al Noroeste del BC (todo el año) y al oeste del Cabo Catoche (todo el año).

6. Transporte costa adentro tiene mayor presencia en la plataforma externa

- Límites del GoM en la Bahía de Florida y en Cabo Catoche (todo el año), en la plataforma externa de la WFS A3-A4 (Todo el año), en la plataforma externa al este del Río Misisipi (septiembre-mayo), en la plataforma externa de TAVE (la mayor parte del año) y al norte del BC (febrero a septiembre)

V.1.1. Cambios en la circulación a lo largo de la plataforma continental

Los resultados nos muestran una estacionalidad en la circulación sobre las plataformas del Golfo de México siendo predominantemente en sentido horario. Al calcular la circulación promedio mensual durante el mes de julio predomina en todo el golfo y en las secciones interna y externa de la plataforma la circulación horaria (Figura V.1). En septiembre se presentan, tanto en la plataforma interna como externa, inversiones en el sentido de la corriente (Figura V.2). En la plataforma interna ocurren desde el Río Misisipi hasta la Bahía de Campeche (Isóbata 20 y 30m). En la plataforma externa se observa el cambio en el sentido de la corriente desde la Laguna de Tamiahua hasta Cabo Catoche en el BC. La Bahía de Campeche es una zona cuya circulación antihoraria ocurre en la plataforma interna y externa. La circulación varía en forma consistente con la dirección de la componente del viento a lo largo de la costa, siendo predominantemente con dirección horaria en primavera-verano y cambiando en el oeste y sur del golfo en el mes de septiembre. Una diferencia importante que no ha sido reportada con anterioridad es la circulación antihoraria en la plataforma externa del oeste del Banco de Campeche y en el talud adyacente (Figuras V.1 y V.2). Otra característica importante de la circulación durante Otoño es que aunque la circulación en la plataforma interna, frente a Tamaulipas y en LATEX, es antihoraria, en la plataforma externa se mantiene la circulación horaria, lo cual explica las diferencias reportadas para la circulación en TAVE entre Zavala-Hidalgo et al. (2003) y Dubranna et al. (2011), quienes reportaron circulación diferente para esta zona aunque el primero para la plataforma interna y el segundo con observaciones de corrientímetros en la plataforma externa.

V.1.2. WFS

La circulación a lo largo de la plataforma es horaria la mayor parte del año en toda la plataforma, interna y externa. Podemos observar regiones con circulación antihoraria pequeñas regiones sobre la isóbata de 30m, cerca del Big Bend y sobre la isóbata de 50m, al sur de Tampa (Figura V.2). Por otra parte, los resultados del transporte a través de la WFS nos indican que la circulación en la plataforma interna, está desacoplada de la circulación de la plataforma externa dado que frecuentemente tienen una dirección distinta como lo mencionan Liu y Weisberg (2005, 2012).

En la plataforma interna predomina un flujo costa adentro todo el año mientras que en la intermedia hay hundimiento de febrero a septiembre. Al norte de Dry Tortugas se aprecia surgencia sobre la isóbata de 30 m y alcanza la de 50 m y un flujo costa afuera en la plataforma externa, pero con menos cizalla vertical (Figs. IV.2, IV.3 y IV.4). Sin embargo, tanto los resultados de

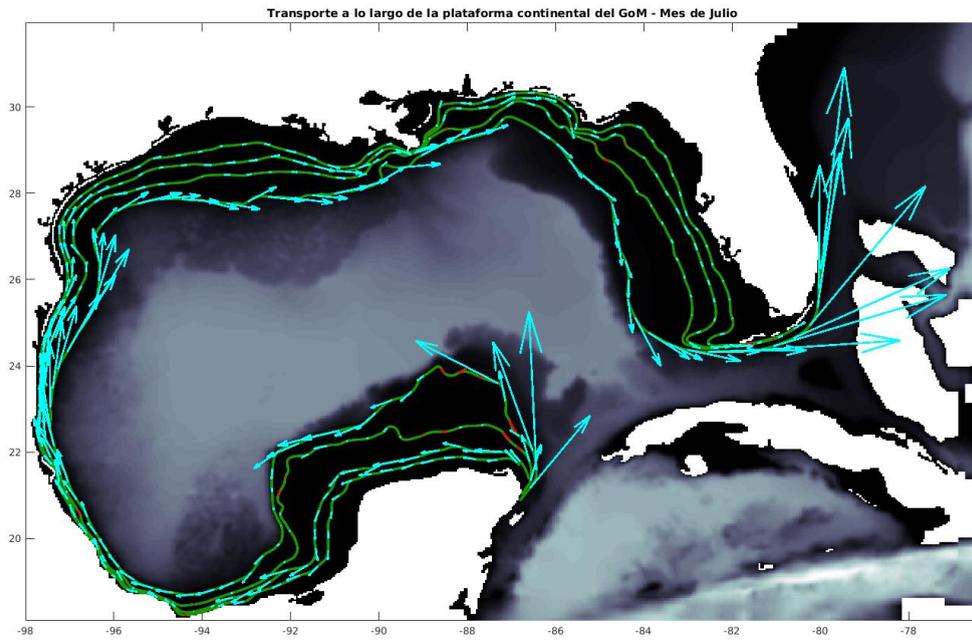


Figura V.1: Transporte promedio a lo largo de las plataformas interna, intermedia y externa del GoM para el mes de Julio. En rojo circulación antihoraria y en azul cielo circulación horaria.

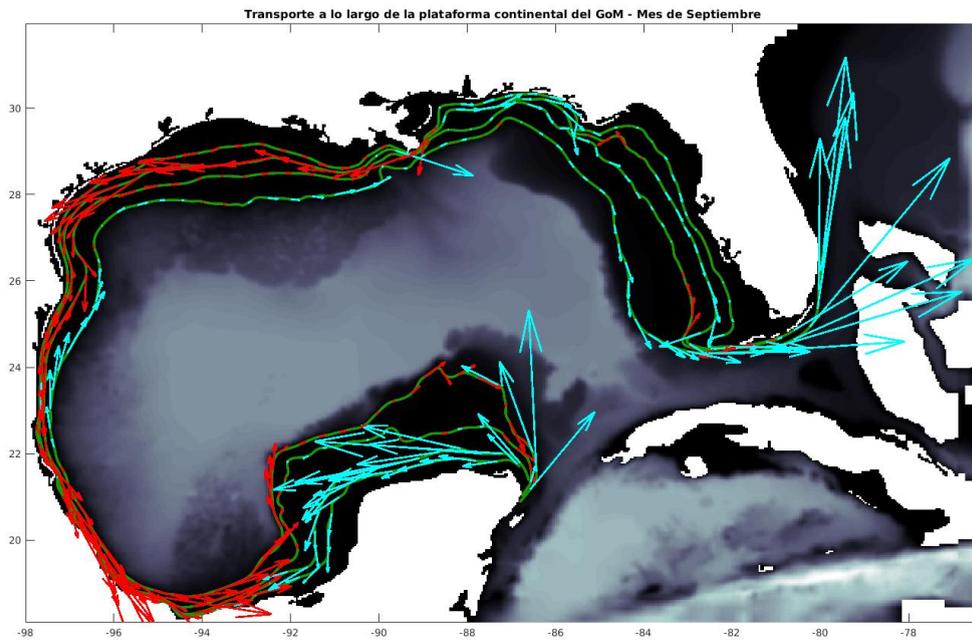


Figura V.2: Transporte promedio a lo largo de las plataformas interna, intermedia y externa del GoM para el mes de Septiembre. En rojo circulación antihoraria y en azul cielo circulación horaria.

temperatura y el esfuerzo de viento, nos indican condiciones suficientes para poder decir que hay una surgencia en la plataforma. Al observar los resultados horarios mensuales del promedio de

años (2000-2013), podemos ver que hay un indicador de surgencia en los meses de verano durante el día.

V.1.3. MAFLA

El Cañón De Soto es un área con una plataforma estrecha y con una pendiente relativamente grande que potencialmente permite una mayor interacción de la plataforma externa con el golfo profundo (B1) donde convergen las isóbatas de la plataforma que se extienden casi 90° sobre la región del Big Bend (A5). En la plataforma, el fenómeno de hundimiento se presenta en verano y a principios del otoño (Figura IV.10), lo cual está acorde con los resultados de la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa (Figura IV.8), cuya dirección nos indica un acumulamiento de agua en superficie hacia la costa por transporte de Ekman, y de acuerdo con lo reportado por Weisberg (2005). En el noroeste del Golfo, durante el verano, el viento tiene una componente hacia el norte, debido a la influencia del sistema de alta presión que ejerce el Atlántico Norte sobre la región noreste del golfo. Este patrón de viento es reforzado por la alta temperatura sobre el continente conduciendo un efecto monzónico, como lo reporta Zavala-Hidalgo, et al. (2014), haciendo que la circulación en la MAFLA (puntos B2 y B3) tenga una circulación horaria de junio a agosto (Figura IV.1 y Figura IV.2) en la plataforma interna y antihoraria en la plataforma externa (Figura IV.4). Dinnel y Wiseman (1986) encontraron picos del volumen de baja salinidad en MAFLA durante el verano y lo asociaron al transporte hacia el Este de aguas del Río Misisipi.

V.1.4. LATEX

Zavala-Hidalgo et al. (2014) mencionan una circulación ciclónica en la plataforma interna de LATEX con un fuerte jet sobre la plataforma interna. Sobre la plataforma externa ocurre una corriente hacia el noreste más débil y amplia. También se ha reportado que durante julio y agosto la circulación en la plataforma interna cambia de dirección, yendo hacia el este (Zavala-Hidalgo et al., 2014; Cochrane y Kelly, 1986; Nowlin, 2005) (Figura IV.1 y Figura IV.2). Este patrón de corrientes es similar sobre la isóbata de 30m, aunque más débil. En la isóbata de 50m las corrientes son muy débiles, excepto en Septiembre. Sobre la isóbata de los 200m la circulación es claramente en dirección horaria todo el año, aunque más intensa en junio y julio (Figura IV.4).

Podemos ver que la mayor parte del año la componente de esfuerzo del viento a lo largo de la costa es antihorario excepto por un pequeño periodo de inversión a finales de primavera y en verano

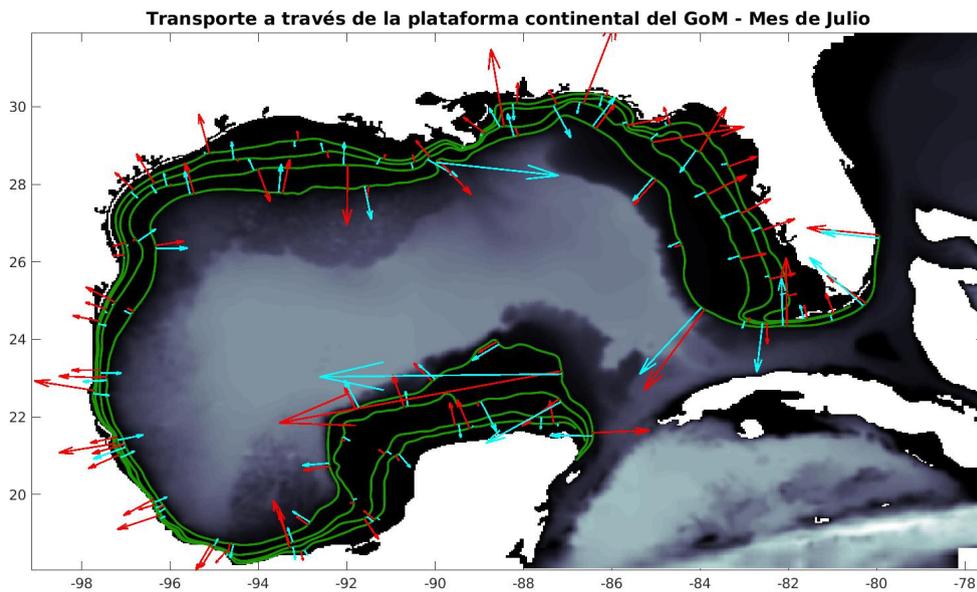


Figura V.3: Transporte promedio a través de las isóbatas 20, 30, 50 y 200m del GoM para el mes de Julio. Se representan dos flechas; en superficie (rojo) y subsuperficie (azul cielo).

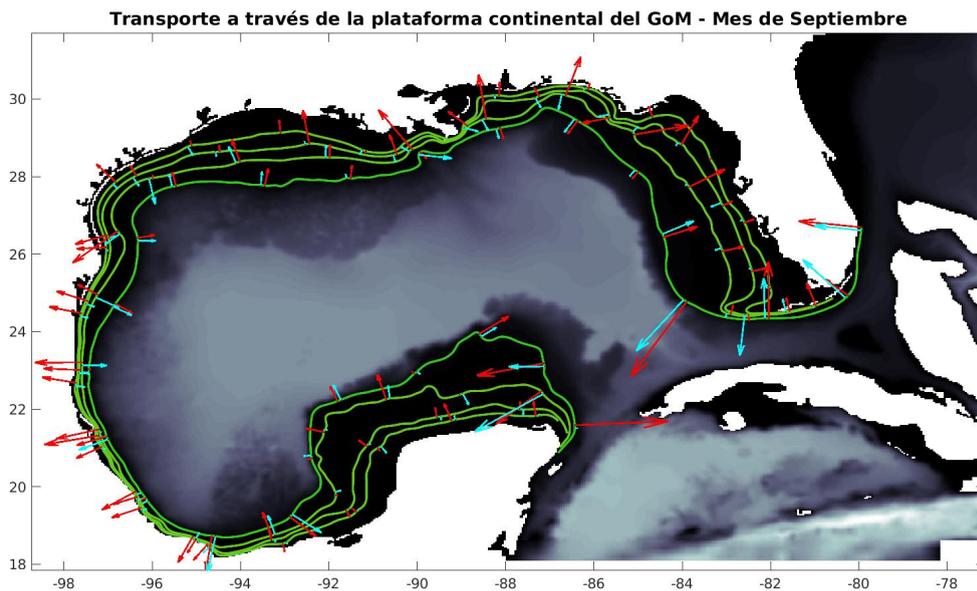


Figura V.4: Transporte promedio a través de las isóbatas 20, 30, 50 y 200m del GoM para el mes de Septiembre. Se representan dos flechas; en superficie (rojo) y subsuperficie (azul cielo).

correspondiente a la zona de transporte negativo superficial sobre todas las isóbatas que coincide con los periodos de surgencia (Figura IV.8). En verano, cuando la circulación cambia de dirección a antihoraria, se presentan surgencias en la plataforma de LATEX (Figura IV.9 y Figura IV.10). En la plataforma interna sucede un fenómeno parecido de julio a agosto cuando los vientos del norte son predominantes en un período de días (Nowlin, 1998), pero en septiembre, cuando el régimen

de circulación anticiclónica reemplaza el régimen ciclónico dominante en la plataforma (Figura IV.1 y Figura IV.2), la surgencia cambia a hundimiento, para regresar nuevamente a surgencia en octubre (Figura IV.10). En la plataforma externa de LATEX (isóbata 200m) tenemos una circulación horaria la mayor parte del año (Figura IV.4). Esto puede ser un factor por el cual la surgencia sea el fenómeno predominante cerca del talud continental.

V.1.5. TAVE

Los resultados obtenidos muestran una inversión de la circulación en la plataforma interna, predominando una circulación antihoraria de Septiembre a Diciembre, muy débil en enero y febrero y horaria de marzo a agosto (Figura IV.1 y Figura IV.2). Estos resultados son similares a los reportados por Zavala-Hidalgo et al. (2003) quienes señalaron esta inversión estacional de la circulación en la plataforma interna de TAVE. En este caso hay diferencias en enero y febrero en donde no se observa circulación antihoraria (Figura IV.2). Sobre las isóbatas de 30 (Figura IV.2) y 50m (Figura IV.3) la circulación es similar pero con mayor variabilidad, excepto durante septiembre cuando es persistente la circulación antihoraria. Y sobre la isóbata de 200m la circulación es horaria a lo largo del año (Figura IV.4). Cerca de la desembocadura del río Bravo (D1) en la plataforma interna (20 y 30m) se observa una convergencia en enero-junio (Figura IV.7).

Pocas son las mediciones hechas en la plataforma TAVE y en el oeste del BC. Boicourt (1998) sugirió la posibilidad de una corriente costa abajo que se extiende desde la plataforma de Texas hasta Tuxpan en otoño-invierno. Basado en un estudio numérico, Zavala-Hidalgo et al. (2003) encontraron un cambio estacional en la circulación de la plataforma interna (de la costa a la isóbata de 25m) a lo largo de la plataforma TAVE, siendo horaria entre mayo y agosto y antihoraria entre septiembre y marzo. Esto se confirma con el transporte costa abajo obtenido en este estudio que se extiende a lo largo de la plataforma interna de LATEX y TAVE. En la plataforma intermedia la circulación costa abajo comienza en agosto (C1) y se extiende hasta el oeste de BC (E2). En la plataforma externa la circulación es costa arriba desde LATEX hasta pasando Tamiahua (D3), donde hay una inversión de corriente a costa abajo. El borde exterior de la plataforma TAVE (isóbata 200m) está siendo constantemente influenciado por los energéticos remolinos anticiclónicos de la CL que también modifican la circulación de la plataforma (22N). De D2 a D4 ocurre un transporte costa adentro todo el año que al entrar a la plataforma intermedia e interna se transforma en hundimiento, siendo este el fenómeno predominante en TAVE todo el año.

El evento septembrino costa abajo en la plataforma interna e intermedia de TAVE (Figura IV.3 y Figura IV.4) podría relacionarse con las ondas costeras atrapadas que se generan por la intrusión

de frentes fríos (Zavala-Hidalgo et al. 2003). Dubranna et al. (2011) identificó dos eventos de norte en septiembre y dos en octubre, corroborados por el incremento del nivel del mar en Veracruz. La predominancia del hundimiento de esta región en los resultados mostrados (Figura IV.10) no coincide con la surgencia reportada en esta región (Mateos-Jasso et al., 2012; Zavala-Hidalgo et al., 2006). Sin embargo las variaciones de temperatura sí indican una disminución de ésta durante el verano (Figuras IV.19, IV.20, IV.21 y IV.22), por lo cual se realizó el análisis horario para los años 2000 al 2013.

Es conocido que las brisas en el GoM tiene una amplitud muy grande en comparación con otras regiones del planeta (Gille, 2005; Taylor-Espinoza, 2009; 2014). Los resultados de las salidas horarias (sección IV) muestran, por primera vez a escala de todo el GoM, el impacto diurno en la circulación. Es importante mencionar que la simulación atmosférica con la cual se forzó el modelo tiene una resolución horizontal de 10 km y salidas horarias por lo cual representó adecuadamente esta componente de los vientos.

V.1.6. BC

La circulación en la plataforma interna del BC es horaria a lo largo de todo el año (Figuras IV.1, IV.2 y IV.3). Sin embargo en la plataforma externa la circulación sí varía (Figura IV.4), principalmente durante el mes de septiembre cuando es antihoraria a lo largo del quiebre de la plataforma y con mucho mayor intensidad a lo largo del escarpe de Campeche. Esto no ha sido reportado con anterioridad y es una circulación que no corresponde con el forzamiento local del viento por lo que está asociada a forzamiento remoto que genera ondas y corrientes viajando a lo largo del quiebre de la plataforma y el talud continental. En la plataforma interna, principalmente durante el otoño se observa una confluencia de corrientes en el sureste de la Bahía de Campeche. Una característica de esta región es la persistente corriente del océano profundo hacia la plataforma en el este del BC y de la plataforma hacia el océano profundo en el oeste del BC, cruzando la isóbata de los 200m. Esta condición se observa también en el suroeste del BC. La surgencia es muy clara en la plataforma interna la cual puede identificarse en la figura IV.10, que muestra la diferencia de transporte en superficie y subsuperficie, mostrando que hay un flujo neto hacia afuera en superficie y costa adentro subsuperficialmente. Esto también se observa en las temperaturas, las cuales son más bajas en el este del BC, en la plataforma interna (Figura.IV.19, IV.20, IV.21 y IV.22). La señal de surgencia también se observa en los cálculos de las componentes perpendiculares a las isóbatas de los transportes (Figuras V.14, V.15 y V.16). Además de la surgencia al norte del estado de Yucatán se observa surgencia en el extremo sur del golfo (Figura IV.10).

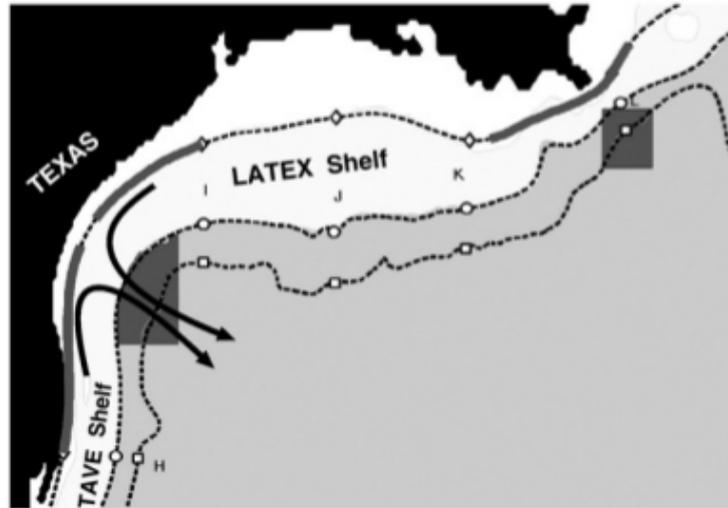


Figura V.5: Representación esquemática del transporte de masa a través de la plataforma debido a la convergencia de masa a lo largo del suroeste de LATEX (de Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

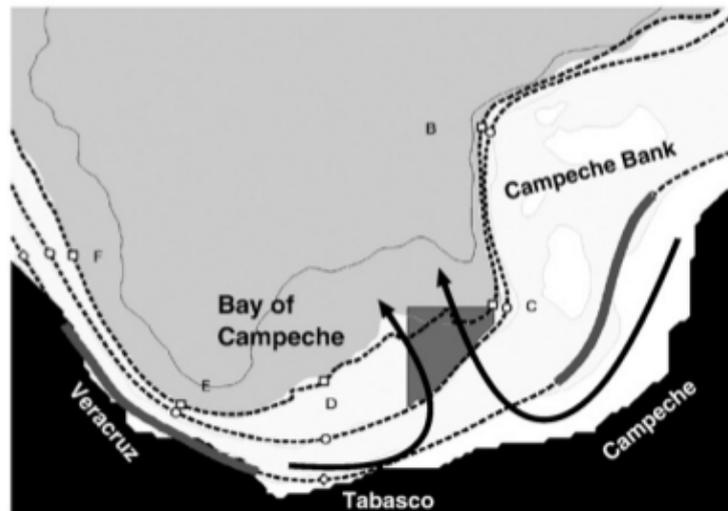


Figura V.6: Representación esquemática del transporte de masa a través de la plataforma debido a la convergencia de masas a lo largo de la Bahía de Campeche (de Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

Capítulo VI

Conclusiones

VI.1. Conclusión

Se utilizaron los datos diarios de 21 años (1992-2012) de una simulación de alta resolución con el modelo HYCOM, realizada en el Grupo Interacción Océano-Atmósfera del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. El objetivo general fue examinar la variabilidad de flujos en la plataforma continental del GoM. Se obtuvieron salidas diarias de los componentes de la velocidad y de la temperatura sobre las isóbatas de 20, 30, 50 y 200 m para realizar los análisis. En particular se calcularon el transporte a lo largo y a través de las plataformas interna, intermedia y externa del GoM y se analizaron por regiones, es decir, la WFS, MAFLA, LATEX, TAVE y el BC. El análisis se realizó con base en salidas de las 0:00 hrs, diarias, de 21 años. También se analizó la variabilidad diurna a través de las salidas horarias de los años 2000 al 2013, con el propósito de estudiar la variación diurna de la circulación.

Los resultados del transporte a lo largo de la plataforma continental del GoM indican que la circulación con dirección horaria es predominante, aunque existe una inversión estacional en algunas zonas de la plataforma del GoM a circulación antihoraria. Esta inversión se cumple en diferentes periodos de tiempo en plataforma interna, intermedia y externa: En la plataforma interna (20 y 30 m) sucede en LATEX de Septiembre a Mayo y en TAVE de Septiembre a Marzo; En la plataforma intermedia (50 m) ocurre en la WFS y MAFLA de Mayo a Junio, en LATEX de Agosto a Septiembre y en TAVE y BC de Septiembre a Febrero; mientras que en la plataforma externa (200 m) en la WFS en Otoño, al Este del Río Misisipi de Octubre a abril, en LATEX en Verano y al Noreste de BC observamos una circulación antihoraria todo el año.

Se observa que esta inversión estacional a de circulación horaria a antihoraria en la plataforma continental es característica del mes de Septiembre y ocurre en diferentes zonas de la plataforma: Las plataformas interna e intermedia tienen una inversión estacional en la plataforma de LATEX y TAVE, mientras que en la plataforma externa esta inversión septembrina sólo ocurre en la plataforma TAVE y BC. Esta circulación antihoraria en la plataforma externa del oeste del Banco de Campeche y en el talud adyacente es una diferencia importante que no ha sido reportada con anterioridad.

Los promedios mensuales de los transportes diarios a través de las isóbatas muestran que la plataforma externa del GoM presenta un transporte costa adentro/afuera con mayor frecuencia e intensidad que en las plataformas interna e intermedia. El transporte en la capa superior sobre las isóbatas de 20 y 30 m es principalmente costa adentro (subsistencia) a lo largo del año en la región norte y oeste del GoM y es costa afuera (surgencia) en el sur del GoM, en la plataforma al sur de la Bahía de Campeche y en el BC. En la WFS predomina la subsistencia durante primavera y verano, en LATEX en invierno y primavera y en TAVE y MAFLA la mayor parte del año. Condiciones de surgencia ocurren en verano en LATEX y en el BC todo el año, sobre la isóbata de 30m. Sobre la isóbata de 20m, ocurre surgencia al este del Río Misisipi (B3) la mayor parte del año y en el BC, predominantemente durante el verano.

En la plataforma intermedia (isóbata de 50m), el transporte en superficie (0 a 20m) a través de la plataforma es costa adentro al centro y norte del GoM, en el sur del golfo de enero a junio, al oeste de la Península de Yucatán y al noroeste de la misma todo el año. El transporte costa afuera se observa al sur de Texas de febrero a junio, en la Bahía de Campeche todo el año y al norte del BC, donde es predominante. Se observa surgencia durante el verano en LATEX; en MAFLA, al este del Misisipi, durante el invierno y a principios de la primavera. También ocurre surgencia al norte y oeste del BC en invierno y primavera.

En la plataforma externa el transporte costa adentro predomina en la WFS, en TAVE y al oeste del BC. Por otro lado, el transporte costa afuera aparece todo el año al sur de Texas, en la Bahía de Campeche y al Norte del BC. En la plataforma externa de LATEX, al igual que en las plataformas interna e intermedia, se observa una surgencia durante el verano. También ocurren surgencias en algunas zonas de la plataforma de TAVE, cercanas a la Bahía de Campeche, y al norte del BC, donde se presentan durante todo el año. El hundimiento disminuye su frecuencia en comparación con las plataformas internas, presentándose en MAFLA principalmente en los meses de primavera y verano, en Veracruz y algunas regiones del BC donde se observan a lo largo del año. En la plataforma WFS el transporte es costa adentro en toda la columna de agua la mayor

parte del año, al igual que al norte de TAVE, mientras que en LATEX se muestra de invierno hasta principios de primavera. En TAVE, frente a Tamaulipas, se observa transporte de agua costa afuera durante todo el año, al igual que en algunas regiones de la Bahía de Campeche y al noroeste y norte del BC.

La temperatura de la columna de agua sobre las isóbatas de 20 y 30m, es más baja de diciembre a abril que en verano, especialmente en el norte del GoM, en las plataformas de LATEX, MAFLA y WFS. Las plataformas de TAVE y el BC cuentan con temperaturas más cálidas que al norte del GoM en invierno, siendo el BC la zona con temperaturas altas en esta temporada. La temperatura comienza a elevarse a partir de abril, un mes antes que en el norte del GoM siendo mayores durante el verano y mediados de otoño, donde se presenta un período de transición en el mes de noviembre. En los meses de verano se presentan temperaturas bajas en superficie en algunas regiones debidas a surgencias; de mayo a julio en MAFLA (B2), en LATEX (C5), en la plataforma TAVE (D3) y en el BC (E1-E5). Subsuperficialmente, en MAFLA (B1-B2), LATEX (C4-C5) y TAVE (D1-D5), la temperatura es baja en los meses de verano al igual que en el borde del BC (E5), cercano a Cabo Catoche.

Resultados previos han mostrado que existe surgencia durante el verano en la plataforma TAVE pero que no se observan en los resultados anteriores nos llevaron a plantear el análisis de los datos horarios debido a que se habían analizando únicamente datos de las cero horas. Esto puede deberse a que sea un fenómeno diurno y en algunos casos de un periodo de días, en la escala sinóptica. Los resultados muestran por primera vez a escala de todo el GoM, el impacto diurno en la circulación. Al observar el transporte horario mensual a través de la plataforma continental, se encontró que tanto en superficie como subsuperficialmente hay una señal diurna muy clara donde la componente de la corriente perpendicular a las isóbatas analizadas cambia a lo largo del ciclo diurno y en ocasiones incluso cambia de signo.

Las direcciones entre superficie y subsuperficie del transporte costa adentro/afuera son opuestas la mayor parte del año, pero con mayor intensidad entre abril y agosto, correspondiendo con los meses en que la circulación en el oeste del GoM tiene dirección horaria en la plataforma interna e intermedia. Igualmente, se muestra un intenso ciclo diurno para las diferentes regiones del GoM, aunque con diferente fase. La condición de surgencia para el mes de julio, sobre la isóbata de 30m, es notoria en la WFS y MAFLA desde alrededor de las 8 hrs GMT hasta las 20 hrs GMT, mientras que en LATEX es alrededor de las 14 hrs GMT y su finalización a las 24 hrs GMT. En TAVE ocurre con un horario similar al de la WFS. Esto muestra la influencia de la brisa de tierra (viento de tierra hacia el mar). En la zona del BC no se observa una variación diurna tan

importante como en las otras regiones mencionadas, pues predomina la condición de surgencia durante el ciclo diurno. Durante septiembre, los patrones son similares pero la variabilidad diurna de la componente a través de la plataforma de las corrientes tienen considerablemente menor amplitud. La señal diurna se va debilitando a lo largo del otoño manteniéndose así hasta marzo, siendo en abril cuando se observa la señal diurna cuando tiene mayor amplitud.

Se tiene una alternancia, en las horas complementarias a los casos con condiciones de surgencia, con condiciones de hundimiento. En la intensidad de la condición de surgencia hay una asimetría, siendo mayor en WFS y MAFLA y la de hundimiento siendo más intensa en LATEX. En TAVE es ligeramente más intensa la condición de hundimiento. Esta condición es similar pero con menor intensidad sobre las isóbatas de 20 m y 50 m. La señal diurna en la isóbata de 200 m es perceptible en primavera y verano.

En el caso de la plataforma externa (isóbata de 200 m) se muestra una notoria entrada o salida de agua en los segmentos analizados (0 a 20 m y 20 a 50m) al igual que con los resultados del cálculo del transporte diario. Las zonas con transporte costa afuera más representativas son frente al delta del Río Bravo (D1), en la Bahía de Campeche (D6-E1) y al oeste y norte de BC (E1-E4). Mientras tanto, el transporte costa adentro aparece en las zonas cercanas a la CL de la WFS y BC. También hay transporte costa adentro en LATEX y al norte de TAVE. La surgencia en esta plataforma externa se puede ver en verano en WFS, TAVE y el BC.

VI.2. Trabajo futuro

Durante el desarrollo de esta tesis han surgido algunas líneas futuras que se han dejado abiertas. Algunas están directamente relacionadas con este trabajo de tesis y son el resultado de cuestiones que han ido surgiendo durante la realización de la misma. Uno de los grandes desafíos en el intercambio a través de la plataforma es cómo el comportamiento físico de un océano costero determina (o no determina) la estructura del ecosistema de la plataforma. En el presente estudio, observamos que la influencia de brisa marina en los sistemas de surgencia/hundimiento es clave en el ciclo diurno principalmente en las plataformas angostas de TAVE y LATEX. Esta periodicidad podría estar determinando la estructura de los ecosistemas y la mezcla vertical en la plataforma que podría ser analizado a diferentes escalas para observar su cambio en el tiempo.

Ciertamente, el alcance que se tuvo al emplear promedios Eulerianos de una simulación numérica de alta resolución fue el la observación de la variabilidad de flujos en las secciones superficiales

y subsuperficiales en la plataforma y el reconocimiento las zonas de mayor intercambio con el océano profundo.

Apéndice A

Promedios mensuales de transportes horarios (2000 - 2013)

En este apéndice se presentan los promedios mensuales de los transportes horarios sobre las isóbatas de 20, 30, 50 y 200m.

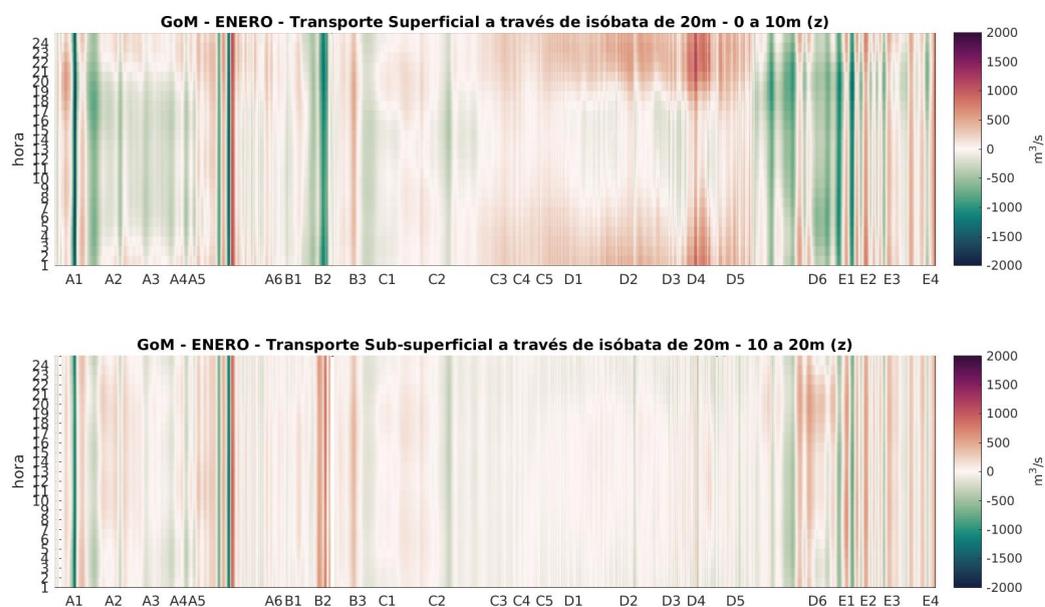


Figura A.1: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Enero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

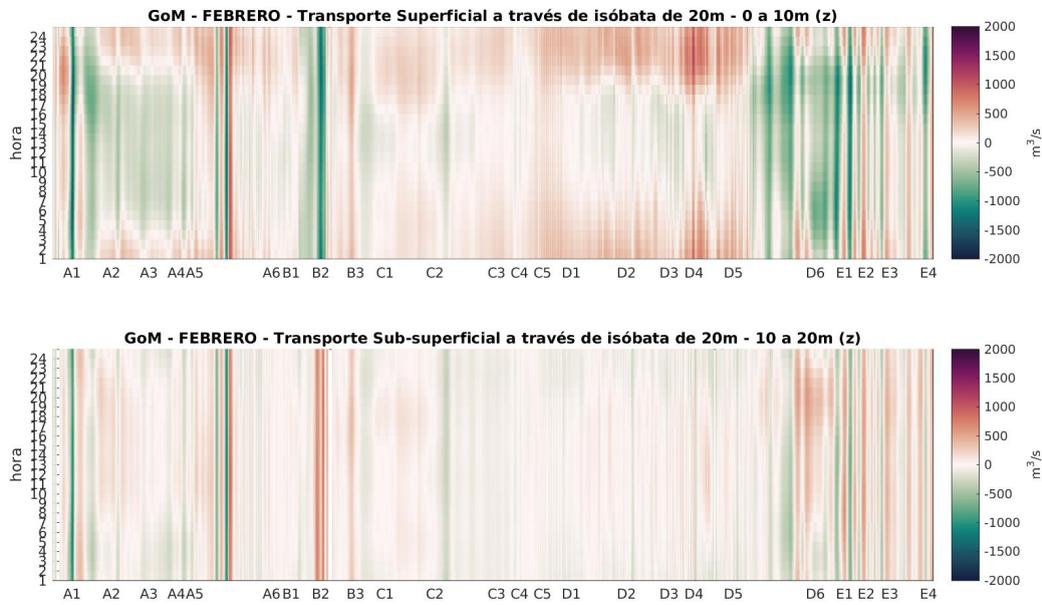


Figura A.2: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Febrero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

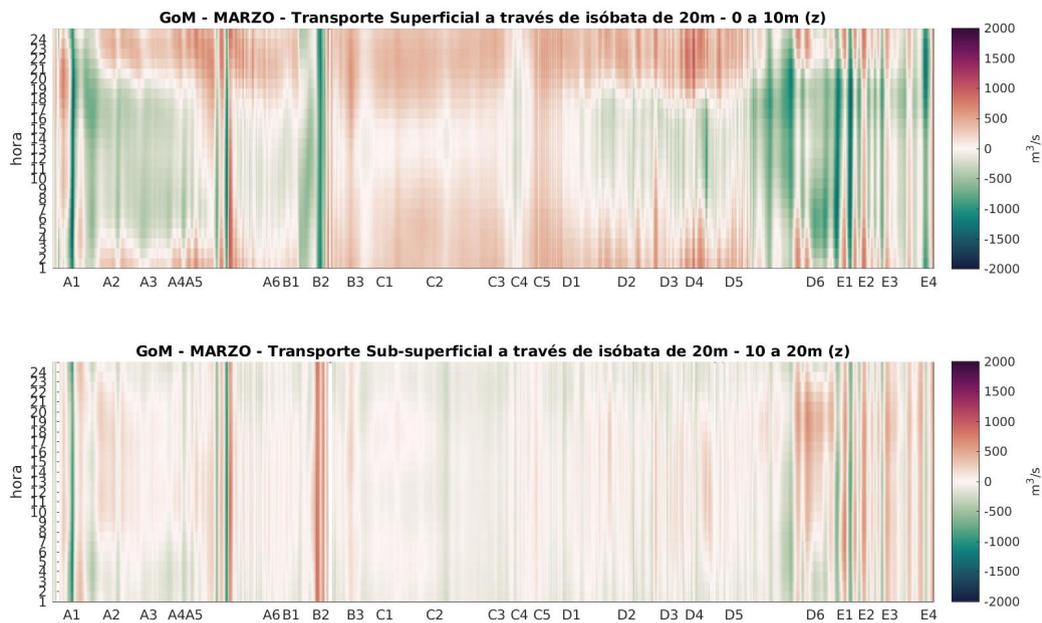


Figura A.3: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Marzo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

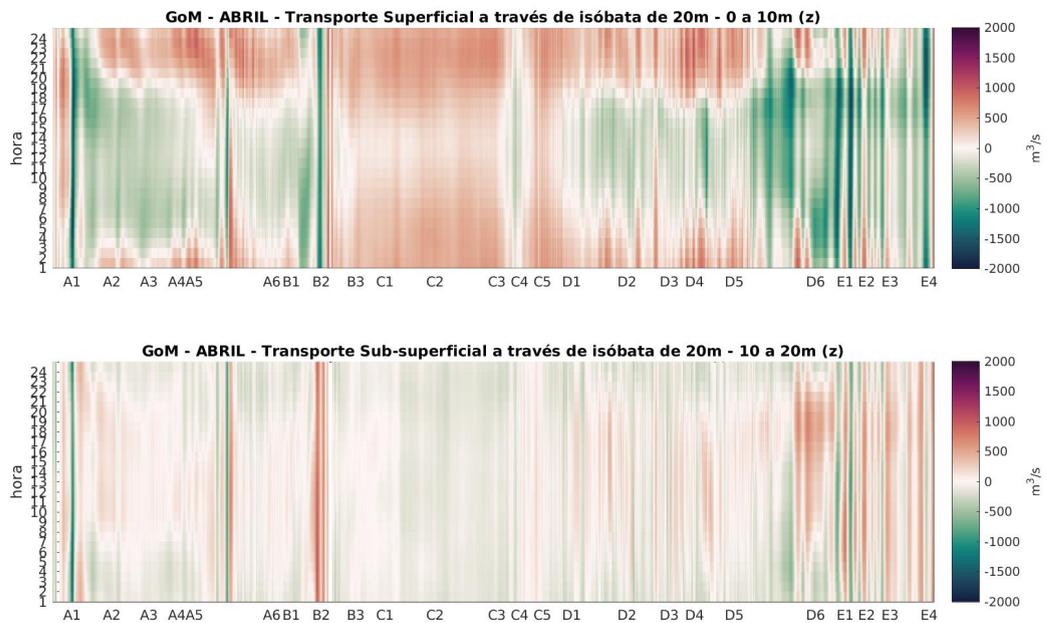


Figura A.4: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Abril. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

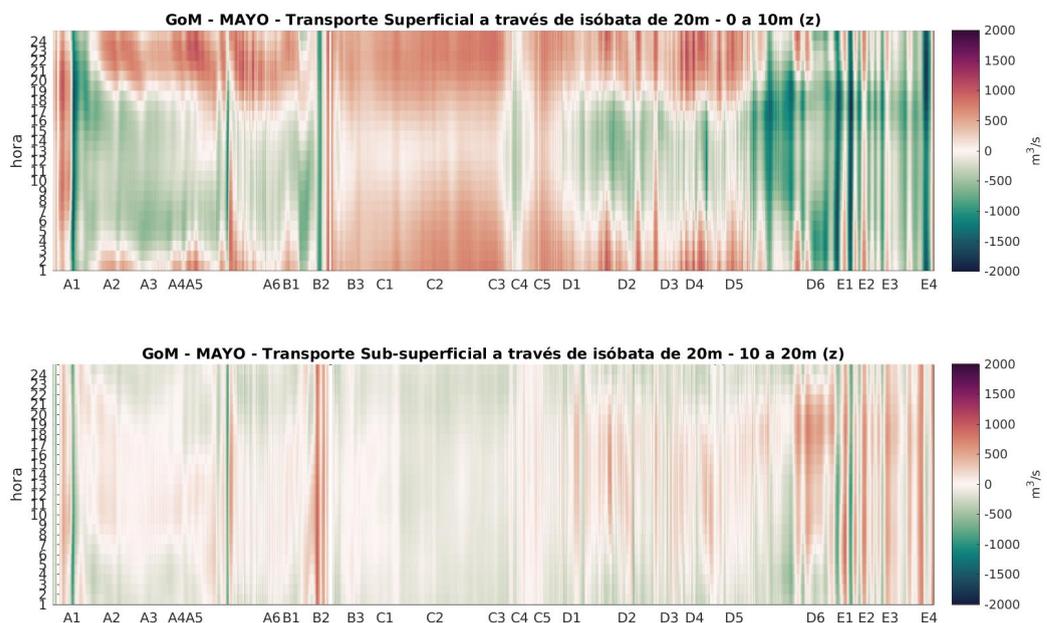


Figura A.5: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Mayo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

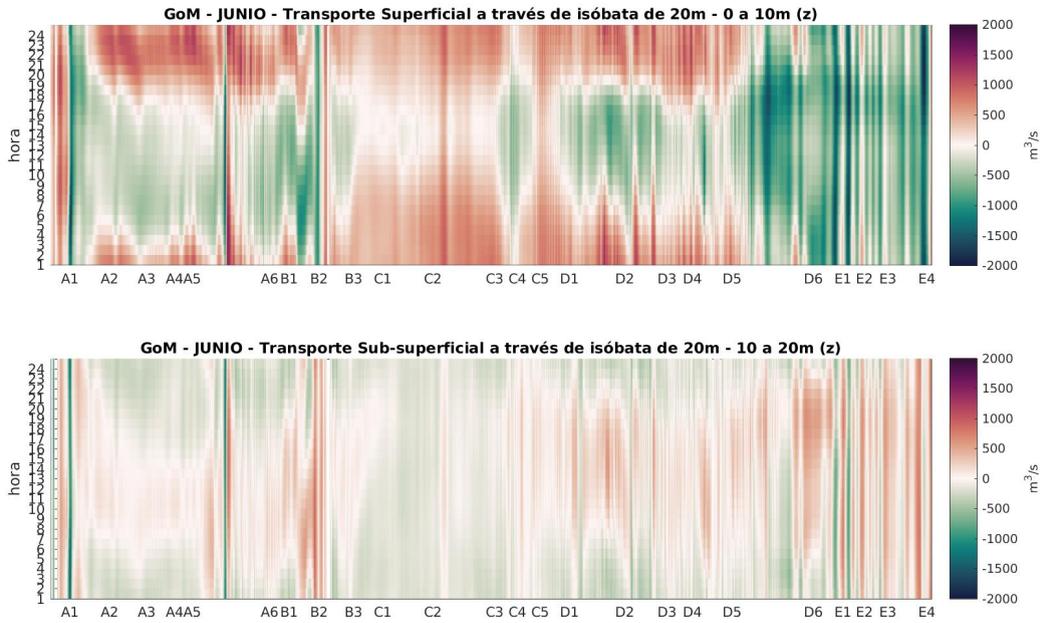


Figura A.6: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Junio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

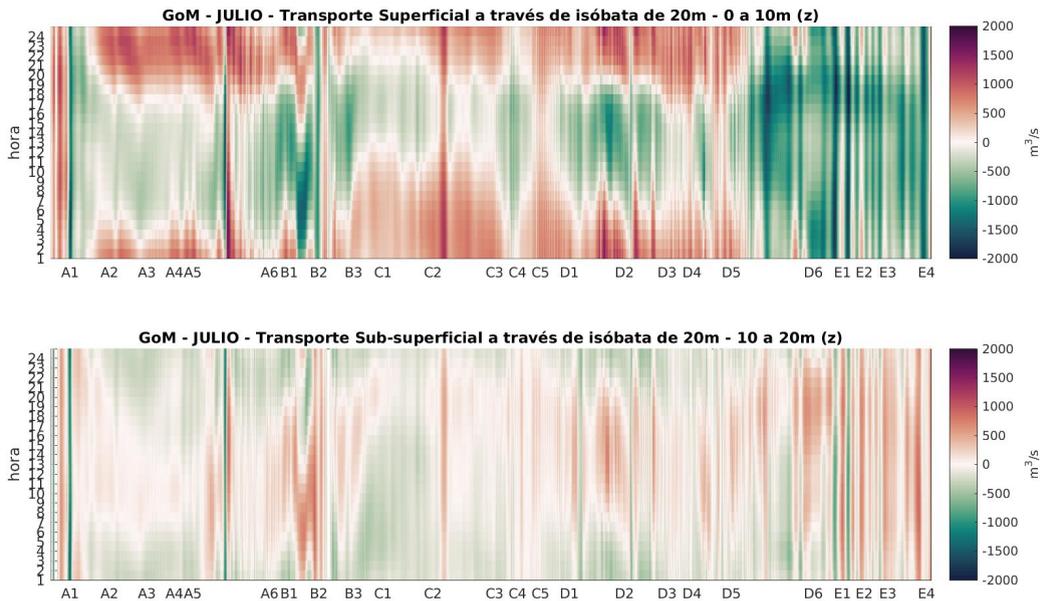


Figura A.7: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Julio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

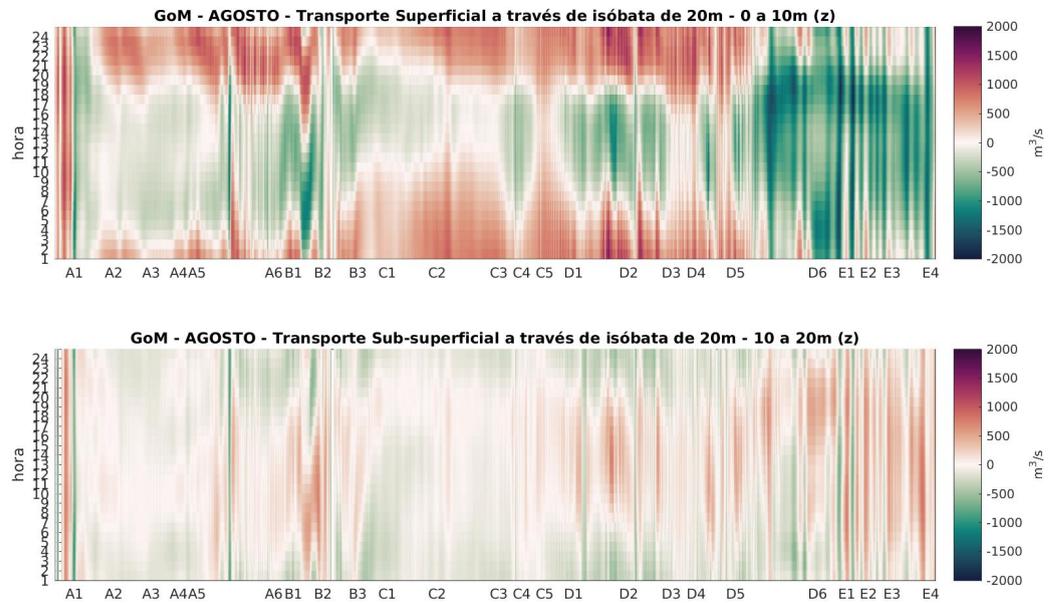


Figura A.8: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Agosto. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

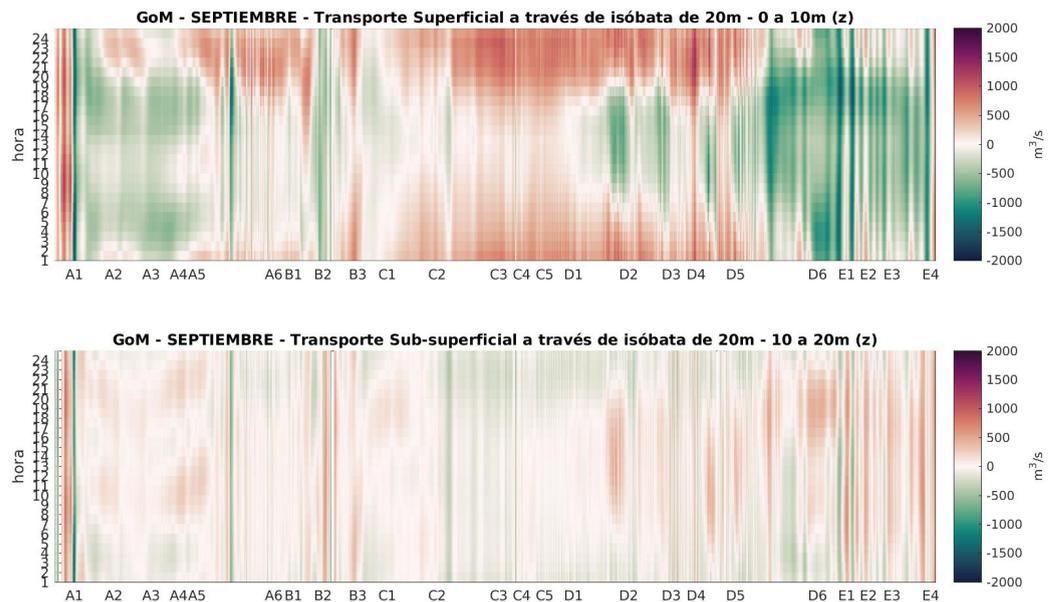


Figura A.9: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Septiembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

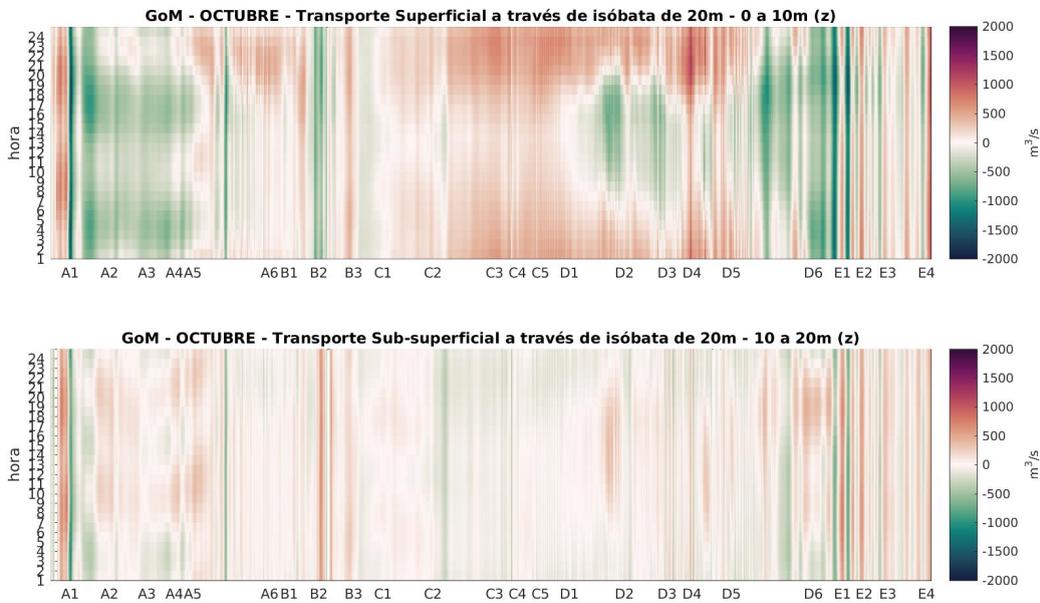


Figura A.10: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Octubre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

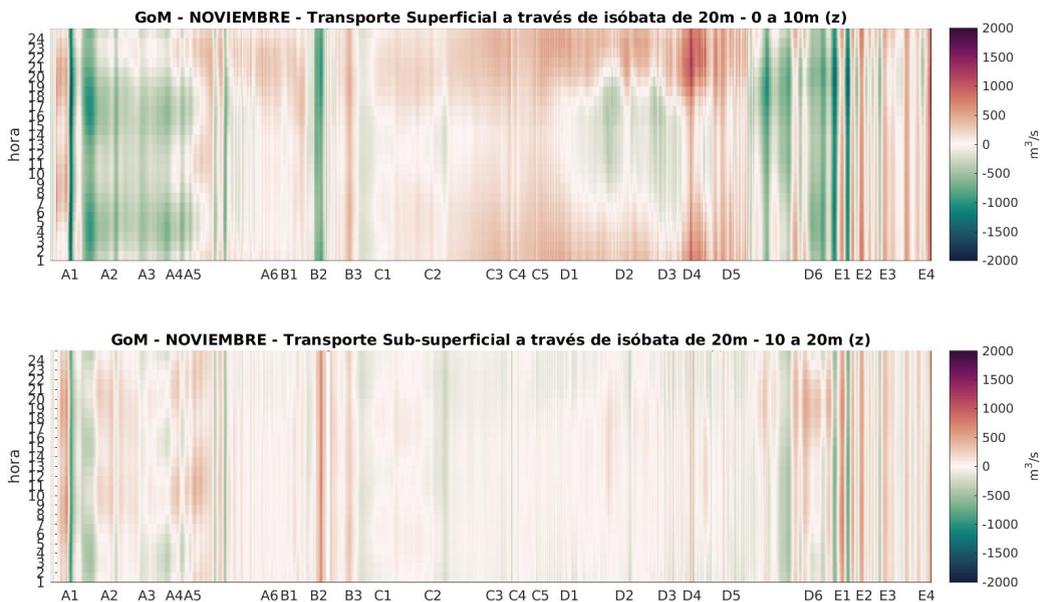


Figura A.11: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Noviembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

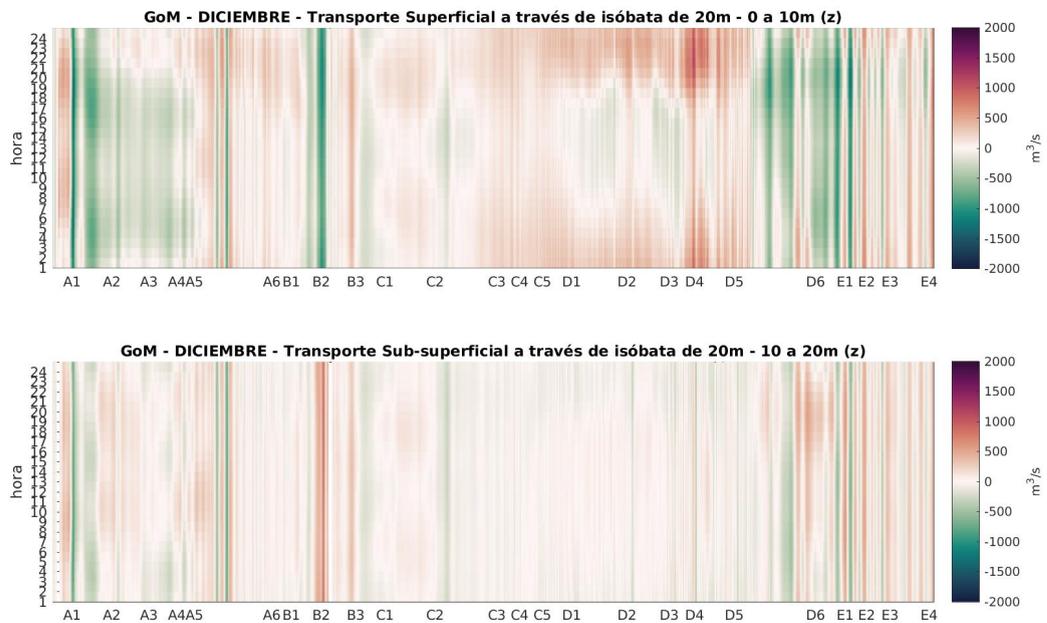


Figura A.12: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 20m del GoM (2000 - 2013) para Diciembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

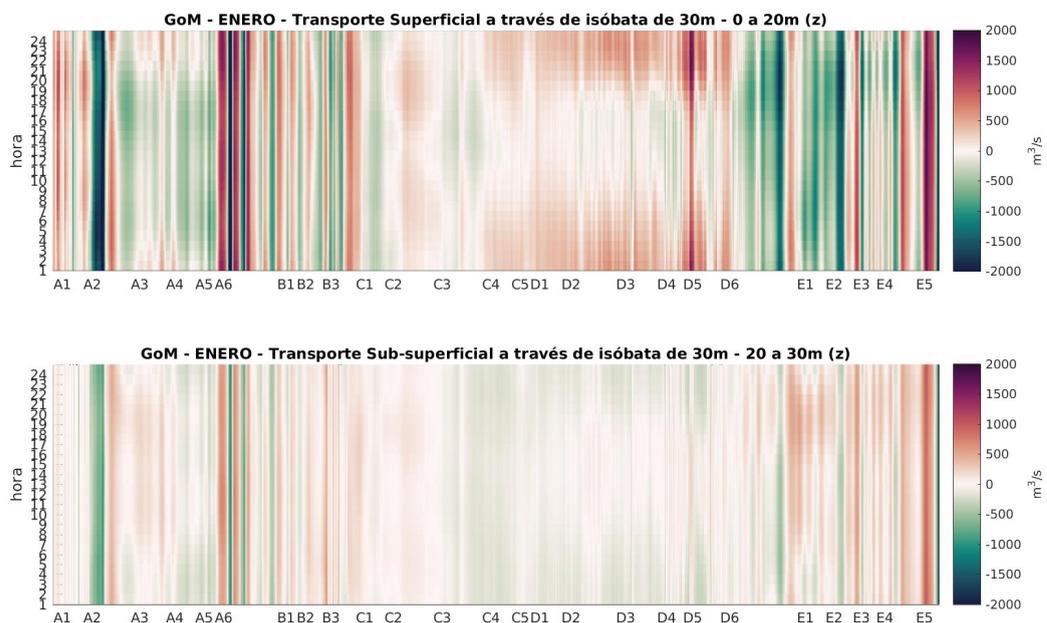


Figura A.13: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Enero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

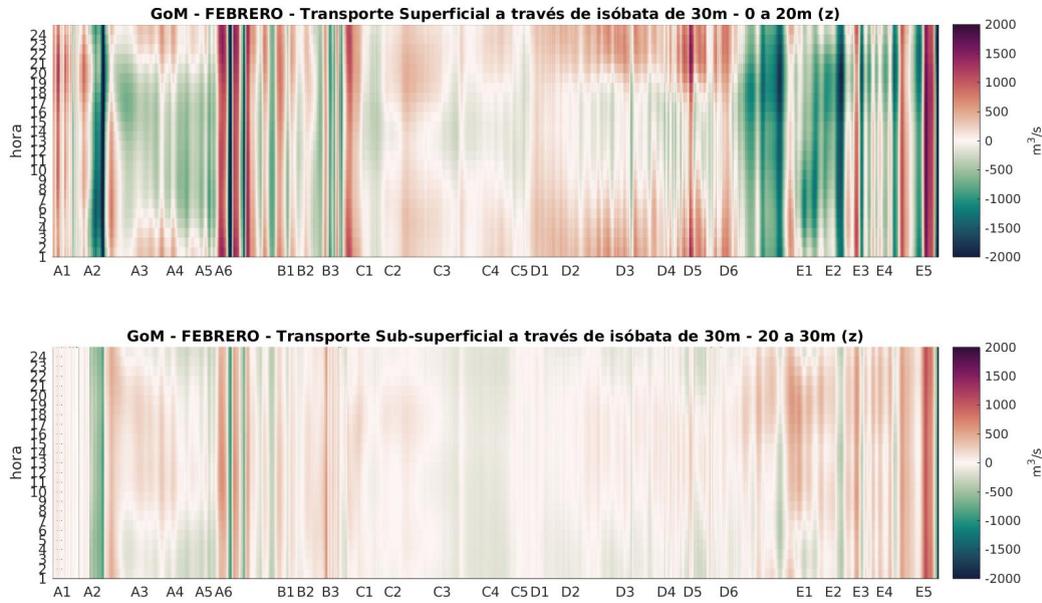


Figura A.14: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Febrero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

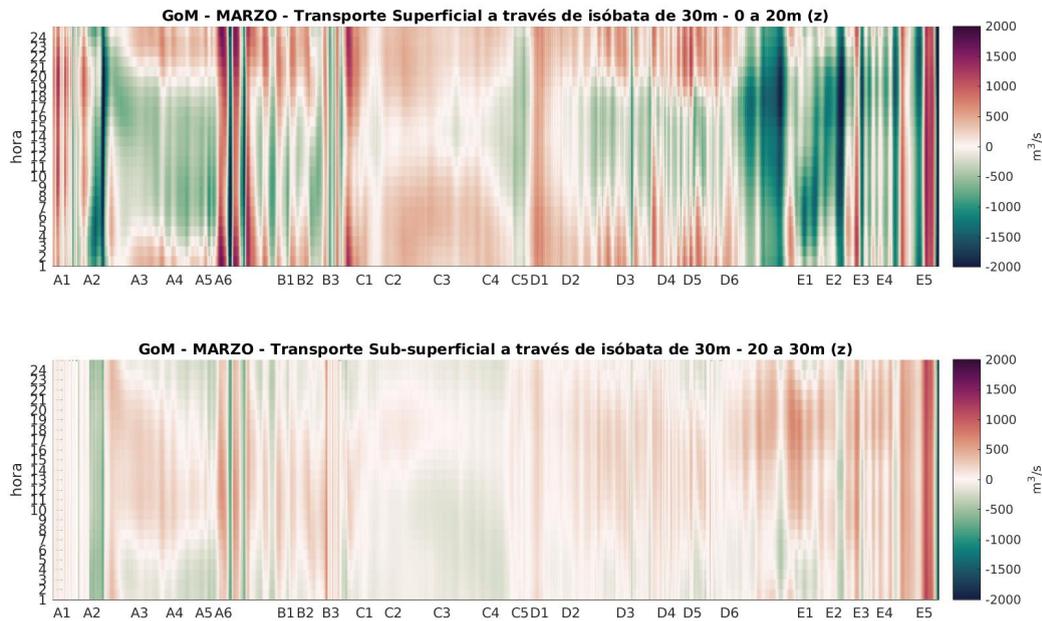


Figura A.15: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Marzo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

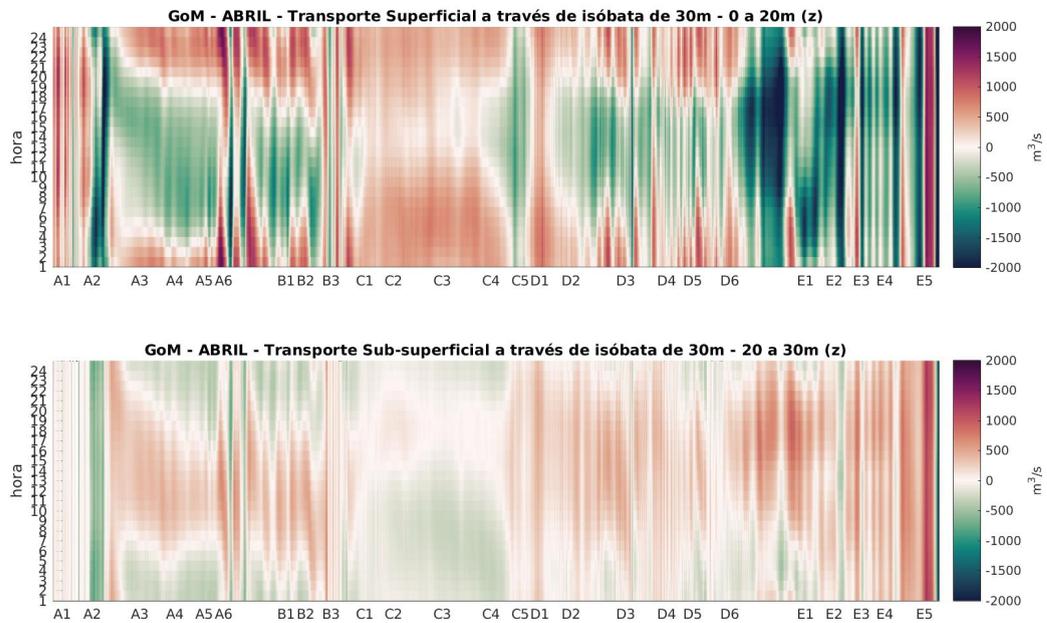


Figura A.16: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Abril. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

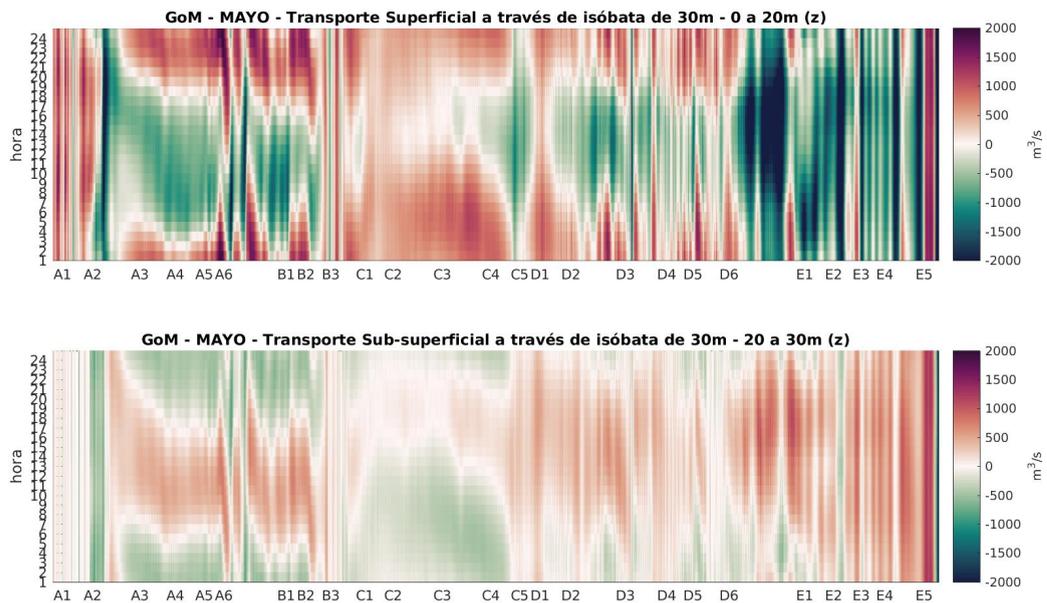


Figura A.17: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Mayo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

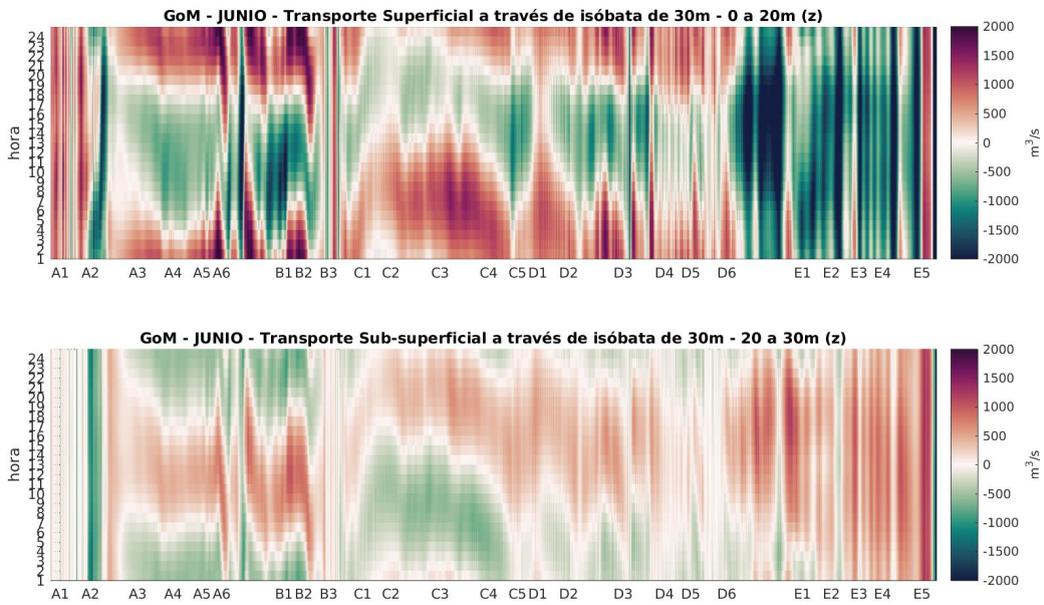


Figura A.18: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Junio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

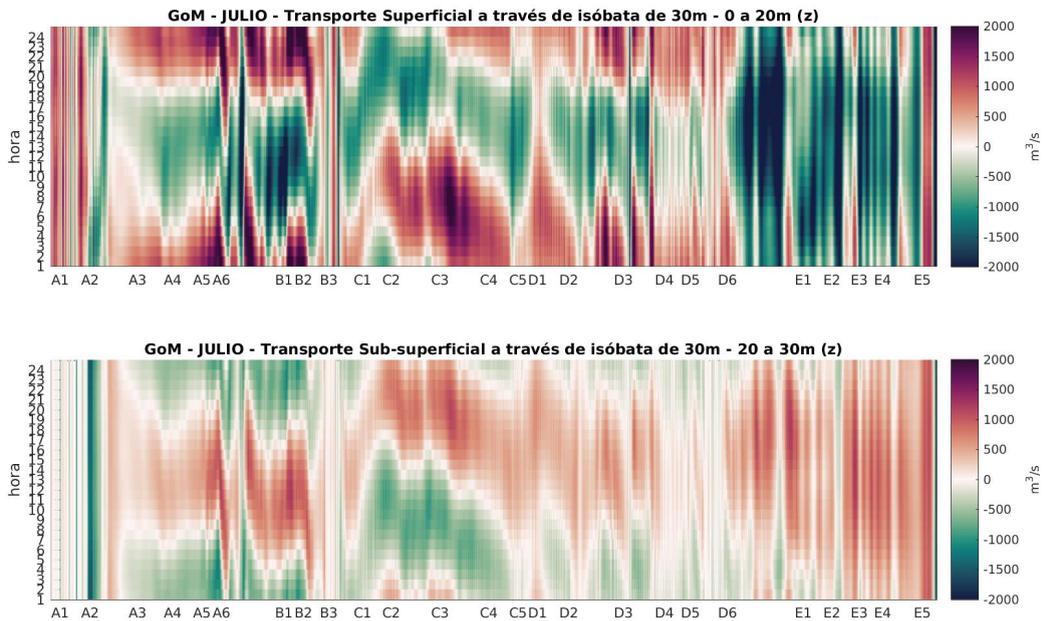


Figura A.19: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Julio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

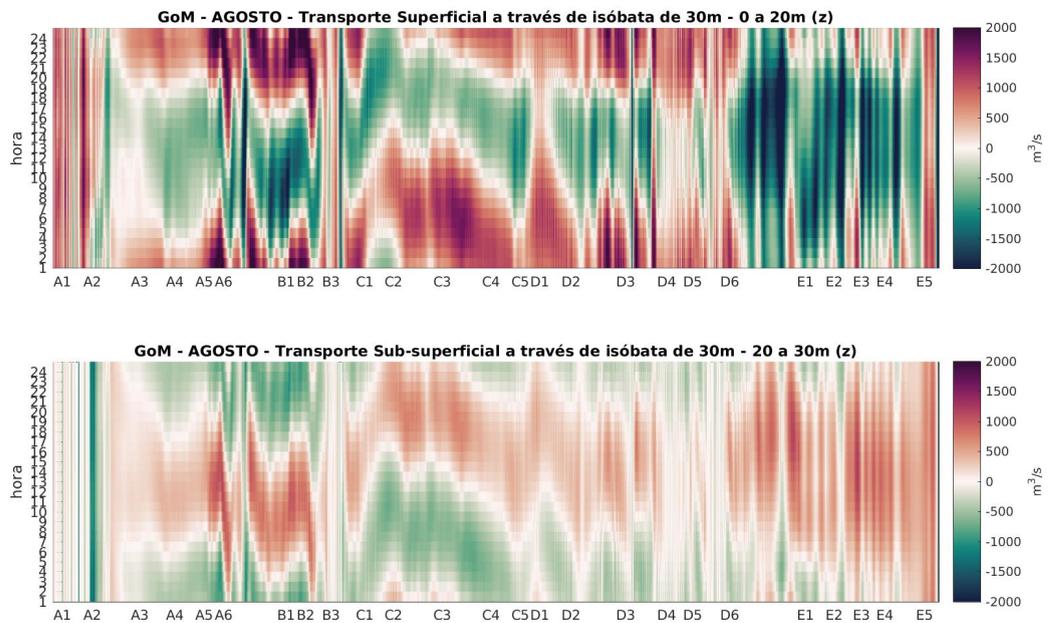


Figura A.20: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Agosto. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

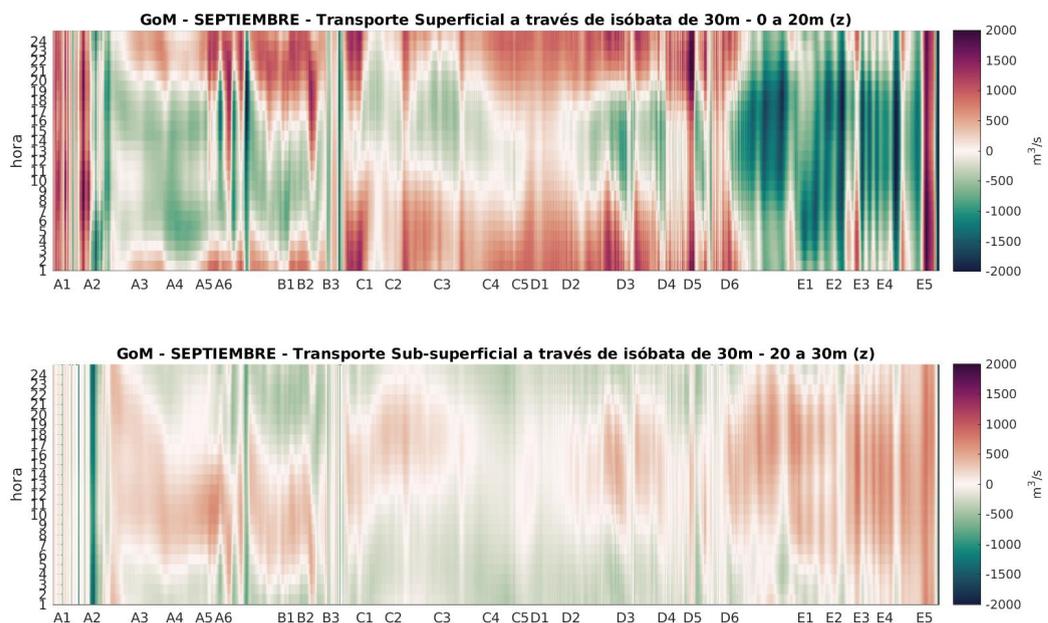


Figura A.21: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Septiembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

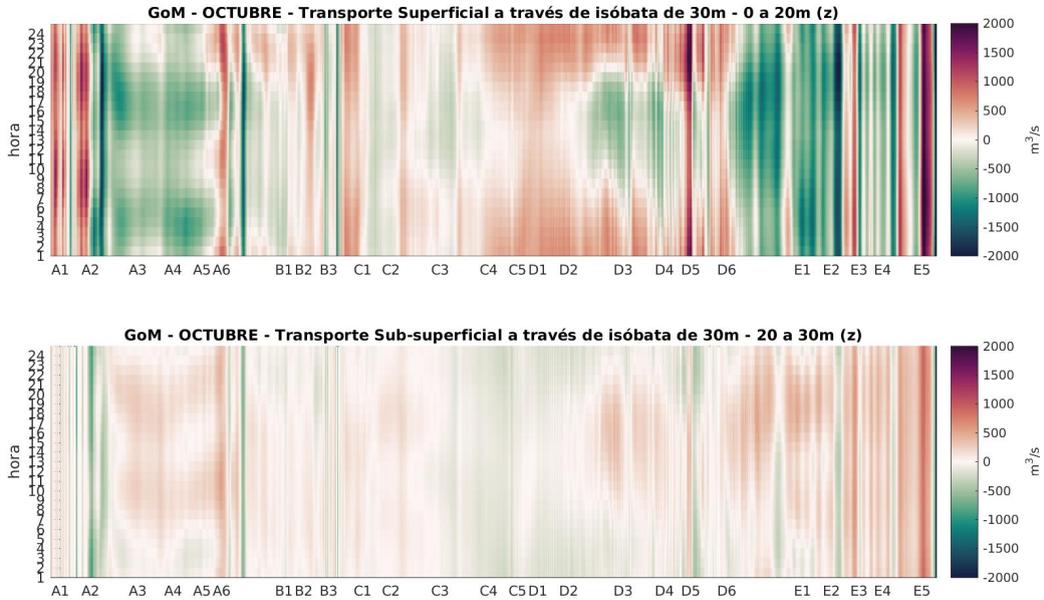


Figura A.22: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Octubre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

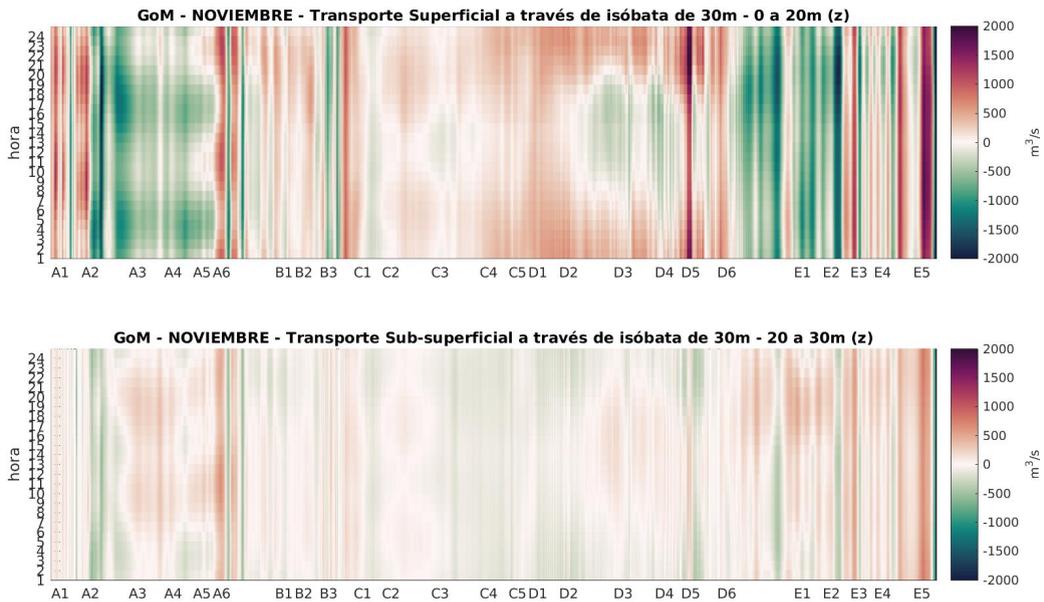


Figura A.23: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Noviembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

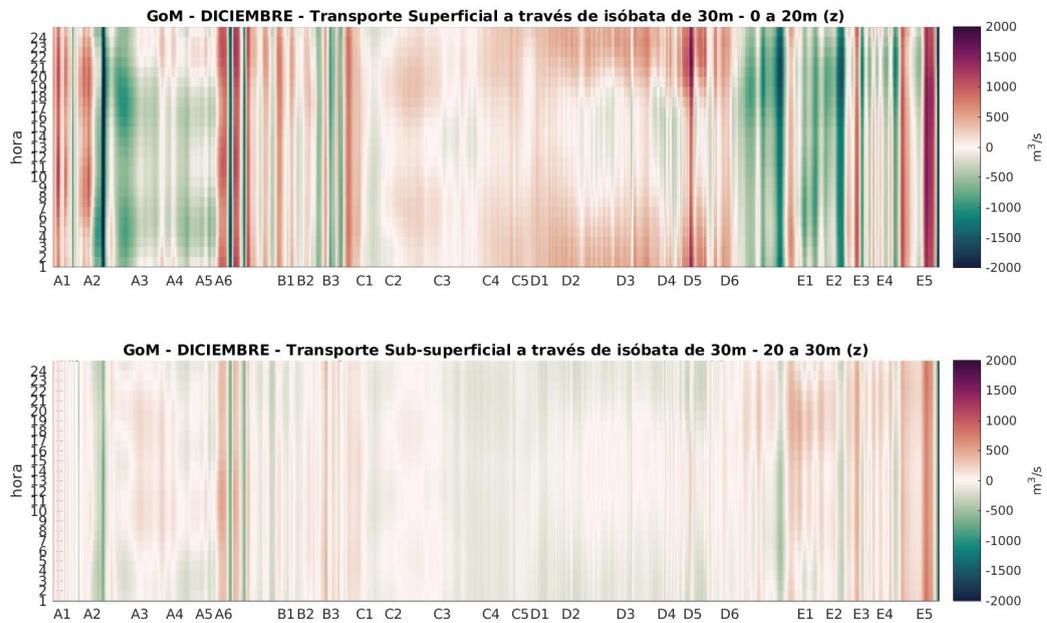


Figura A.24: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 30m del GoM (2000 - 2013) para Diciembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

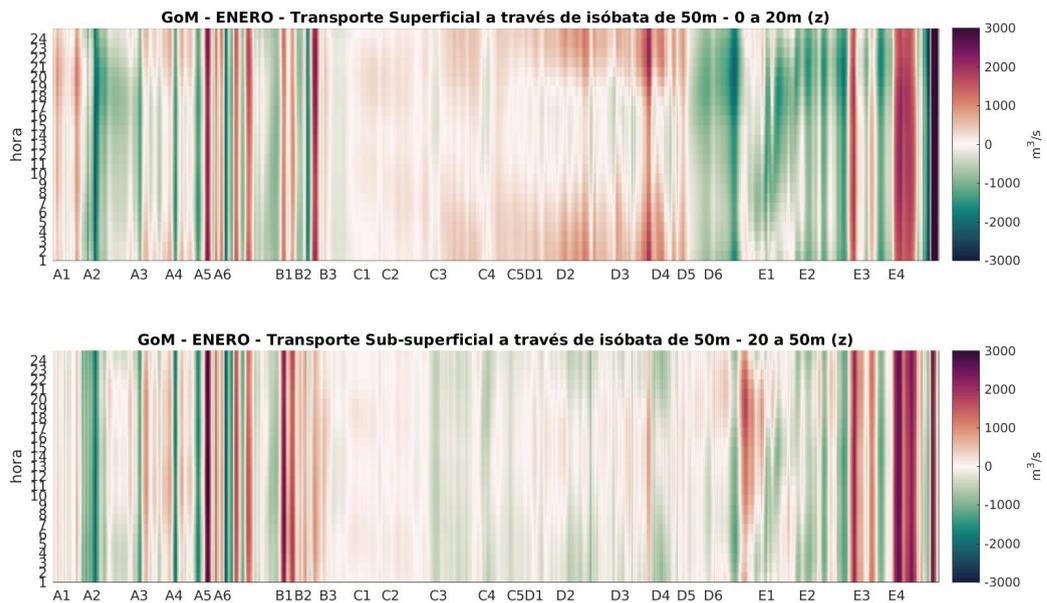


Figura A.25: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Enero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

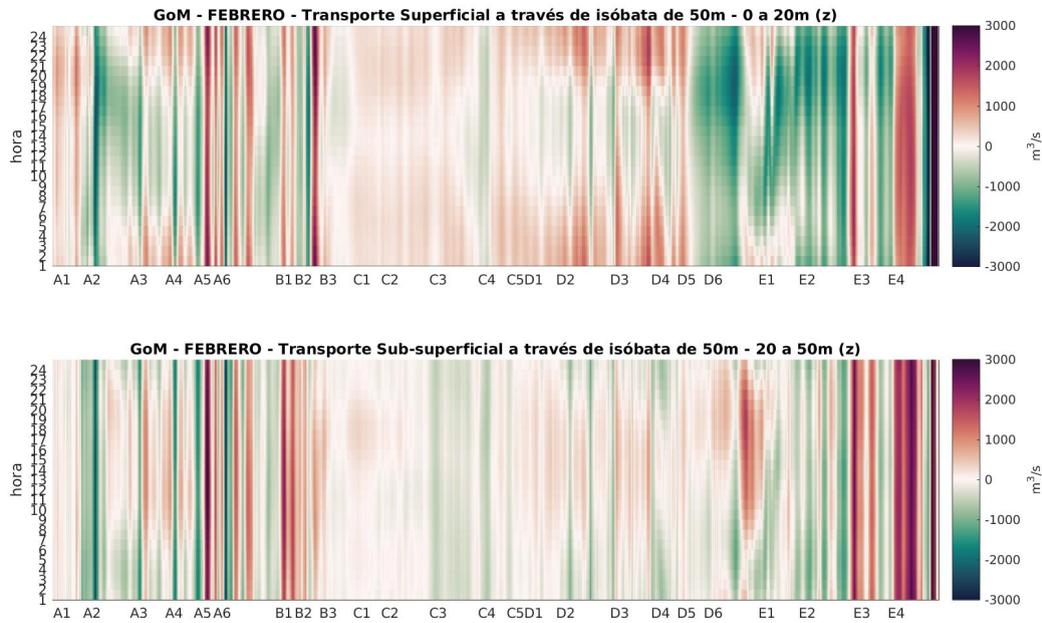


Figura A.26: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Febrero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

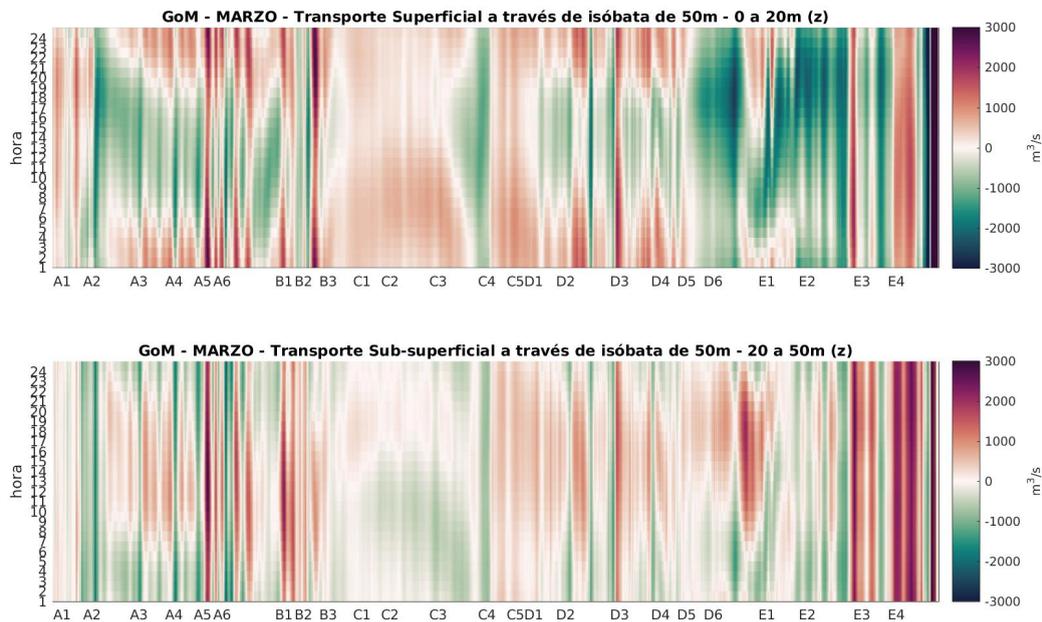


Figura A.27: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Marzo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

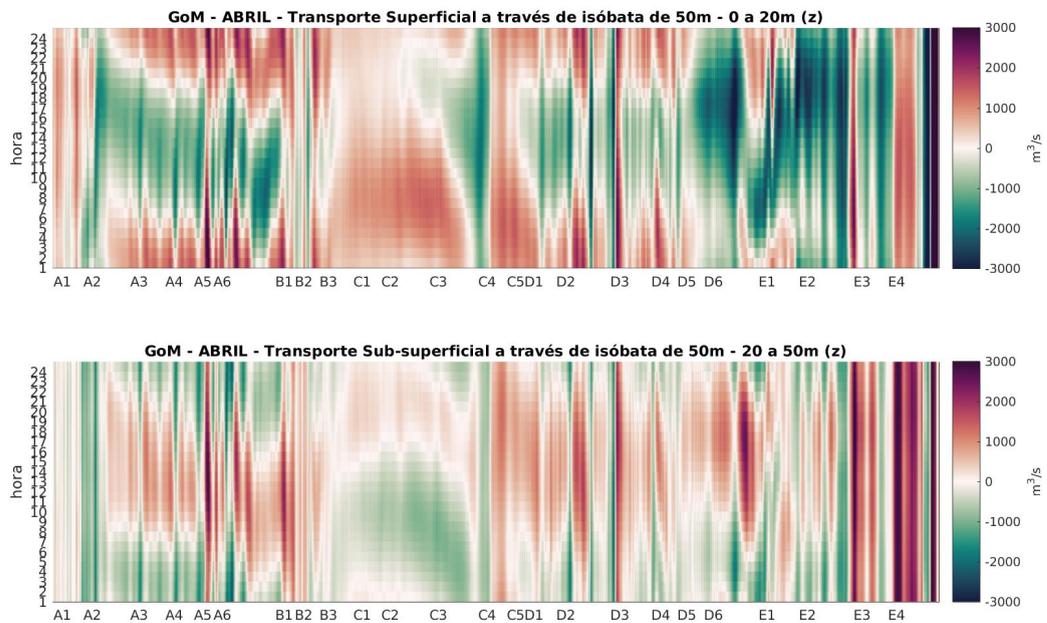


Figura A.28: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Abril. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

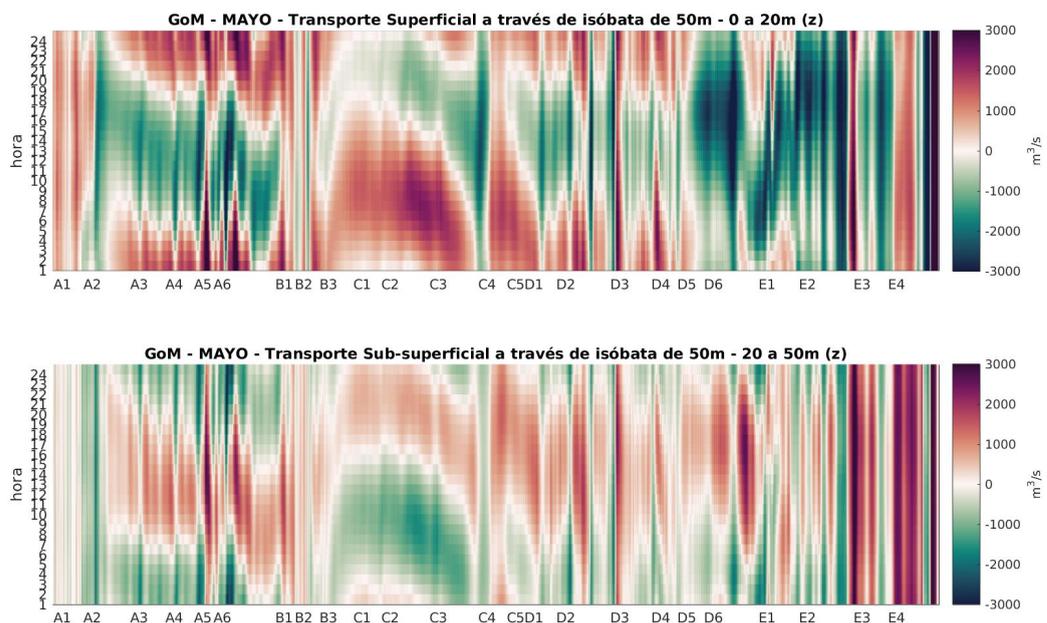


Figura A.29: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Mayo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

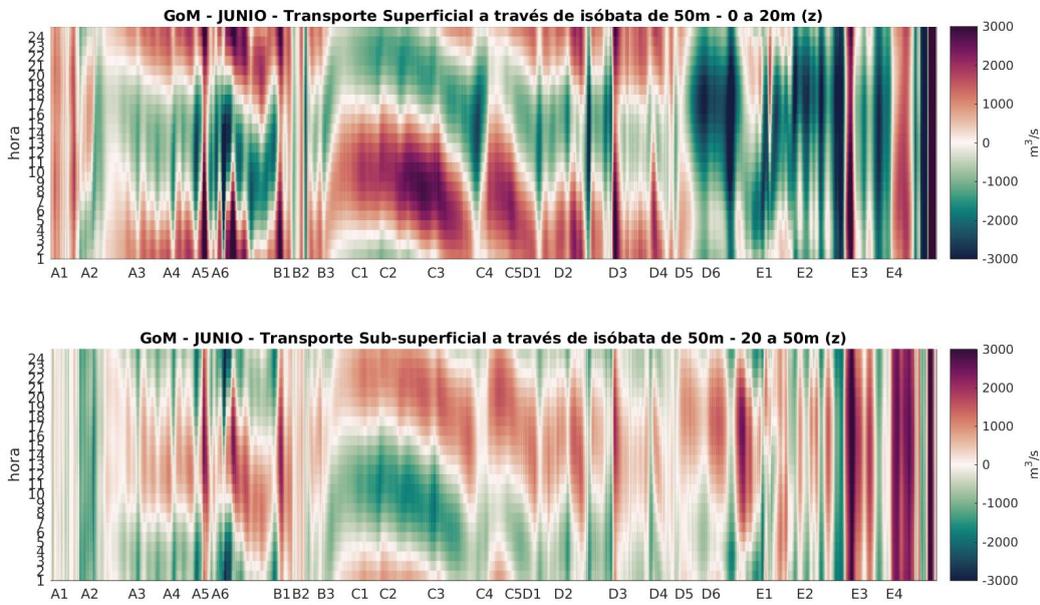


Figura A.30: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Junio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

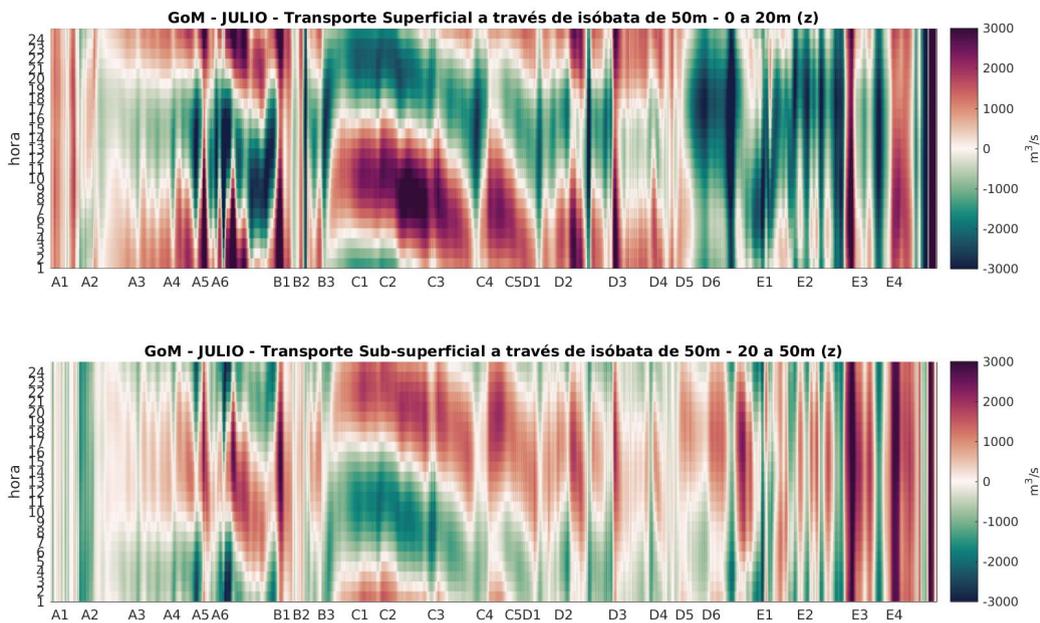


Figura A.31: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Julio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

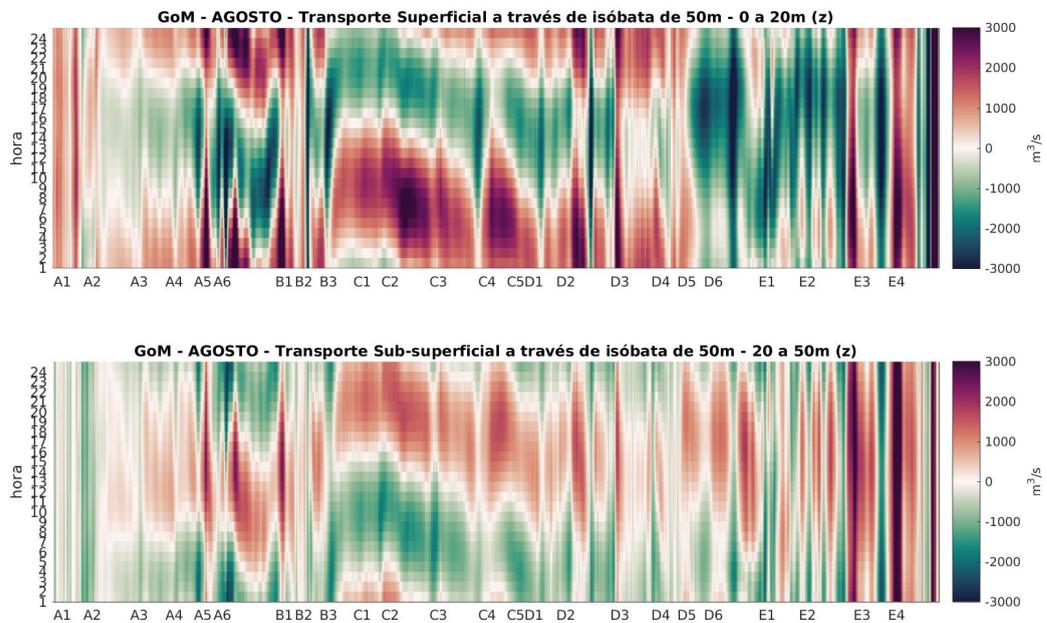


Figura A.32: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Agosto. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

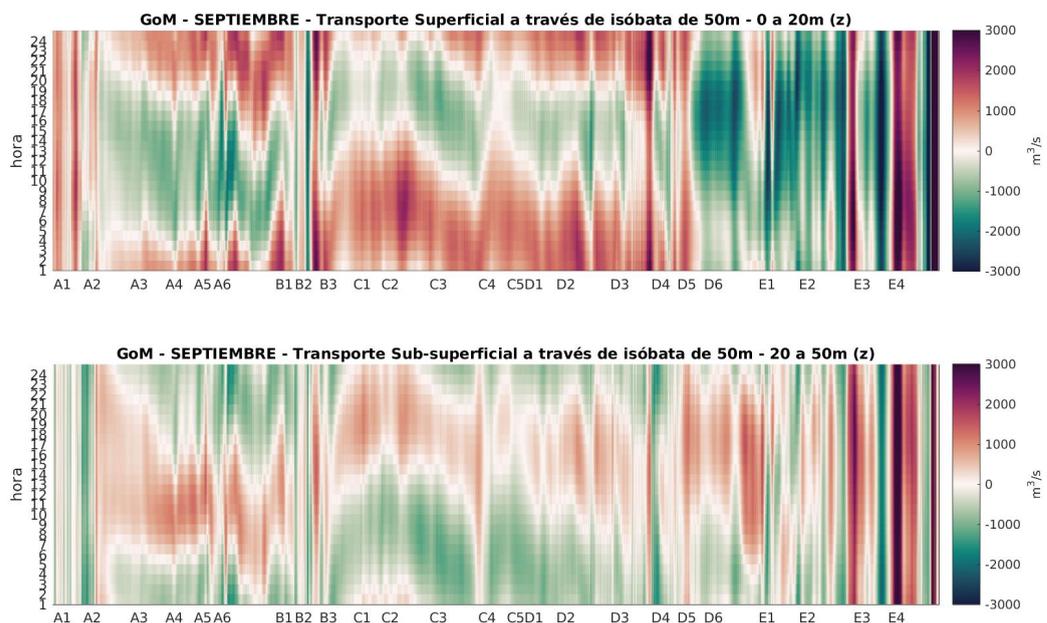


Figura A.33: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Septiembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

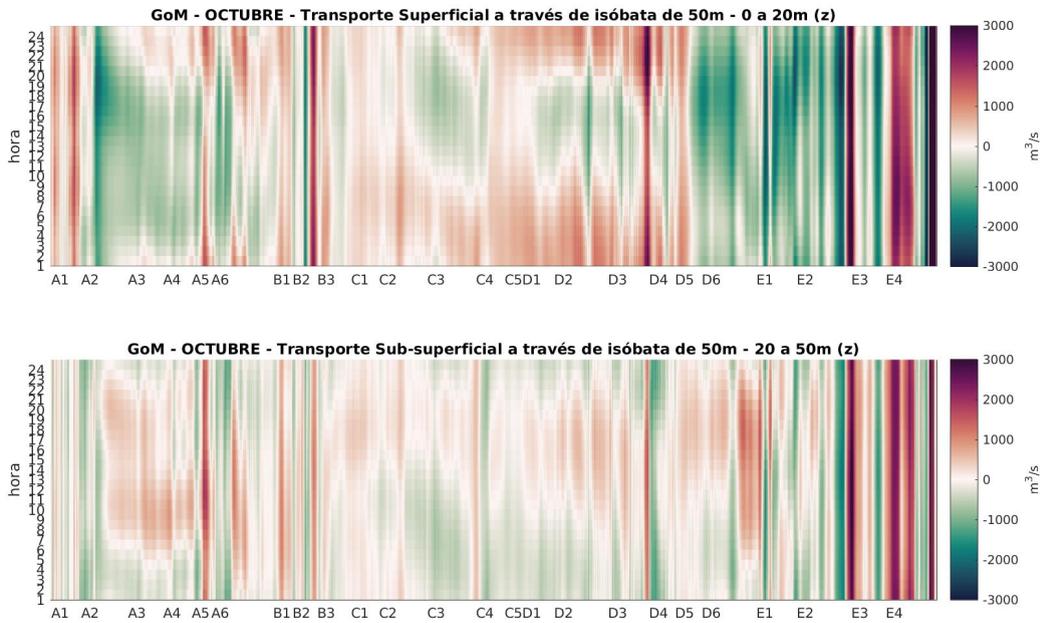


Figura A.34: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Octubre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

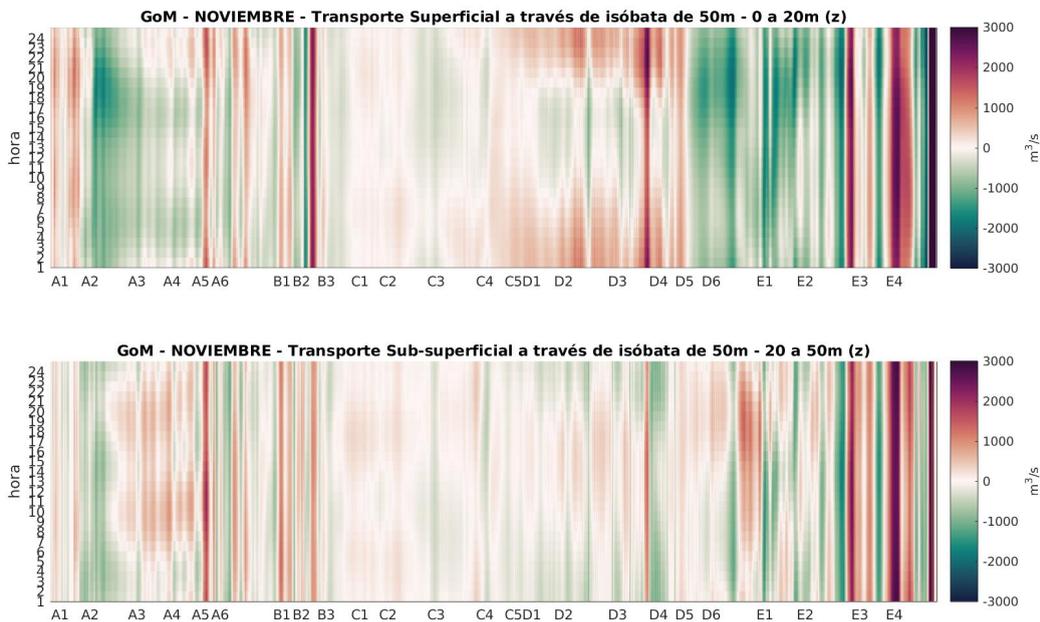


Figura A.35: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Noviembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

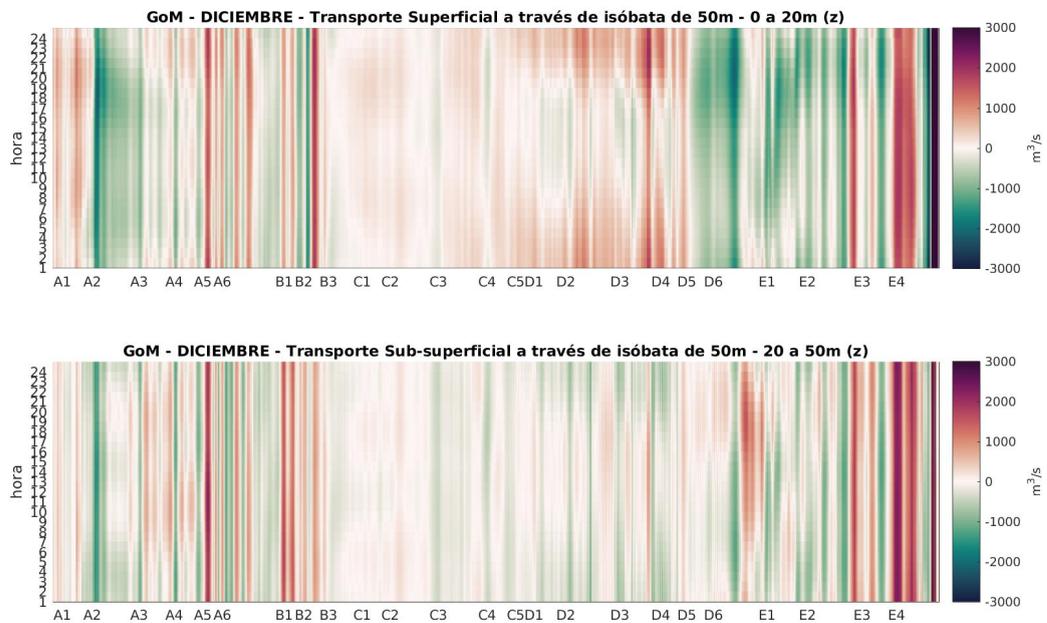


Figura A.36: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 50m del GoM (2000 - 2013) para Diciembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

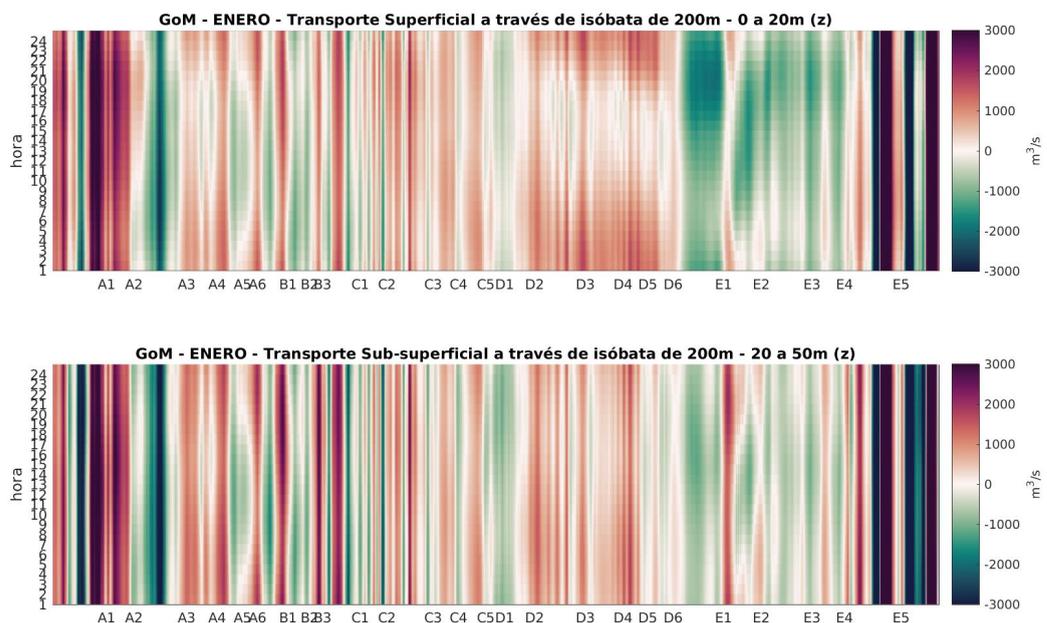


Figura A.37: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Enero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

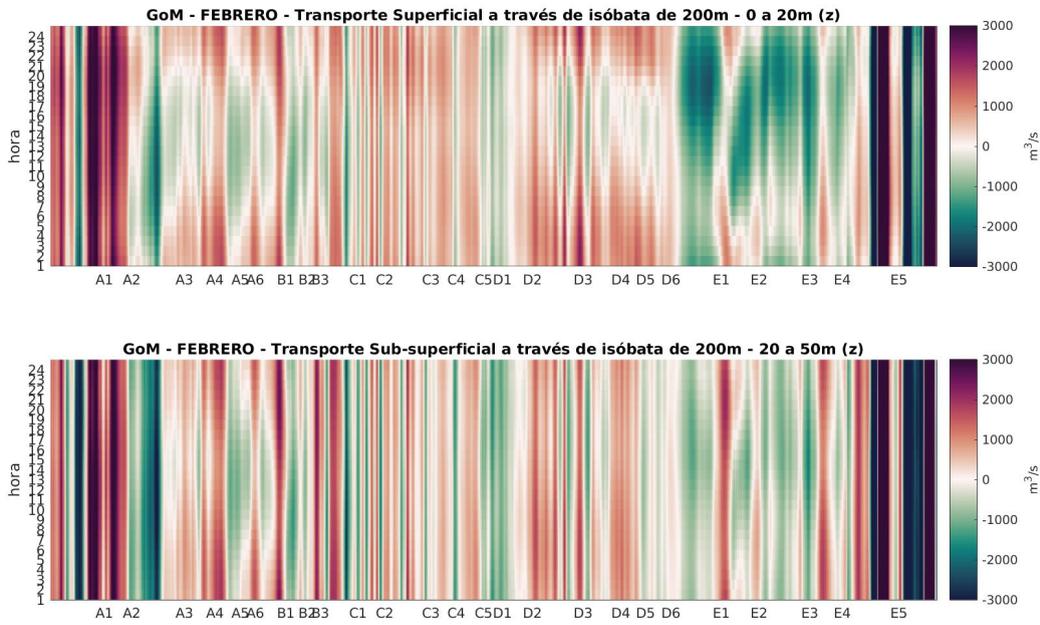


Figura A.38: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Febrero. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

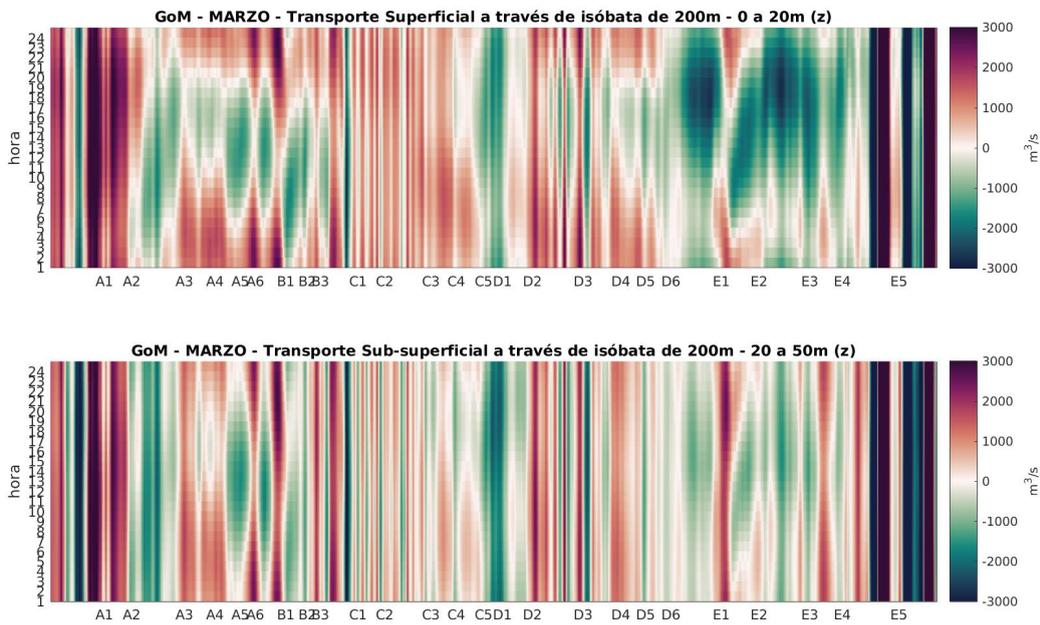


Figura A.39: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Marzo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

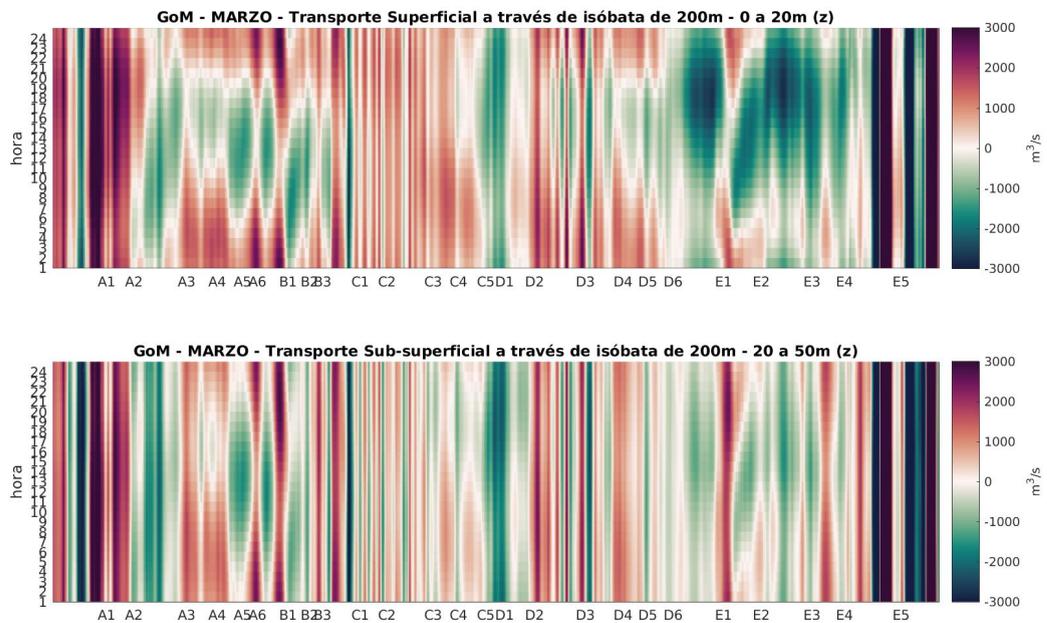


Figura A.40: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Abril. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

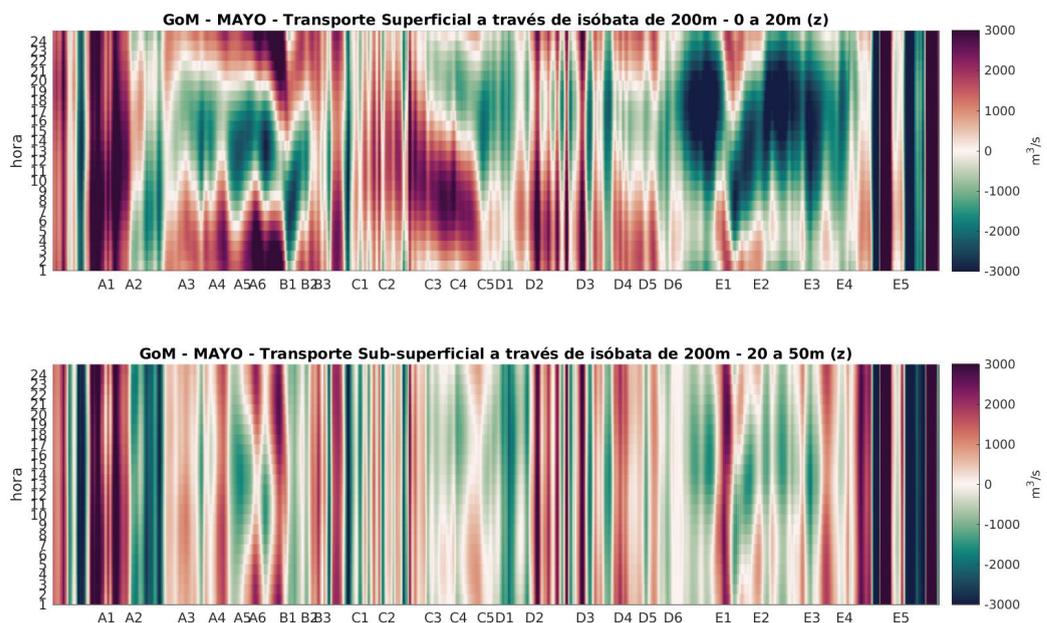


Figura A.41: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Mayo. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

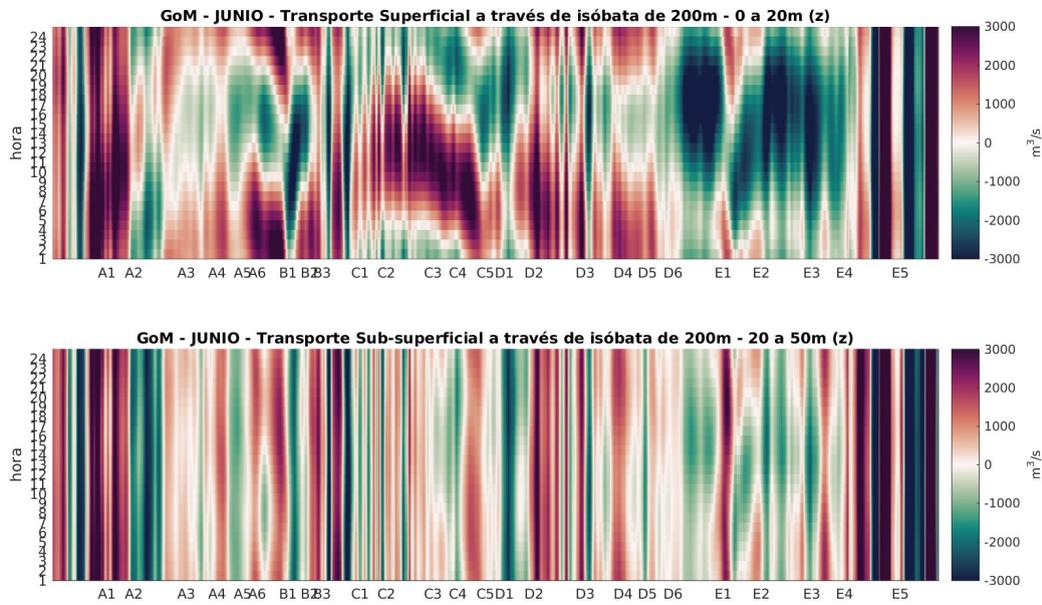


Figura A.42: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Junio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

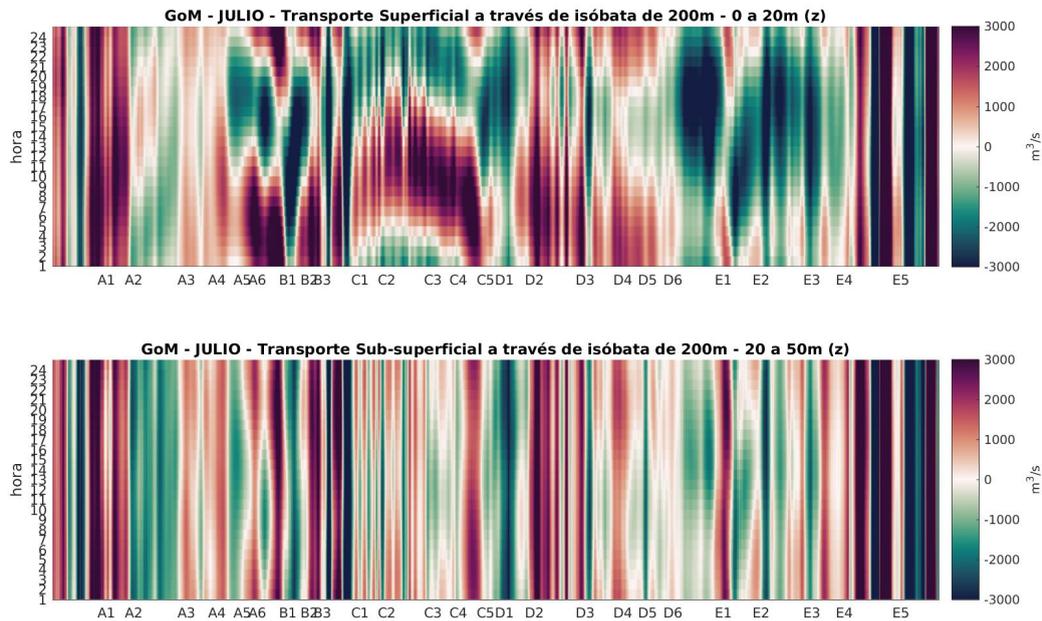


Figura A.43: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Julio. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

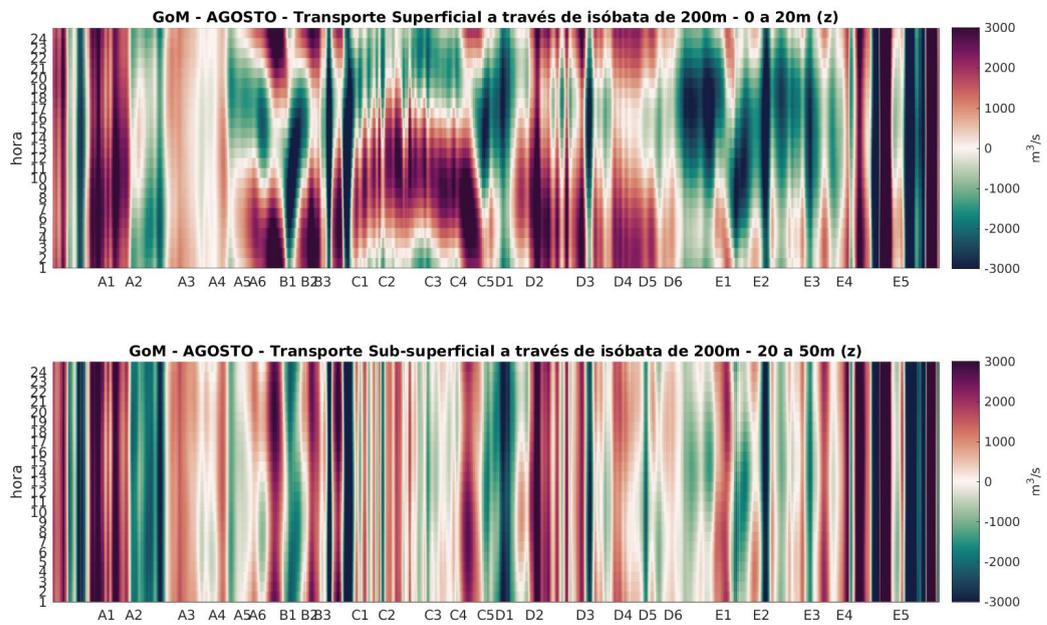


Figura A.44: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Agosto. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

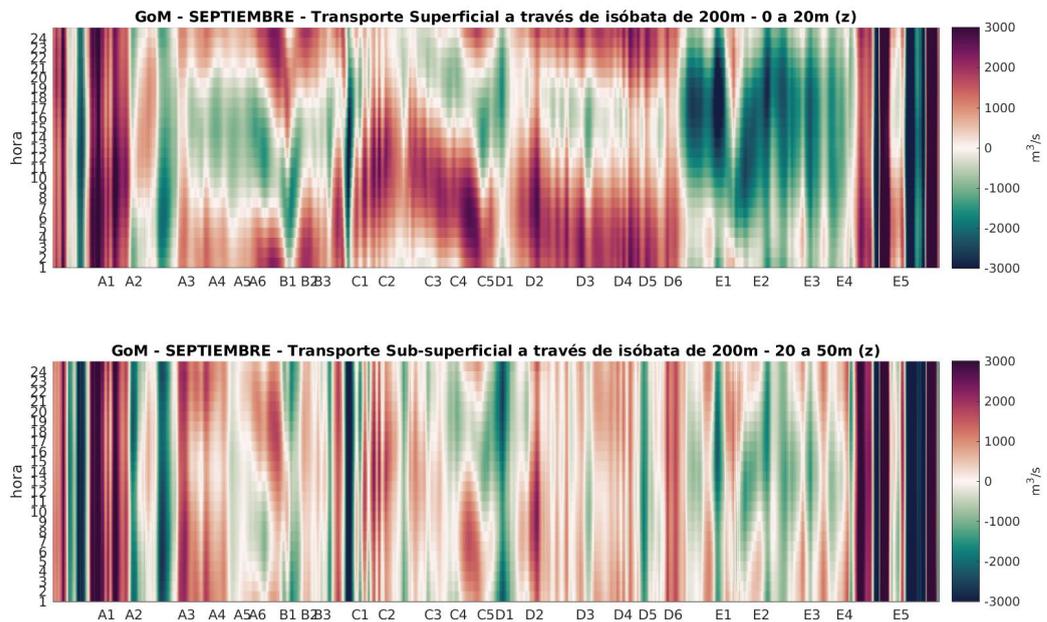


Figura A.45: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Septiembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

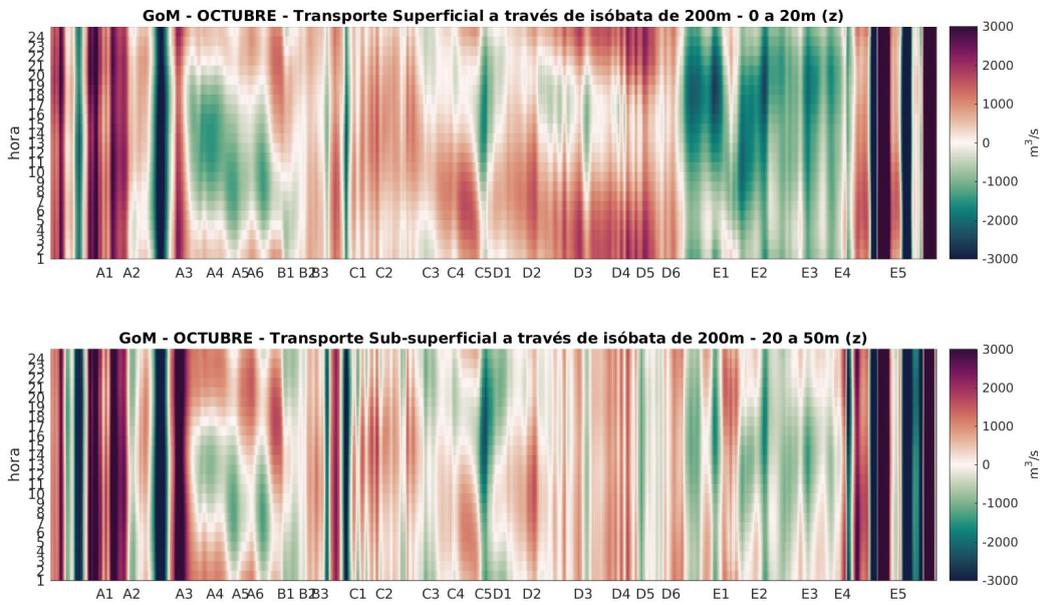


Figura A.46: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Octubre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

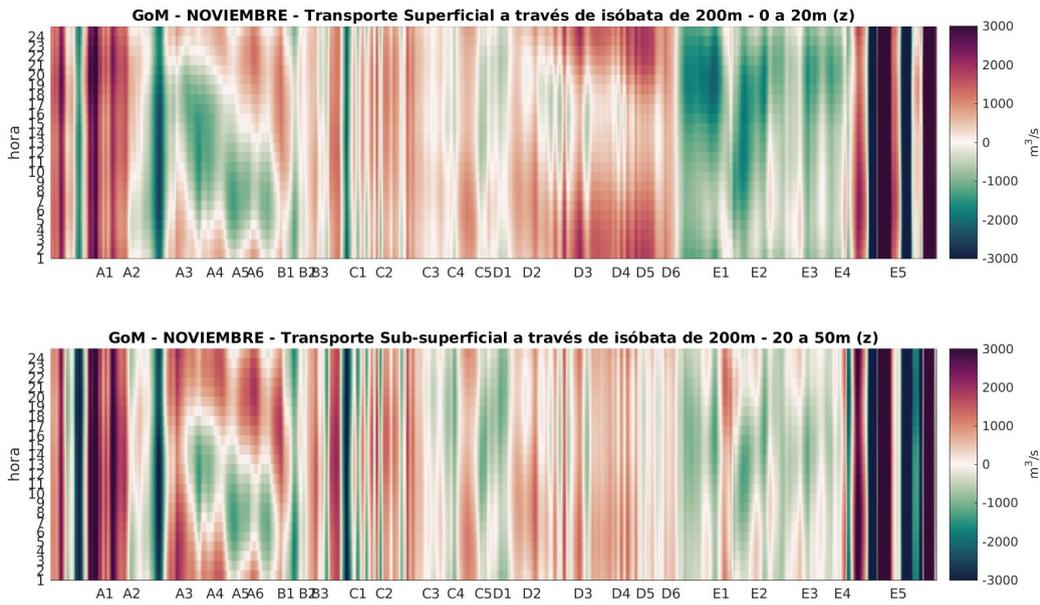


Figura A.47: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Noviembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

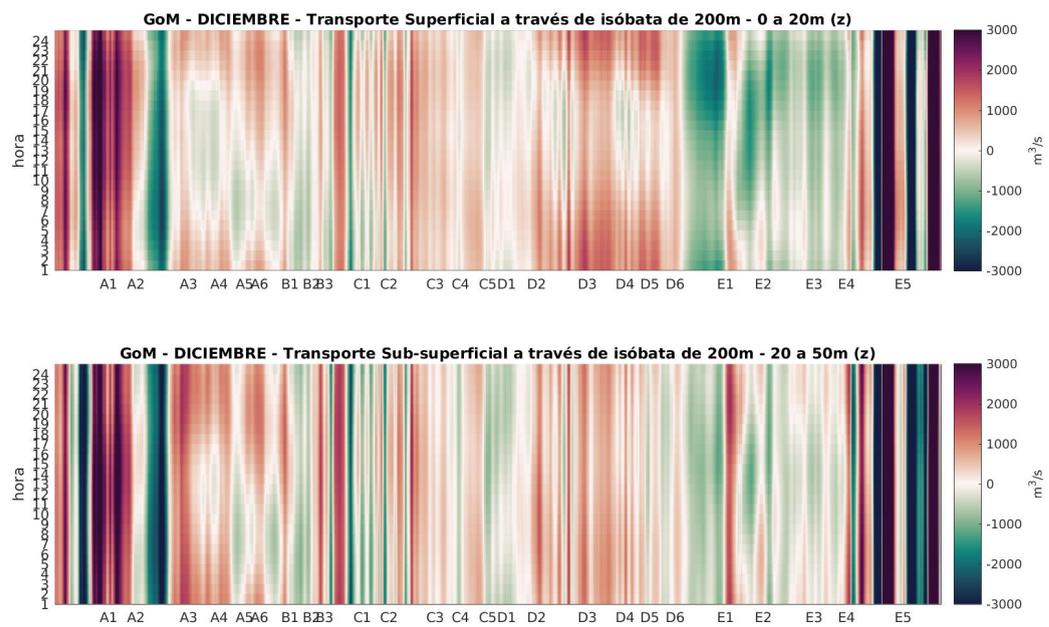


Figura A.48: Diagramas Hovmuller del promedio horario (Horario GMT) del transporte a través de la isóbata de 200m del GoM (2000 - 2013) para Diciembre. En rojos el transporte costa adentro y el transporte costa afuera en verde.

Bibliografía

- Badan, A., Candela, J., Sheinbaum, J., and Ochoa, J. (2005). Upper-layer circulation in the approaches to yucatan channel. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*, pages 57–69.
- Biggs, D. C. and Müller-Karger, F. E. (1994). Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western gulf of mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C4):7371–7384.
- Bleck, R. (1978). On the use of hybrid vertical coordinates in numerical weather prediction models. *Monthly Weather Review*, 106(9):1233–1244.
- Bleck, R. and Boudra, D. B. (1981). Initial testing of a numerical ocean circulation model using a hybrid (quasi-isopycnic) vertical coordinate. *Journal of Physical Oceanography*, 11(6):755–770.
- Boicourt, W. C. (1998). Continental shelf of the southeastern united states and gulf of mexico: in the shadow of the western boundary current. *The sea*, pages 135–182.
- Candela, J., Tanahara, S., Crepon, M., Barnier, B., and Sheinbaum, J. (2003). Yucatan channel flow: Observations versus clipper atl6 and mercator pam models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C12).
- Caso, M., Pisantry, I., and Ezcurra, E. (2004). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*, volume 1. Instituto Nacional de Ecología.
- Chen, C., Wiesenburg, D. A., and Xie, L. (1997). Influences of river discharge on biological production in the inner shelf: A coupled biological and physical model of the louisiana-texas shelf. *Journal of Marine Research*, 55(2):293–320.
- Cochrane, J. and Kelly, F. (1986). Low-frequency circulation on the texas-louisiana continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C9):10645–10659.

- Cushman-Roisin, B. and Beckers, J.-M. (2011). *Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects*, volume 101. Academic Press.
- Dubranna, J., Pérez-Brunius, P., López, M., and Candela, J. (2011). Circulation over the continental shelf of the western and southwestern gulf of mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C8).
- Elliott, B. A. (1982). Anticyclonic rings in the gulf of mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 12(11):1292–1309.
- Flores-Coto, C., Sanvicente-Añorve, L., Zavala-García, F., Zavala-Hidalgo, J., and Funes-Rodríguez, R. (2014). Environmental factors affecting structure and spatial patterns of larval fish assemblages in the southern gulf of mexico. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2):307–321.
- Gill, A. and Rasmusson, E. M. (1983). The 1982–83 climate anomaly in the equatorial pacific. *Nature*, 306(5940):229–234.
- Gille, S. T., Llewellyn Smith, S. G., and Statom, N. M. (2005). Global observations of the land breeze. *Geophysical Research Letters*, 32(5).
- Hurlburt, H. and Thompson, J. D. (1980). A numerical study of loop current intrusions and eddy shedding. *Journal of Physical Oceanography*, 10(10):1611–1651.
- Hurlburt, H. E. and Thompson, J. D. (1982). The dynamics of the loop current and shed eddies in a numerical model of the gulf of mexico. *Elsevier Oceanography Series*, 34:243–297.
- Kolodziejczyk, N., Ochoa, J., Candela, J., and Sheinbaum, J. (2011). Deep currents in the bay of campeche. *Journal of Physical Oceanography*, 41(10):1902–1920.
- Lewis, J. K. and Hsu, S. (1992). Mesoscale air-sea interactions related to tropical and extratropical storms in the gulf of mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C2):2215–2228.
- Liu, Y. and Weisberg, R. H. (2005). Patterns of ocean current variability on the west florida shelf using the self-organizing map. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C6).
- Liu, Y. and Weisberg, R. H. (2012). Seasonal variability on the west florida shelf. *Progress in Oceanography*, 104:80–98.
- Martínez-López, B. and Zavala-Hidalgo, J. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the gulf of mexico. *Journal of Marine Systems*, 77(1):1–20.

- Mateos-Jasso, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., and Allende-Arandía, M. E. (2012). Variability of the thermohaline structure in the northern veracruz coral reef system, mexico. *Continental Shelf Research*, 50:30–40.
- Monreal-Gómez, M. and Salas-de León, D. (1990). Simulación de la circulación en la bahía de campeche. *Geofísica Internacional*, 29(2):101–111.
- Monreal-Gómez, M., Salas-de León, D., Velasco-Mendoza, H., Caso, M., Pisanty, I., and Ezcurra, E. (2004). La hidrodinámica del golfo de méxico. *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*, 1:47–68.
- Morey, S. L., Martin, P. J., O'Brien, J. J., Wallcraft, A. A., and Zavala-Hidalgo, J. (2003). Export pathways for river discharged fresh water in the northern gulf of mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C10).
- Morey, S. L., Zavala-Hidalgo, J., and O'Brien, J. J. (2005). The seasonal variability of continental shelf circulation in the northern and western gulf of mexico from a high-resolution numerical model. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and models*, pages 203–218.
- Müller-Karger, F. E., Walsh, J. J., Evans, R. H., and Meyers, M. B. (1991). On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the gulf of mexico as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C7):12645–12665.
- Murphy, S. J., Hurlburt, H. E., and O'Brien, J. J. (1999). The connectivity of eddy variability in the caribbean sea, the gulf of mexico, and the atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C1):1431–1453.
- Nowlin, W. D., Jochens, A. E., DiMarco, S. F., Reid, R. O., and Howard, M. K. (2005). Low-frequency circulation over the texas-louisiana continental shelf. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and models*, pages 219–240.
- Ochoa, J., Sheinbaum, J., Badan, A., Candela, J., and Wilson, D. (2001). Geostrophy via potential vorticity inversion in the yucatan channel. *Journal of Marine Research*, 59(5):725–747.
- Oey, L.-Y. (1995). Eddy-and wind-forced shelf circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C5):8621–8637.
- Oey, L.-Y., Ezer, T., and Lee, H.-C. (2005). Loop current, rings and related circulation in the gulf of mexico: A review of numerical models and future challenges. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and models*, pages 31–56.

- Qian, Y., Jochens, A. E., Kennicutt II, M. C., and Biggs, D. C. (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):1–17.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., and Scavia, D. (2002a). Beyond science into policy: Gulf of mexico hypoxia and the mississippi river: Nutrient policy development for the mississippi river watershed reflects the accumulated scientific evidence that the increase in nitrogen loading is the primary factor in the worsening of hypoxia in the northern gulf of mexico. *AIBS Bulletin*, 52(2):129–142.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., and Wiseman Jr, W. J. (2002b). Gulf of mexico hypoxia, aka “the dead zone”. *Annual Review of ecology and Systematics*, 33(1):235–263.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., Gallegos, A., and O’Brien, J. J. (2003). Isthmus of tehuantepec wind climatology and enso signal. *Journal of Climate*, 16(15):2628–2639.
- Salas-de León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., Signoret, M., and Aldeco, J. (2004). Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact on near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the campeche canyon, gulf of mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C5).
- Sanvicente-Añorve, L., Zavala-Hidalgo, J., Allende-Arandía, M., and Hermoso-Salazar, M. (2014). Connectivity patterns among coral reef systems in the southern gulf of mexico. *Marine Ecology Progress Series*, 498:27–41.
- Schmitz, W. J. and Richardson, W. S. (1968). On the transport of the florida current. In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, volume 15, pages 679–693. Elsevier.
- Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A., and Ochoa, J. (2002). Flow structure and transport in the yucatan channel. *Geophysical Research Letters*, 29(3).
- Smith, R. (1995). The physical processes of coastal ocean upwelling systems. *Upwelling in the ocean: Modern processes and ancient records*.
- Soto, L. A. and Escobar-Briones, E. (1995). Coupling mechanisms related to benthic production in the sw gulf of mexico. *Biology and Ecology of Shallow Coastal Waters*, pages 233–242.
- Sturges, W. and Blaha, J. P. (1976). A western boundary current in the gulf of mexico. *Science*, 192(4237):367–369.
- Sturges, W. and Leben, R. (2000). Frequency of ring separations from the loop current in the gulf of mexico: A revised estimate. *Journal of Physical Oceanography*, 30(7):1814–1819.

- Vázquez De La Cerda, A., Reid, R., DiMarco, S., and Jochens, A. (2005). Bay of campeche circulation: An update. *Circulation in the Gulf of Mexico: observations and models*, pages 279–293.
- Vazquez de La Cerda, A. M. (1993). Bay of campeche cyclone.
- Vidal, V., Vidal, F. V., Hernández, A. F., Meza, E., and Pérez-Molero, J. M. (1994a). Baroclinic flows, transports, and kinematic properties in a cyclonic-anticyclonic-cyclonic ring triad in the gulf of mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C4):7571–7597.
- Vidal, V. M., Vidal, F. V., Hernández, A. F., Meza, E., and Zambrano, L. (1994b). Winter water mass distributions in the western gulf of mexico affected by a colliding anticyclonic ring. *Journal of Oceanography*, 50(5):559–588.
- Walker, N. D., Leben, R. R., and Balasubramanian, S. (2005). Hurricane-forced upwelling and chlorophyll a enhancement within cold-core cyclones in the gulf of mexico. *Geophysical Research Letters*, 32(18).
- Weisberg, R. H., Barth, A., Alvera-Azcarate, A., and Zheng, L. (2009). A coordinated coastal ocean observing and modeling system for the west florida continental shelf. *Harmful Algae*, 8(4):585–597.
- Weisberg, R. H., Black, B. D., and Li, Z. (2000). An upwelling case study on florida’s west coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C5):11459–11469.
- Weisberg, R. H., He, R., Liu, Y., and Virmani, J. I. (2005). West florida shelf circulation on synoptic, seasonal, and interannual time scales. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and models*, pages 325–347.
- Zavala-Hidalgo, J., Gallegos-García, A., Martínez-López, B., Morey, S. L., and O’Brien, J. J. (2006). Seasonal upwelling on the western and southern shelves of the gulf of mexico. *Ocean dynamics*, 56(3-4):333–338.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., and O’Brien, J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the gulf of mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C12).
- Zhang, X., Hetland, R. D., Marta-Almeida, M., and DiMarco, S. F. (2012). A numerical investigation of the mississippi and atchafalaya freshwater transport, filling and flushing times on the texas-louisiana shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11).