

Tesis defendida por
Carlos Andrés Valverde Kaliseh

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rubén Castro Valdez
Director del Comité

Dr. Héctor García Nava
Miembro del Comité

Dr. Rafael Hernández Walls
Miembro del Comité

Dr. Ronald Spelz Madero
Coordinador del programa
de posgrado en Oceanografía Costera

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Miembro del Comité

28 de Julio de 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Oceanografía Costera**

Caracterización de la circulación oceánica en la Entrada del Golfo de California

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestría en Ciencias

Presenta:

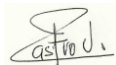
Carlos Andrés Valverde Kaliseh

Ensenada, Baja California. México 2016



Resumen de la tesis de Carlos Andrés Valverde Kaliseh, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera.

Caracterización de la circulación oceánica en la Entrada del Golfo de California



Resumen aprobado por:

Dr. Rubén Castro Valdez
Director de Tesis

A partir de registros de corrientes obtenidas con un perfilador acústico Doppler posicionado sobre la isobata de ~180 m en la plataforma de Sinaloa (24.04°N/107.86°W, ~60 km de la costa), se caracterizó la variabilidad de la circulación oceánica en la región de la entrada al Golfo de California (EGC). Los periodos de medición fueron entre Noviembre de 2003 a mayo de 2004, y entre Noviembre de 2007 a Septiembre de 2009. Además de los registros de corrientes, se utilizaron datos de topografía dinámica absoluta (ADT/AVISO) en el periodo 1993-2013, a los cuales se les extrajo la climatología (mensual y estacional). Asimismo, se utilizaron datos de mareógrafos en estaciones costeras (Acapulco, Manzanillo y Mazatlán) para estudiar la covariabilidad de señales observadas en el anclaje con las medidas en estas regiones al exterior. Las corrientes en el anclaje mostraron una relativa baja señal estacional, pero con alta variabilidad dominada por eventos o pulsos de mesoescala del orden de unos cuantos días a semanas. El flujo en la columna de agua (20-120 m) en varios de estos eventos, fluctuó sin cambiar de signo y con predominancia hacia dentro del golfo, aunque también ocurrieron hacia afuera del golfo. La corriente tuvo señal preferencialmente alineada a lo largo de la costa la mayor parte del año. Los flujos hacia dentro del golfo dominaron en el verano y parte del otoño lo cual fue asociado a la Corriente Costera Mexicana (CCM). Estos flujos se intensificaron en forma de pulsos lo cual también se observó en los datos de los mareógrafos. Los pulsos estuvieron asociados al paso de ondas atrapadas a la costa. Los primeros dos modos de las Funciones Empíricas Ortogonales de los datos de ADT en la entrada al Golfo de California mostraron una clara señal estacional. El primer modo (62% de la varianza) fue dominado por un flujo hacia el ecuador, donde la circulación geostrófica superficial está asociada al brazo tropical de la Corriente de California. Las amplitudes de este modo mostraron una señal estacional con valores positivos la primera parte del año (máximos entre abril-mayo), y valores negativos el resto del año (mínimos entre agosto-septiembre). El cambio de signo indica que la corriente puede invertir su dirección y cambiar a los rasgos de un remolino ciclónico en la entrada al golfo y un flujo hacia el polo. El segundo modo, con el 14% de la varianza, describió un flujo costero hacia el polo que incursionó al golfo, con su mayor intensidad hacia la plataforma de Sinaloa. Esta corriente está ligada a la CCM. La amplitud del segundo modo (Fig. 20c), mostró también una señal estacional bien definida, con valores positivos entre abril y octubre donde la corriente se dirige hacia el polo, y hacia el ecuador entre noviembre-marzo. Consistente con los resultados de las mediciones con el perfilador acústico, este segundo modo reveló que el flujo más intenso hacia el polo ocurrió en verano y hacia fuera del golfo en invierno. Por lo tanto, la circulación en la entrada del golfo está dominada por la interacción entre la CC y la CCM, afectada por una intensa actividad de mesoescala.

Palabras clave: **Corrientes superficiales, topografía dinámica absoluta, flujo, Entrada del Golfo de California.**

Dedicatoria y Agradecimientos

*A mi familia, en especial a mi padre,
Alberto Gpe. Valverde Flores por apoyarme
Incondicionalmente y siempre creer en mí.
Te quiero mucho jefe.*

*A mi madre,
Blanca Elida Kalisch Herrera. Mi ángel de la guarda.
Esa luz que penetra lo profundo e ilumina lo más oscuro,
Siempre estarás en mi corazón, madre mía.*

*Mi gran hermano, Jesús “El Beto” Valverde Kaliseh
Por apoyarme y guiarme en este viaje extrovertido.
Te agradezco todo el cariño que me has brindado*

*A mis amigos, los meramente y colegas
Gracias por aguantarme en las buenas y en las malas.
Así como a esa persona que estuvo conmigo
Durante esta magnífica oportunidad,
Tu recuerdo perdura como el calor del sol
En una cálida mañana de invierno.*

*Por último, a la música que me acompaña siempre.
Brindándome serenidad, paciencia y la capacidad
Para digerir mi camino y en especial esta gran experiencia.*

Al Dr. Rubén Castro Valdez por su paciencia, apoyo, disponibilidad y confianza durante la formación académica (aunque sea pequeña), parte clave en mi crecimiento. Profe, mil gracias por no desistir conmigo y tener la capacidad de seguir adelante. Ya la acabamos, este es el glorioso resultado. Un fuerte abrazo profe, y de verdad que admiro su trabajo y su desempeño. Sígale echando ganas.

Al Dr. Héctor García Nava por sus comentarios y sugerencias a lo largo del posgrado. Además, el gran apoyo que me brindo, el cual fue de gran ayuda para elaborar este trabajo y a entender algunos conceptos, reforzando el trabajo científico.

Al Dr. Walls, al Dr. R. Durazo por su apoyo en aceptar participar en mi comité y brindarme ayuda en su momento.

Gracias a las campañas oceanográficas PESCAR (PEgassus of the Sea of Cortés ARea), una colaboración entre UABC (IIO-FMC) y de la Naval Postgraduate School (NPS), iniciada desde 1992, por brindarme sus datos (anclaje).

Tabla de contenido

Resumen	3
Dedicatoria y Agradecimientos	4
Lista de figuras	6
1. Introducción	9
1.1 Circulación en la EGC	10
1.2 Justificación	14
1.3 Objetivos	15
1.4 Hipótesis	16
2. Datos y Método	16
2.1 Estructura del anclaje y datos de corrientes (ADCP)	16
2.2 Tratamiento previo	17
2.3 Datos Satelitales	18
2.4 Ajuste armónico	20
3. Métodos	21
3.1 Estadística Básica	21
3.2 Altimetría Satelital y Corrientes Geostróficas	22
3.3 Elipses de Variabilidad (Eje de máxima varianza)	22
3.4 Funciones Empíricas Ortogonales	24
4. Resultados	25
4.1 Perfil medio de velocidad	26
4.2 Series de Tiempo	31
4.2.1 Noviembre 2003 – Mayo 2006	31
4.2.2 Noviembre 2007 –Septiembre 2009	33
4.2.3 Variabilidad espacio-temporal del anclaje (FEO's).....	38
5. Comparación entre las corrientes medidas en el Anclaje y a través de datos Satelitales.....	42
5.1 Imágenes de Satélite (MADT)	45
5.2 Elipses de variabilidad	48
5.3 Climatología promedio y corrientes geostroficas superficiales [1993-2013]	50
5.4 Climatología mensual [1993-2013].....	53
5.5 Climatología estacional y raíz cuadrática media (r.c.m.).....	58
6. Discusión	60
7. Conclusión	70
8. Referencia Bibliográfica.....	73
8. Anexo	79

Figura	Lista de Figuras	Página
1	Cuencas en la región del Golfo de California. CG=Cuenca de Guaymas, CC=Cuenca Carmen, CF=Cuenca Farallón, CP=Cuenca Pescadero. EGC= Zona de la Entrada al Golfo de California. La sección marcada por (●) indica las posiciones hidrográficas de los cruceros PESCAR y el símbolo (●) indica la posición del anclaje (ver abajo). En color se indica la profundidad (m). Se incluye la isobata de 200 m en color blanco.	10
2	Localización del área de estudio en la Entrada al Golfo de California. Se incluye la posición del anclaje "El Dorado" (●) sobre la plataforma de Sinaloa. También se incluyen la posición donde se extrajeron registros de altimetría satelital de AVISO en dos puntos: "Cabo Pulmo" (●) frente a la península de BC y El Dorado 2, situado a 8 km del anclaje. Se anexa la longitud del registro temporal de muestreo del ADCP (abajo), así como el esquema del anclaje con los instrumentos instalados a su respectiva profundidad (izquierda).	18
3	Perfiles verticales promediados temporalmente de las componentes de velocidad (u , v) y su desviaciones estándar ($u-\sigma$, $v-\sigma$): (a) Noviembre 2003 a mayo 2006 (-16 a -116 m). (b) Noviembre 2007 a septiembre de 2009 (-20 a -118 m). La profundidad en metros, se representó con la variable [z].	27
4	Perfiles verticales promediados temporalmente de las componentes de velocidad rotadas (u_r , v_r) y sus desviaciones estándar ($u-\sigma$, $v-\sigma$) en la columna de agua (a) Noviembre 2003 a mayo 2006 (-16 a -116 m). (b) Noviembre 2007 a septiembre de 2009 (20 - 118 m). La profundidad en metros, se representó con la variable [z].	28
5	(a) Componentes de velocidad (u , v) promediadas verticalmente para noviembre de 2003 a mayo de 2006. (b) Corrientes rotadas a lo largo del eje de máxima varianza, para el mismo periodo. Valores positivos (negativos) indican flujo hacia dentro (fuera) del golfo.	32
6	(a) Componentes de velocidad (u , v) promediadas verticalmente para el periodo de noviembre de 2007 a septiembre de 2009. (b) Distribución vertical de las corrientes rotadas a lo largo del eje de máxima varianza, para el mismo periodo. Valores positivos (negativos) indican flujo hacia dentro (fuera) del golfo.	34
7	Promedios mensuales de las componentes de velocidad (u_m - v_m): a) Noviembre 2003-septiembre 2006. b) Noviembre 2007-septiembre 2009. c) Componente rotada y verticalmente promediada $\pm$ la desviación estándar (m/s) para el primer periodo. d) Igual que (c), pero el segundo.	36

8	Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) de las componentes rotadas al eje de máxima varianza para el primer periodo. (a) Modos espaciales. (b) Amplitudes de las serie de tiempo.	40
9	Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) de las componentes rotadas al eje de máxima varianza para el primer periodo. (a) Modos espaciales. (b) Amplitudes de las serie de tiempo.	41
10	Correlación vectorial de la corriente rotada al eje de máxima varianza entre los DA (~20 m) y DS de las corrientes geostróficas superficiales sobre un punto cercano al anclaje (8 km), para ambas series de tiempo: a) Primera periodo (arriba). b) Segunda serie (abajo). Se indicó el valor de la correlación [r], entre más cercano a 1, indica mayor similitud.	43
11	a) Topografía Dinámica Absoluta de los diarios promediados mensualmente (m), en dos puntos en la entrada al Golfo de California entre 1993-2013. Un punto peninsular (CP) y uno continental (ED2) (Ver Fig. 2). b) Diferencias de altura (Δh) entre ED2 – CP de la ADT para la superficie del mar (m).	46
12	Serie temporal (1993 – 2013) de las ADT mensuales, promediadas para un año típico en ED2 (línea roja) y CP (línea azul). Las líneas (--) indican el cambio temporal, respecto a las diferencias entre ambas localidades.	47
13	Elipses de variabilidad a partir de los datos diarios promediados verticalmente del anclaje, incluyendo ambos periodos en las cuatro estaciones del año. Los vectores promedio (rojo) y diarios (azul). a) Primavera, b) verano, c) otoño e d) invierno.	49
14	Corrientes geostróficas superficiales promedio para cada estación del año en una sección de la EGC a partir de los datos satelitales diarios [1993-2013]: a) Primavera, b) verano, c) otoño e d) Invierno.	50
15	Topografía Dinámica Absoluta de la superficie del mar promedio (1993-2013), a partir de datos diarios con 0.25 x 0.25° de resolución. La barra de colores indica las variaciones del nivel del mar y el círculo blanco (o) indica la posición del anclaje. Las fechas indican las corrientes geostróficas superficiales.	52
16	Promedio temporal (1993 – 2013) de las ADT y vectores de velocidad geostrófica superficial: a) enero, b) febrero c) marzo y d) abril. Se muestra la posición (o) del anclaje.	55
17	Ídem que la Figura 15 pero para: e) mayo, f) junio, g) julio h) agosto.	56

- 18 Ídem que la Figura 15 pero para: i) septiembre, j) octubre, k) noviembre 57
y l) diciembre.
- 19 Climatología estacional (1993-2013) de las Corrientes geostróficas
superficiales (vectores) y la raíz cuadrática media (color): (a) Primavera, 60
(b) verano, (c) otoño e (d) invierno.
- 20 Registro de series temporales (2004 - 2009): a) Datos diarios de la
corriente superficial a lo largo de la costa para los datos del anclaje (azul) 67
y de las corrientes geostróficas superficiales derivadas de altimetría
(negro). b) Datos diarios de las anomalías del Nivel de mar para Mazatlán
(negro), Manzanillo (rojo) y Acapulco (verde) obtenidas de mareógrafos
- 21 a) Primer modo espacial obtenido mediante las Funciones Empíricas
Ortogonales (EOF's) de las velocidades geostróficas generadas a partir de 68
la altimetría satelital. b) Amplitud de la serie de tiempo para el modo
(azul) y su ajuste armónico (rojo).
- 22 a) Segundo modo espacial obtenido mediante las Funciones Empíricas
Ortogonales (EOF's) de las velocidades geostróficas generadas a partid 69
de la altimetría satelital. b) Amplitud de la serie de tiempo para el modo
(azul) y su ajuste armónico (rojo).

1. Introducción

La costa noroccidental de México constituye la frontera sureste del giro anticiclónico del Pacífico Norte y es el límite noreste de la circulación ecuatorial hacia el oriente, por lo tanto, es la zona del arribo de aguas de origen sub-ártico y tropical (Wyrтки, 1967; López-Bojorquez, 1996; Fielder y Talley, 2006). Dicha zona, comprende gran parte de la zona de la entrada al Golfo de California (EGC). El Golfo de California (GC) es un mar semi-cerrado del Océano Pacífico subtropical (OP) localizado al NW de México. Se subdivide en diferentes regiones de acuerdo a sus características oceanográficas y fisiográficas. La Figura 1 muestra las características fisiográficas de la región sur y la entrada.

Muchas de las particularidades y características oceanográficas del GC se manifiestan a través de la interacción con el OP, con el que tiene comunicación abierta (~200 km de ancho, ~3.5 km de profundidad), lo que permite un factible intercambio de propiedades (Collins et al., 1997; Ripa, 1997). Aguas del Pacífico tropical (cálidas y de relativa salinidad) y aguas de origen Subártico (relativamente frías y de baja salinidad), ingresan con cierta estacionalidad al GC, las cuales contrastan con las aguas (más salinas y cálidas) del interior del golfo (Castro et al., 2000, 2006). La confluencia de aguas en la EGC produce complejos escenarios a través de cada estación del año, y modifica su estructura debido a las diferencias de temperatura y densidad entre masas de agua superficiales. Esto causa frentes que tienden a desarrollar estructuras de mesoescala como remolinos, chorros, y meandros, algo característico de la zona (Lavín et al., 2009; Collins et al., 1997, 2014).

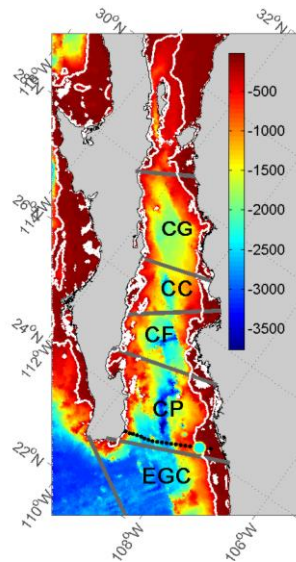


Figura 1. Cuencas en la región del Golfo de California. CG=Cuenca de Guaymas, CC=Cuenca Carmen, CF=Cuenca Farallón, CP=Cuenca Pescadero. EGC= Zona de la Entrada al Golfo de California. La sección marcada por (•) indica las posiciones hidrográficas de los cruceros PESCAR y el símbolo (•) indica la posición del anclaje (ver abajo). En color se indica la profundidad (m). Se incluye la isobata de 200 m en color blanco.

1.2 Circulación en la EGC

La circulación superficial en el Pacífico Oriental Tropical, entre Cabo San Lucas (CSL), Cabo Corrientes y la costa continental del golfo, consiste principalmente en una rama de la Corriente de California (CC) y Agua Superficial Tropical (AST). No obstante, caracterizado bajo un régimen complejo de distintos forzamientos remotos y procesos oceanográficos, actuando sobre la configuración abrupta del fondo (litoral). Por medio de observaciones directas durante verano (junio, 2003; junio, 2005), Lavín et al. (2006) reportaron las características de una corriente costera hacia el polo caracterizadas por un flujo ancho (90-180 km) y profundo (~400 m), con velocidades de ~0.15 – 0.30 m/s. Además, mostraron

que el flujo de la CC hacia el ecuador se desplaza hacia la costa continental, alimentada por los procesos de mesoescala frente a la EGC. Lo anterior, perjudica significativamente la circulación en superficie y permite la distribución de las masas de agua sobre el GC. Varios de los estudios realizados en el área de la región sur del GC (Collins et al., 1997; Pegau et al., 2002; Figueroa et al., 2003; Zamudio et al., 2008; Lavín et al. 2006; Lavín et al., 2013) destacan la importancia de los procesos de mesoescala sobre la confluencia de corrientes en la EGC. Kessler (2006) en su revisión de la circulación del Pacífico Oriental Tropical frente a México, plantea una interrogante sobre la circulación superficial en la EGC para indicar el escaso conocimiento de la dinámica regional (falta de datos oceanográficos en el área). Señala la importancia de conocer la dinámica superficial de la EGC, donde confluyen una rama de la CC en dirección sureste y la CCM que fluye hacia el polo. A través de las anomalías del nivel mar (ANM) entre Guaymas y Santa Rosalía, Ripa (1997) calculando velocidades geostróficas, determinó un constante forzamiento en la EGC causado por el OP (ingreso), que viaja de manera anticiclónica con velocidades máximas de 0.2 m/s para principios de Agosto.

A través de datos climatológicos de promedios mensuales de la temperatura superficial del mar (SST) de imágenes de satélite, Lavín et al. (2009) mostraron que entre finales de otoño y primavera las isotermas en el GC y el OP adyacente tienen una distribución zonal. Este patrón se interrumpe entre fines de mayo y mediados de julio, cuando las isotermas muestran un desplazamiento hacia el norte y tienden a distribuirse meridionalmente dentro del golfo. Lo anterior es debido en parte al calentamiento estacional y a un aparente calentamiento más rápido asociado a una corriente costera que

acarrea aguas de origen tropical hacia el polo, la cual está directamente ligada con la Corriente Costera Mexicana (CCM). La CCM se desarrolla desde el golfo de Tehuantepec hasta la EGC. Se intensifica por la influencia de ondas atrapadas a la costa y es más intensa durante los años El Niño (Lavín *et al.* 2006, Zamudio *et al.* 2007; Godínez *et al.*, 2010). Por medio de datos de altimetría satelital del periodo 1992-2008 y datos medidos durante diez campañas oceanográficas como parte del Programa Oceanográfico del Occidente de México (PROCOMEX), Godínez (2011) describió la circulación en el OP frente a México. El autor encontró que la circulación media está afectada por la presencia de un brazo de la CC que se curva hacia la EGC, el cual se divide en dos sub-ramas, una al sur y otra hacia la costa continental. Estas ramas están, separadas por una circulación ciclónica, producto de la dinámica de Sverdrup. El autor también encontró que la CCM se genera localmente por el rotacional del esfuerzo del viento, y mostró que la variabilidad de mesoescala en la circulación superficial, que representa ~30% de la varianza local, es tan importante como la variabilidad a escalas estacional e interanual.

Otro mecanismo de importancia que modifica los patrones de circulación en la región son las ondas atrapadas a la costa. Estas ondas interactúan con salientes rocosas y puntas, y actúan como mecanismo generador de los numerosos remolinos en la EGC (Zamudio *et al.* 2008). De igual manera, Godínez *et al.*, (2013) demostraron la importancia del rotacional del esfuerzo del viento local sobre la dinámica superficial de la EGC y enfatizaron la compleja interacción de la CCM y las irregularidades topográficas, las cuales generan una inestabilidad baroclínica (remolinos) y este mecanismo se ve reforzado por la llegada de ondas atrapadas a la costa de origen ecuatorial. Por último, sugieren que la variabilidad

mensual de la corriente y los cambios en la altura superficial del mar se deben principalmente a un intenso flujo hacia los polos próximo a la costa. Así como, la dominancia de un núcleo con baja (alta) salinidad entrando (saliendo) entre primavera-verano (otoño-invierno) por la boca del GC a lo largo de la costa (peninsular) continental (Zamudio et al., 2008).

Godínez et al., (2010), demostraron la importancia del rotacional del esfuerzo del viento local sobre la dinámica superficial de la EGC y enfatizaron la compleja interacción de la CCM y las irregularidades topográficas, las cuales generan una inestabilidad baroclínica (remolinos) y este mecanismo se ve reforzado por la llegada de ondas atrapadas a la costa de origen ecuatorial. Actualmente, se encuentra bien descrito como la CCM se desplaza hacia el polo, arribando hasta el GC, principalmente en verano (Lavín et al., 2006; Lavín et al., 2013). Para noviembre, Mascarenhas et al. (2004), sugiere intercambio de aguas y un flujo de ingreso de AST hacia la EGC. Collins et al. (2014), prueban que a finales de otoño, fuerte forzamiento horizontal es producido debido al intercambio de agua entre flujos salientes (entrantes) del GC (OP).

La influencia del viento sobre la circulación en el interior del GC muestra diferencias significativas respecto al OP adyacente. El viento en el OP tiene una fuerte componente del noroeste casi todo el año la cual se intensifica en primavera y parte del verano (Strub y James, 2002; Castro y Martínez, 2010). En el interior del GC, los vientos del noroeste dominan la mayor parte del año con velocidades de $\sim 0.8\text{-}0.12$ m/s, pero se debilitan (~ 0.5 m/s) e invierten a vientos del sureste a finales de primavera y el verano. Este

comportamiento está directamente relacionado con el Monzón de Norteamérica (Badán-Dangon, et al., 1989; Merrifield y Winant, 1989; Bordoni et al. 2004; Navarro-Labastida, 2013). Navarro-Labastida (2013) encontró en el sur del GC que tanto el viento zona, como el meridional se debilitan durante periodos de transición entre las condiciones dominantes de invierno y verano. En respuesta a los diferentes forzamientos, el nivel del mar en el EGC responde a los cambios en el viento y la flotabilidad. Existe una clara estacionalidad, con un máximo en verano y un mínimo en invierno. Mientras que las variaciones en el nivel del mar, se incrementan debido a un intercambio de calor que ocurre entre la EGC y el OP, resultando en un ambiente refrescante y fresco hacia el GC (Castro et al., 1994; Berón-Vera & Ripa, 2000).

A pesar de que los estudios mencionados anteriormente describen de forma adecuada las condiciones promedio estacionales en la entrada del golfo, están basados en bancos de datos (puntuales) hidrográficos, en modelos numéricos o anomalías del nivel del mar obtenidas por altimetría satelital de baja resolución temporal (semanal-mensual). Varios de los estudios describen las características de la circulación frente al OP mexicano y en zonas cercanas pero la descripción de una posible estacionalidad es aún incipiente. Por tanto, no proveen una descripción adecuada de la variabilidad temporal de corto período de la circulación tal que permitan entender de manera más adecuada la dinámica superficial. Por ejemplo, es necesario identificar e interpretar los pulsos y fluctuaciones que dominan el comportamiento espacio-temporal de la región, y de esta manera evaluar la variabilidad que generan sobre la circulación superficial.

En este trabajo se analizan series de tiempo de larga duración en la EGC (noviembre 2003 – septiembre 2009) obtenidas de observaciones directas sobre en la plataforma de Sinaloa, para estudiar la circulación su estacionalidad. Con el fin de lograr una mejor cobertura espacial y descripción de las corrientes que llegan a la plataforma de Sinaloa, el análisis de los registros del correntómetro se complementa con datos de Altura Dinámica Absoluta (ADT por sus siglas en inglés) de la superficie del mar obtenidas con satélite en el periodo enero de 1993 hasta diciembre del 2013. Adicionalmente, se hace uso de datos del nivel del mar a partir de mareógrafos sobre la zona costera ubicados en Acapulco, Gro. Manzanillo, Col. y Mazatlán, Sin., para la mismo periodo de la serie de tiempo del anclaje (Nov 2003 – Sep 09).

Objetivo General

- *Caracterizar los patrones de circulación superficial en la Plataforma de Sinaloa y Entrada del Golfo de California.*

Objetivos Particulares

1. Caracterizar la variabilidad temporal de las corrientes con énfasis en la escala estacional y las frecuencias bajas.
2. Caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la circulación superficial en áreas aledañas al anclaje.
3. Estudiar eventos de origen transitorio y su relación con señales remotas del nivel del mar.
4. Determinar la influencia relativa de los posibles forzamientos que determinan la variabilidad espacio-temporal.

HIPOTESIS

En el intercambio anual de agua entre el GC con el OP se manifiesta una compleja circulación, en el cual, las aguas que entran al golfo a través de la plataforma de Sinaloa, ocurren principalmente entre fines de primavera-verano y las aguas del golfo que fluyen hacia fuera, se presentan frecuentemente en invierno, y modulan cierta variabilidad estacional. Donde los principales forzantes y eventos de mesoescala intensifican y modifican el patrón de circulación que genera la confluencia entre aguas.

"La variabilidad espacio-temporal de la corriente superficial en la EGC responde al forzamiento del viento a escala estacional y se encuentra fuertemente afectada por el paso de ondas atrapadas a la costa ".

2. Datos y Métodos

2.1 Estructura del anclaje y datos de corrientes (ADCP)

Este estudio se basa en datos obtenidos por medio de las campañas oceanográficas PESCAR (PEgassus of the Sea of Cortés ARea), una colaboración conjunta entre UABC (IIO-FMC) y de la Naval Postgraduate School (NPS), iniciada desde 1992. Como parte de dicho programa se instaló un anclaje sobre la plataforma de El Dorado (ED) en Sinaloa (Figs. 1 y 2). Dicho anclaje fue ubicado sobre la isobata de ~180 m durante el periodo de Noviembre de 2003 a Septiembre de 2009, con un intervalo sin mediciones entre mayo de 2006 a noviembre de 2007. La estructura del anclaje consistió en una serie de instrumentos unidos por cables de acero y una cadena. Esta última se mantiene fija en el fondo por medio

de un peso muerto en el extremo inferior. El anclaje se mantiene en posición vertical por medio de boyas a diferentes profundidades. En el extremo superior, se encuentra la boya principal que soporta la estructura a una profundidad de ~40 m (Figura 2). Cercano al peso muerto se colocó un mecanismo liberador que permite recuperar los instrumentos al activarse una señal acústica. El perfilador de corrientes (ADCP) utilizado fue un Sontek de 250 kHz el cual se colocó por encima del liberador en sentido vertical a una profundidad de ~120 m. Se obtuvo el campo de velocidad de la corriente (magnitud y dirección) en celdas espaciadas cada 4 m hasta cerca de la superficie (~20 m). El intervalo de muestreo fue de 15 minutos, con un total de 25 capas de corrientes en profundidad.

2.2 Tratamiento previo

Los posibles errores de medición y fallas en la instrumentación se detectaron y corrigieron de manera subjetiva. Los escasos períodos sin datos fueron interpolados linealmente. Para garantizar la continuidad de las series de tiempo en la columna de agua se seleccionaron solamente los datos entre 20 y 120 m de profundidad. La dirección de las corrientes, referidas al norte magnético, fue corregida al norte geográfico. Para esto se le sumó el valor de la declinación magnética de 9.425° . El propósito de este estudio fue el análisis de las frecuencias bajas. Por tanto, se eliminaron de las series de tiempo de las componentes de velocidad mediante un Lanczos con frecuencia de corte de 36 horas (Emery & Thompson, 2003).

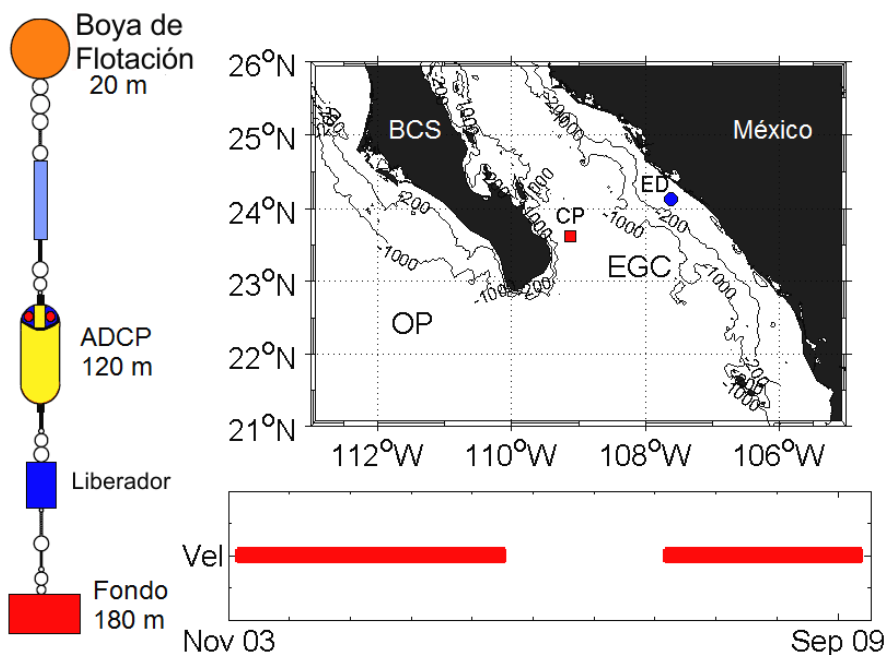


Figura 2. Localización del área de estudio en la Entrada al Golfo de California. Se incluye la posición del anclaje “El Dorado” (•, ED) sobre la plataforma de Sinaloa. En este punto y en la localidad de Cabo Pulmo (•, CP) frente a la península de Baja California se extrajeron registros de altimetría satelital de AVISO. Se anexa la longitud del registro temporal de muestreo del ADCP (abajo), así como el esquema del anclaje con los instrumentos instalados a su respectiva profundidad (izquierda).

2.3 Datos Satelitales

Para estudiar las escalas de variabilidad de las corrientes, se produjeron mapas del flujo geostrófico superficial en la región de estudio. Estos se construyeron a través de imágenes diarias de la Topografía Dinámica Absoluta (ADT). Los ADT contienen datos de la altura de la superficie del mar a partir un conjunto de datos satelitales de altimetría donde se integra la información de 4 satélites: *Jason-2/AltiKa*, *Jason-2/Cryosat-2*, *Jason-1-2/Envisat* y *Topex/Poseidón / ERS*. La topografía dinámica absoluta se obtiene al contrastar la

anomalía del nivel del mar medido por el altímetro con la topografía dinámica promedio. Esta última se estima a partir de observaciones de altimetría de varios años (1993-2013) con lo que se elimina el efecto del geoide (Rio et al., 2007). Los mapas de ADT se proveen con una resolución temporal diaria y espacial de $\frac{1}{4}^{\circ} \times \frac{1}{4}^{\circ}$ en una cuadrícula cartesiana (AVISO handbook manual, 2012). Los mapas diarios de la ADT fueron promediados mensual y estacionalmente para el mismo periodo del anclaje.

Comentario [A1]: Nota previa al siguiente párrafo. Aun cuando aviso provee mapas diarios, en realidad son mapas semanales centrados en el día especificado. El altímetro pasa cada 7-10 días por un punto por lo que la resolución temporal es de alguna manera ficticia en los datos que nos proveen. Mientras tengamos esto en cuenta no hay problema. Sobre todo porque en la introducción se menciona la importancia de tener datos con alta resolución temporal (horas) para el estudio de la variabilidad, pero que en realidad es de varios días.

Preguntar BIEN

2.4 Ajuste armónico

Dada una serie de tiempo $w(t)$, es posible aproximar su comportamiento mediante series de Fourier que involucren señales a diferentes frecuencias. Para el caso de un ajuste con periodicidades anuales y semianuales, la aproximación queda de la forma

$$w(t) = u_a \cos(\omega t - \phi_a) + u_s \cos(2\omega t - \phi_s)$$

Donde u_a y u_s son las amplitudes anual y semianual respectivamente, con frecuencia anual $\omega = 2\pi / 365.25$, t es el tiempo, ϕ_a y ϕ_s son las fases anual y semianual respectivamente. Los valores de amplitud y fase se determinan en el sentido de mínimos cuadrados.

3. Métodos

3.1 Estadística Básica

Una vez que se realizó el tratamiento preliminar de los datos de corrientes tanto del anclaje como del satélite, se realizaron cálculos de estadísticos básicos: máximos (mínimos), promedios y desviación estándar para cada una de las componentes de velocidad de datos. Se generaron promedios temporales para los datos satelitales y por

profundidades para las componentes de velocidad de los datos obtenidos por el ADCP (anclaje). El análisis de correlación cruzada de dos series vectoriales permite estudiar la similitud en la co-variabilidad de las series. En este trabajo se obtuvo la correlación vectorial resultante entre los registros de corrientes del anclaje y aquellos de velocidad geostrófica calculados a partir de los datos del altímetro como (Kundu y Allen, 1976).

$$C_{vec}(x1, x2, r) = \frac{\bar{w1}(t)^* \bar{w2}(t+r)}{[(\bar{w1}(t)^* \bar{w1}(t))^{\frac{1}{2}} (\bar{w2}(t)^* \bar{w2}(t))^{\frac{1}{2}}]}$$

Donde w1 y w2 representan la forma compleja de la velocidad en cada serie de tiempo, * denota el complejo conjugado, r es el desfase o retraso en el tiempo. La amplitud de C_{vec} representa el coeficiente de correlación entre las dos series de tiempo.

3.2 Altimetría Satelital y Corrientes Geostróficas

Con el fin de reducir posibles errores potenciales en los datos satelitales que surgen de la alta incertidumbre de los sensores, se les retiró de la serie temporal tanto el promedio temporal como el ciclo anual de la ADT, de acuerdo a lo descrito por Strub y James, (2002) y Willis et al., (2004). Las componentes de velocidad obtenidas de los datos del anclaje fueron tratadas con el procedimiento anterior, para su posterior correlación. En cada celda de la cuadrícula mostrada en la figura 1a las componentes de velocidad zonal y meridional de la velocidad geostrófica superficial se estimaron con las relaciones:

$$U_s = \frac{-g \Delta h (ADT)}{f \partial y} \quad V_s = \frac{g \Delta h (ADT)}{f \partial x}$$

donde g es la aceleración de la gravedad, f el parámetro de Coriolis $f = 2\Omega \sin(\Phi)$; Φ = latitud, Ω = velocidad angular de la tierra. El parámetro h representa el ADT (m), y ∂x y ∂y son distancias que representan la resolución espacial de la malla.

3.3 Elipses de Variabilidad

Para facilitar su representación, los datos de velocidad de las corrientes se rotaron a los ejes de máxima variabilidad (Emery y Thompson, 2002). Se construyeron elipses de variabilidad estacionales para las corrientes promedio (20-120 m) del anclaje en cada estación del año. Dado un registro de corrientes con componentes u y v , sus anomalías temporales se calcularon como:

$$u' = -\bar{u} ; v' = -\bar{v}$$

Posteriormente se construyó una matriz de covarianza, para encontrar los ejes principales, y se resuelve por la solución de la ecuación cuadrática o eigenvalores.

$$\det[C - \lambda I] ; C = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u'v'(\text{tn})$$

donde C es la covarianza de los datos, I es la matriz identidad y λ los eigenvalores, que son las raíces de las varianzas de los cambios de velocidad a lo largo de los ejes mayor y menor de una elipse componente obtenidos por:

$$\frac{\lambda u}{\lambda v} = \frac{1}{2} \left\{ (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2) \pm \left[(\bar{u}'^2 - \bar{v}'^2) + 4(\bar{u}'\bar{v}')^2 \right]^{1/2} \right\}$$

El valor positivo se utiliza para calcular λu y el valor negativo para λv . La orientación del eje mayor (λu) difiere 90° con respecto al menor (λv). El ángulo (θp) de orientación del eje principal se obtiene mediante:

$$\theta p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\bar{u}'\bar{v}'}{\bar{u}'^2 - \bar{v}'^2} \right] \text{ en el intervalo } \frac{-\pi}{2} \leq \theta p \leq \frac{\pi}{2}$$

La relación entre las magnitudes de los ejes mayor y menor de la elipse componente se conoce como excentricidad, y está dada por:

$$\beta = \frac{\lambda u}{\lambda v}$$

Los valores de excentricidad cercanos a 1 implican una corriente casi rectilínea mientras que la corriente cerca de cero implica una alta variabilidad de orientación. La principal utilidad de este análisis es para obtener la orientación principal del flujo para cada una de las profundidades y a lo largo de cada estación del año. Las elipses gráficas se construyeron a partir de la magnitud de los ejes principales y su inclinación. Como una herramienta para indicar la tendencia direccional o dominio de la corriente, junto a las elipses de variabilidad se incluyeron los vectores medios diarios por estaciones del año del Anclaje y DS, así como un vector medio.

3.4 Funciones Empíricas Ortogonales

Con el objeto de estudiar la variabilidad de las corrientes en la plataforma de Sinaloa se aplicó la técnica de Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) a los datos rotados de la componente rotada al eje de máxima varianza (u_r). El análisis de FEO's es un método estadístico que se utiliza para descomponer un conjunto de datos en una combinación lineal no correlacionada de funciones separadas originales. En muchas aplicaciones de oceanografía, los datos en espacio y tiempo $D(z, t)$ se descomponen en funciones separables de tiempo y espacio clasificados de acuerdo a su varianza (Emery y Thompson, 2002). La descomposición consiste en expresar las observaciones de algún campo muestreado D , como una transformación lineal homogénea o rotación de coordenadas.

Matemáticamente se expresa como: $D = AF$; $D_{ij}(z, t) = \sum_{i=1}^m a_i(t) f_{ij}(z)$

Donde F es una matriz ortonormal $m \times m$, tal que $I = FF'$, F' es la transpuesta de F , I la matriz identidad. Esta matriz F representa a los eigenvectores o los modos espaciales. La matriz A

es una matriz $n \times m$, con elementos a_{ij} , que satisface a la ecuación. El subíndice i , enfatiza que A no es función del espacio, sólo del tiempo, y que sobre un tiempo dado es un vector renglón A_i con elementos a_i ($i=1,2,\dots,m$) los cuales son constantes sobre toda la región. Los valores de a_i son llamados amplitudes o modos. Los datos que se utilizan para este análisis son del anclaje, rotados al eje de máxima varianza y consisten de una secuencia en periodo de mediciones de los datos, representadas como $D(z,t)=\{D_i\}$ $i=1,2,\dots,n$ donde el subíndice i denota los tiempos.

4. Resultados

En la primera sección se presentan la estructura vertical de las corrientes promediadas temporalmente en la columna de agua, desviaciones estándar y componentes rotadas al eje de máxima varianza para las series de tiempo del anclaje ubicado sobre la PS. Después se presentan las series de tiempo y distribución espacial para los modos más relevantes de las FEO's. En la segunda sección se muestran las relaciones entre los datos satelitales y las corrientes obtenidas *in situ* (correlación vectorial), así como las elipses de variabilidad. A continuación se exponen los resultados de los datos provenientes de la altimetría satelital y describe las fluctuaciones del nivel del mar en zonas aledañas al anclaje (ajuste armónico). Se presentan las zonas con mayor variabilidad a través de la raíz cuadrática media (r.c.m.) en áreas de la entrada al golfo. Por último, se analizan los rasgos principales en el comportamiento de las corrientes, efectos producidos por fluctuaciones en el nivel del mar, agentes forzantes y eventos transitorios para caracterizar la circulación oceánica de la EGC.

4.1 Perfil medio de velocidad

El perfil vertical (temporalmente promediado) de las componentes de velocidad (u , v) y su desviación estándar, para ambos periodos de medición del anclaje, se muestra en la Figura 3. En el primer periodo el perfil medio de la componente u en toda la columna mostró un flujo negativo (al oeste), con velocidades de ~ -0.05 m/s por debajo de 50 m y disminuyen hacia las capas superiores (~ 0.028 m/s a 15 m de profundidad). Esta componente presentó gran semejanza (signo contrario) a la componente de u_r (Fig. 4), y parece alinearse a la isobata de ~ 180 m. Dicha isobata en la posición del anclaje presenta una curvatura (-30°) hacia el NO y (Fig. 1).

La componente v , exhibió valores positivos (norte), lo que indica flujo hacia el noroeste considerando ambas componentes. Su intensidad fue más baja que u y mantuvo velocidades medias de ~ 0.03 m/s, casi constantes en toda la columna. En el segundo período (Fig. 3b), el promedio temporal de la componente u fue más intensa en toda la columna que en el primer periodo. Por ejemplo, la corriente entre 35 – 60 m de profundidad fluctuó entre -0.065 y 0.1 m/s, mientras que la componente v mostró un ligero incremento (>0.01 m/s), por arriba de 50 m de profundidad. Por otro lado, la variabilidad, asociada a la desviación estándar, fue también mayor que el promedio en ambos periodos, (Figura 3 - Tabla I). Para el primer periodo, la máxima variabilidad espacial (~ 0.12 m/s) ocurrió cerca de la superficie para la componente u , la cual mostró un flujo medio con fuertes corrientes, caracterizados por una estructura verticalmente persistente.

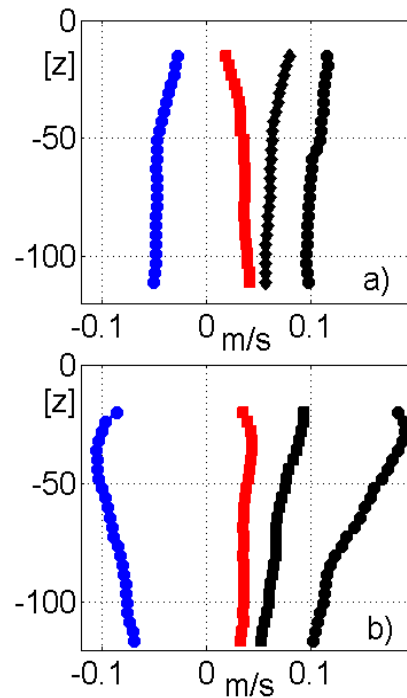


Figura 3. Perfiles verticales promediados temporalmente de las componentes de velocidad (u , v) y su desviaciones estándar ($u \sigma$, $v \sigma$): (a) Noviembre 2003 a mayo 2006 (-16 a -116 m). (b) Noviembre 2007 a septiembre de 2009 (-20 a -118 m).

Sin embargo, para el segundo periodo, la variabilidad de las componentes u y v se intensificaron significativamente comparado con el primer periodo, con mayor efecto en superficie. Posiblemente, por el hecho de que el segundo periodo fue más corto, por lo que, al presentar altas desviaciones y obtener el promedio, se produjo menor (mayor) compensación en las velocidades (aproximadamente 8 meses menos). Lo anterior se analizara más adelante en detalle.

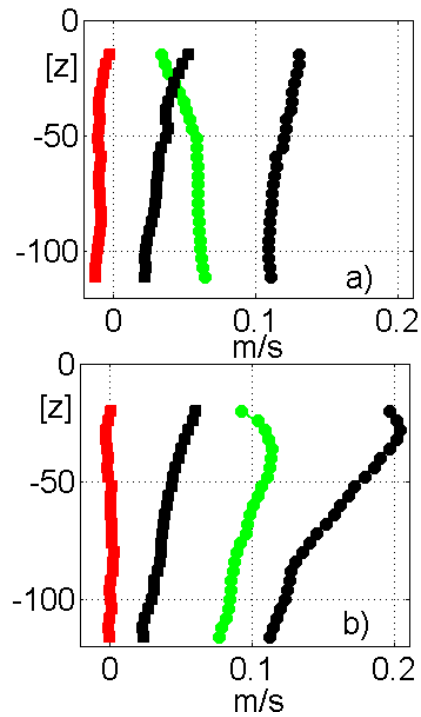


Figura 4. Perfiles verticales promediados temporalmente de las componentes de velocidad rotadas (u_r , v_r) y sus desviaciones estándar ($u-0$, $v-0$) en la columna de agua (a) Noviembre 2003 a mayo 2006 (-16 a -116 m). (b) Noviembre 2007 a septiembre de 2009 (20 - 118 m). La profundidad en metros, se representó con la variable $[z]$.

En la Figura 4 se presenta el promedio vertical de las velocidades rotadas al eje de máxima varianza. Se observó un comportamiento similar entre el flujo medio de la componente E-O y la componente rotada (u_r). Cerca del fondo, la intensidad de la corriente rotada al eje de máxima varianza aumentó (disminuyó) en el primer (segundo) periodo, con un flujo máximo de ~ 0.12 m/s a 35 m de profundidad. En el primer periodo de las observaciones, la componente rotada a lo largo del golfo, mostró un ligero incremento hacia las capas más profundas.

Como es de esperar, la componente de mínima varianza (eje menor de la elipse componente) fue más débil y se orientó hacia el oeste (Fig. 4). En contraste, el perfil promedio durante el segundo periodo exhibió las menores velocidades registradas (Tabla 1) cercanas a cero y un flujo hacia la cabeza del GC. Destacó velocidades máximas < 0.1 m/s y mínimo > 0.1 m/s a lo largo de toda la columna. Cabe mencionar la intensa señal registrada a una profundidad de ~ 35 m en las velocidades de la componente a lo largo del golfo (u_r), destacó una magnitud media ~ 8 veces mayor que el flujo a través del golfo (v_r) para el segundo periodo (~ 0.12 m/s).

Tabla I. Estadística temporal de las velocidades (u_m - v_m) del anclaje (ambos periodos) y de las componentes rotadas u_r (a lo largo del golfo) con profundidades espaciadas cada 16 m. θ es el ángulo (azimut) del eje de máxima varianza. El signo (+) en u_r indica un flujo hacia dentro del GC. Los datos dentro del paréntesis corresponden al segundo periodo.

Z (m)	U _m			V _m m/s			U _r			θ
	Máx	Media	Std	Máx	Media	Std	Máx	Media	Std	
20	<u>0.38</u>	-0.04	0.12	<u>0.37</u>	0.04	0.08	<u>0.63</u>	0.06	0.13	-29
	(0.46)	(-0.09)	(0.18)	(0.38)	(0.03)	(0.09)	(0.94)	(0.09)	(0.20)	(22)
36	<u>0.43</u>	-0.05	0.11	<u>0.37</u>	0.04	0.07	<u>0.55</u>	0.06	0.13	-28
	(0.31)	(-0.1)	(0.18)	(0.40)	(0.04)	(0.09)	(0.91)	(0.11)	(0.20)	(-22)
52	<u>0.36</u>	-0.05	0.11	<u>0.38</u>	0.04	0.06	<u>0.59</u>	0.06	0.12	-28
	(0.29)	(-0.1)	(0.16)	(0.39)	(0.04)	(0.08)	(0.85)	(0.11)	(0.17)	(-22)
68	<u>0.31</u>	-0.05	0.1	<u>0.35</u>	0.04	0.06	<u>0.57</u>	0.06	0.11	-29
	(0.31)	(-0.09)	(0.14)	(0.31)	(0.04)	(0.07)	(0.79)	(0.1)	(0.15)	(-22)
84	<u>0.19</u>	-0.05	0.1	<u>0.31</u>	0.03	0.06	<u>0.48</u>	0.06	0.11	-29
	(0.22)	(-0.08)	(0.12)	(0.26)	(0.04)	(0.06)	(0.68)	(0.09)	(0.13)	(-26)
100	<u>0.21</u>	-0.05	0.1	<u>0.27</u>	0.03	0.06	<u>0.42</u>	0.05	0.11	-29
	(0.20)	(-0.08)	(0.11)	(0.23)	(0.04)	(0.06)	(0.57)	(0.08)	(0.12)	(-26)
116	<u>0.23</u>	-0.03	0.1	<u>0.24</u>	0.02	0.06	<u>0.4</u>	0.03	0.11	-29
	(0.21)	(-0.07)	(0.1)	(0.19)	(0.03)	(0.05)	(0.47)	(0.08)	(0.11)	(-26)
$\bar{X}$	<u>0.31</u>	-0.03	0.1	<u>0.33</u>	0.03	0.06	<u>0.52</u>	0.05	0.12	-29
	(0.28)	(-0.09)	(0.14)	(0.32)	(0.04)	(0.07)	(0.75)	(0.09)	(0.16)	(-24)

Lo anterior no fue evidente en la primera parte del registro, ya que la estructura vertical destacó señales promedio espacialmente similares. Sin embargo, la alta desviación estándar de u_r en ambos periodos indicó mayor variabilidad en la porción superficial del anclaje, ya que las bajas desviaciones en v_r señalaron la débil presencia que manifiesta la corriente rotada a eje de máxima varianza del GC. Esta conducta radica en cambios en la orientación del flujo hacia el noroeste (sureste), y repercute en la frecuencia de los pulsos de entrada (salida), lo que sugiere un flujo vertical dominado por corrientes paralelas al GC, y en menor grado, por un flujo (perpendicular) entre la península y el continente.

En general, la estructura vertical de las corrientes promediadas temporalmente, mostró un flujo aparentemente con características barotrópicas en ambos periodos de medición y con una gran variabilidad. Como se mostrará enseguida, los registros son el resultado de una compleja secuencia de pulsos alternantes de entrada (salida), los cuales desplazan la corriente sobre toda la columna de agua en una misma dirección. El máximo en la componente u_r se observó a 30 m (120 m) y disminuyó (aumentó) respecto a la profundidad para el primer (segundo) periodo. La componente v_r denotó velocidades entre 4 a 8 veces menor que la componente u_r , un flujo débil y alineado perpendicular a la costa (Tabla I). La desviación estándar de la componente u_r (v_r) duplicó al flujo medio obtenido y exhibió un incremento (disminución).

4.2 Series de tiempo

4.2.1 Noviembre 2003 – Mayo 2006

Las corrientes filtradas y promediadas verticalmente en la columna de agua en el primer periodo de observaciones se muestran en la Figura 5a, mientras que en la Figura 5b se incluye la evolución temporal de la estructura vertical de las corrientes rotadas a lo largo del eje de máxima varianza. Con el propósito de determinar la estacionalidad, se agruparon cada 3 meses, comenzando a partir de diciembre para invierno y continua así hasta otoño (sep, oct, y nov), respectivamente. Se observa que el flujo verticalmente promediado de las componentes de velocidad (Fig. 5a), mostró un patrón de circulación predominante hacia el interior del GC, con una menor contribución de la corriente hacia el sureste, principalmente para los meses de invierno y primavera (Fig. 5a). En la mayor parte de la columna de agua ($\sim 3/4$) se detectó una alternancia de pulsos de distinta magnitud y duración (Fig. 5b). La serie de pulsos mostraron un incremento en la velocidad del flujo medio (<0.3 m/s), con alta persistencia en los pulsos orientados hacia el noroeste (sureste).

Durante junio de 2004 (Fig. 5a), la componente u (v) alcanzó su máximo ~ -0.45 (0.35) m/s (flujo de entrada, hacia el NO). Mientras que para los meses de noviembre y diciembre del mismo año, la velocidad máxima en u (v) fue de ~ 0.25 (-0.15) m/s (flujo de salida, hacia el SE), respectivamente. Se detectó la presencia de ~ 15 pulsos negativos (positivos) en el flujo promediado verticalmente para u (v) a través de los 30 meses analizados, con una duración de entre ~ 2 y 5 semanas (Figura 5a), destaca la alta variabilidad en la señal. En estos periodos la corriente se intensificó significativamente (<0.3 m/s) y manifestó en conjunto, una prominente dirección hacia adentro del GC, lo que indica el ingreso de aguas provenientes del Pacífico.

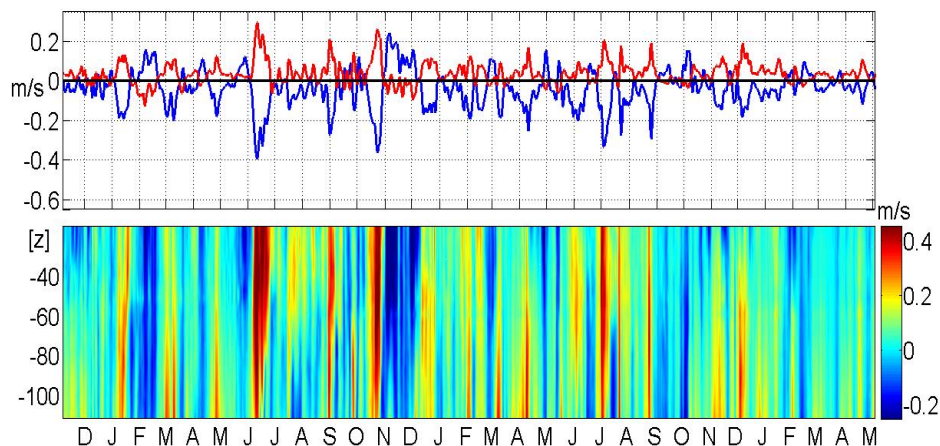


Figura 5. (a) Componentes de velocidad (u , v) promediadas verticalmente para noviembre de 2003 a mayo de 2006. **(b)** Componente de la corriente a lo largo del eje de máxima varianza. Valores positivos (negativos) indican flujo hacia dentro (fuera) del golfo.

La estructura vertical de la componente de la corriente rotada al eje de máxima varianza, mostró que el flujo al interior-exterior es principalmente barotrópico a través de pulsos alternados hacia adentro (afuera) del golfo con mayor (menor) variabilidad (Figura 5b). Cabe mencionar, la importancia que destacó la presencia de eventos donde el flujo exhibió un patrón distinto respecto a la estructura vertical anteriormente descrita. Primero, entre 40-80 metros de profundidad, un cambio en el sentido del flujo principalmente en julio, agosto, septiembre y en menor grado en invierno. Segundo, únicamente para los meses de junio, julio y agosto, la componente rotada mostró un claro patrón de comportamiento en toda la columna, la cual se dirigió hacia dentro del golfo destacando máximos de ~ 0.5 m/s para el mes de junio del 2004.

Esta condición se repite para algunos meses (enero, septiembre y a finales de octubre para el 2004; febrero, marzo, agosto y entre noviembre-diciembre del 2005), con pulsos de menor magnitud presentes en toda la columna de agua (Fig. 5b). Entre los meses

de noviembre y diciembre del 2004, un pulso relativamente intenso hacia afuera del golfo se observó), en las velocidades rotadas al eje de máxima varianza (Fig. 5b). Lo anterior, propicia una corriente orientada al sureste, alcanzando velocidades ~ -0.3 m/s.

4.2.2 Noviembre 2007– Septiembre 2009

El patrón temporal de las corrientes diarias verticalmente promediadas para el segundo periodo de mediciones en el anclaje (Fig. 6a), mostró en general flujos más intensos que el primer periodo de mediciones en 2003-2006, sobre todo en los veranos de 2008 y 2009. Así mismo, se observó un debilitamiento de las corrientes hacia fines de otoño e invierno. Por otro lado se observó alta persistencia de los flujos en dirección noroeste (hacia el interior del GC), los cuales fueron más evidentes y de mayor intensidad que en el primer periodo. Los diferentes pulsos alternados hacia dentro del Golfo (noroeste) y hacia afuera (sureste) caracterizaron al flujo verticalmente promediado (Fig. 6a).

Las diferencias en las características de ambos períodos sugieren que la circulación está relacionada con otras oscilaciones diferentes a la estacional (Tabla II). Aunque en general la circulación es de tipo barotrópica, se registraron eventos con características baroclínicas. En el invierno de 2007–2008 se detectaron flujos en direcciones opuestas, con velocidades de ingreso (salida) de ~ 0.3 m/s (-0.3 m/s) en la parte superior (inferior) de la columna de agua (Tabla II). Asimismo, la estructura vertical se comportó similar para los meses de marzo y abril del 2009. Durante verano de 2008, la corriente manifestó la velocidad más intensa registrada de los dos periodos, y alcanzó máximos de hasta ~ 0.8 m/s.

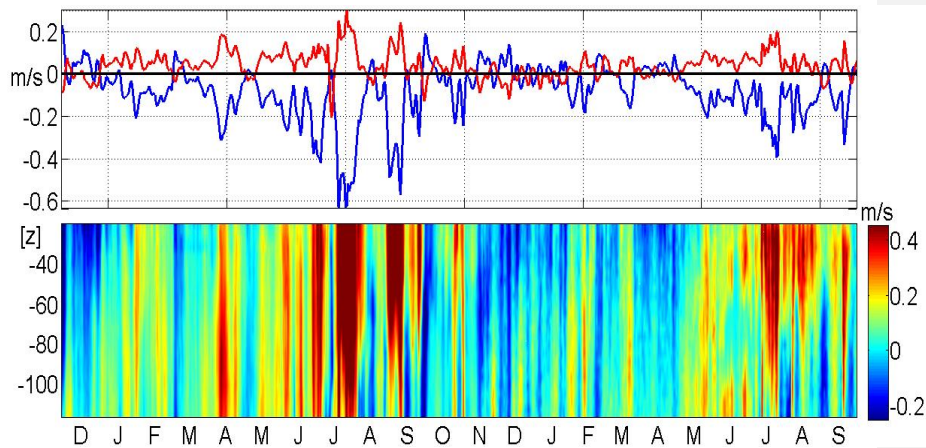


Figura 6. (a) Componentes de velocidad (u , v) promediadas verticalmente para el periodo de noviembre de 2007 a septiembre de 2009. **(b)** Distribución vertical de las corrientes rotadas a lo largo del eje de máxima varianza, para el mismo periodo. Valores positivos (negativos) indican flujo hacia dentro (fuera) del golfo.

La estructura vertical rotada al eje de máxima varianza en el segundo periodo de mediciones mostró la interacción de aguas en forma de pulsos alternados hacia el exterior (interior) del golfo. De igual manera, la mayor variabilidad en la corriente se mostró en la mitad superior de la columna (Figura 6b), pero destacó la alta variabilidad en toda la vertical. Flujos de salida de $\sim 5 - 20$ días de duración se evidenciaron para toda la columna de agua y exhibieron una corriente persistente hacia el sureste a lo largo de ambos periodos. Por lo que es evidente que la estructura vertical se modifica y varía estacionalmente. Para los meses de junio, julio y agosto de todos los años, la componente meridional mostró un intenso pulso de larga duración hacia dentro del golfo. En este periodo, la componente zonal (meridional) alcanzó velocidades de hasta ~ -0.8 (0.4) m/s para el mes de julio del 2008 (Fig. 6b). Las altas fluctuaciones de las velocidades observadas, posiblemente estén también asociadas a tormentas tropicales y/o al paso de

ondas atrapadas a la costa. Conforme aumentó la profundidad, el flujo disminuyó su intensidad ligeramente en ciertos meses (agosto, septiembre y diciembre), pero se mantuvo constante en junio-julio y se invirtió hacia dentro del golfo a mediados de febrero y finales de septiembre de 2008, con una magnitud media de ~ 0.1 m/s (0.15 m/s) en las direcciones a lo largo y perpendicular a la entrada del golfo, respectivamente.

Con el propósito de investigar si se detecta algún patrón estacional en los flujos, los registros de los anclajes se promediaron mensualmente y verticalmente (Figura 7). En el primer periodo, la corriente promedio mostró alta persistencia hacia el noroeste, la mayor parte del año (Fig. 7a), donde la componente meridional (zonal) del flujo se orientó hacia el norte (oeste). Los valores más altos ocurren desde principios de junio (~ 0.12 m/s) hasta finales de agosto. A mediados de febrero, la corriente presentó un flujo débil orientado al este, al igual que en noviembre, aunque este último fue al noreste. En el segundo periodo, las componentes de velocidad promediadas mensualmente mostraron un patrón similar que el primer periodo (Fig. 7b.). El flujo más intenso ocurrió entre mayo y agosto, con máximo en julio ($u \sim 0.25$ m/s, $v \sim 0.1$ m/s). Solo entre octubre y diciembre el flujo medio fue hacia el sureste. El flujo en la componente v presentó una señal muy similar respecto al primer periodo, difieren entre noviembre y febrero. Los promedios mensuales de la componente rotada al eje de máxima varianza, en ambos periodos, resultó positiva durante todo el año que representa un flujo hacia el interior del golfo (Fig. 7c y 7d). Destaca un incremento del flujo en el verano (junio-agosto) en ambos periodos, aunque más débil en los veranos 2004-2005 que 2008-2009. El máximo en el primer periodo ocurrió en junio (0.15 m/s) y en julio en el segundo periodo (<0.25 m/s).

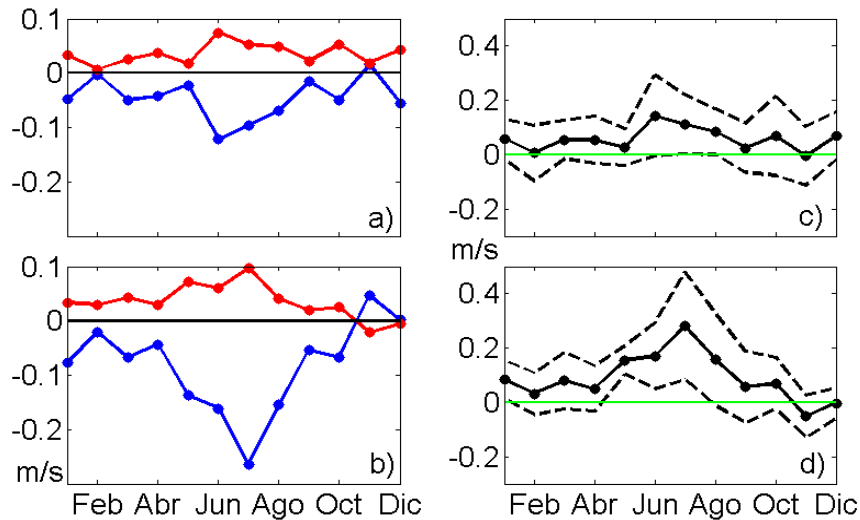


Figura 7. Promedios mensuales de las componentes de velocidad verticalmente promediadas ($u_m - v_m$): **a)** Noviembre 2003 - septiembre 2006. **b)** Noviembre 2007 - septiembre 2009. **c)** Componente rotada al eje de máxima varianza y verticalmente promediada $\pm$ la desviación estándar (m/s) para el primer periodo. **d)** Igual que (c), pero para el segundo periodo.

Es importante notar la alta variabilidad del flujo a lo largo del año (Figs. 7c, 7d), por ejemplo, en el primer periodo las fluctuaciones asociadas a la desviación estándar fueron entre 0.05-0.1 m/s, de tal forma que al restarle al promedio la desviación estándar resultaron valores negativos en casi todo el año, lo cual indica que el flujo podría cambiar de signo en la mayoría de los meses, como se observó anteriormente (Figs. 5-6), y sobre todo en otoño-invierno. Lo anterior es similar para el segundo periodo, aunque las fluctuaciones fueron mayores. En general, se destaca un flujo positivo de larga duración (finales de mayo hasta septiembre, incluso hasta finales de octubre). Mientras que para el resto del año (Fig. 7c-d), un flujo débil en ambos registros y alta variabilidad ($>0.05 \pm 0.15$ m/s), lo cual fue más evidente entre a partir de finales de febrero hasta octubre.

Tabla II. Promedios mensuales de las componentes verticalmente promediadas de velocidad (m/s) respecto a la capa superficial del anclaje (~ 20 m) a lo largo del golfo (u , u_r) y ancho del golfo (v , v_r), para ambos periodos de medición. En color rojo se destacan los valores extremos.

Mes	<i>1^{er} periodo</i>			<i>2^{do} periodo</i>		
	Um	Vm	Ur	Um	Vm	Ur
Ene	-0.05	0.03	0.07	-0.08	0.034	0.07
Feb	-0.03	0.01	0.01	-0.02	0.03	0.08
Mzo	-0.05	0.03	0.07	-0.07	0.043	0.01
Abr	-0.04	0.04	0.09	-0.04	0.03	0.08
May	-0.02	0.02	0.07	-0.14	0.072	0.05
Jun	-0.12	0.07	0.15	-0.16	0.06	0.12
Jul	-0.10	0.05	0.11	-0.26	0.1	0.2
Ago	-0.07	0.05	0.08	-0.15	0.04	0.17
Sep	-0.02	0.02	0.09	-0.05	0.02	0.13
Oct	-0.05	0.05	0.15	-0.07	0.026	0.1
Nov	0.02	0.02	0.11	0.05	-0.2	0.08
Dic	-0.06	0.04	0.09	0.002	-0.005	0.06
Media	-0.05	0.04	0.1	-0.08	0.04	0.1

La marcada variabilidad en u_r , posiblemente se deba a la presencia de eventos, ya sea transitorio (huracanes) o algún agente forzante sobre la EGC, tal como el campo de viento, los cuales se involucran drásticamente en la variabilidad de la señal, como respuesta a ciertos agentes forzantes. Se encontró una conducta estacional notable (débil) en el promedio temporal mensual de la corriente para el segundo (primer) periodo del estudio. Entre primavera-verano un flujo positivo (~ 0.1 m/s) caracterizó la corriente media del primer periodo. Mientras que el resto del año se exhibió un flujo negativo (al igual que para el mes de mayo).

4.2.3 Variabilidad espacio-temporal del anclaje (FEO's)

Con el propósito de investigar características más detalladas en la estructura vertical y temporal del campo de corrientes del anclaje El Dorado, se aplicó la técnica de FEO a las anomalías de la componente rotada al eje de máxima varianza (u_r , eje principal), y a cada período de observaciones por separado. La serie temporal o amplitudes se normalizaron al máximo absoluto para cada modo. Posteriormente, dicha normalización fue multiplicada por la estructura espacial o eigenvectores. Solo se presentan los primeros dos modos, ya que estos explican más del 90 % de la varianza.

El 1^{er} modo del primer periodo, resultó con el 82% de la varianza. La estructura vertical tuvo solo valores positivos (Fig. 8a), casi constantes en los primeros 60 m, y disminuyó hacia la capa más profunda (~ 115 m), mientras que la serie temporal, mostró gran variabilidad, donde se presentaron una serie de pulsos o eventos alternados que indican flujos de entrada (salida) en toda la columna. Sin embargo, representa la señal estacional. Esto puede verse claramente en la serie temporal con dos picos por año que sugiere que la corriente tiene tanto señal anual como semi-anual (Fig. 8b). Los pulsos de entrada en general fueron más intensos, destacando los de junio y octubre de 2004, así como fines de junio a mediados de julio de 2005, los cuales alcanzaron velocidades mayores de ~0.3 m/s por arriba de 60 m de profundidad y se mantuvieron alrededor 3 semanas.

Otros pulsos intensos de menor duración (≤ 2 semanas) ocurrieron en septiembre de 2004, fines de julio y fines de agosto de 2005. Entre los flujos (pulsos) de salida que destacan; enero-febrero y noviembre-diciembre de 2004, con velocidades máximas de > 0.25 m/s y duración de ~ 3 semanas. De menor intensidad (máximo ~ 0.13 m/s) y duración (< 2 semanas) destacan; marzo, abril y mayo de 2004, febrero y fines de abril de 2005, entre otros.

El 2^{do} modo resultó con el 15 % de la varianza, cuya estructura vertical tuvo valores negativos en los primeros 60 m y positivos en el resto de la columna. Las amplitudes fueron más débiles que el primer modo y mostraron también un patrón complejo de flujos alternados. Por ejemplo; en enero de 2004, el flujo fluctuó de negativo (positivo) los primeros 60 m (60-115 m), con máximos de 0.15 m/s (0.15 m/s) a 20 m (115 m) de profundidad. En junio de 2004, el flujo fue intenso (máximo < 0.25 m/s) y hacia dentro del golfo por arriba de 60 m, pero cambió hacia fuera del golfo para profundidades < 60 m. Estas características (aunque de menor intensidad) se repitieron entre julio-septiembre de 2004 y julio de 2005. Por otro lado destacan los pulsos de noviembre y diciembre de 2004: aquí sobresalen flujos hacia fuera del golfo arriba de 60 m y se invierten a mayor profundidad. Es importante mencionar la profundidad donde ocurre la inflexión (~ 60 m), la cual pudiera delimitar la circulación superficial (subsuperficial) en la boca y golfo de California. Además, la profundidad a la cual la dinámica interanual se separa en dos capas; en la capa superior aguas tropicales afectadas por efectos de El Niño y en capas por debajo del punto de inflexión la intrusión de la CC, reforzada mediante el forzamiento del viento sobre la punta de la península.

El segundo periodo mostró una estructura muy similar al primer periodo. Tuvo un 85.6% de la varianza para 1^{er} modo, cuya estructura vertical mantuvo valores positivos en la columna (Fig. 9a), con máximos entre 20-40 m y disminuyendo hacia mayor profundidad (~ 115 m). La amplitud (Fig. 9b) mostró también gran variabilidad con fuertes pulsos, incluso mayor que el primer periodo, aunque aparentemente se detectó cierta estacionalidad, donde los pulsos se incrementaron hacia el verano. Por ejemplo, entre fines de marzo y principios de abril del 2008, se observa un pulso de ~ 2 semanas con máximos de 0.25 m/s a ~30 m de profundidad. En junio alcanzó los 0.4m/s y con la misma duración, pero durante julio el flujo rebasó los 0.7 m/s entre 20-40 m de profundidad y disminuyó en las capas más profundas. Otro evento pero de menor intensidad (~ 60 m/s) ocurrió en agosto, y otro más débil en septiembre. Posteriormente, desde octubre de 2008 hasta fines de marzo de 2009 el flujo se debilitó y destacó una corriente negativa (hacia fuera del golfo).

El 2^{do} modo del segundo periodo resultó con el 11.4 % de la varianza, cuya estructura vertical tuvo valores negativos en los primeros 60 m y positivos en el resto de la columna. Mostró una magnitud más baja que el primer modo espacial y destacó un patrón complejo de pulsos alternantes. Al iniciar el 2008, se destacó una corriente con flujos negativo en la primera mitad de la columna, con máximos < 0.2 m/s entre los primeros ~40 metros de profundidad. Entre julio y septiembre de 2008 y 2009, se destacó la fuerte presencia de pulsos hacia adentro del golfo y exhibieron una señal temporal con alta variabilidad e intensas amplitudes positivas, mayores a 0.5 m/s.

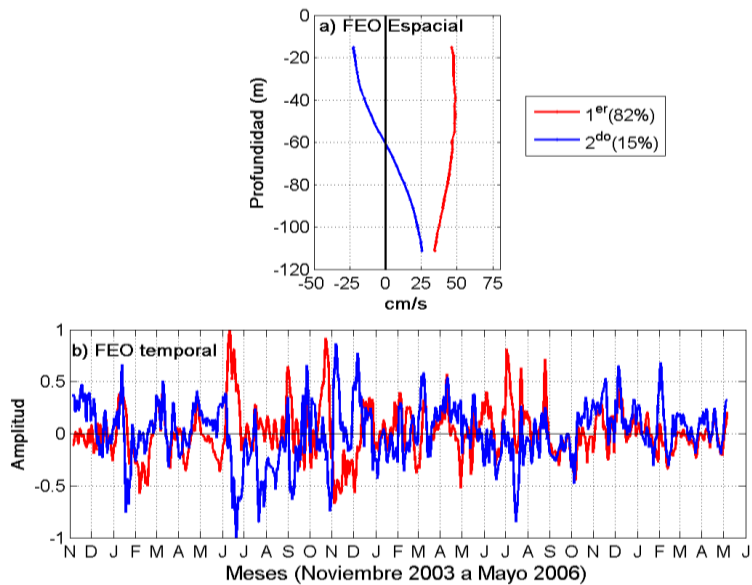


Figura 8. Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) de las componentes rotadas al eje de máxima varianza para el primer periodo. **(a)** Modos espaciales. **(b)** Amplitudes de las serie de tiempo.

En marzo de 2008, el flujo fluctuó de positivo (negativo) los primeros 60 m (60-115 m), alcanzando su máxima amplitud (~ 50 m) en abril. Al igual que para verano y principios de otoño de 2004 y 2005, el flujo fue intenso (máximo < 0.25 m/s) y hacia dentro del golfo por arriba de 60 m en el 2008 y 2009. Dicha intensificación destacó la máxima amplitud negativa (flujo saliendo por el fondo y entrando por superficie) a mediados de septiembre de 2008, en ambos registros. Flujos verticalmente alternados y orientados hacia fuera del golfo, sobresalen también en los pulsos de noviembre y diciembre de 2008 y en menor intensidad en primavera (2008 y 2009), aquí sobresalen flujos hacia fuera del golfo arriba de 60 m y se invierten a mayor profundidad. Mientras que en el verano, se invierte la dirección promedio, una conducta que parece remarcar cierta persistencia en la EGC.

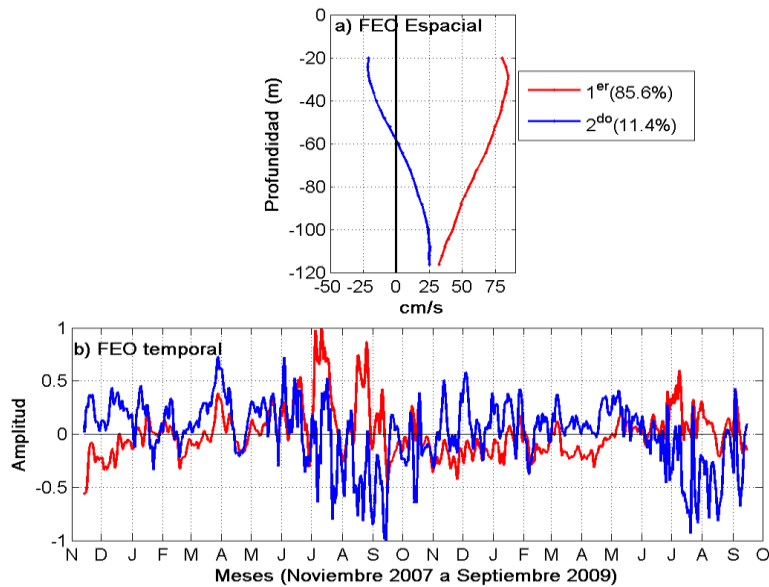


Figura 9. FEO's de las componentes rotadas al eje de máxima varianza para el segundo periodo. **(a)** Modos espaciales. **(b)** Amplitudes de las serie de tiempo.

La estructura vertical presentó una columna bastante definida en ambos modos. La cual evidencia cierta persistencia y a su vez, un punto de inflexión que parece indicar que la corriente tiene una señal anual (semi-anual) compleja. No obstante, es evidente que para el segundo modo el flujo presenta un cambio de sentido, afectado principalmente por la variabilidad interanual asociada con la dinámica ecuatorial y por el arribo de ondas atrapadas a la costa. Por lo tanto, es en esta profundidad a la cual la dinámica interanual se separa en dos capas; propiciando el ingreso en la capa superior de aguas tropicales afectadas y en capas por debajo del punto de inflexión la intrusión de la CC. La profundidad donde ocurre la inflexión (~ 60 m), posiblemente refleja el cambio temporal en la circulación superficial (subsuperficial) sobre la plataforma de Sinaloa.

5. Comparación entre el flujo medido de los datos en el Anclaje y a través de datos Satelitales.

Se compararon los datos de las corrientes del anclaje (DA) a 20 m de profundidad filtrados y promediados diariamente, contra las datos de las corrientes geostróficas superficiales diarias obtenidas a través de datos satelitales de AVISO (DS; ADT, ver método), las cuales fueron extraídos en un punto muy cercano al anclaje (~ 8 km al N). En ambos registros de datos las componentes de velocidad fueron rotadas al eje de máxima varianza. Con el fin de poder caracterizar mejor el patrón del flujo superficial, se graficaron las corrientes rotadas por separado (ambos periodos) y se describen a continuación en la Fig. 10.

El comportamiento temporal de las corrientes rotadas al eje de máxima varianza, del anclaje y los datos de altimetría mostraron cierta similitud en ambos periodos. Se observó una mayor variabilidad en los datos del anclaje (ur_a) que en los satelitales (ur_s), pero con diferencias sobresalientes para cada periodo. La corriente promedio a 20 m de profundidad para el primer periodo del anclaje, mostró las velocidades más bajas (0.05 ± 0.03 m/s), mientras que en segundo periodo el flujo fue de $\sim 0.1 \pm 0.06$ m/s. La comparación entre ur_a y ur_s en el primer periodo presentó rasgos de un flujo superficial variable, pero no para el segundo periodo, al determinar una magnitud y tendencia similar entre los registros, obteniendo la correlación mayor.

La correlación se obtuvo mediante la sobre posición de los datos promediados semanalmente para los DA (DS). Para la componente v_r (eje menor), la correlación fue más baja (Fig. 10) y destacó velocidades medias de 0.14 ± 0.04 (0.17 ± 0.05 m/s) para todo el periodo (2003 – 2009), respectivamente. Las velocidades rotadas al eje de máxima (mínima) varianza alcanzaron su máximo (mínimo) entre junio-julio (noviembre-diciembre), descrito en la Tabla III, asociado probablemente con el ingreso (salida) de aguas de la CCM (CGC). Lo anterior no concuerda para las estaciones de transición, donde se evidenció una conducta más dispersa entre los DA y DS.

La corriente mantuvo una orientación hacia el **noroeste**, como lo muestra el diagrama de astillas, llegando a la máxima correlación entre ambas señales en verano. En invierno, se observó en menor grado, el ingreso de aguas y con un patrón más variable. Las diferencias observadas entre los DA y DS posiblemente se deban a que los DS presenta diferente intervalos de medición respecto a los DA, el intervalo real de muestreo de los altímetros es del orden de 10 días, aunque fueron interpolados en mallas espacio (25×25 km)-tiempo (diario) por AVISO, además del efecto atmosférico y que son localidades (profundidades) distintas. En el segundo periodo la correlación entre los datos del anclaje y los de satélite fue mayor ($r = 0.85$, Fig. 10). Además la corriente mostró cierta estacionalidad en la plataforma de Sinaloa; un flujo entrante y un flujo saliente intensificado en las costas del golfo, que invierten el sentido de circulación entre verano a invierno. No obstante, la actividad de flujos intercalados respecto al eje del golfo, se evidencia en las épocas de transición y mas específico, para los meses de febrero, mayo, junio, octubre y noviembre del 2004; marzo, mayo, octubre y noviembre del 2005 y Febrero del 2006.

Comentario [A2]: Es difícil notar la orientación de las corrientes cuando pones series de tiempo de las componentes. Lo mejor sería utilizar diagrama de astillas de las corrientes medidas. Cualitativamente, eso da mejor información que las componentes.

Como esta EL DRIGRAMA DE ASTILLA>>?

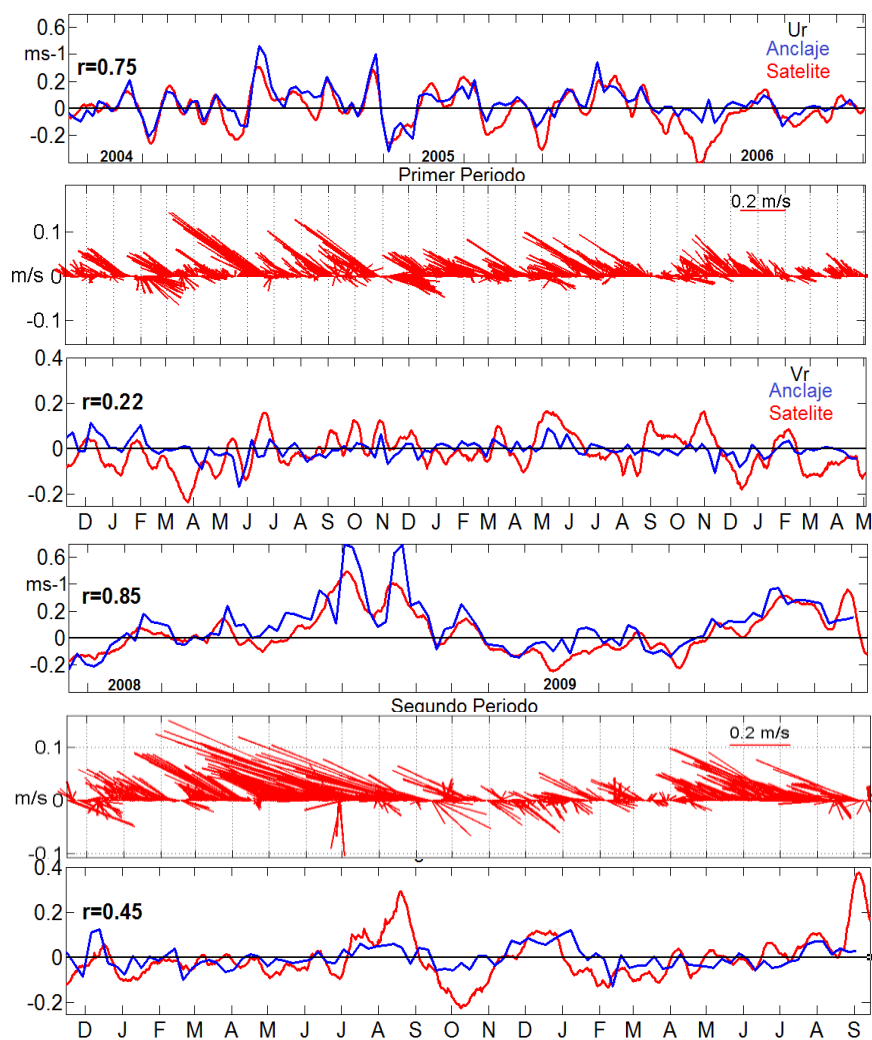


Figura 10. Datos filtrados y promediados semanalmente de la componente rotada al eje de máxima (U_r) y mínima varianza (V_r) a 20 m de profundidad en el anclaje (—) y de las corrientes geostróficas superficiales en un punto cercano al anclaje (~ 8 km) (—). Se anexa los valores de la correlación vectorial (r) entre ambas series de tiempo: **a)** Primera periodo (arriba). **b)** Segunda serie (abajo) y **c)** Diagrama de astillas (arriba) para la primer (segunda) series de tiempo (abajo).

Tabla III. Componentes de velocidad rotadas ur (vr) estacionales.

Est.	Mes	Mean Ur	Mean Vr	Std Ur	Std Vr	Min Ur	Min Vr	Max Ur	Max Vr
Inv	Dic	-0.16 (-0.5)	0.01 (-0.01)	0.12 (0.1)	0.08 (0.08)	-0.44 (-0.25)	-0.18 (-0.1)	-0.2 (0.1)	0.16 (0.12)
	Ene	-0.12 (0.02)	0.03 (-0.04)	0.16 (0.1)	0.09 (0.05)	-0.43 (-0.20)	-0.13 (-0.1)	0.2 (0.15)	0.16 (0.7)
	Feb	-0.1 (-0.04)	0.01 (0.04)	0.14 (0.11)	0.09 (0.05)	-0.36 (-0.26)	-0.13 (-0.13)	0.2 (0.15)	0.12 (0.8)
Pri	Mzo	-0.09 (-0.01)	-0.01 (-0.06)	0.1 (0.08)	0.09 (0.08)	-0.27 (-0.19)	-0.23 (-0.14)	0.17 (0.1)	0.15 (0.1)
	Abr	-0.05 (-0.04)	-0.01 (-0.04)	0.12 (0.9)	0.12 (0.05)	-0.25 (-0.31)	-0.13 (-0.20)	0.1 (0.14)	0.18 (0.12)
	May	-0.09 (-0.02)	-0.04 (0.01)	0.01 (0.12)	0.08 (0.08)	-0.26 (-0.29)	-0.14 (-0.20)	0.14 (0.14)	0.16 (0.16)
Ver	Jun	-0.07 (0.15)	0.02 (0.01)	0.1 (0.12)	0.04 (0.06)	-0.25 (-0.5)	-0.11 (-0.08)	0.45 (0.3)	0.12 (0.16)
	Jul	-0.08 (0.22)	0.08 (0.01)	0.1 (0.11)	0.06 (0.06)	-0.21 (-0.5)	0.12 (0.04)	0.5 (0.8)	0.18 (0.13)
	Ago	-0.12 (0.15)	0.1 (0.05)	0.08 (0.14)	0.08 (0.1)	-0.22 (-0.9)	-0.12 (-0.05)	0.4 (0.4)	0.22 (0.3)
Oto	Sep	-0.13 (0.01)	0.09 (0.05)	0.05 (0.1)	0.1 (0.13)	-0.19 (-0.19)	-0.17 (-0.07)	-0.32 (0.2)	0.21 (0.38)
	Oct	-0.14 (-0.03)	0.06 (-0.02)	0.06 (0.19)	0.11 (0.12)	-0.20 (-0.41)	-0.23 (-0.09)	-0.32 (0.3)	0.2 (0.16)
	Nov	-0.15 (-0.13)	0.02 (0.01)	0.08 (0.09)	0.07 (0.05)	-0.36 (-0.36)	-0.12 (-0.1)	-0.03 (0.05)	0.13 (0.15)
Me dia	m/s	-0.11 (-0.02)	0.1 (0.11)	0.1 (0.11)	0.08 (0.08)	-0.29 (-0.21)	-0.1 (-0.15)	0.09 (0.25)	0.16 (0.16)

5.1. Imágenes de Satélite (MADT)

Debido a la alta correlación obtenida entre los datos de las componentes de velocidad del anclaje y los de las corrientes geostróficas superficiales extraídas de altimetría satelital (Fig. 10), y con el propósito de presenciar un panorama más amplio de las corrientes que llegan a la zona del anclaje, se procesaron los datos satelitales diarios de la ADT y sus corrientes geostróficas desde 1993–2013 (21 años de registro). Se describe la señal de las ADT extraída para dos puntos contrapuestos de costa a costa (Fig. 2) para describir su comportamiento a lo largo del periodo mencionado. Se analiza también la

climatología promedio de la ADT y las corrientes geostróficas superficiales en zonas aledañas al anclaje. Las características del primer punto extraído de la serie satelital, se encuentra ubicado a ~8 km al noroeste del anclaje, se le denominó El Dorado 2 (ED2). El otro punto, se situó cerca a la punta de la península del lado del golfo, y se le denominó Cabo Pulmo (CP). En ambos puntos, los cambios en el nivel del mar presentaron claras fluctuaciones y denotan una comportamiento estacional (Fig. 11a).

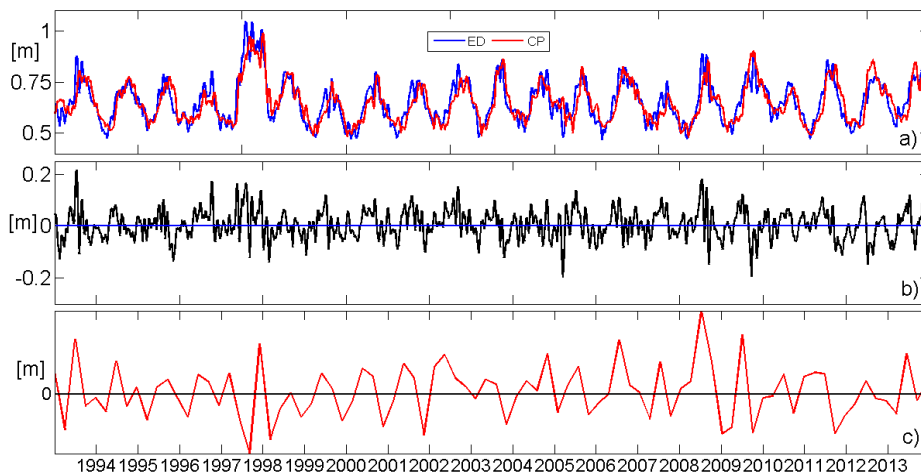


Figura 11. a) Topografía Dinámica Absoluta de los datos diarios promediados mensualmente (m), en dos puntos en la entrada al Golfo de California entre 1993-2013. Un punto peninsular (CP) y uno continental (ED2) (Ver Fig. 2). **b)** Diferencias de altura (Δh) entre ED2 – CP de la ADT para la superficie del mar (m). **c)** Promedio trimestral de las diferencias de altura de las ADT entre los puntos mencionados.

La altura media de la serie fue de ~0.64 m, con máximos en verano y mínimos para invierno. Hay varios rasgos que resaltan, por ejemplo, entre 1997-1998, se observó un máximo en la ADT (~0.12 m), así como otros máximos secundarios (1993, 2003, 2008, 2009, 2012) y un mínimo (<0.05 m) a finales de 2007. Estas variaciones interanuales responden a posibles procesos de gran escala, tales como el Fenómeno del Niño, o eventos

sinópticos transitorios, como ciclones tropicales, eventos de mesoescala, ondas atrapadas a la costa, entre otros (Durazo and Baumgartner, 2002; Zamudio et al., 2008, Godínez et al., 2010, Gutiérrez-Villanueva et al., 2014). La climatología mensual de ADT para ambas localidades se muestra en la Fig. 12. La costa continental (ED2) es en promedio ~ 0.005 m mayor y muestra un desfase mínimo (días) respecto a la costa peninsular (CP). Para los primeros tres meses el nivel del mar en CP supera a ED2, llegando al mínimo la primera semana de marzo en ED2. Mientras que para CP, no fue hasta abril donde se observa la menor altura. A partir de abril, en ambas localidades se observa un incremento mensual (aunque mayor en ED2), con alturas máximas entre agosto-septiembre (~ 0.75 m). El decremento en el nivel del mar fue similar en ambas costas para el resto del año, pero fue mayor de octubre a diciembre en CP. Por otro lado, las diferencias de alturas (m) entre ED2-CP, sugieren alta variabilidad en el comportamiento anual del nivel del mar en la EGC. Las diferencias entre ambas localidades, en condiciones de balance geostrófico, indicarían flujo superficial hacia el polo cuando las alturas son mayores del lado continental (abril-septiembre) y flujo hacia el ecuador cuando las diferencias son negativas (resto del año).

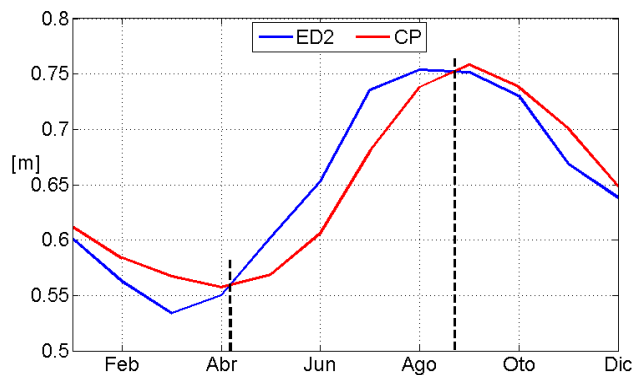


Figura 12. Serie temporal (1993 – 2013) de las ADT mensuales, promediadas para un año típico en ED2 (línea roja) y CP (línea azul). Las líneas (--) indican el cambio temporal, respecto a las diferencias entre ambas localidades.

Las diferencias de altura entre ED2-CP de las ADT's de los datos diarios (1993-2013) se muestran en la Fig. 11b. Se observan diferencias entre -0.15 a 0.15 m y alta variabilidad temporal. Además, se observa cierta señal estacional (fig. 11c), reflejando el comportamiento descrito en la figura 11a: pendientes positivas principalmente en verano y un extenso periodo ~6-8 meses (oto-inv-pri) con diferencias negativas. Lo anterior implica que la EGC exhibe un flujo hacia el polo (ecuador) principalmente en verano (invierno) con alturas predominantes en la costa este (oeste).

5.2. Elipses de variabilidad

Se elaboraron elipses de variabilidad en cada estación del año (Figura 13) a partir de los promedios diarios de los datos más cercanos a la superficie (20 m) medidos por el anclaje. Se observa que la corriente en la plataforma de Sinaloa (PS) varía principalmente en la dirección NO-SE, aparentemente debido a la orientación de la costa y en la misma dirección de las isobatas. En las cuatro estaciones del año (Fig. 13) se observó gran variabilidad, pero el flujo medio fue dirigido hacia dentro del golfo, aproximadamente alineado a la isobata de 180 m. La magnitud del vector medio fue mayor en el verano que en las demás estaciones (Fig. 13b), debido a que se presentó una dirección predominante hacia el NO y es cuando ocurren las velocidades más fuertes como lo indican los vectores diarios (en azul). En los otros periodos, los flujos se orientaron en diferentes direcciones, lo cual produce también una disminución en el vector promedio. En invierno (Fig. 13d), los vectores diarios se dirigieron hacia el NO y hacia el SE alineados a la costa. En primavera (Fig. 13a), hubo una predominancia hacia el NO, pero también al E-SE, con dirección hacia la plataforma de Sinaloa. Durante el otoño (Fig. 13c), los flujos más intensos fueron al NO, y

la elipse fue semejante a la de verano, la cual se alineó a la isobata de 180 m (NO-SE), pero también se observa un flujo hacia el SE asociado a las agua que salen del golfo. El vector promedio es el más débil, no representó una dirección bien definida, posiblemente se anuló o contrarrestó debido a la gran variabilidad en esta estación.

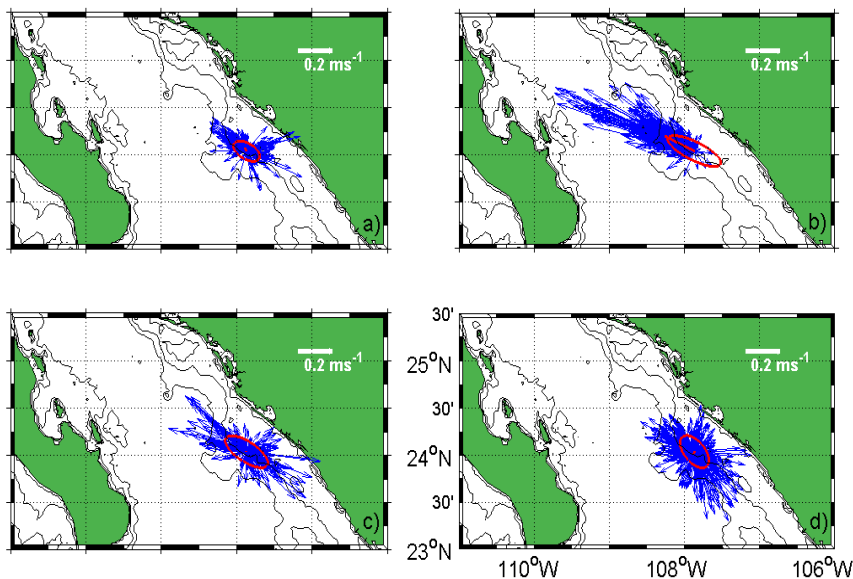


Figura 13. Elipses de variabilidad a partir de los datos diarios (azul) promediados verticalmente del anclaje, incluyendo ambos periodos en las cuatro estaciones del año. Los vectores promedio se indican en color rojo. **a)** Primavera, **b)** verano, **c)** otoño e **d)** invierno.

La excentricidad mensual de las elipses de variabilidad (β) destacó valores altos en todo el año 0.75 ± 0.05 y un valor máximo (mínimo) de 0.84 (0.67) para julio (enero). No obstante, presenta tres picos intensos interrumpidos por una rápida respuesta (~ 2 meses) que implica mayor variabilidad. Resultando en un comportamiento alternado entre incremento/decremento, con 3 máximos (mínimo) evidentes: Abril (junio), julio (septiembre) y octubre (enero), respectivamente. Cabe mencionar, la β para verano definió

Comentario [A3]:

Que puedes decir de? Esta cantidad la definiste en la sección de métodos y bien vale la pena al menos mencionar que si se tomó en cuenta mas allá de la fórmula...

0.6731 ene
0.7551 feb
0.7911 mar
0.7958 abr
0.7260 may
0.6839 jun
0.8398 jul
0.7845 ago
0.6954 sep
0.7968 oct
0.7306 nov
0.7434 dic
Mensuales

La relación entre las magnitudes de los ejes mayor y menor de la elipse componente se conoce como excentricidad, y está dada por:

$$\pi = \frac{\lambda_u}{\lambda_v}$$

Los valores de excentricidad cercanos a 1 implican una corriente casi rectilínea mientras que la corriente cerca de cero implica una alta variabilidad de orientación. La principal utilidad de este análisis es para obtener la orientación principal del flujo para cada una de las profundidades y a lo largo de cada estación del año.

un comportamiento clave y asegura la fuerte intrusión de la CCM. Además, de la clara dominancia de la configuración del fondo sobre las corrientes, ya sea al ingresar o salir cerca de la costa continental. Por último, el parámetro β parece sugerir el momento (mes) en el cual se lleva a cabo un cambio en el patrón de circulación sobre la plataforma de Sinaloa. Lo anterior, se corrobora con la gran variabilidad observada en todas las estaciones, con excepción del verano (aunque parece que es en junio cuando se genera una mayor inestabilidad en el flujo superficial, reflejado en la alta variabilidad que presentó (Fig. 13b).

Para observar un panorama más amplio respecto a la circulación superficial de toda la entrada fisiográfica del golfo, se obtuvieron promedios estacionales de las componentes de velocidad geostrófica superficial derivadas de los datos de ADT. Se observó que los vectores describen cierta estacionalidad (Fig. 14). El promedio para primavera a lo largo de la sección muestra un flujo hacia el este. En el verano el vector promedio sobresale de la elipse, indicando la alta dominancia del pulso ecuatorial a lo largo de los meses correspondientes a dicha estación, asociada a la corriente costera hacia el interior del golfo, la cual incrementa de oeste a este, probablemente como respuesta al efecto topográfico (PS). Mientras que en la otras estaciones el flujo presentó una variabilidad mucho mayor. En el otoño se observa un gradiente de oeste a este, con el flujo más intenso hacia la plataforma de Sinaloa y con dirección hacia fuera del golfo (S-SE), y en el invierno el flujo es hacia el sur-sureste, con el gradiente inverso comparado con el otoño, o sea, flujo más intenso en la parte oeste cerca de la península.

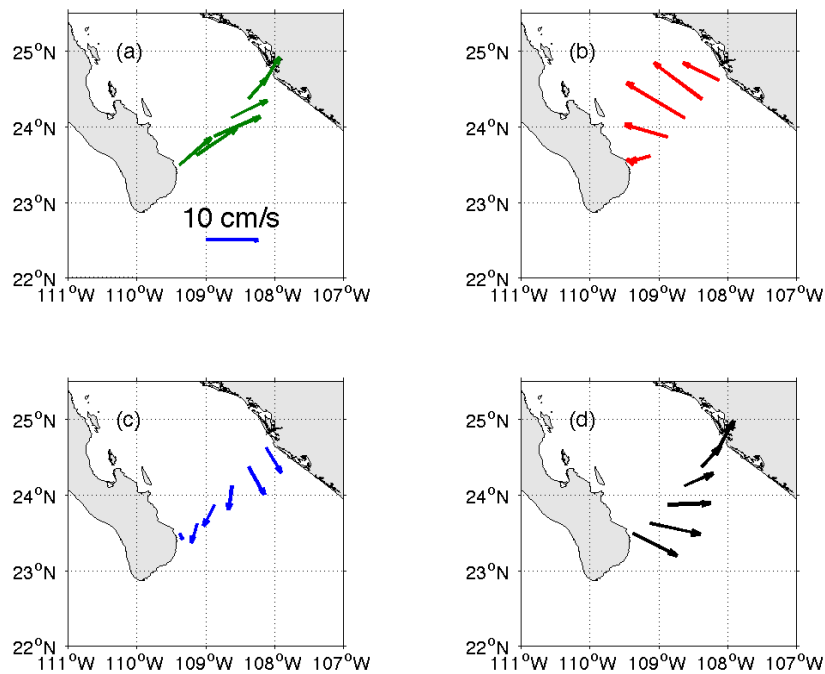


Figura 14. Corrientes geostróficas superficiales promedio para cada estación del año en una sección de la EGC a partir de los datos satelitales diarios [1993-2013]: **a)** Primavera, **b)** verano, **c)** otoño y **d)** Invierno.

5.3. Climatología promedio y corrientes geostróficas superficiales (1993-2013)

La estructura espacial de la ADT promedio (1993-2013) muestra un gradiente desde la costa hacia el océano y de norte a sur (Figura 14). La corriente parece formar meandros en su recorrido, sobre todo en la zona frente a la península y cercano al anclaje, donde se observa la mayor variabilidad, debido al debilitamiento de la corriente geostrófica superficial (vectores), observado en zonas asociadas a la inestabilidad del flujo y la propagación de remolinos. El flujo medio exhibe velocidades geostróficas débiles (0.10

m/s) y se destaca un flujo predominante hacia el S-SE entre los 22-26 °N al oeste de la península. Al este de 110°W, el flujo predominante es hacia el E-NE, y parece rotar ciclónicamente hacia el dentro del golfo, así como en dirección a la posición de la zona del anclaje. La presencia de un remolino ciclónico cerca de la costa (entre 22-24°N y 107 – 111° W), parece reforzar el flujo hacia el interior del golfo.

Las velocidades geostróficas relativamente bajas (<0.03 m/s) se ven afectadas directamente al disminuir la elevación del nivel del mar. El gradiente en la región de la EGC llega a ser tan intenso, que generan corrientes geostróficas de gran magnitud, las cuales disminuyen en promedio de sur a norte (22 – 25° N), conforme arriban a la entrada del golfo. Producto de la inestabilidad en la corriente superficial y de los procesos de mesoescala (remolinos), asociados a la orografía. Dicho efecto propicia la formación y persistencia de los remolinos dentro del golfo (región sur), al centro de la boca y en las cercanías de Baja California (BC). Este efecto fue descrito por Zamudio et al. (2008) quienes lo asociaron las puntas e irregularidades del GC con inestabilidades de la corriente y la formación de giros. La orientación y magnitud de los vectores promedio en las cercanías del anclaje y cerca de la PS, refleja un flujo superficial de ~150 km de ancho y se extiende pegado a la costa Este de la EGC. Posiblemente sea resultado de los flujos de la Corriente de California y de la Corriente Costera Mexicana (CCM), esta última una corriente recientemente definida en el patrón de circulación en las costas mexicanas, donde parece ingresar únicamente por la PS. La mayor contribución en la circulación superficial entre el OP y GC es el arribo e influencia del sistema de la CC (Fig. 15).

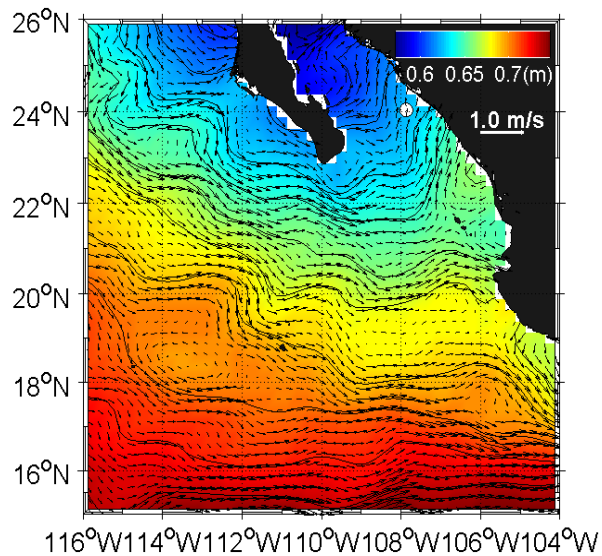


Figura 14. Topografía Dinámica Absoluta de la superficie del mar promedio (1993-2013), a partir de datos diarios con $0.25 \times 0.25^\circ$ de resolución espacial. La barra de colores indica las variaciones del nivel del mar (–contornos) y el círculo blanco (o) indica la posición del anclaje. Las fechas indican las corrientes geostrofas superficiales.

Asociado a lo anterior, fue evidente presenciar una ramificación en el flujo costero (Fig. 14), para cierta altura específica y alineándose a una única dirección (como respuesta al incremento en el nivel del mar). Además, e acarrea ACC hacia el S-SE, y se separa entre $19\text{--}23^\circ$ N de latitud, lo cual produce tres flujos diferentes. El primero, permanece en la misma dirección anteriormente descrita y se dirige hasta latitudes bajas $\sim 10^\circ$ N (no mostrado), con alturas significativas ~ 0.75 m, un grosor ~ 100 km y alejado de la costa ~ 300 km, el cual posiblemente se integra con la CCNE (rojo). El segundo brazo presentó una conducta singular. En la figura 14, se aprecia una extensión de la Corriente de California hasta los 20° N y -106° W, caracterizada por un flujo de ~ 50 km de ancho, con alturas mayores de 0.65 m (verde-amarillo), el cual arriba a las costas de Nayarit con

Comentario [A4]: La escala de 0.1 m/s es la pequeña rayita debajo del cero? Modificala para que quede más clara la escala..

Si quedo mejor?.

velocidades medias ~ 0.04 m/s. No obstante, es importante mencionar un último desprendimiento de la CC frente a la punta de la península, asociada a las alturas del nivel del mar más bajas. El flujo medio fluye hacia el E entre 22° y -109° W, probablemente como respuesta al viento y a efecto de la orografía de la punta. No obstante, decenas de kilómetros adelante (22° N, -107° W), la corriente cambia notablemente de dirección. El brazo de ~ 80 km de grosor se dirige hacia la costa continental frente a Sinaloa e ingresa con persistente dirección (NE) a la EGC por el oeste (plataforma de Sinaloa). Kessler (2006) y Godínez et al. (2010) fueron los primeros en abordar este desplazamiento de la CC, revelando un comportamiento similar a lo descrito anteriormente. Denominan como el brazo tropical de la CC, a la extensión de esta corriente (CC), una vez que se desplaza mas allá de la península y explican que particularmente es evidente a principios de primavera, verano y hasta invierno.

5.4. Climatología mensual (1993-2013)

La evolución mensual de la ADT en la EGC se muestra en la figuras 15 - 17. Aunque la sinopsis que se pretende realizar de las corrientes se enfoca principalmente a la porción sur y zona de la entrada al golfo, el área que se consideró en estas imágenes es bastante amplia (15.5 - 26° N/ 114 - 105° W) con el propósito de observar de manera sinóptica el comportamiento de las corrientes en la región circundante al anclaje. Las alturas más bajas (0.4 - 0.45 m) del nivel del mar comienzan a partir de invierno (Fig. 15) y se encontraron en la porción sur del golfo, en la boca y su alrededor (al este de la península), con valores mínimos para el mes de marzo (2003-2005). Los máximos en la ADT (0.85 - 0.9 m) sobre la EGC inician en junio (Fig. 16) frente a la costa continental, y hacia finales de septiembre

cubrieron toda la EGC (Fig. 17). Por otra parte, las variaciones del nivel del mar, las corrientes geostróficas superficiales de salida que dominan en la porción sur y entrada del golfo iniciaron desde octubre (Fig. 16j), y son en dirección S-SE, sobre todo en la mitad este, hacia el lado continental. Entre noviembre y diciembre (Figs. 17k, 17l) el flujo se intensificó y cubrió toda la zona entre la península y las costas de Sonora-Sinaloa, aparentemente más organizado y con dirección preferente hacia el SE-E. Incluso en diciembre se observa un “chorro” adyacente a la península con dirección hacia el SE que alcanzó $\sim 21^{\circ}\text{N}/108^{\circ}\text{W}$.

Durante enero (Fig. 15a), los rasgos de un remolino ciclónico en la porción sur del golfo ($\sim 24^{\circ}\text{N}$) son evidentes, el cual se caracteriza con un flujo hacia el sur adyacente a la costa peninsular, y un flujo hacia las costas de Sinaloa principalmente en la entrada ($\sim 23^{\circ}\text{N}$). Frente a la costa oeste de la península, en el Pacífico, hay una corriente cercana a la costa que alcanza la punta de la península vira hacia el este y aparentemente se intensifica y contribuye con el desarrollo de un remolino anticiclónico bien definido ($\sim 22^{\circ}\text{N}/110^{\circ}\text{W}$). Entre febrero-marzo, la corriente frente a la costa de la península del lado del Pacífico, se observa más ancha y penetra hacia la zona de la entrada con dirección este y con mayor intensidad, mientras que el remolino anticiclónico se observa hacia el suroeste ($\sim 21^{\circ}\text{N}/111^{\circ}\text{W}$). Entonces, las corrientes que llegan a la zona del anclaje están asociadas aparentemente a las aguas de la Corriente de California (CC), lo mismo ocurre en abril, aunque ahora, la corriente vira hacia el sureste y luego al oeste, por lo que se detectó la presencia de otro remolino anticiclónico alrededor de $22.5^{\circ}\text{N}/108.5^{\circ}\text{W}$, aunque más débil.

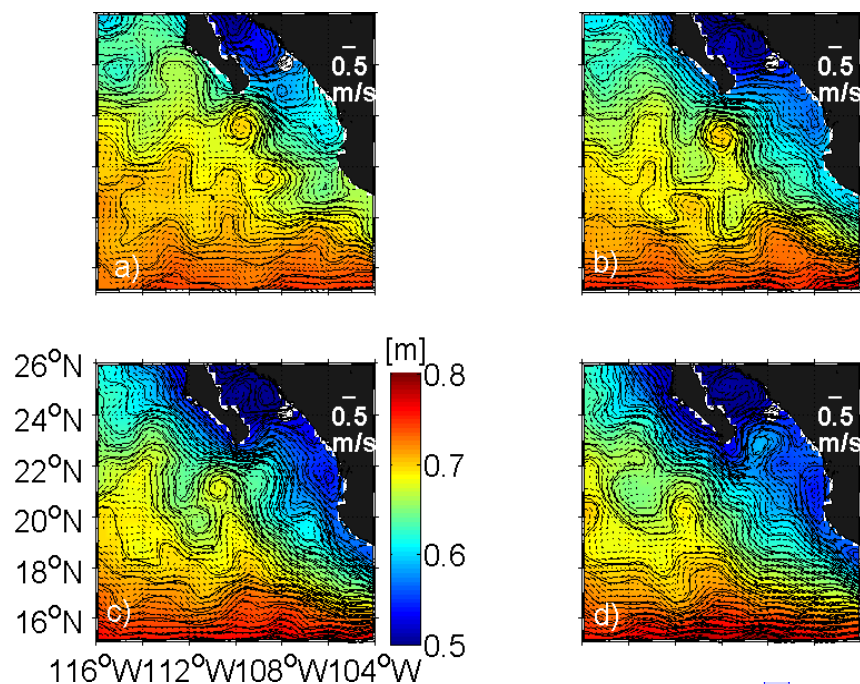


Figura 15. Promedio temporal (1993 - 2013) de las ADT y vectores de velocidad geostrofica superficial: **a)** enero, **b)** febrero **c)** marzo y **d)** abril. Se muestra la posición (o) del anclaje.

En mayo (Fig. 16e), la corriente frente a la península, del lado del Pacífico, se extendió hasta $\sim 20^\circ\text{N}$, giró hacia el E y alcanzó la zona de Cabo Corriente, posteriormente se distribuyó hacia el NO cerca de las costas de Sinaloa. Aparentemente, esta corriente rodea el remolino anticiclónico observado en la entrada, y penetra al golfo cerca de la península, y se desliza al este-noreste en la porción sur del golfo. Otro rasgo notable fue que frente a la punta oeste de la península, parte de la corriente que fluyó hacia el sur, describió un pequeño lazo o remolino en forma ciclónica ($\sim 22.2^\circ\text{N}/110^\circ\text{W}$). Para junio (Fig. 16f), dicho remolino se observa más desarrollado, mientras que la corriente frente a la península proveniente del NW, lo rodea ($\sim 21.5^\circ\text{N}$) y penetra hacia el interior del golfo.

Comentario [A5]: Usa colores menos saturados para apreciar mejor las estructuras. También puedes intercalar los vectores (u,v) para más claridad en las corrientes. Cuidado con la escala de referencia de vectores.

La barra de colores la puedes mover hacia la derecha y solo ponerle etiquetas a uno de los mapas del lado izquierdo....

QUEDO MEJOR ASI?

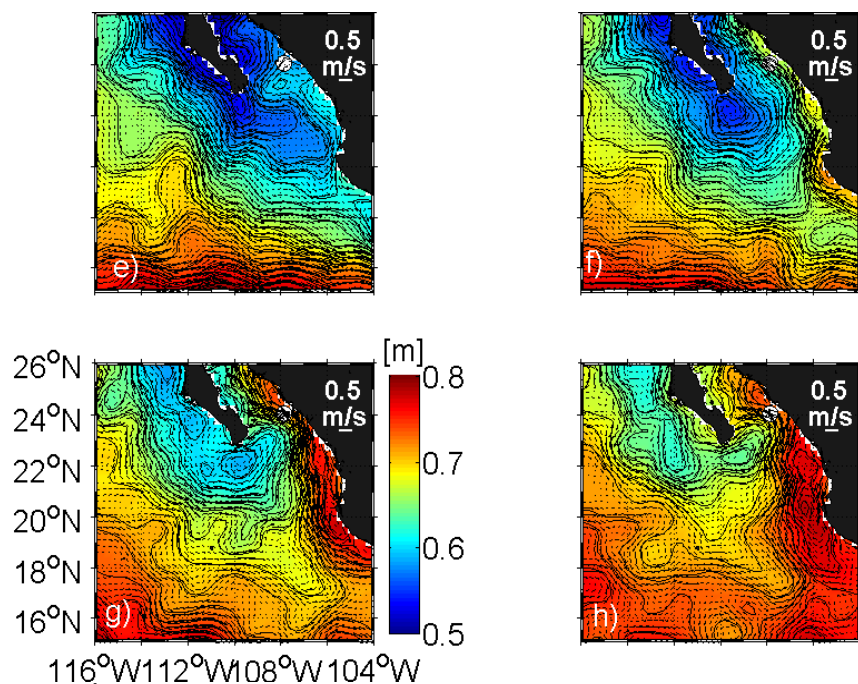


Figura 16. Ídem que la Figura 15 pero para: **e)** mayo, **f)** junio, **g)** julio **h)** agosto.

Por otro lado, se aprecia una corriente costera angosta bien desarrollada que proviene desde $\sim 18^\circ\text{N}$. Esta corriente fue asociada a la Corriente Costera Mexicana (CCM), la cual en conjunto la CC, aparentemente penetran al golfo cubriendo toda la zona de la entrada. Es evidente que a la zona del anclaje le llegan corrientes provenientes del sureste. Durante julio y agosto (figs. 16g-h), el remolino ciclónico frente a la punta de la península se observa más extenso ($110.2\text{-}108^\circ\text{W}$; $21\text{-}23^\circ\text{N}$) y con cierta orientación NO-SW. En su lado oriental y hacia la costa, se aprecia que la CCM ahora es más ancha e intensa. En agosto, el flujo en la parte norte del remolino, así como parte de la CCM, aparentemente rodean la punta de la península y se distribuye hacia el noroeste.

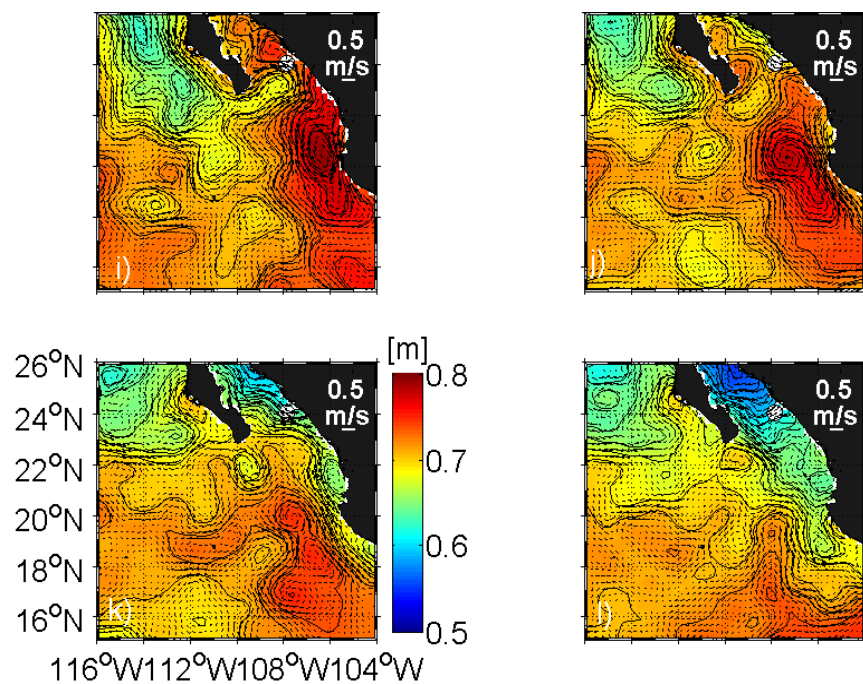


Figura 17. Ídem que la Figura 15 pero para: **i)** septiembre, **j)** octubre, **k)** noviembre y **l)** diciembre.

Lo anterior fue evidente en septiembre, donde el remolino ciclónico se extendió hacia toda la entrada. Corrientes del oeste-suroeste, las cuales viran hacia el oeste cerca a la zona del anclaje y de las costas de Sinaloa, se ven asociadas a este giro. En octubre las aguas en la porción sur del golfo fluyen hacia el sur en un patrón complejo (Fig. 17j). En la porción sur del golfo y parte de la entrada se observa un flujo de salida, más intenso y organizado hacia la mitad este, hacia el lado continental, y débil cerca de la Península. El flujo rodea la península y parece contribuir en una corriente que se desplaza hacia el polo frente a la Península del lado del Pacífico, al tiempo que se observa un aparente retroceso de la Corriente der California asociado a un remolino ciclónico alrededor de 113°W/23°N.

5.5 Climatología estacional y variabilidad (r.c.m.)

En la figura 18 se muestra la estructura espacial de la climatología de ADT y las corrientes geostróficas superficiales asociadas. Se presentaron valores bajos de ADT en el interior del golfo en los meses de invierno y primavera, y máximos a finales de verano y otoño. Asociado al periodo de máximo calentamiento/enfriamiento superficial del mar (TSM) y a los procesos de mesoescala (agentes forzantes), la estructura difirió notablemente para las cuatro estaciones.

La circulación superficial durante primavera fue influenciada por la corriente (CC) frente a la península del lado oceánico. Se desplazo hacia el sureste paralelo a la costa y mostró baja variabilidad (r.c.m. ~ 0.05 m/s). Al llegar a la Punta oeste de la península, parte de la corriente continua su trayectoria hacia el sureste realizando meandros. Otra parte rodeó la punta de la península, y justamente sobre la entrada al golfo, se dirigió hacia el noreste, donde viró hacia la PS. Después, se observó un cambio de dirección hacia el sureste y finalmente al suroeste donde se unió con la otra parte del flujo hacia el ecuador. Entonces, el flujo entrada describió un patrón anticiclónico, y contiguo a este, en la porción sur del golfo, se observan otros dos remolinos, uno ciclónico ($\sim 24.2^\circ\text{N}$) y otro anticiclónico ($\sim 25.3^\circ$). Es interesante notar que la mayor variabilidad (>0.2 m/s) ocurrió en una franja amplia (~ 111.5 - 108°W), principalmente donde la corriente giró en forma ciclónica frente a la punta de la península. En verano, la corriente frente a la península mantuvo su flujo con dirección sureste pero más lejos de la costa comparada con primavera, además su trayectoria mostró alta variabilidad (>0.15 m/s) y una tendencia a fluir hacia el este alrededor de $\sim 111^\circ\text{NW}/21^\circ\text{N}$.

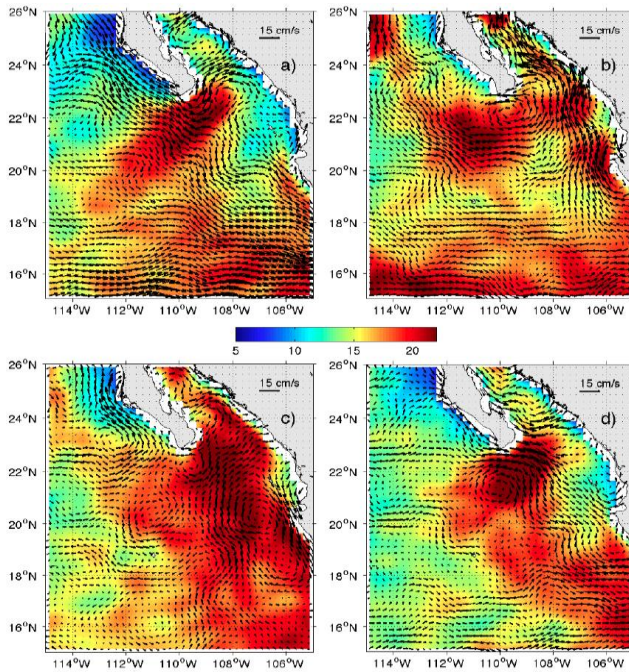


Figura 18. Climatología estacional (1993-2013) de las Corrientes geostróficas superficiales (vectores) y la raíz cuadrática media (color): (a) Primavera, (b) verano, (c) otoño e (d) invierno.

Un rasgo interesante de este flujo hacia el este fue que, frente a la península (~109.8°W) se observan características de un remolino ciclónico, el cual se unió con el flujo de la CCM con dirección hacia el polo (interior del golfo). La CCM se observó bien definida desde ~19°N, tuvo la mayor intensidad (0.15-0.2 m/s) alrededor de 22-23.5°N, mostró gran variabilidad (r.c.m. ~ 0.2 m/s) y se redistribuyó en toda la porción sur del golfo. El otoño mostró la mayor variabilidad espacial, valores de la r.c.m. >0.2 m/s cubrieron una gran área; al sur de ~23°N y al este de ~112°W y en el sur del golfo. El flujo frente a la península (23-26°N) en el Pacífico fue hacia el noroeste y en el golfo hacia el sureste pero realizando meandros en su trayectoria. El flujo hacia el noroeste parece estar

asociado a una retroceso de la CC ($\sim 22^\circ\text{N}$), se observan flujos de salida del golfo y provenientes del sureste. El remolino ciclónico frente a la punta oeste de la península es evidente así como un remolino anticiclónico frente a Cabo Corrientes. En el invierno la situación cambió bastante, en la parte oeste de la península (sur de 24°N) se observó un flujo relativamente débil ($\sim 0.05\text{-}0.1\text{ m/s}$) y hacia el sureste. Al rodear la punta de la península el flujo se intensificó, alcanzó velocidades de $\sim 0.15\text{ m/s}$, parte del flujo continuó su trayectoria hacia el sureste y otra desarrolló un remolino anticiclónico ($\sim 110^\circ\text{W}/21\text{-}22^\circ\text{N}$). En la porción sur del golfo el flujo fue predominante hacia el sur pero con una importante tendencia hacia el este.

6. Discusión

A continuación, se analizan y discuten las primeras observaciones directas de larga duración para la región de la entrada al GC. Se presentó un panorama amplio de la circulación durante ~ 6 años para los datos del anclajes (DA, Nov-2003 a Sep-2009) y 21 años para los datos de altimetría (DS, 1993-2013). Se describe la estructura de los patrones principales y la variabilidad espacio-temporales del flujo. Cabe mencionar, la sugerencia manifestada por Lavín et al. (2014), donde refieren que se lleve a cabo una investigación extensa en la parte sur del golfo, con énfasis en el arribo/origen de las corrientes y su variabilidad temporal. Los datos de las corrientes en la Plataforma de Sinaloa medidos por el anclaje mostraron una circulación dominada por flujos de gran variabilidad en magnitud y dirección, así como la presencia de numerosos pulsos (eventos) (Figs. 5, 6, 8). Por otro lado, la región sur del golfo manifestó cambios en el flujo superficial y sugiere el arribo de distintas corrientes, reflejado en la alta variabilidad y el efecto de forzamientos remotos (Fig. 18). La corriente sobre la plataforma de Sinaloa destacó una dirección predominante

hacia el NO, alcanzando magnitudes >0.5 m/s en los verano de 2004, 2008 y durante el otoño de 2009. Cabe mencionar que en la región de la entrada al golfo, durante fines de primavera y principios del verano de 2004, a través de diferentes investigaciones se reportó la presencia de un flujo intenso hacia el interior del golfo. Por ejemplo, en Lavín et al. (2009), en junio de 2004, destacan la intrusión de agua cálida sobre la plataforma continental de Sinaloa, así como filamentos de agua fría provenientes de la Corriente de California. Estos autores, utilizando lances de CTD-LADCP obtuvieron el flujo a través del campo geostrófico y de observaciones de las corrientes desde un buque. Detectaron una corriente en la capa superior (< 500 m) intensa (~ 0.7 m/s en superficie), la cual fluyó hacia el interior del golfo. Esta corriente cubrió gran parte de la entrada al golfo, también manifestó una corriente costera (~ 30 km de ancho) intensa cerca de la plataforma de Sinaloa.

Por otro lado, Zamudio et al. (2008), con el propósito de investigar la generación de remolinos en el GC, utilizan un modelo numérico global (HYCOM), anidado para el golfo. Explican la presencia de una Corriente Costera de Frontera Este, que viaja a lo largo del Pacífico Tropical Mexicano con dirección hacia el polo, la cual incide hacia el interior del golfo con máximos entre mayo-junio. Esta corriente es de gran importancia para la formación de remolinos en el golfo, la cual se intensifica por el paso de ondas atrapadas a la costa. Otro estudio de observaciones superficiales (Lavín et al., 2014), a través de corrientes lagrangeanas entre junio de 2004 y agosto de 2006, reportaron la presencia de un flujo hacia el polo entre junio-septiembre en la plataforma de Sinaloa. Entre sus experimentos destacó una intensa corriente hacia el interior del golfo cercano a la costa

oriental. Por ejemplo, muestran que un derivador se tardó ~ 20 días en recorrer 1000 km; en su trayectoria el flujo mantuvo velocidades promedio de ~ 0.6 m/s y máximos hasta de 0.8 m/s. En los datos del anclaje (Figs. 5, 8, 10), se observó entre fines de la primera y segunda semana de junio de 2004, la presencia de un flujo intenso (~ 0.6 m/s), el cual se distribuyó en toda la columna de agua (20-120 m). Este tipo de eventos fueron ligados a forzamientos remotos de mesoescala en el Pacífico Tropical, y además con forzamiento local de mesoescala debido al viento (Lavín et al., 2014). A diferencia de estos autores, pudimos observar en nuestro estudio, no solo la presencia de estos eventos (pulsos) de mesoescala de un flujo hacia el polo en el 2004, sino que también pueden ocurrir cada año, principalmente durante el verano (Fig. 5 y 8). Por otro lado, También se observa que flujos de salida ocurrieron en el anclaje principalmente a fines del otoño e invierno.

Un rasgo importante a mencionar es que el flujo en el anclaje mostró en varios eventos un flujo donde éste no cambió de signo en toda la columna. Lo que indica que las corrientes que llegan (o salen) al golfo se mantienen en toda la columna. La estructura espacial de las FEO's (Figs. 8 y 9) muestran este caso, ya que en el primer modo, con más del 84 % de la varianza, el flujo no cambio de signo, lo que indica que en el anclaje el flujo puede ir en una dirección o en sentido contrario a lo largo de toda la columna, lo cual sugiere características de un flujo barotrópico, y en menor grado, como lo muestra el segundo modo (15 % de la varianza), el flujo puede cambiar de signo en la vertical (entre 20-60 m en una dirección y entre 60-120 m en otra). Este carácter barotrópico fue mayor (menor) para verano (invierno), con una estructura vertical similar, exhibiendo escasa variabilidad en la columna. En verano, pulsos intensos hacia adentro (+) del GC se

intercalaron con flujos moderados hacia fuera del golfo (-). Para invierno la conducta se invirtió, con un flujo intenso (débil) de salida (entrada). En los meses de transición, la corriente en promedio fue débil (± 0.01 m/s) y observó alta variabilidad, con cambios semanales en la dirección (10-25 días) y repentinos eventos o pulsos positivos (negativos), respectivamente. La alta persistencia en los flujos hacia el NO (interior), fue más (menos) evidente para verano del 2004-2008 (2003, 2006, 2009). Este patrón comienza a partir de abril-mayo, con el incremento del nivel del mar sobre el continente, y promueve el ingreso del ACC. Lo anterior es asociado a una circulación anticiclónica en la entrada del golfo (Fig. 15d-e, 18a). Además, la intrusión del Agua Superficial Tropical (AST), mediante el desplazamiento de la Corriente Costera Mexicana (CCM), principalmente desde junio hasta finales de septiembre (Figs. 15e-g-18b).

Las velocidades registradas en el anclaje son un poco más intensas que las reportadas por Lavín et al. (2009), con velocidades de 0.55 m/s (0.8) en el flujo costero que viaja hacia el noroeste por el continente. La corriente hacia el interior (+) del GC presentó valores de 0.2–0.3 m/s (0.4-0.5) y un flujo de salida (-) de 0.15-0.4 m/s (0.25-0.5). Collins et al., (2014) discuten y ponen en evidencia una compleja dinámica descrita para la EGC, la cual es afectada por procesos de mezcla (frentes y remolinos de submesoscala), debido al arribo de Aguas Tropicales, Aguas de la Corriente de California y las Aguas del interior del Golfo, la recirculación de aguas superficiales por remolinos y por el desplazamiento de aguas del Golfo hacia el oeste. Es importante describir la presencia de flujos en dirección contraria, originados a partir de una corriente barotrópica, interrumpida por una circulación con cambio de signo en la columna para periodos con duración entre 7–15 días,

pero con cierta persistencia a lo largo de todo el año (ver cap. 6.5). Ambos, contribuyen en la circulación de la EGC y repercuten en la varianza del flujo sobre la plataforma de Sinaloa. La variabilidad respecto a la profundidad de interacción para ambas corrientes y la dirección en la que arriban, nos revela una compleja alternancia temporal de ambos flujos y un mayor forzamiento horizontal a ~60 m.

El posible efecto topográfico de la PS, la ubicación del anclaje (cercana al borde continental) y la recirculación causada por procesos de mesoescala, pueden ser los factores que originan este comportamiento. Destacaron dos patrones espaciales que describen la posible interacción y desplazamiento de las corrientes. El primer escenario sugiere un flujo alineado a la isobata de 200 m sobre la PS (someramiento) y responde a un posible/aparente comportamiento barotrópico en algunos casos. Mientras que en el segundo, el flujo superficial se encuentra con otro en dirección opuesta al entrar a la PS. Aunado a los agentes forzantes mencionados, el flujo superficial se ve afectado con el paso de tormentas tropicales entre verano-otoño y/o al paso de ondas atrapadas a la costa, incrementando significativamente la velocidad del flujo para verano, observación descrita por Zamudio et al. (2008). En este periodo (verano), como se mencionó anteriormente, el marcado incremento del nivel del mar (SSH) se asoció con la intensificación de las corrientes limítrofes y con la llegada de ondas atrapadas a la costa, provenientes del ecuador (pulsos lejanos).

Las OAC son generadas por huracanes y tormentas tropicales, a lo largo de la costa occidental de México entre Mayo-Octubre, al desplazarse hacia el polo a lo largo de costa

continental y son detectadas hasta la región dentro del Golfo de California (Enfield y Allen, 1983; Merrifield y Winant, 1989; Merrifield, 1992; Gjevik y Merrifield, 1993). Por otra parte, la EGC se caracteriza por una fuerte actividad de mesoescala y propicia un patrón muy variable. La estacionalidad en las corrientes superficiales, exhiben un máximo en primavera pero un intenso flujo o chorro en verano, el cual coincide con la máxima generación de giros en la península observada en la ADT de estos periodos.

Kurcyn et al. (2012), sugiere que las corrientes superficiales y el rozamiento vertical pueden favorecer la producción de remolinos, y debido a las inestabilidades, el esfuerzo del viento altera la estructura baroclínica en zonas costeras (Figura 19a). Se encontró cierta discrepancia respecto al máximo en la generación de remolinos anticiclónicos que sugiere para verano. En la climatología mensual se observó que la alta presencia de remolinos, mas bien, se presenta entre diciembre y mayo (Fig. 13) frente a la punta de la península y no para el periodo mencionado (verano). Además, la intensificación de la CC comienza a partir de febrero a mayo y propicia la formación de un persistente remolino anticiclónico en la entrada al golfo. El remolino transporta gran parte de la corriente hacia el continente y ocasiona una circulación anticiclónica débil (Figura 18). La zona sur del GC se encuentra afectada por ~16 remolinos anuales. Kurcyn (2012) sugiere que el cambio abrupto entre mar abierto y la plataforma continental ocasiona esta intensa actividad. Por lo tanto, los numerosos procesos de mesoescala en nuestros registros contribuyen en la dinámica local del flujo, y parecen ser un mecanismo que activa y modula la circulación superficial sobre la EGC.

Con el propósito de mejorar los conocimientos generales de la circulación en el GC, se analizó lo descrito sobre la propagación y distribución de la CCM dentro del golfo. De acuerdo a Zamudio et al., (2007, 2008, 2011) la corriente hacia el polo en el GC es una extensión de la Corriente Costera de Costa Rica y la Corriente Costera Mexicana. Lavín et al. (2006, 2009, 2014), proponen que la Corriente Costera Mexicana podría producir la corriente costera observada dentro del GC. De acuerdo a estos autores, se desconocen detalles de lo que pasa con la corriente hacia el polo al norte de Cabo Corrientes. Aunque en los estudios utilizando modelos numéricos (Zamudio et al., 2007, 2008 y 2011), sugieren que al menos parte de ella sigue al interior GC. También, concuerdan con el desplazamiento de la CCM, donde una parte continúa por la costa continental a lo largo de la costa en el Golfo de California, observado en los meses de junio-agosto, a partir de los MADT mensuales.

La Fig. 19 muestra los registros de la serie de datos diarios (Nov-2003 a Sep-2009) de las corrientes a lo largo de la costa a 20 m de profundidad en el anclaje, en conjunto con la corriente superficial geostrófica derivada de datos de altimetría en un punto cercano al anclaje (Fig. 19a). Además se incluyen los registros de anomalía del nivel del mar obtenidas por mareógrafos en Mazatlán, Manzanillo y Acapulco (Fig. 19b). Aunque la serie más completa fue la de Manzanillo, en general se observan anomalías positivas en verano y negativas en invierno para las tres series, así como la presencia de una gran cantidad de eventos o perturbaciones. Estas perturbaciones parecen propagarse hacia el norte a lo largo de la costa, ya que concuerdan con las corrientes observadas en el anclaje El Dorado. Tal es el caso, del evento de junio 2004 discutido previamente, donde se observan

anomalías positivas (~ 0.2 m) en Mazatlán y Manzanillo. Este evento fue discutido en Lavín et al. (2014), donde reportaron elevaciones 0.16, 0.19 y 0.21 m entre Acapulco, Manzanillo y Mazatlán, respectivamente.

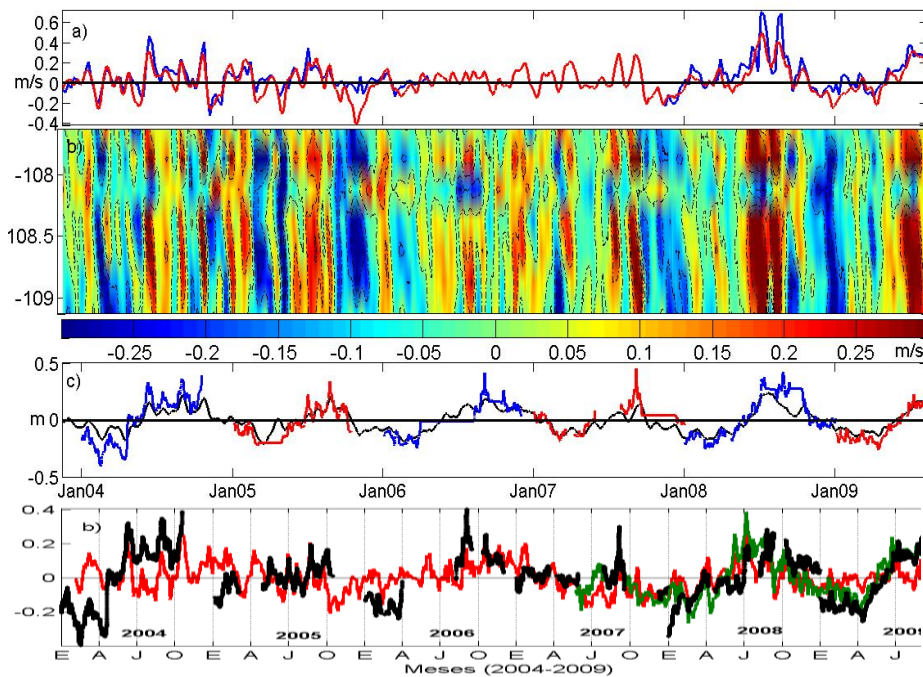


Figura 19. Registro de series temporales (2004 – 2009): **a)** Datos diarios de la corriente superficial a lo largo de la costa para los datos del anclaje (**azul**) y de las corrientes geostróficas (**rojo**). **b)** Diagrama Hovmöller de las velocidades geostróficas para la EGC y **c)** Datos diarios de las anomalías del Nivel de mar para Mazatlán (**azul - rojo**), y alturas superficiales derivadas de altimetría para un punto cercano al anclaje (**negro**) y **d)** Datos diarios de las anomalías del Nivel de mar para Mazatlán (**negro**), Manzanillo (**rojo**) y Acapulco (**verde**) obtenidas de mareógrafos.

La variabilidad espacial de los fenómenos de origen tropical (eventos transitorios) en el Pacífico Tropical Mexicano altera la magnitud de la corriente y radica en fluctuaciones prominentes en el nivel del mar (Fig. 19) a lo largo de su trayectoria, la cual en numerosas ocasiones se desplaza hacia el GC, repercutiendo en las velocidades registradas por medio

del anclaje y por ende, en la circulación superficial de la boca. La intensidad y trayectoria de los ciclones tropicales dependen de muchas variables como la presión atmosférica, la temperatura superficial del océano, y el grado de evaporación (Navarro-Labastida, 2012). Romero-Vadilla et al., (2007) indicó las trayectorias de los ciclones que afectaron la península de B.C. Durante junio, las depresiones tropicales y huracanes en el Pacífico Tropical Mexicano producen desplazamientos en la corriente superficial hacia el oeste siguiendo el patrón del viento. Un mes después, una circulación ciclónica frente a la punta de la península y el arribo de OAC propicia trayectorias hacia el NO, lo que permite el arribo de los eventos transitorios. Para septiembre la circulación ciclónica disminuye causando vientos del oeste sobre la mayor parte de península, lo cual genera un cambio de dirección hacia el N-NE y promueve el impacto de los ciclones tropicales con el continente. Las trayectorias hacia el NE desde principios de agosto hasta octubre finales de verano, permite el desvío de los vientos del oeste. Lo que resulta en un movimiento hacia el norte y son estos los que eventos transitorios que penetran al GC para los meses de agosto a octubre y afectan enormemente la dinámica superficial en la boca del GC, donde septiembre es el mes de mayor frecuencia con huracanes categoría 1 (Navarro-Labastida, 2012). En el periodo del anclaje (2003-2009), se distinguió la trayectoria de fenómenos de origen tropical, los cuales ingresaron al golfo y afectaron la circulación superficial sobre la plataforma de Sinaloa (anclaje). El evento más destacado en este periodo (categoría 4) fue el huracán Norbert, alcanzando velocidades de ~ 115 km/h para el 4-12 de octubre del 2008. Además, la trayectoria del huracán categoría 2 (Paul) ingreso a la EGC entre el 21-26 de octubre del 2006, los cuales afectaron directamente las velocidades (~ 0.5 m/s) registradas en el anclaje (Fig. 19a y c). El arribo de Norbert, fue registrado como un pulso

positivo (~ 0.45 m) en los DA (DS), detectando su presencia sobre la PS para la última semana octubre del año correspondiente, siendo el segundo pulso más intenso de todo el periodo (~ 6 años). Por lo tanto, se pudiera atribuir la variabilidad de la corriente superficial y el incremento del nivel del mar en octubre. Sin embargo, existe una alta variabilidad temporal en el paso de huracanes sobre la EGC, conducta observada desde finales de verano hasta otoño. Cabe mencionar, la dominancia que presentan las fluctuaciones de evento del Niño/Niña en el GC (por ser una extensión del OP), las cuales repercutieron en la conducta registrada los DS (Fig. 19 a y b), cuando el huracán Paul se desplazó hacia la boca del GC. Entre el 2006-2007, se encontraron bajas velocidades asociadas a una alta variabilidad en la zona y a un nivel del mar relativamente bajo, como lo muestra el diagrama Hovmoller (Fig. 19b). Reflejando una circulación débil entre el OP y GC (ingreso-salida), sujeta probablemente al periodo dominado por la Niña (oscilaciones negativas del ENSO).

Con el objeto de extraer las señales más importantes en el periodo de mediciones del anclaje (2003-2009) y en el área de la región de la entrada al golfo, se le aplicó la técnica de FEO's a los datos de ADT y posteriormente se obtuvieron las corrientes geostróficas superficiales para cada modo. Antes de aplicar la técnica de FEO's, los datos de ADT se les extrajo solo el promedio temporal. En la Fig. 20 se muestran los primeros dos modos de la MADT y de la circulación geostrófica así como su variación temporal (amplitudes). El primer modo representó el 62% de la varianza (Fig. 20a). Se observa un patrón de corrientes que fluye hacia el ecuador frente a la península de Baja California del lado del Pacífico ($22-24^{\circ}\text{N}$). Después, la corriente rodeó la punta de la península con

dirección hacia el anclaje y viró hacia el sur, luego al oeste donde se observan los rasgos de un remolino anticiclónico en la entrada. Esta corriente fue asociada a la rama tropical de la Corriente de California (Godínez et al., 2010; Kurcyn et al., 2012). Posteriormente la corriente se dirige al Sur. Parte de esta corriente, entre 106-107.5°W y 20-23°N, frente a Cabo a Corrientes, fue parte de un remolino ciclónico. En la serie temporal de este modo (Fig. 20c), se observa una señal estacional bien definida (~74% ajuste armónico), valores positivos la primera parte del año, con máximos entre abril-mayo, y valores negativos el resto del año con mínimos entre agosto-septiembre. El cambio de signo indica que la corriente puede invertir su dirección y cambiar a los rasgos de un remolino ciclónico en la entrada al golfo y un flujo hacia el polo.

Por otro lado, el segundo modo (Fig. 20b) explicó el 14% de la varianza y describió un flujo costero hacia el polo que incurrió al golfo, con su mayor intensidad hacia la plataforma de Sinaloa. Esta corriente fue ligada a la Corriente Costera Mexicana (Lavín et al., 2006; Godínez et al., 2010). La amplitud (Fig. 20c), al igual que el primer modo, mostró una señal estacional bien definida (73 % de la varianza), con valores positivos entre abril y octubre donde la corriente se dirige hacia el polo (Fig. 20b) y cambia hacia el ecuador entre noviembre-marzo. Este segundo modo, reveló, al igual que en el anclaje, que el flujo más intenso hacia el polo ocurrió en verano (junio-julio) y hacia fuera del golfo en invierno. Se observa también que el flujo más intenso ocurrió entre junio-julio de 2008. El tercer modo (no mostrado) tuvo solo el 3 % de la varianza y sugirió la presencia de remolinos.

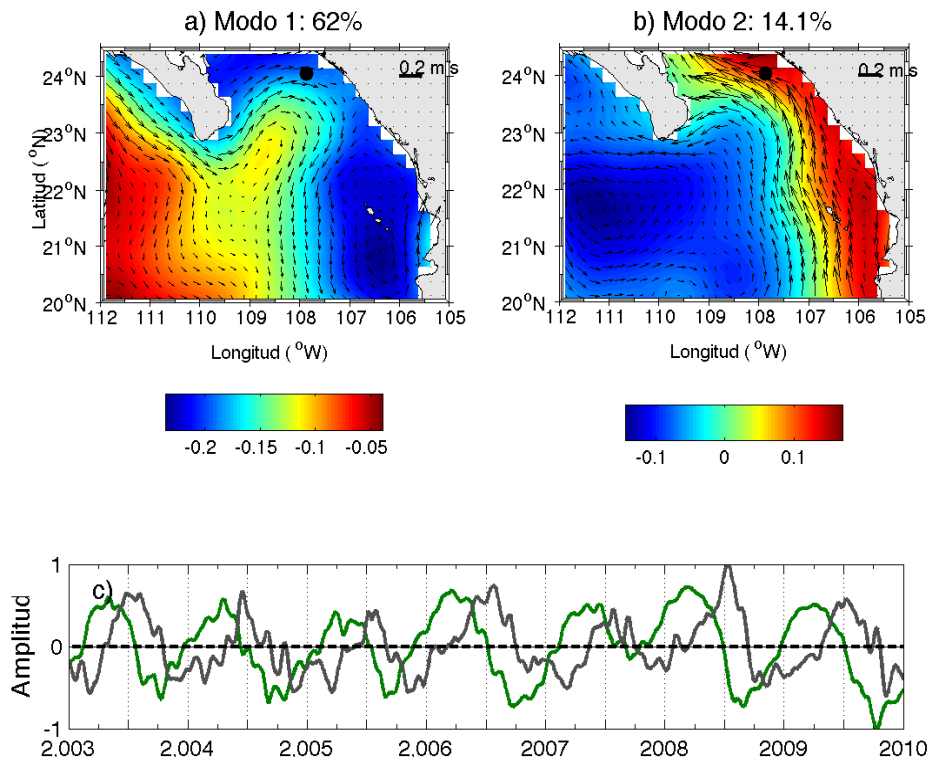


Figura 20. Funciones Empíricas Ortogonales de los datos ADT, a los cuales se les removió El promedio temporal: Primer (a) y segundo (b) modo espacial. Se incluyen las velocidades geostróficas superficiales en vectores. c) Amplitud de la serie de tiempo para el primer modo (verde) y segundo modo (gris). Se incluye la posición del anclaje (•).

Por último, se discute el efecto del fondo y el paso de OAC en el patrón superficial de la circulación en la EGC. El cambio abrupto en la configuración batimétrica (litoral) parece modular las fluctuaciones en el campo de las corrientes frente a la EGC. Gómez-Valdivia et. al., (2015) le atribuyen dicho efecto a la difracción de la OAC, cuya anchura (GC) es mucho más corta que la longitud de las OAC. Sin embargo, el radio interno de deformación de Rossby es del orden de 30 km. Por lo tanto, no es posible tal efecto de difracción sobre la

boca del GC. Más bien, las OAC se alinean al fondo y siguen a configuración pegado a la plataforma de Sinaloa. Después, estas características provocan la difracción de la onda de Kelvin a través de huecos y estrechos (Buchwald y Miles, 1974; Durland y Qiu, 2003; Johnson y Garrett, 2006). La difracción local de las OAC ha sido deducida a partir de variaciones en el nivel del mar, tomadas dentro y fuera del Golfo de California (Gutiérrez et al, 2014; Spillane et al., 1987). La onda difractada se mantiene a lo largo de la costa del continente; mientras que, el resto rápidamente da la vuelta (modo uno) en la entrada del golfo ($24^{\circ}\text{N}/-107^{\circ}\text{W}$) y se desplaza hacia los polos a lo largo del oeste costa de B.C. (Spillane et al., 1987), tal como se muestra en los MADT. Por lo tanto, el arribo de las ondas atrapadas a ayuda a explicar la alta correlación del nivel del mar entre Mazatlán y Manzanillo durante su tránsito (Spillane et al., 1987).

7. Conclusión

A través de datos de corrientes de un anclaje ubicado en la plataforma de Sinaloa, datos altimetría satelital (ADT), así como de datos de estaciones mareográficas costeras, se describieron y analizaron los patrones de circulación en la entrada del Golfo de California, en particular en la plataforma de Sinaloa. Los registros recabados de corrientes en el Anclaje El Dorado, fueron suficientes para determinar el comportamiento estacional y transitorio de la circulación. Las corrientes medidas en el anclaje en la plataforma de Sinaloa, mostraron baja señal estacional pero una gran variabilidad dominada por eventos o pulsos de mesoescala del orden de unos cuantos días a semanas. El flujo en la columna de agua (20-120 m) en varios de estos eventos, fluctuó en toda la columna sin cambiar de signo con predominancia hacia dentro del golfo pero también hacia afuera. Este patrón

sugiere condiciones barotrópicas. El flujo en el anclaje tuvo una señal predominantemente alineada a lo largo de la costa, aproximadamente sobre la isobata de 200 m la mayor parte del año. Flujos hacia dentro del golfo dominaron en el verano y parte del otoño lo cual fue asociado a la Corriente Costera Mexicana. En primavera la presencia de la Corriente de California fue evidente, la cual genera un remolino anticiclónico en la entrada del golfo y contribuye con un flujo del oeste hacia el anclaje. A fines de otoño e invierno el flujo hacia fuera del golfo fue más evidente. Las fluctuaciones detectadas entre las estaciones de Acapulco, Manzanillo, Mazatlán y el Anclaje en plataforma de Sinaloa, muestran que las anomalías del nivel del mar durante verano se propagan hacia el golfo como ondas atrapadas a la costa, las cuales intensifican las corrientes de sobre la plataforma de Sinaloa.

El patrón observado en los diarios MADT de las corrientes geostróficas superficiales promediadas mensualmente determinó una rama que se extiende fuera del GC hacia el sur entre noviembre y abril. A partir de enero, el flujo se aleja de la costa y conforme se acerca la primavera, se une con la corriente superficial (CC) frente a LA Península de Baja California. Durante el invierno la CCM se desplaza hacia a la EGC pero es desviada lejos de la costa mediante una circulación anticiclónica frente a la península. Lo anterior, permite el ingreso la salida de aguas superficiales provenientes del GC (AGC) y produce un desplazamiento de la CCM, la cual viaja hacia el norte frente a la península. El cambio de estación entre primavera y verano, mostró por el cambio de orientación en la corriente superficial, modificando su dirección hacia el interior (sur) del GC (OP). La CCM se bifurca lejos de la costa (300 km) entre Sinaloa y Nayarit, una fluye a lo largo de la costa continental y la segunda rama salta la EGC (no entra), siguiendo su trayectoria hacia el

norte. Los remolinos ciclónicos en el sur del Golfo de California se asocian al flujo costero a lo largo de la costa de la parte continental de México especialmente en verano (otoño) cuando la propagación de las OAC intensifica la circulación e induce inestabilidades que conducen a la propagación de remolinos (Zamudio et al., 2008).

La circulación oceánica en la Entrada del Golfo de California se caracteriza por una dinámica compleja, fuertemente dominada por su interacción con el OP y por la variabilidad estacional en el viento local. Además, la circulación sobre la EGC se responde al tránsito de OAC y en este caso, por la predominante actividad de mesoescala (remolinos) y el persistente efecto de la configuración del fondo (litoral).

8. Referencias bibliográficas

- Bádan-Dangon, A., 1998. Coastal circulation from the Galápagos to the Gulf of California. Robinson, A.R., Brink, K.H. (Eds.), the Sea Volume 11: The Global Coastal Ocean, Regional Studies and Syntheses John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, pp. 315–343.
- Bordoni, S., P. E. Ciesielski, R. H. Johnson, B. D. McNoldy, and B. Stevens (2004), The low-level circulation of the North American Monsoon as revealed by QuikSCAT, Geophys. Res. Lett., 31, L10109, doi: 10.1029/2004GL020009.
- Castro R. y J. A. Martínez (2010). Variabilidad Temporal y Espacial del campo de Vientos. Capítulo del Libro Dinámica del Ecosistema Pelágico Frente a la Península de Baja California, 1997-2007: Diez años del Programa IMECOCAL. Durazo R. y Gaxiola, G. (Eds.). Instituto Nacional de Ecología (INE), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior (CICESE), México. pp. 129- 147. ISBN: 978-607-7908-30-2.

- Castro, R., A. S. Mascarenhas, R. Durazo, and C. A. Collins (2000), Seasonal variation of the salinity and temperature at the entrance of the Gulf of California, Mexico, *Ciencias Marinas*, 26(4), 561–583.
- Castro, R., Lavín, M. and Ripa, P. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 99: 3249–3261.
- Castro, R., M. F. Lavín, E. Beier, and A. Amador (2007), Structure of mesoscale eddies in the southern Gulf of California during cruise NAME-2 (August 2004), *Eos Trans. AGU*, 88(23), Jt. Assem. Suppl., Abstract U24A-05
- Castro, R., R. Durazo, A. Mascarenhas, C. A. Collins, and A. Trasviña (2006), Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California, *Deep-Sea Res. I*, 53, 188– 200.
- Collins, C.A., Garfield, N., Mascarenhas Jr., A.S. and Spearman, M.G. (1997). Ocean current across the entrance to the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 102: 20927–20936.
- Emery, W. Y R. Thomson. (2001). *Data analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier Inc. Segunda edición. Amsterdam. 638p.
- Enfield, D. B. Y J. S. Allen. (1983). the generation and propagation of sea level variability along the Pacific Coast of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 13: 1012 – 1033.
- Gjevik, B. Y M. A. Merrifield. (1993). Shelf-sea response to tropical storms along the west coast of Mexico. *Cont. Shelf Res.*, 13: 25 – 47.
- Gódinez, V.M., Beier, E., Lavín, M.F., Kurczyn, J.A., 2010. Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *J. Geophys. Res. Oceans* 115. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JC005705>.

- Gómez-Valdivia, Parés-Sierra, Flores-Morales (2015). The Mexican Coastal Current: A subsurface seasonal bridge that connects the tropical and subtropical Northeastern Pacific. *Continental Shelf Research* 110 (2015) 100–107
<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.010>
- Gutiérrez, M.O., López, M., Candela, J., Castro, R., Mascarenhas, A., Collins, C.A., 2014. Effect of coastal-trapped waves and wind on currents and transport in the Gulf of California. *J. Geophys. Res. Oceans* 119, 5123–5139.
<http://dx.doi.org/10.1002/2013JC009538>.
- Kessler, W. S. (2006), the circulation of the eastern tropical Pacific: A review, *Prog. Oceanogr.*, 69(2–4), 181–217, doi:10.1016/j.pocean.2006.03.009
- Kurcyn, J. A., E. Beier, M. F. Lavín, and A. Chaigneau (2012), Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry, *J. Geophys. Res.*, 117, C10021, doi: 10.1029/2012JC007970.
- Lavín, M. F., E. Beier, J. Gomez-Valdes, V. M. Gódínez, and J. Garcia (2006), On the summer poleward coastal current off SW Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02601, doi: 10.1029/2005GL024686.
- Lavín, M. F., R. Castro, E. Beier, and V. M. Godínez (2013), Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress, *J. Geophys. Res.*, 118, 1367–1381, doi:10.1002/jgrc.20132.
- Lavín, M. F., R. Castro, E. Beier, V. M. Gódínez, A. Amador, and P. Guest (2009), SST, thermohaline structure and circulation in the southern Gulf of California in June 2004, during the North American Monsoon Experiment, *J. Geophys. Res.*, 114, C02025, doi: 10.1029/2008JC004896.

- Lavín, M.F., Beier, E. y Badán, A. (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. Contribuciones de la Oceanografía Física en México. Monogr. No. 3, Unión Geofísica Mexicana, pp. 139–169.
- Marinone SG, Lavín MF, Parés-Sierra A. 2011. A quantitative characterization of the seasonal Lagrangian circulation of the Gulf of California from a three-dimensional numerical model. *Cont. Shelf Res.* 31: 1420–1426.
- Marinone SG, Lavín MF. 2006. Role of tides and mixing in the formation of an anticyclonic gyre in San Pedro Mártir Basin, Gulf of California. *Deep-Sea Res. II* 53: 60–76.
- Marinone SG. 2003. A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 108: 3325. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JC001720>
- Mascarenhas, A. S., Jr., R. Castro, C. A. Collins, and R. Durazo (2004), Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico, *J. Geophys. Res.*, 109, C07008, doi: 10.1029/2003JC002124.
- Merrifield, M. A. Y C. D. Winant. (1989). Shelf circulation in the Gulf of California: A description of the variability. *J. Geoph. Res.*, **94**: 18133 – 18160.
- Navarro-Labastida (2013). Variabilidad diurna, estacional y transitoria de los vientos en l Sur del Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas., Baja California, México, 46 pp.
- Pegau, W. S., E. Boss, and A. Martinez (2002), Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California, *Geophys. Res. Lett.*, 29(9), 1295, doi: 10.1029/2001GL014076.

- Ripa, P. (1997), Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California, *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 597– 614.
- Roden G.I. 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. In: van Andel T.J.H, Shor G.G (eds.). *Marine Geology of the Gulf of California*. Am. Assoc. Petr. Geol. Mem. 3, Tulsa, pp. 30–58.
- Spillane, M.C., Enfield, D.B., Allen, J.S., 1987. Intraseasonal oscillations in sea level along the west coast of the Americas. *J. Phys. Oceanogr.* 17, 313–325 [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1987\)017<0313:IOISLA42.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1987)017<0313:IOISLA42.0.CO;2).
- Strub, P.T., James, C., 2002. Altimeter-derived surface circulation in the large-scale NE Pacific Gyres. Part 1. Seasonal variability. *Progr. Oceanogr.* 53, 163–183. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00029-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00029-0).
- Trasviña, A., and E. D. Barton (2008), summer circulation in the Mexican tropical Pacific, *Deep Sea Res. Part I*, 55(5), 587–607, doi: 10.1016/j.dsr.2008.02.002.
- Willis, J. K., D. Roemmich, and B. Cornuelle (2004), Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales, *J. Geophys. Res.*, 109, C12036, doi: 10.1029/2003JC002260.
- Wyrtki, K. (1967). Circulation and water masses in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. Limnol.*, 1: 117–147.
- Zamudio, L., P. Hogan, and E. J. Metzger (2008), summer generation of the Southern Gulf of California eddy train, *J. Geophys. Res.*, 113, 378 C06020, doi: 10.1029/2007JC004467.
- Zamudio, L., P. Hogan, and E. J. Metzger (2011), modeling the seasonal and interannual variability of the northern Gulf of California salinity, *J. Geophys. Res.*, 116, C02017, doi: 10.1029/2010JC006631.

