



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

“VARIABILIDAD LAGRANGEANA EN LA COSTA NORESTE DEL
PACÍFICO MEXICANO”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANÓLOGO

PRESENTA:
NOÉ ARIAS MARTINEZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. XAVIER FLORES VIDAL

ENSENADA BAJA CALIFORNIA, AGOSTO 2020.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**“VARIABILIDAD LAGRANGEANA EN LA COSTA NORESTE DEL PACÍFICO
MEXICANO”**

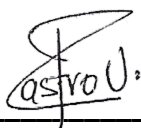
**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
OCEANÓLOGO**

**PRESENTA:
NOÉ ARIAS MARTÍNEZ**

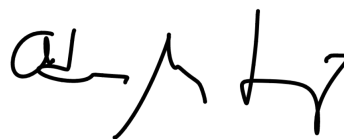
**APROBADA POR:
COMITÉ DE TESIS**



Dr. Xavier Flores Vidal
Director



Dr. Rubén Castro Valdez
Sinodal



Dr. Adán Mejía Trejo
Sinodal

Dedicatoria

*A mis padres María y Noé, por su apoyo y cariño incondicional.
A mi hermana Itzel, por siempre estar a mi lado aún en la distancia.*

Agradecimientos

Madre muchas gracias por apoyarme en todas mis decisiones y luchas por sacarnos adelante. Papá gracias por todos los consejos que me has brindado y por escucharme siempre. Itzel, así como tu lo estás para mi, yo siempre estaré para ti hermana.

A mis abuelitas Lupe y Ana, por brindarme todo su cariño.

Al Dr. Xavier Flores, por todo el apoyo, enseñanzas y sugerencias, pero, sobre todo, gracias por la gran paciencia.

A los miembros del comité de tesis, el Dr. Rubén Castro, por auxiliarme durante toda la carrera como tutor, y al Dr. Adán Mejía por su disposición e interés en este trabajo.

Al Radlab team: Joha, Lalo, Andy y Chuy, por apoyarme y forzarme a terminar este trabajo, gracias por sus consejos y apoyos.

A Marlén Ramos y Adalberto Rodríguez, por abrirme las puertas de su casa y hacerme sentir parte de ella. A ti Marlene por pasar todos estos momentos a mi lado y no dejarme rendir ante los problemas más grandes.

A mis profesores de la universidad y en especial a: Patricia Alvarado, Rigoberto Guardado, Antonio Martínez y Raúl Herrera, por hacer más amena la carrera.

A mis amigas de Morelia, Karen, Itzury e Irlanda por brindarme su apoyo, aunque estemos lejos. A mis amistades de la universidad y en especial a Citlalli, Mariana e Isaí, por hacer menos pesada la carrera con tantas risas y momentos de apoyo.

Resumen

El propósito de este trabajo fue analizar y describir las corrientes superficiales frente a las costas de la península de Baja California de los años 2016 al 2019, utilizando derivadores Lagrangeanos complementados con productos satelitales de temperatura, vientos y altura del nivel del mar. Se estudió la variabilidad estacional para cada año, así como las trayectorias descritas por 13 derivadores liberados durante los cuatro años. La circulación descrita por los derivadores, fue complementada con datos satelitales de; altura del nivel del mar sobre una malla con resolución espacio-temporal de ~ 10 km horizontales y un día, respectivamente. Temperatura superficial del mar con una resolución de ~ 10 km y una precisión de $\sim 0.5^\circ$ C. Campo de viento superficial (10 m sobre la superficie del mar) con una resolución espacial de $\sim 30 \times 30$ km, con promedios cada 6 horas durante el 2018 y 2019. Durante los cuatro años de estudio se observó principalmente una corriente costera (< 70 km) con dirección hacia el Ecuador que es perceptible hasta latitudes de San Carlos B.C. ($\sim 29.5^\circ$ N), donde se bifurca en dos flujos: a) prolongación al Pacífico, y b) Corriente de Vizcaíno. Además de este rasgo permanente durante los cuatro años de estudio, también se observó que en la región profunda lejana a la costa (> 100 km) se encuentra un sistema de corrientes con dirección al sur y estructura en forma de “serpenteo” que parece interactuar con remolinos presentes en la región profunda. La variabilidad de la Corriente costera al Ecuador y de los flujos que de esta se desprenden, parecen deberse a la intensidad estacional de los vientos. Sin embargo, la modificación de los campos de temperatura superficial, debido al calentamiento estacional y al enfriamiento por surgencias, podrían también modificar los campos de presión de forma secundaria al viento y jugar un papel discreto en la circulación costera de esta región.

Palabras clave: Corriente de California, Corriente al Ecuador, Circulación superficial, Derivadores superficiales, Estacionalidad.

Contenido

1. Introducción	1
2. Objetivos	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivo particular	4
3. Datos y Métodos	4
3.1. Derivadores superficiales	5
3.1.1. Procesamiento de datos obtenidos con derivadores	7
3.2. Productos satelitales	8
3.2.1. Altimetría satelital	8
3.2.2. Temperatura superficial del mar	8
3.2.3. Mapas de viento	9
4. Resultados	11
4.1. Análisis de la circulación basado en SST y geostrofia satelital	11
4.1.1. Circulación anual 2016-2019	12
4.1.2. Circulación estacional del 2016-2019	15
4.2. Campos sinópticos de viento	24
4.3. Trayectorias Lagrangeanas	28
5. Discusión	37
6. Conclusión	40
7. Referencias	41

Lista de figuras.

Figura	Página
1. Esquema de los derivadores oceánicos DORIS.	6
2. Derivador oceánico DORIS liberado frente a la zona costera de Baja California, México. A) Izquierda; esfera de flotación de DORIS con su panel solar interior. B) Derecha; la draga subsuperficial ubicada a 1 m de profundidad.	6
3. Promedios anuales de la circulación superficial, estimados a partir de corrientes geostróficas y SST satelital. La región marcada por la elipse roja representa la Corriente Al Ecuador (CAE), mientras que la región marcada con la elipse verde muestra la zona denominada en este trabajo como región de bifurcación (RB). El gradiente de color indica la temperatura superficial del agua.	14
4. Velocidades geostróficas satelitales durante el año 2016. En las cuales las flechas negras indican la dirección y magnitud de las corrientes, y las flechas grises gruesas indican las corrientes denominadas como prolongación al Pacífico y corriente de Vizcaíno. El gradiente de color indica la temperatura superficial del agua.	16
5. Velocidades geostróficas satelitales durante el año 2017. En las cuales las flechas indican la dirección y magnitud de las corrientes. Los colores indican la temperatura superficial del agua.	18
6. Velocidades geostróficas satelitales durante el año 2018. En las cuales las flechas indican la dirección y magnitud de las corrientes. Los colores indican la temperatura superficial del agua.	20
7. Velocidades geostróficas satelitales durante el año 2019. En las cuales las flechas indican la magnitud y dirección de las corrientes. Los colores indican la temperatura superficial del agua.	22
8. Elipses de variabilidad del viento estacional, durante el 2018.	26
9. Elipses de variabilidad del viento estacional, durante el 2019.	27
10. Magnitud de velocidad de los derivadores liberados durante el año	

2016. La trayectoria azul representa corrientes medidas en verano, mientras que la trayectoria roja corresponde con otoño.	29
11. Temperatura satelital y de los derivadores lanzados durante el 2016.	30
12. Magnitud de velocidad de los derivadores liberados durante el año 2017.	31
13. Temperatura satelital y de los derivadores lanzados durante el 2017.	32
14. Magnitud de velocidad de los derivadores liberados durante el año 2018.	33
15. Temperatura satelital y de los derivadores lanzados durante el 2018.	33
16. Magnitud de velocidad de los derivadores liberados durante el año 2019.	35
17. Temperatura satelital y de los derivadores lanzados durante el 2019.	36

Lista de tablas.

Tabla	Página
I. Fechas limitantes de las estaciones del año.	12
II. Estaciones del año con las mayores velocidades geostroficas.	23
III. Derivadores utilizados para obtener las trayectorias Lagrangeanas.	28

1. Introducción

La principal característica de la circulación oceánica en el noreste del Pacífico mexicano es el Sistema de la Corriente de California (SCC). Este sistema se compone de corrientes geostroficas muy variables, asociadas a una alta productividad biológica y a un flujo promedio hacia el Ecuador que ha sido documentado entre 0-300 m de profundidad (Lynn y Simpson, 1987), y que es mejor conocido como la Corriente de California (CC). Debido a sus orígenes subárticos la CC está bien identificada por las características fisicoquímicas de sus aguas que fluyen hacia el Ecuador durante todo el año, esta es perceptible desde algunos cuantos kilómetros de la costa hasta ~200 km mar adentro y se caracteriza principalmente por aguas con temperaturas relativamente frías ($10^{\circ} - 20^{\circ} \text{C}$), salinidad de 32.5 a 33.8, y abundante oxígeno ($>150 \mu\text{mol kg}^{-1}$) (Lynn y Simpson, 1987; Cepeda-Morales *et al.*, 2013). La CC también cuenta con flujos subsuperficiales (de ~200-300 m de profundidad) al parecer estacionales, conocidos como la Contracorriente de California (CcC), identificados a <100 km de la costa en dirección al polo que transportan aguas con temperaturas bajas de 8° a 10°C , alta salinidad (34 a 34.2) y bajo oxígeno ($<100 \mu\text{mol kg}^{-1}$) debido a su origen del sur (Lynn y Simpson, 1987; Durazo, 2015; Velayarce, 2019).

Distintos trabajos (Hurlburt y Thompson, 1973; Pedlosky, 1974; McCreary, 1981; Durazo, 2003) sugieren que el principal forzamiento del SCC es el esfuerzo del viento, mismo que impone gradientes de presión horizontal, y que de manera secundaria lo son la rotación de la tierra, mareas y el oleaje.

Los vientos en la región de la CC son predominantemente del norte y del oeste (Reid *et al.*, 1958; Ramírez, 2005). Por lo que se ha sugerido que la estacionalidad de la CC esta íntimamente ligada con la estacionalidad de los vientos y centros de alta y baja presión que estos mismos generan (Parés *et al.*, 1997; Ramírez, 2005). La variabilidad estacional de la CC está definida por dos periodos de tiempo según sus condiciones climatológicas e hidrográficas, un periodo frío durante invierno y

primavera, y un periodo cálido durante verano y otoño (Lynn y Simpson, 1987; Durazo *et al.*, 2010; Durazo, 2015; Saavedra, 2017).

Las surgencias en la costa de Baja California se asocian a eventos de alta productividad en el océano y se ha sugerido que obedecen a dos factores; 1) el transporte de Ekman debido a la componente del viento paralelo a la costa, mismo que origina movimiento superficial de agua mar adentro, por lo que el agua en la costa es substituida por agua profunda, lo que da lugar a la surgencia costera. 2) el efecto del rotacional del esfuerzo del viento, el cual, si es positivo, genera bombeo de Ekman (transporte de aguas subsuperficiales a la superficie), y favorece a las surgencias costeras (Castro y Martínez, 2010).

Las surgencias ocurren principalmente durante primavera y verano, al soplar los vientos a lo largo de la costa favorecen dicho efecto (Strub *et al.*, 1987). Al debilitarse los vientos, se favorece la entrada de agua tropical por el límite sur de la CC durante parte de otoño e invierno. Dicha variabilidad responde al cambio latitudinal estacional del centro de alta presión en el Pacífico Norte que migra hacia los polos durante finales de verano y otoño (Durazo, 2015).

Por lo tanto, la variabilidad de la CC es fuertemente influenciada por el viento, no solo al imponer un gradiente de presión horizontal y generar surgencias, sino que, además, en este proceso se producen flujos costeros con dirección a los polos, mismos que responden a la variabilidad estacional del viento (Marchesiello *et al.*, 2003; Pickett y Paduan, 2003; Durazo, 2015).

Un común denominador de la literatura existente es su interpretación geostrófica, la cual permite conocer los rasgos generalizados del SCC en escalas espaciales de centenas de kilómetros y variabilidad temporal del orden de meses. Por lo tanto, existe aún necesidad por estudiar regiones puntuales de algunas decenas de kilómetros y procesos que toman del orden de horas a días en suceder, los cuales son difíciles de captar con las típicas técnicas de estudios de masas de agua a partir de perfiles de gradientes verticales de densidad, salinidad, temperatura y corrientes, desde cruceros oceanográficos.

Para estudiar procesos de escalas temporales de horas a años y de algunos cuantos km, existen técnicas que permiten capturar corrientes superficiales de forma

sinóptica, entre ellas se encuentran: (1) Altimetría satelital que nos permite observar el nivel superficial del mar y producir mapas de corrientes geostróficas asociadas a gradientes de presión en el agua, sin embargo este método está mayormente limitado por su resolución temporal (días en el mejor de los casos) ; (2) Radares de Alta Frecuencia que obtienen mapas de corrientes superficiales en zonas de cientos de kilómetros desde la costa y permiten medir la parte ageostrófica y geostrófica de las corrientes, con escalas espacio-temporales sin precedentes del orden de cientos de metros y algunos minutos ; y (3) Boyas de deriva, esta técnica fue de las pioneras en brindar información sinóptica de las corrientes superficiales. Actualmente derivadores equipados con GPS de alta precisión (1-3 m) y telemetría en tiempo real a través de satélites, permiten obtener trayectorias Lagrangeanas que representan la variabilidad de las corrientes desde otra perspectiva, con resoluciones espacio-temporales de algunos cientos de metros y horas, respectivamente.

La ventaja de estas técnicas sinópticas es que permiten identificar características como lo son; zonas de convergencia, divergencia y corrientes de chorro con escalas de decenas a algunos cientos de metros, mismas que pueden explicar la generación de filamentos por procesos de frentes térmicos, remolinos de pequeña escala y flujos boyantes.

En este trabajo, se utiliza una compilación de 13 trayectorias Lagrangeanas medidas entre el 2016 y 2019, junto con imágenes satelitales, con las cuales se estudia la variabilidad de la circulación superficial en una región frente a la costa de Baja California México, tanto en escalas temporales de días a años, cómo en escalas espaciales de cientos de metros hasta algunas centenas de km.

Otra de las ventajas de utilizar trayectorias Lagrangeanas en este estudio, radica en que los instrumentos contaron con sensor de temperatura que midió datos de temperatura superficial del agua, de forma que pudieron ser comparados con datos satelitales obtenidos con radiómetros y estudiar de forma simultánea las corrientes asociadas con frentes térmicos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Estudiar la variabilidad de las corrientes superficiales en la región de Baja California a partir de datos satelitales (temperatura superficial y corrientes geostróficas) y trayectorias Lagrangeanas medidas por boyas de deriva.

2.2. Objetivos particulares

- A partir de datos obtenidos de productos satelitales, estudiar la variabilidad anual (2016-2019) y estacional, de las corrientes geostróficas y temperatura superficial.
- A partir de datos medidos con boyas de deriva, estudiar la variabilidad espacio-temporal durante el mismo periodo (2016-2019).
- Comparar la variabilidad estimada con boyas de deriva y datos satelitales, encontrar las principales diferencias y discutirlos.

3. Datos y Métodos

Para la medición directa (*in-situ*) de las corrientes superficiales, existen dos técnicas importantes. La Euleriana que consiste en medir la velocidad de corriente en un punto fijo en la columna de agua a través del tiempo, generalmente realizada con correntómetros o ADCP's (Perfiladores Acústicos de Corrientes Doppler, por sus siglas en inglés) anclados; y la técnica Lagrangeana, que mide las corrientes desde un objeto en desplazamiento con la parcela de agua. Para esta técnica se pueden utilizar derivadores o trazadores que derivan por acción directa de las corrientes (Niller y Paduan, 1995; Ulanski, 2012; Pendón, 2017; Romero, 2019).

Los datos que se utilizarán para este trabajo fueron obtenidos mediante derivadores Lagrangeanos liberados en la Corriente de California, entre el 10 de agosto del 2016 y el 14 de marzo de 2020.

3.1. Derivadores superficiales

Los DORIS (Derivadores Oceánicos Remotos *in situ*) son sondas oceanográficas Lagrangeanas diseñadas y fabricadas en los laboratorios del Observatorio Oceanográfico Regional Costero (OORCo) del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California. DORIS ha sido documentado y utilizado en otros estudios como por ejemplo Gómez-Roa *et al.*, 2020 y González, 2017. El instrumento realiza mediciones autónomas y las transmite en tiempo real, cuentan con un GPS de alta precisión (WAAS con un error de $\pm 1-3$ m), un panel solar que brinda autonomía de varios meses, un papalote sub-superficial que funciona como draga de arrastre a un metro de profundidad y un microcontrolador con capacidad de obtener, procesar y enviar en tiempo real variables como la temperatura y posición geográfica, entre otras.

Su diseño es compacto, ligero y económico, por lo que son de fácil liberación y se pueden considerar desechables. La figura 1 muestra el esquema de DORIS, el cual incluye una draga sub-superficial para garantizar la deriva por acción directa de las corrientes y minimizar al máximo la acción directa del viento sobre el elemento de flotación. La figura 2a muestra una DORIS en el agua inmediatamente después de ser liberada, y la figura 2b muestra la draga subsuperficial.

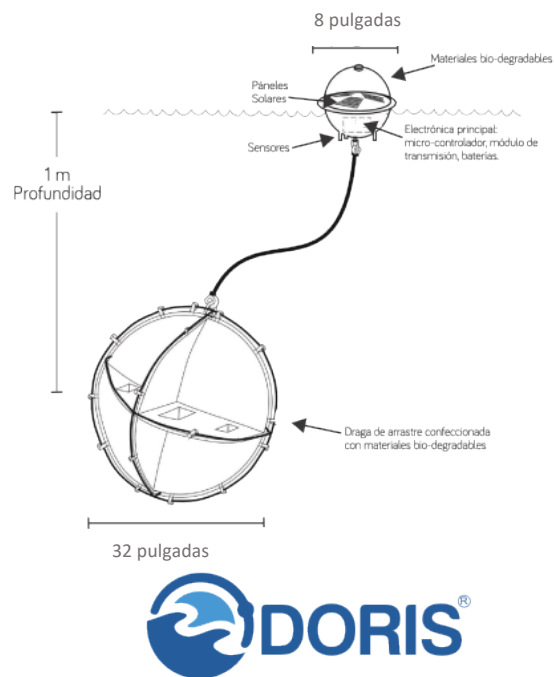


Figura 1.- Esquema de los derivadores oceánicos DORIS.

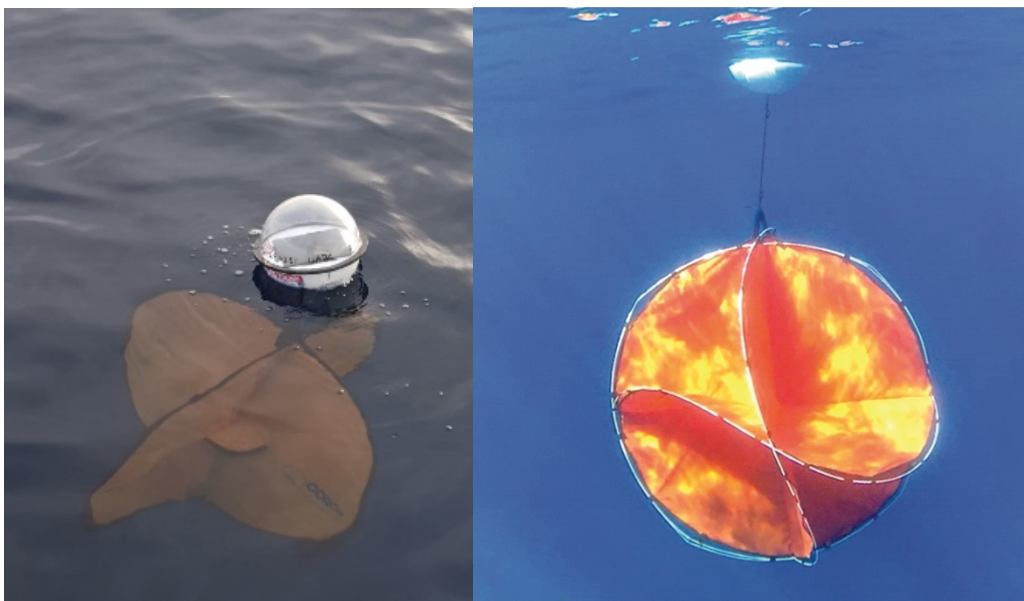


Figura 2.- Derivador oceánico DORIS liberado frente a la zona costera de Baja California, México. A) Izquierda; se aprecia la esfera de flotación de DORIS con su panel solar interior. B) Derecha; se aprecia la draga subsuperficial ubicada a 1 m de profundidad.

3.1.1. Procesamiento de datos obtenidos con derivadores.

El procesamiento de los datos para los derivadores consistió en eliminar datos registrados a bordo de la embarcación, datos en tierra, así como las posiciones erróneas por mal geoposicionamiento. Los datos de posición fueron obtenidos con un GPS de tipo WAAS, con una tasa de muestreo de aproximadamente cada hora, los cuales fueron almacenados como longitud y latitud. Para cada boya, se calculó la distancia desplazada entre cada posición, y se utilizó el esquema de diferencias centradas (Poulain *et al.*, 2009) para calcular las componentes de velocidad (u , v), donde:

$$u = \frac{dx}{dt} \quad v = \frac{dy}{dt}$$

dx = La diferencia en metros de las longitudes del punto anterior y el posterior.

dy = La diferencia en metros de las latitudes entre el punto anterior y posterior.

dt = Para todos los casos fue un intervalo de una hora, en segundos.

Con los componentes de velocidad (u , v) se calculó la magnitud de la misma como:

$$|V| = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Los datos de temperatura medidos por los DORIS a un metro de profundidad, fueron en intervalos de aproximadamente cada hora, por lo que se realizaron promedios diarios para tener mejor procesamiento de datos y gracias al GPS tipo WAAS se permitió tener una precisión menor a tres metros.

3.2. Productos satelitales

3.2.1. Altimetría satelital

Para estudiar los patrones de circulación geostrófica en la superficie, se utilizaron promedios diarios de altura del nivel de mar obtenida de productos de altimetría satelital. Del dato de altura de nivel de mar es posible derivar las velocidades geostróficas a partir de:

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{d\eta}{dy} \quad v_g = \frac{g}{f} \frac{d\eta}{dx}$$

Donde u_g y v_g son las velocidades longitudinales y latitudinales; g es el valor de la gravedad (-9.8 m/s); f es el parámetro de Coriolis, y $d\eta$ representa los cambios de η en X y en Y.

Los datos utilizados fueron generados por el Servicio de Monitoreo del Medio Marino Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) de los años 2016 al 2020, del cual se obtuvo un campo de η , y velocidad geostrófica (u y v), sobre una malla cartesiana con resolución espacio-temporal de ~ 10 km ($1/12^\circ$) horizontales y 1 día, respectivamente.

Con este producto se construyó una base de datos constituida por promedios diarios de velocidades geostróficas de los años 2016 al 2019, misma que permitió correlacionar las trayectorias de los derivadores con la dirección, magnitud y cambios temporales de la corriente geostrófica. De esta forma, se estimó la relación en escalas de días a meses, de la geostrofia sobre las trayectorias obtenidas por los derivadores.

3.2.2. Temperatura superficial del mar (SST)

Para estudiar la variación espacio-temporal de la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en ingles), se utilizó el Sistema Operativo SST y Análisis de Hielo Marino (OSTIA), descrito en Donlon *et al.* 2012. OSTIA utiliza una combinación de datos satelitales (ENVISAT-AATSR Advance Along Track Scanning Radiometer) y

datos *in-situ* medidos con boyas de deriva, para realizar un análisis basado en interpolación óptima a múltiples escalas diseñada para aplicaciones en predicción numérica del clima y sistemas de pronóstico oceánico. El sistema OSTIA filtra todos los datos con variabilidades menores a un día y produce una estimación diaria de SST global a una resolución de $1/12^\circ$ (~ 10 km) y precisión de $\sim 0.5^\circ\text{C}$ (Donlon *et al.* 2012).

OSTIA se encuentra disponible a través del Servicio de Monitoreo del Medio Marino Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Con este producto se construyó una base de datos de los años 2016 al 2019, que permitió correlacionar la temperatura *in-situ* medida por los derivadores DORIS con los campos de SST derivados de OSTIA, y a su vez con las corrientes geostróficas.

Los datos obtenidos de temperatura fueron convertidos de grados Kelvin a Celsius y posteriormente se graficaron en el software Matlab.

3.2.3. Mapas de viento

Para la variabilidad espacial y temporal de viento en la región de estudio, se utilizaron los datos de viento solo de los años 2018 y 2019 (por ausencia de datos del 2016-2017), obtenidos del Servicio de Monitoreo del Medio Marino Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Los datos comprenden información del campo de viento superficial (10 m sobre la superficie del mar), en una malla (u y v) con una resolución espacial de ~ 30 km x 30 km (0.25° x 0.25°), con promedios cada 6 horas durante los experimentos. Su uso permitió estimar las intensidades del viento, así como su dirección en cada una de las estaciones del año definidas por la tabla I.

Para el cálculo de la elipse de variabilidad se requirió rotar la orientación de los datos que componen una serie de tiempo a su eje de máxima varianza o eje principal para posteriormente obtener los parámetros de la elipse a través de la metodología propuesta por Emery y Thompson (1998) (Larrañaga, 2013). Si la componente zonal es $u(t)$ y la componente meridional es: $v(t)$ para un vector velocidad, entonces, $\vec{V}(t)$,

y u' y v' representan las componentes de las anomalías de las series de tiempo respecto a sus medias $\bar{u}$ y $\bar{v}$, se deduce que:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n$$

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n$$

$$u' = u(t) - \bar{u}$$

$$v' = v(t) - \bar{v}$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u'v'(tn)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\overline{u'v'}}{\overline{u'^2} - \overline{v'^2}} \right]$$

$$\begin{Bmatrix} \lambda u \\ \lambda v \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \{ \overline{u'^2} + \overline{v'^2} \} \pm [(\overline{u'^2} - \overline{v'^2})^2]^{1/2}$$

Donde C es la covarianza de los datos, θ representa el ángulo de máxima variabilidad y λu y λv representan la variabilidad de cada una de las componentes. Al relacionar dichas componentes λu y λv de la elipse de variabilidad se obtiene el índice π , en el cual se representa la excentricidad de la elipse y hace referencia a la variabilidad de la dirección del vector $\vec{V}(t)$.

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

Basados en la información satelital descrita, se estudió la variabilidad oceánica en el área de estudio. Se utilizaron los campos de viento, de temperatura superficial oceánica y las corrientes geostroficas, para estudiar y describir la variabilidad de las corrientes presentes en la región. Posteriormente se prosiguió a correlacionar la dinámica descrita con las trayectorias de deriva obtenidas por DORIS.

La sección 4.1 presenta la descripción de la variabilidad anual durante el periodo 2016-2019 y un análisis estacional dentro del mismo periodo, ambos basados en la SST y velocidades de corrientes geostroficas. Posteriormente en la sección 4.2 se presenta la variabilidad estacional durante los años 2018 y 2019 de los campos sinópticos de viento, esto como una forma de explicar la variabilidad descrita en la sección 4.1. Finalmente, en la sección 4.3 se presenta una descripción de las trayectorias medidas con DORIS, así como una comparación de temperaturas medidas por satélite y DORIS.

4. Resultados

4.1. Análisis de la circulación basado en SST y geostrofia satelital.

Con la finalidad de estudiar la variabilidad del sistema de corrientes en la región costera frente a Baja California, para los periodos de tiempo y condiciones muestreadas por los derivadores DORIS, se presenta una descripción anual del 2016 al 2019 de las corrientes geostroficas asociadas con la distribución de temperatura superficial estimados a partir de datos de satélite. Posteriormente se presenta una descripción estacional para los cuatro años de interés (2016-2019), y se discuten las principales corrientes y las estaciones del año con mayor variabilidad de las mismas. Las fechas de las estaciones del año definidas para este trabajo, se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Fechas limitantes de las estaciones del año.

Fecha	Estación
22-Diciembre al 19-Marzo	Invierno
20-Marzo al 20-Junio	Primavera
21-Junio al 22-Septiembre	Verano
23-Septiembre al 21-Diciembre	Otoño

(Instituto Geográfico Nacional, 2020).

4.1.1. Circulación anual 2016-2019.

La figura 3 contiene el promedio anual de los años 2016-2019, formado a partir de datos diarios de SST (mostradas como gradientes de color) y corrientes geostróficas (flechas negras). Durante los años del estudio, el rasgo principal de la circulación superficial fue una corriente costera (~70 km de la costa) en dirección al Ecuador, llamada de aquí en adelante como “Corriente Al Ecuador” CAE (indicada con una elipse roja en la figura 3), la cual se asoció con surgencias costeras, identificadas como con un gradiente de temperatura de $\sim 2^{\circ}\text{C}$ (entre la costa y el mar abierto). Esto es indicativo de dos procesos importantes, las surgencias costeras y el gradiente de presión (negativo costa-mar). Este último responsable de la corriente al Ecuador (CAE).

La CAE se observó durante los cuatro años presentados en este trabajo, con una velocidad promedio de $\sim 0.20\text{ m/s}$. Durante el 2016 la CAE alcanzó su máxima intensidad ($\sim 0.3\text{ m/s}$ en su promedio anual), además esta sufrió una bifurcación en la región denominada en este trabajo como “Región de Bifurcación” (RB), indicada con una elipse morada sobre la figura 3. En dicha RB, se puede apreciar que una parte del flujo sigue la costa a igual velocidad ($\sim 0.15\text{ m/s}$) y otra parte se dirige a mar abierto con un aumento de velocidad hasta $\sim 0.3\text{ m/s}$. El origen o forzamiento de esta RB tratará de ser abordado más adelante.

De esta descripción anual de 2016 a 2019, es notable que los patrones regionales y anuales representados en la figura 3, son consistentes durante los cuatro

años de datos analizados, con mayor incremento en magnitud de la CAE durante el 2016 y 2018, acompañado de una ligera migración de la RB al noroeste durante el 2016. Esta variabilidad anual pudiera estar relacionada a la intensidad y estructura del viento sinóptico o a gradientes de presión impuestos por cambios sinópticos del campo de temperatura.

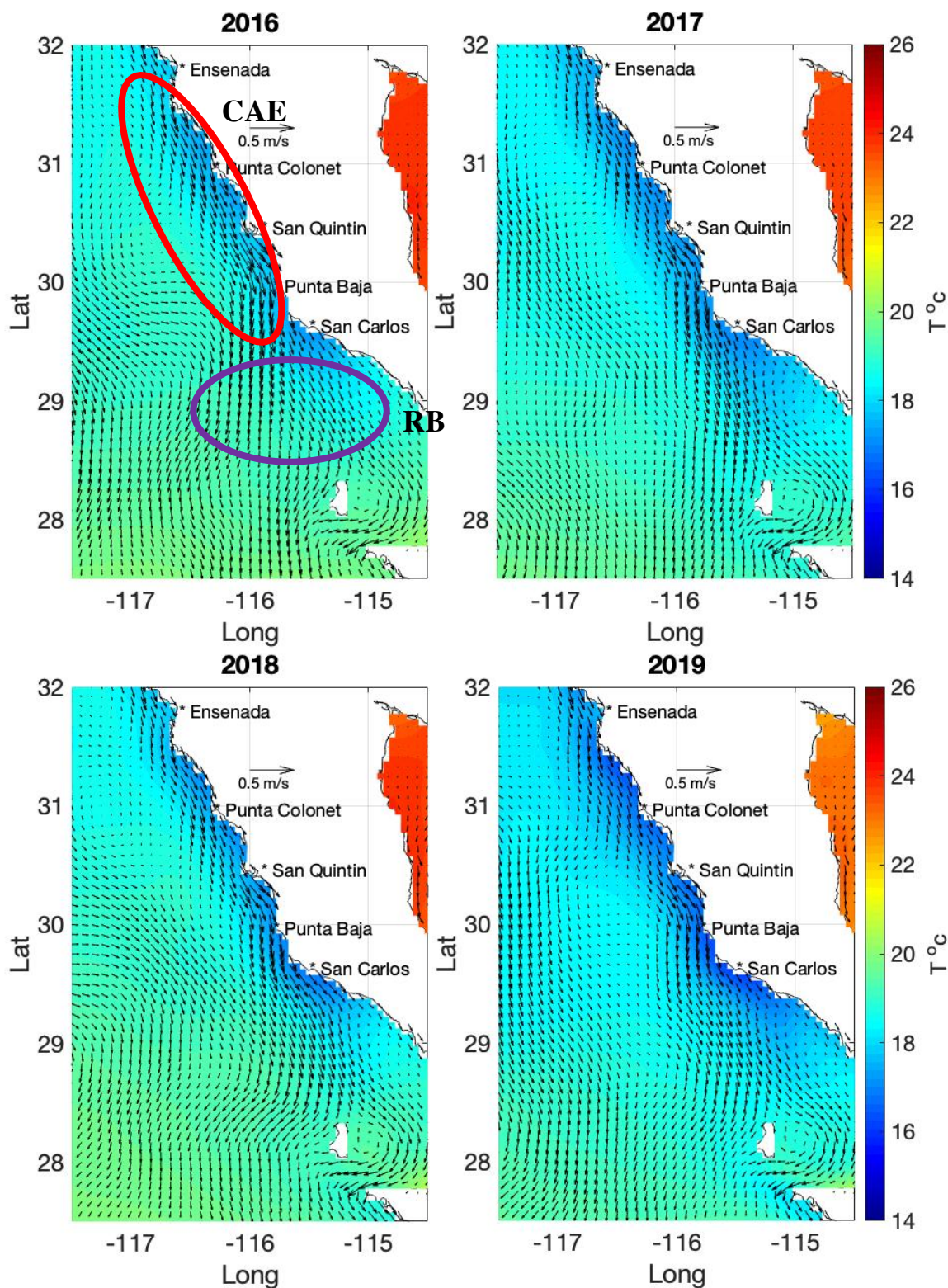


Figura 3.-Promedios anuales de la circulación superficial, estimados a partir de corrientes geostróficas y SST satelital. La región marcada por la elipse roja representa la corriente al Ecuador (CAE), mientras que la región marcada con la elipse morada muestra la zona denominada en este trabajo como región de bifurcación (RB). El gradiente de color indica la temperatura superficial del agua.

4.1.2. Circulación estacional 2016-2019

La figura 4 contiene los promedios estacionales del año 2016, limitados por las fechas indicadas en la tabla I y obtenidos a partir de mapas construidos con promedios diarios de SST y corrientes geostróficas. Durante el 2016 se observó la CAE con una velocidad promedio anual de ~ 0.15 m/s, con intensidades máximas durante primavera, verano y otoño de hasta ~ 0.5 m/s, y mínimas durante el invierno (~ 0.1 m/s). Durante la primavera aumentó la velocidad de las corrientes hacia el sur, lo que seguramente favoreció el transporte de Ekman (hacia fuera de la costa), y permitió el ascenso de agua fría ($\sim 16^\circ\text{C}$) a la superficie, más evidente en verano y otoño.

La CAE formó un flujo cercano a la costa (<70 km), mismo que se extendió de los 32°N hasta los $\sim 29.5^\circ\text{N}$, hasta dividirse en dos flujos distintos en la región denominada de bifurcación (RB). Dichos flujos se denominarán como '*prolongación al Pacífico*' de la CAE al flujo con dirección sur-oeste (hacia mar abierto), que sale al oeste de Isla de Cedros, indicado con la flecha gris gruesa y elipse negra sobre el panel de verano, y como '*corriente de Vizcaíno*' al flujo costero con dirección hacia al sur-este que incursiona en bahía Vizcaíno, indicado con la flecha gris gruesa y elipse amarilla sobre el panel de otoño.

De esta descripción anual de 2016 podemos también apreciar que durante la época fría (invierno y primavera) la temperatura fue $\sim 2.5^\circ\text{C}$ más fría que durante la época cálida (verano y otoño).

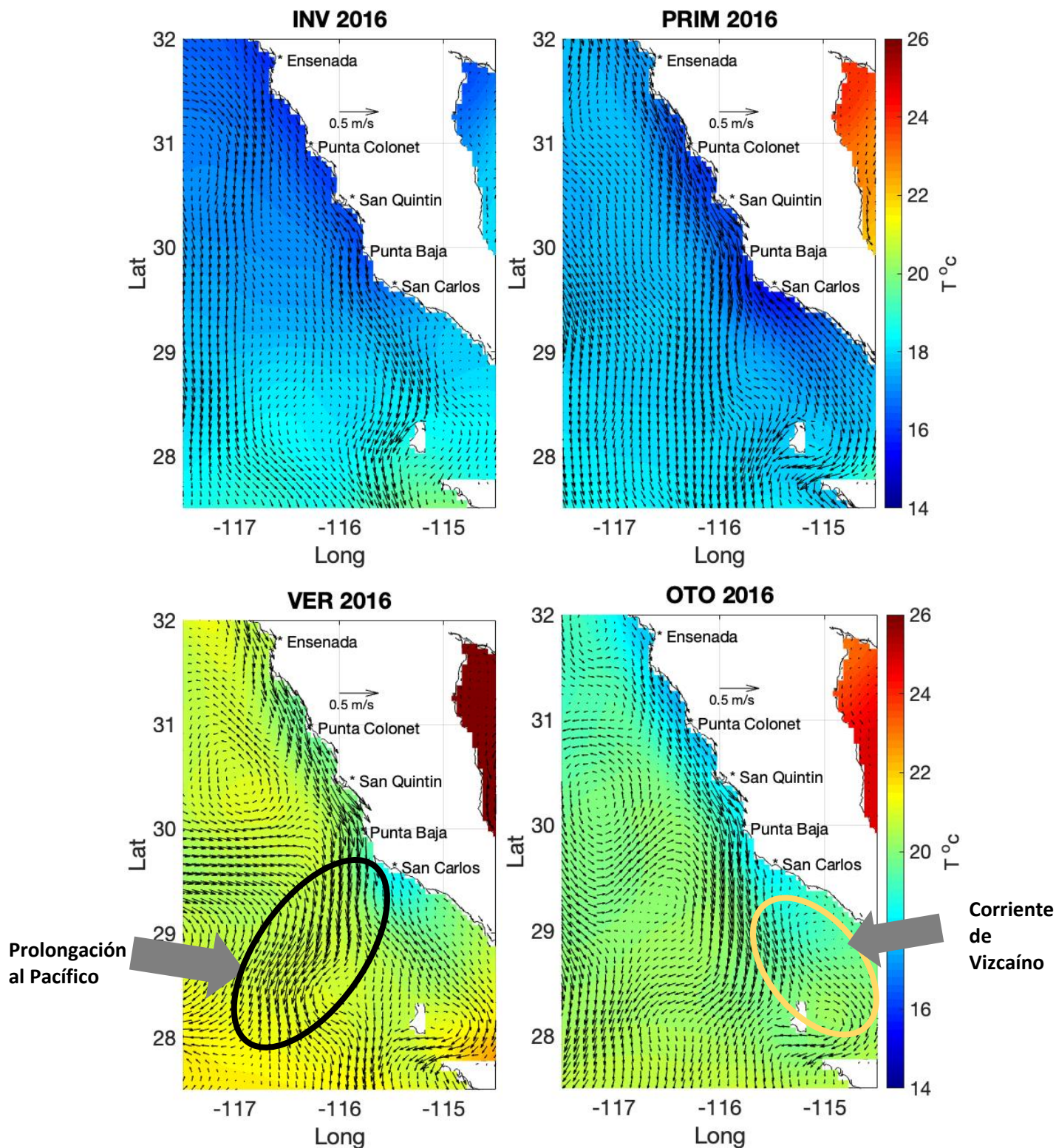


Figura 4.- Velocidades geostróficas satelitales durante el año 2016. En las cuales las flechas negras indican la dirección y magnitud de las corrientes, y las flechas grises gruesas indican las corrientes denominadas prolongación al Pacífico y corriente de Vizcaíno. El gradiente de color indica la temperatura superficial del agua.

La figura 5 muestra las épocas de invierno, primavera, verano y otoño, del 2017, en las que nuevamente se observó la CAE con una velocidad geostrófica promedio durante todo el año de ~ 0.2 m/s, con intensificación durante primavera-verano de hasta ~ 0.40 m/s y una disminución durante otoño-invierno (~ 0.15 m/s).

Durante la época fría se observó que la RB migró hacia el norte (frente a San Carlos $\sim 29.5^\circ$ N) y la corriente de Vizcaíno fue casi imperceptible. En contraste, en la época cálida la RB se observó al sur de San Carlos ($\sim 28.5^\circ$ N) con la presencia de la corriente de Vizcaíno bien desarrollada. Este esquema es opuesto al de 2016, donde la RB migró al norte durante la época cálida y al sur durante la época fría.

En la primavera y verano hubo un aumento en la velocidad de las corrientes hacia el sur, lo que seguramente favoreció el transporte de Ekman (hacia fuera de la costa), y permitió el ascenso de agua fría ($\sim 14 - 18^\circ$ C). La corriente de Vizcaíno fue más evidente durante el verano y otoño. Durante el 2017, el gradiente de temperatura fue de $\sim 4^\circ$ C entre la época fría (invierno y primavera) y la época cálida (verano y otoño).

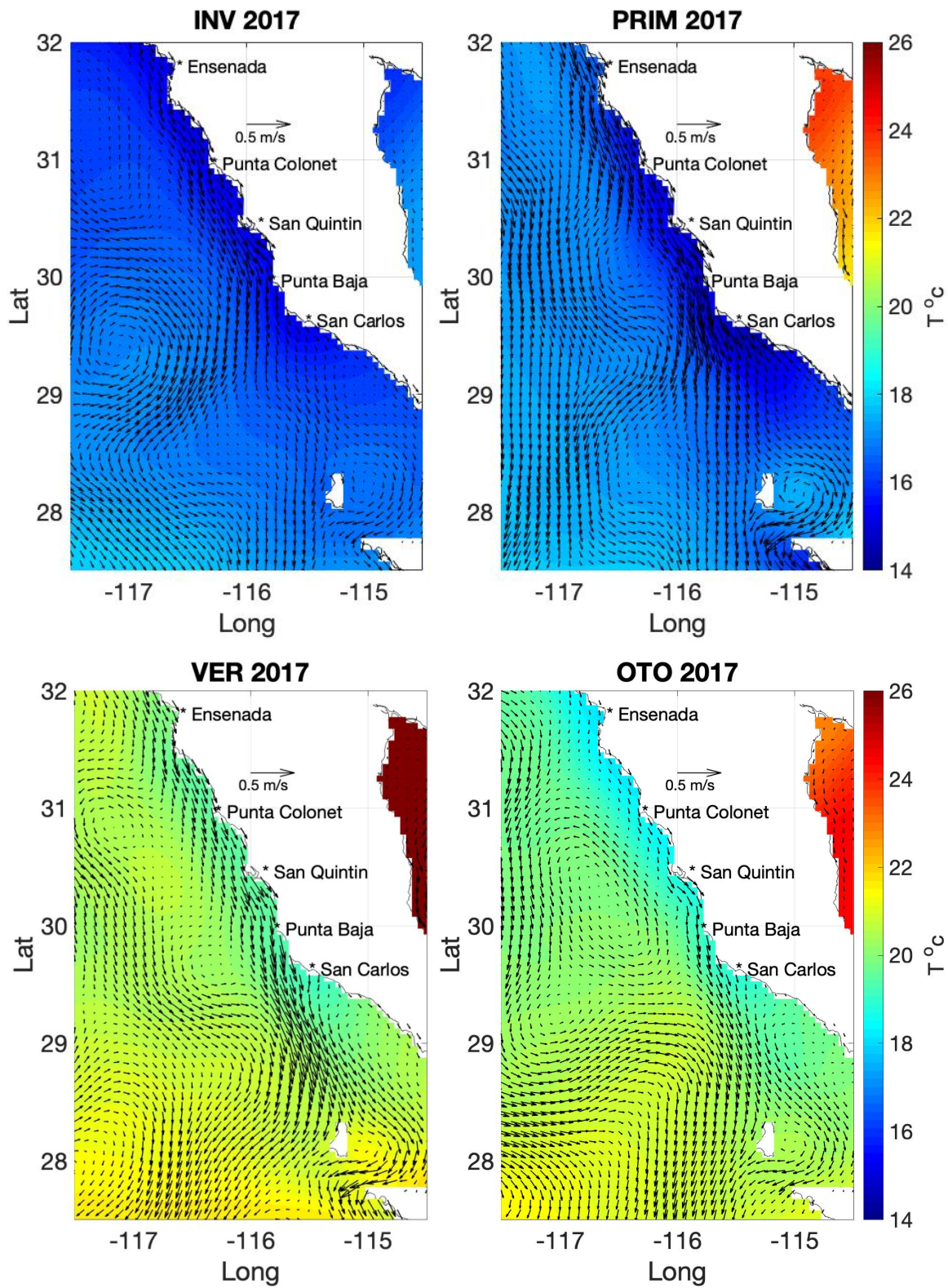


Figura 5.- Velocidades geostróficas satelitales durante el año 2017. En las cuales las flechas indican la dirección y magnitud de las corrientes. Los colores indican la temperatura superficial del agua.

La figura 6 contiene las épocas de invierno, primavera, verano y otoño del 2018, en las que se observó nuevamente la CAE durante todo el año con una velocidad promedio de ~ 0.2 m/s, con una intensificación durante primavera-verano de hasta ~ 0.5 m/s y una disminución durante otoño-invierno (~ 0.15 m/s).

Durante primavera y verano se presentó la RB de la CAE en su posición más sureña ($\sim 28.5^\circ$ N) sin observarse ninguna relación entre la posición de la RB y los gradientes de temperatura. Sin embargo, la presencia bien desarrollada de la corriente de Vizcaíno se pudo observar en verano y con menor intensidad durante primavera y otoño. En primavera hubo un aumento en la velocidad en comparación a los años anteriores, esta intensificación hacia el sur, favoreció el transporte de Ekman (hacia fuera de la costa), dicho proceso permitió el ascenso de agua fría ($\sim 14^\circ$ C). Durante el otoño la intensidad de la CAE fue muy tenue en comparación a los otoños de años anteriores. Otro aspecto importante que no se aprecia durante los años anteriores de estudio, es la ligera presencia en otoño de la contracorriente de California (señalada con una elipse de color azul en el panel de otoño), esta se puede relacionar a que en esta época los vientos son menos intensos que primavera y verano.

Durante la época fría (invierno y primavera) el gradiente de temperatura fue $\sim 7^\circ$ C más fría que durante la época cálida (verano y otoño), este gradiente es el más intenso de los cuatro años estudiados.

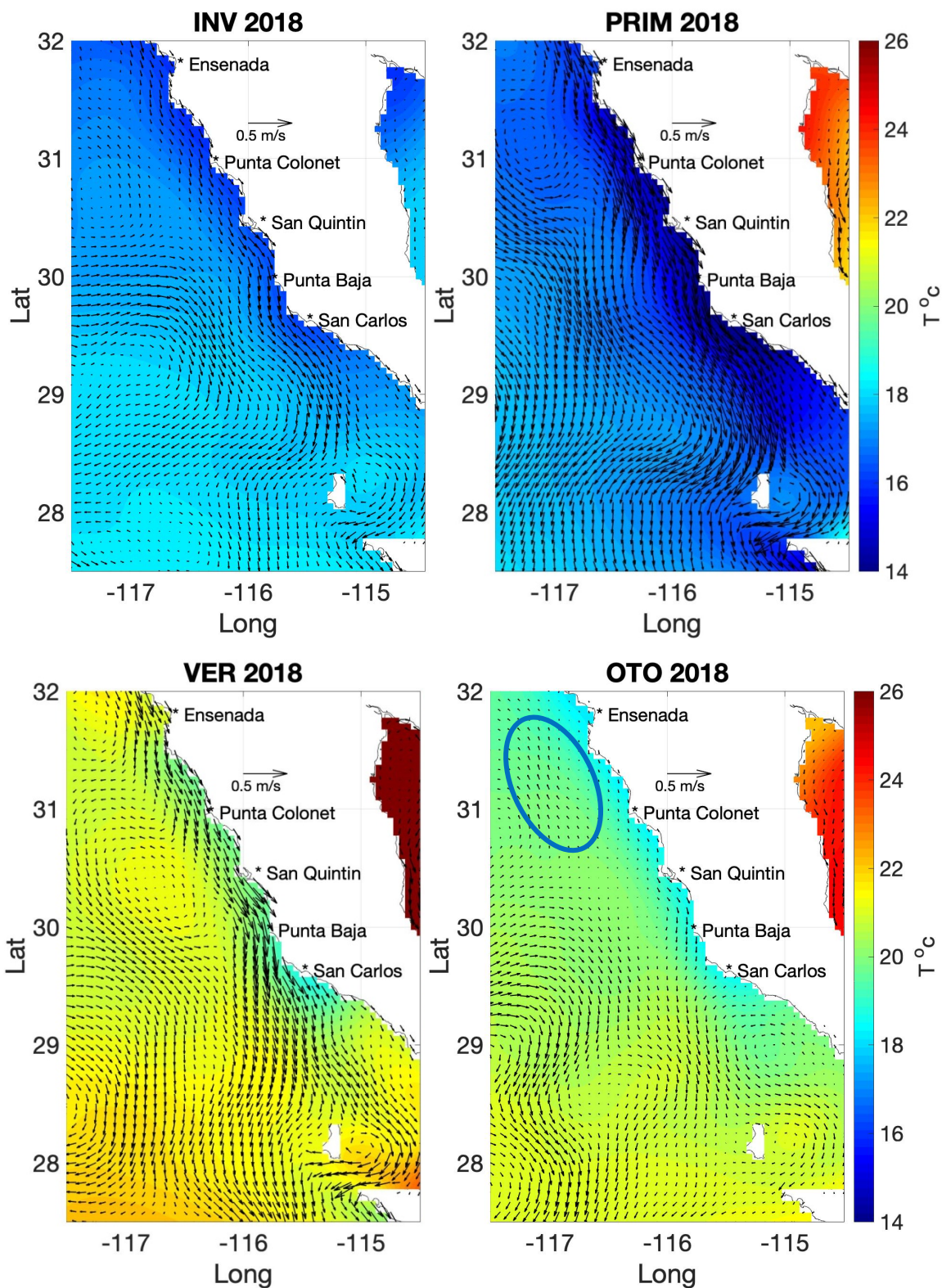


Figura 6. Velocidades geostróficas satelitales durante el año 2018. En las cuales las flechas indican la dirección y magnitud de las corrientes. Los colores indican la temperatura superficial del agua. La elipse azul en el panel de otoño muestra la contracorriente de California.

Por último, la figura 7 contiene la variabilidad estacional del 2019, se observó nuevamente la CAE durante todo el año con una velocidad promedio de ~ 0.2 m/s. Al igual que 2017 y 2018 la velocidad de la CAE fue mayor durante la primavera-verano (~ 0.5 m/s) cuando el flujo costero se intensificó y favoreció el transporte de Ekman (hacia fuera de la costa), lo que permitió el ascenso de agua fría ($\sim 14^\circ$ C), mientras que durante el otoño-invierno el flujo costero de la CAE fue más débil (~ 0.1 m/s).

Bajo condiciones intensas de la CAE, la región de bifurcación se observó en su posición más sureña (igual que en 2018) cerca a la Isla de Cedros $\sim 28.5^\circ$ N. Al igual que en los años anteriores, cuando la CAE es intensa y la posición de la RB es al sur, la corriente de Vizcaíno también se intensifica. Al igual que el 2018, durante el otoño del 2019 se apreció la ligera contracorriente de California (señalada con una elipse de color azul en el panel de otoño).

Durante la época fría (invierno y primavera) el gradiente de temperatura fue $\sim 6^\circ$ C más fría que durante la época cálida (verano y otoño), durante este año la RB se mantuvo entre los $\sim 28.5^\circ$ y 29° N indistintamente de la época cálida o fría.

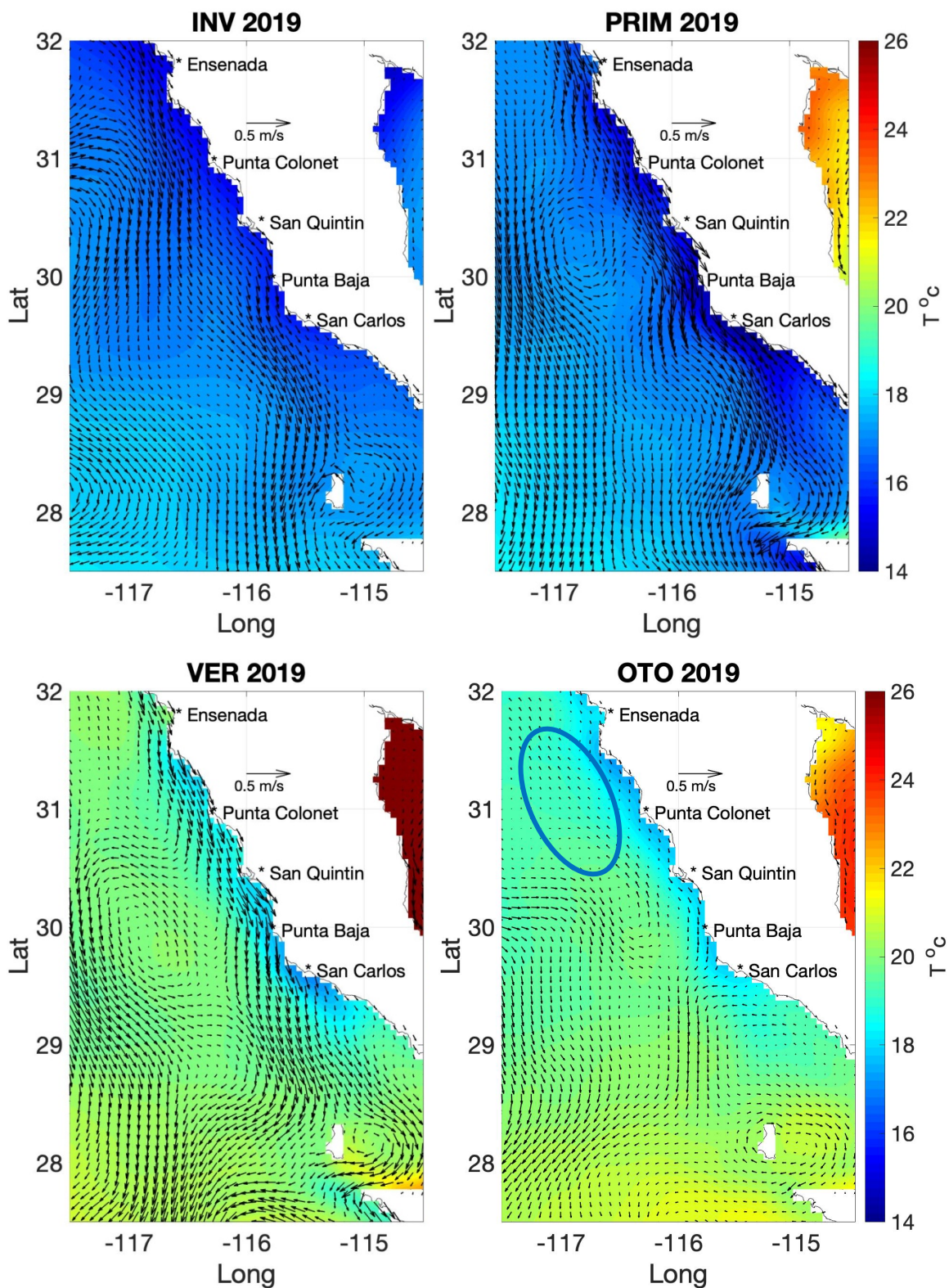


Figura 7.- Velocidades geostróficas satelitales durante el año 2019. En las cuales las flechas indican la magnitud y dirección de las corrientes. Los colores indican la temperatura superficial del agua. La elipse azul en el panel de otoño muestra la contracorriente de California.

En resumen, la descripción estacional de las corrientes durante 2016-2019 muestra que la intensidad máxima de la CAE siempre se presentó durante primavera-verano, mientras que la menor intensidad fue durante otoño-invierno, donde inclusive en el 2019 se observó una ligera inversión al norte de la CAE. Durante las cuatro estaciones del año, se observó una surgencia costera cuasi-permanente pero más evidente en las épocas de verano y otoño, por lo que estas surgencias seguramente están asociadas a la intensidad de la CAE (máxima en primavera-verano). Otro aspecto importante es que la ‘corriente de Vizcaíno’ y la ‘prolongación al Pacífico’ se intensificaron asociadas a intensificaciones de la CAE.

Con la finalidad de sintetizar algunos de los rasgos más relevantes de la CAE, la RB, la prolongación al Pacífico, la corriente de Vizcaíno y las surgencias costeras, la tabla II muestra una síntesis de estos rasgos.

Tabla II. Estaciones del año con las mayores velocidades geostróficas.

	2016	2017	2018	2019
Intensidad máxima de la CAE y época del año	0.5 m/s en primavera, verano, otoño.	0.4 m/s en primavera-verano	0.5 m/s en primavera-verano	0.5 m/s en primavera-verano
Posición geográfica de la RB	~29.5° N en la época cálida. ~28.5° N en la época fría	~29.5° N en la época fría. ~28.5° N en la época cálida	~28.5° N todo el año	~29.5° N en la época cálida. ~28.5° N en la época fría
Intensidad máxima de la corriente al Pacífico	0.3 m/s durante verano	0.2 m/s durante verano	0.2 m/s durante verano	0.25 m/s durante verano
Intensidad máxima de la corriente de Vizcaíno	0.2 m/s durante verano	0.2 m/s durante verano	0.18 m/s durante verano	0.17 m/s durante verano
Gradiente temperatura entre época cálida y fría	~2.5 ° C	~4° C	~7° C	~6° C

Del análisis anterior podemos inferir que la CAE no tiene una relación evidente con el gradiente de temperatura del agua entre la época fría y la cálida, sino que más bien se intensifica en primavera-verano y se atenúa en otoño-invierno, lo que seguramente este ligado a procesos como el esfuerzo del viento y los gradientes de presión impuestos por el mismo. En cuanto a la posición geográfica de la RB, esta parece estar ligada a la intensidad de la CAE, misma que al ser intensa parece forzar la migración al sur de la RB y la intensificación de las corrientes que de ella se desprenden (prolongación al Pacífico de la CAE y corriente de Vizcaíno), caso contrario al ser menos intensa la CAE, la RB migra hacia el norte.

Para explicar un poco mejor la presencia, intensificación y retracción de la CAE, así como de la presencia y posición de la RB, en la siguiente sección se presenta el campo de viento sinóptico.

4.2. Campos sinópticos del viento.

Con la finalidad de analizar el campo de vientos del área de estudio, en las figuras 8 y 9 se presentan, las elipses de variabilidad del viento y vector promedio para invierno, primavera, verano y otoño de 2018 y 2019, respectivamente. Los datos de este análisis fueron extraídos de la malla de viento con resolución espacio temporal de 30 km y 6 horas, como se describió en la metodología.

De las elipses de variabilidad y vector promedio se observó una inclinación dominante hacia el sureste, este patrón cuasi-constante durante ambos años, es un indicador de la dirección preferencial del viento, mismo que es favorecedor de las surgencias costeras.

Para ambos años (figuras 8 y 9) se aprecia que el vector promedio es mayor que la elipse de variabilidad durante las épocas de primavera y verano, mientras que durante invierno y otoño la elipse de variabilidad es mayor o igual que el vector promedio. Esto significa que las épocas de primavera y verano son épocas de vientos sostenidos, o varios eventos de vientos intensos, con dirección sureste, lo cual explica porqué en esas épocas la CAE presentada en las figuras 4-7 (paneles de primavera y verano) es de mayor intensidad. Por otro lado, las elipses de viento de las épocas de

invierno y otoño representan vientos mucho más variables y de menor intensidad, lo cual también corresponde bien con las figuras 4-7 (paneles de invierno y otoño) donde se aprecia que las épocas de menor desarrollo e intensificación de la CAE es precisamente durante invierno y otoño.

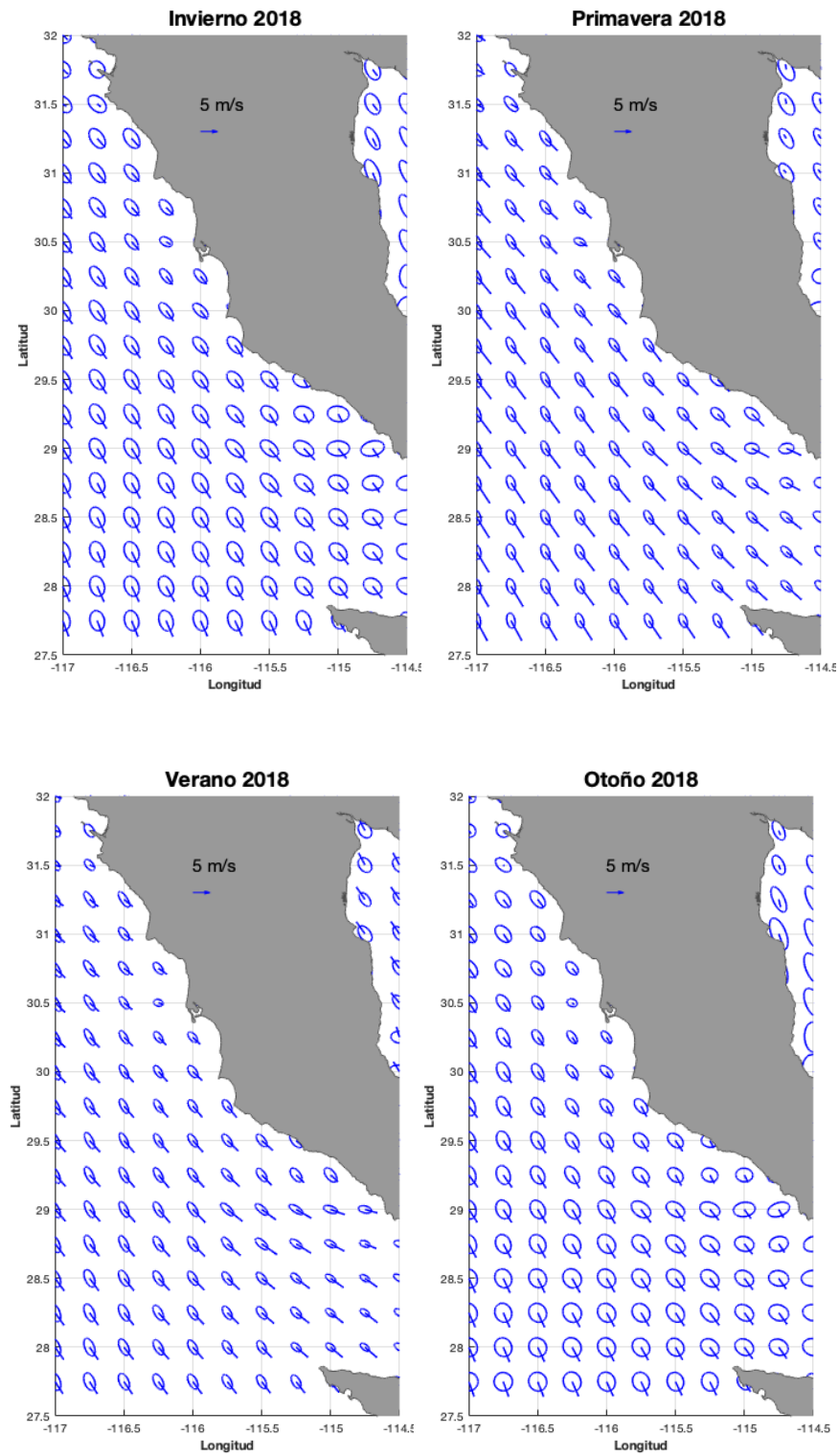


Figura 8.- Elipses de variabilidad del viento estacional, durante el 2018.

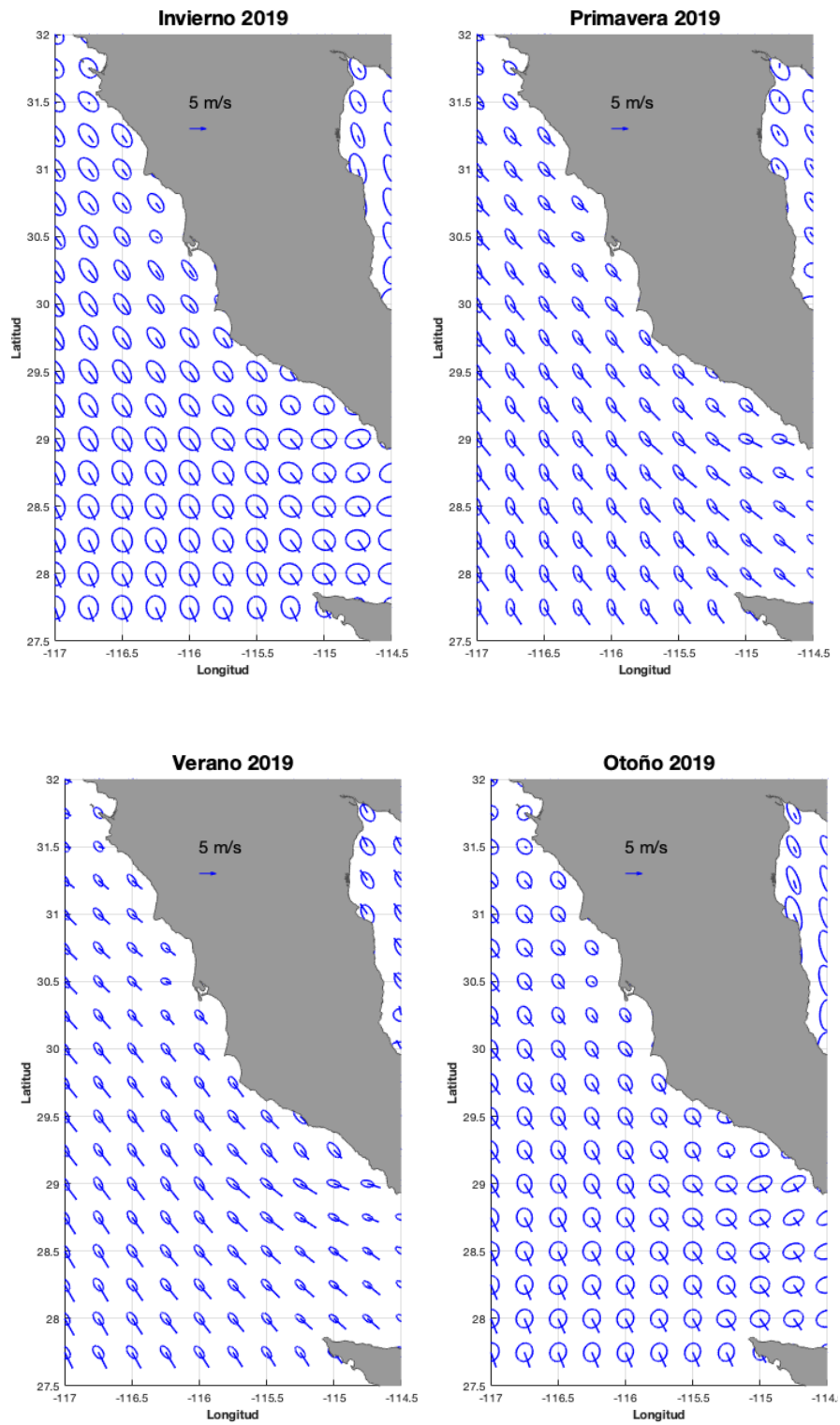


Figura 9.- Elipses de variabilidad del viento estacional, durante el 2019.

Del análisis anterior de viento podemos inferir que existe una relación de la intensificación de CAE con el viento, ya que estos al intensificarse en dirección sureste durante primavera y verano, se observa un aumento en las velocidades de la CAE, caso contrario cuando el viento es variable en dirección, la CAE no es tan intensa.

4.3. Trayectorias Lagrangeanas

Del 2016 al 2019, se obtuvieron un total de 13 trayectorias con los derivadores tipo DORIS. Las trayectorias incluyeron las épocas de primavera, verano, otoño e invierno, con datos continuos por más de ~200 días para las trayectorias más largas y de ~10 días para las trayectorias más pequeñas. La tabla III muestra la relación de trayectorias Lagrangeanas que se utilizaron para este estudio, así como el año de liberación, duración (fecha de inicio y fin) y estación del año.

Tabla III. Derivadores utilizados para obtener las trayectorias Lagrangeanas.

# Boya	Año	Inicio	Final	# Días	Estación
300234063541950	2016	10-ago-16	02-sep-16	23 días	Verano
300234064326080	2016	14-sep-16	28-oct-16	44 días	Otoño
300234064327210	2017	02-mar-17	31-mar-17	28 días	Primavera
300234064320080	2017	23-jun-17	08-ago-17	45 días	Verano
300234064166600	2017	24-jun-17	03-ago-17	40 días	Verano
300234066632460	2018	22-abr-18	04-jul-18	73 días	Primavera
300234066336340	2018	22-abr-18	06-jul-18	75 días	Primavera
300234066633470	2018	22-abr-18	16-may-18	24 días	Primavera
300234066633460	2018	22-abr-18	04-may-18	12 días	Primavera
300234067631230	2018	04-dic-18	20-jul-19	228 días	Invierno
300234067635510	2018	08-dic-18	01-ago-19	240 días	Invierno
300234067168760	2019	02-oct-19	27-ene-20	82 días	Otoño
300234067402750	2019	04-oct-19	16-oct-19	14 días	Otoño

La figura 10 muestra las trayectorias medidas en verano y otoño de 2016, dichas trayectorias son representadas por vectores continuos que muestran las magnitudes de velocidad de las corrientes medidas por los DORIS.

De las dos trayectorias medidas en 2016, es evidente que la magnitud de velocidad de las corrientes fue similar (~ 50 cm/s) durante el verano y el de otoño, esto corresponde bien con lo reportado en la sección 4.1, donde se mostró que en el 2016 las condiciones de verano y otoño fueron similares. De la misma forma, las trayectorias de ambos derivadores tienen una dirección hacia el sur, lo cual corresponde a la CAE.

La trayectoria de verano se dirigió al sur hasta $\sim 29^\circ$ N donde pareció adquirir una componente al suroeste que puede asociarse con la corriente identificada como 'prolongación al Pacífico', mientras que la trayectoria de otoño parece mantener su dirección al sureste hasta llegar a Isla de Cedros. Esto es similar a lo reportado en la figura 4 para verano y otoño de 2016, donde se aprecia que la RB migró al norte en verano de 2016 y al sur durante otoño del mismo año.

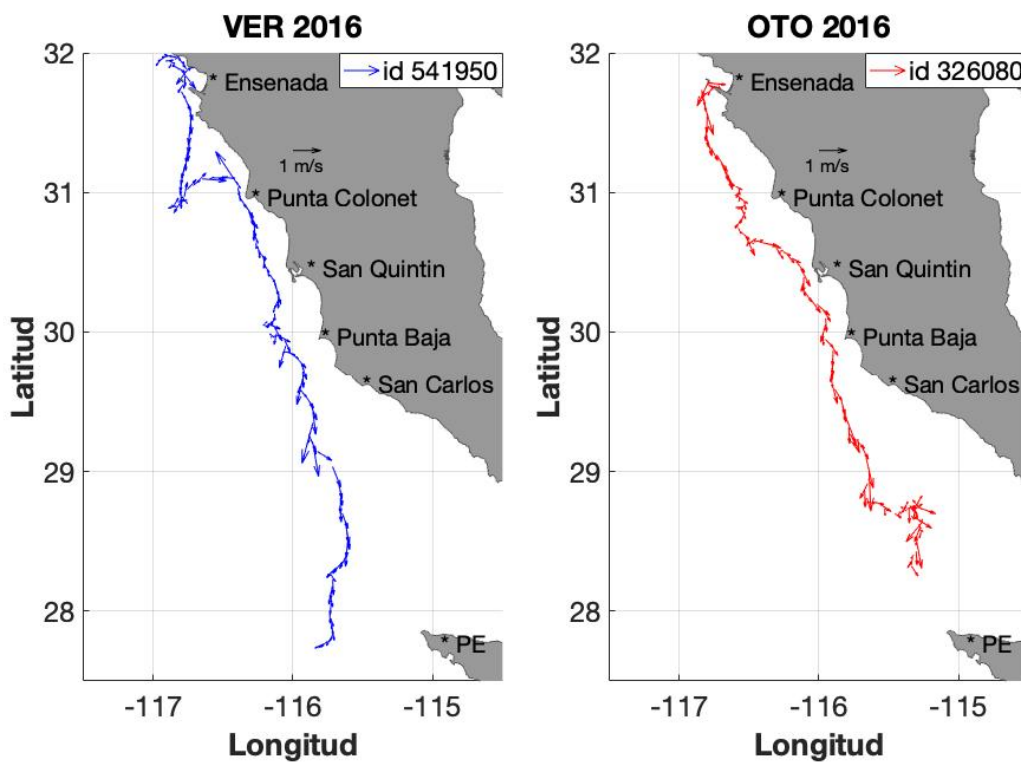


Figura 10. Magnitud de velocidad de los derivadores liberados durante el año 2016. La trayectoria azul representa corrientes medidas en verano, mientras que la trayectoria roja corresponde con otoño.

La figura 11 muestra las temperaturas de los derivadores DORIS y la temperatura satelital extraída en cada celda que describió la trayectoria para cada derivador. Dichos valores corresponden con la figura 4, donde las temperaturas de verano son mayores que las de otoño en $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ (esta diferencia de temperatura es solo entre los derivadores y la temperatura satelital).

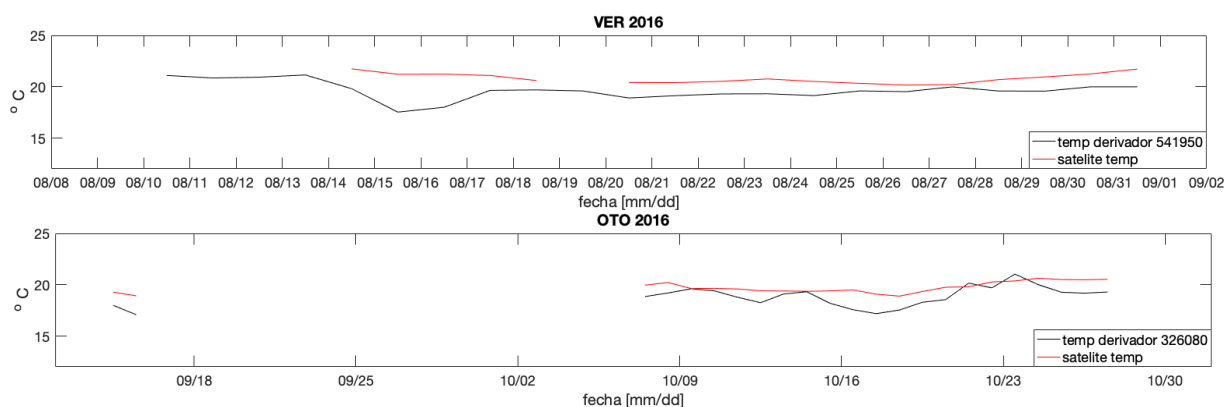


Figura 11.- Temperatura satelital y de los derivadores lanzados durante el 2016.

La figura 12 muestra las trayectorias medidas en primavera y verano de 2017. Las magnitudes durante este año son mayores en los derivadores liberados en verano (magnitud promedio de $\sim 0.43\text{ m/s}$) que en los de primavera (magnitud promedio de $\sim 0.23\text{ m/s}$), esto se puede relacionar a que en verano la intensidad del viento y las velocidades geostróficas son mayores.

Para la trayectoria de primavera, el derivador se dirigió hacia el sur, se encontró con un remolino ciclónico a $\sim 30.5^{\circ}\text{N}$ (poco evidente en las corrientes geostróficas reportadas en la figura 5 panel de primavera), del cual logró salir después de 9 días, y se unió nuevamente en la CAE para seguir su dirección al sur.

En las trayectorias de verano el derivador 166600 (trayectoria color cian) realizó el mismo “serpenteo” que las corrientes geostróficas (alejadas de la costa $>100\text{ km}$, figura 5 panel de verano) hasta unirse con la “prolongación al Pacífico” que se desprendió de la RB a los $\sim 29^{\circ}\text{N}$. Por otro lado, el derivador 320080 (trayectoria color magenta), se dirigió al sur, este se encontró con un remolino ciclónico del cual salió después de 10 días y se unió al “serpenteo” de las corrientes geostróficas lejanas de la costa. En la latitud cercana a los 28°N este derivador parecía incorporarse a la

corriente ‘prolongación al Pacífico’ pero más bien siguió una trayectoria muy costera al sur alrededor de punta Eugenia, corriente que también es evidente en las corrientes geostróficas presentadas en la figura 5.

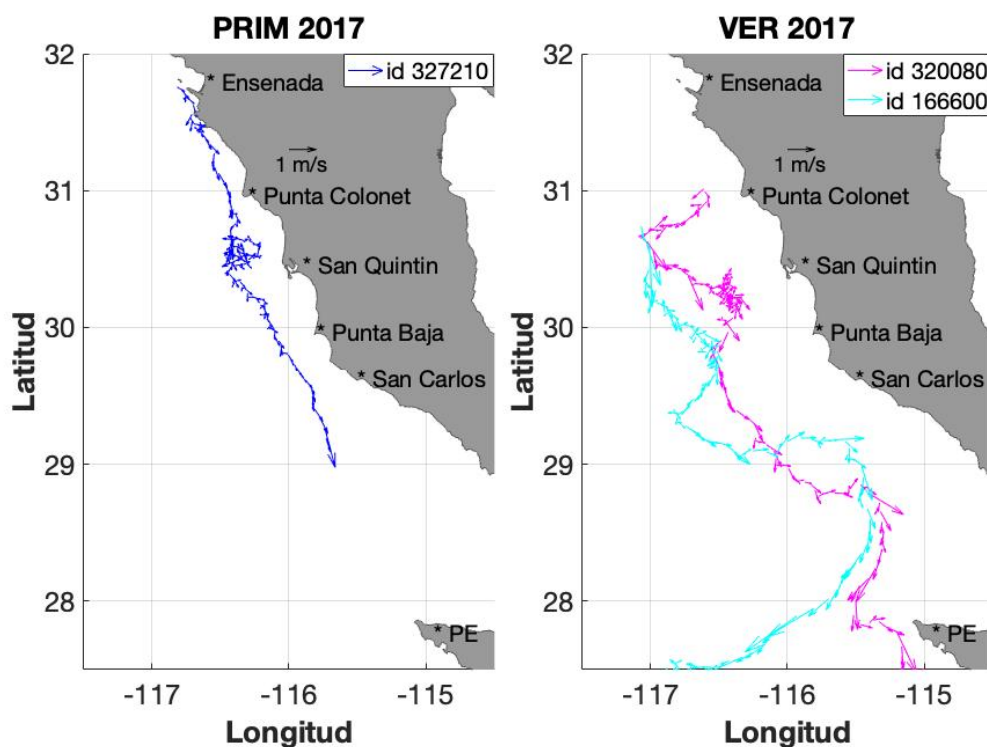


Figura 12. Magnitud de velocidad de los derivadores liberados durante el año 2017.

La figura 13 muestra las temperaturas de los derivadores DORIS y la temperatura satelital extraída en cada celda que describió la trayectoria para cada derivador. La temperatura de ambas fuentes de información (DORIS y Satélite) son similares, y la diferencia entre las temperaturas de verano y primavera es de $\sim 4^{\circ}\text{C}$ para ambas fuentes de datos. En primavera se apreció una temperatura estable de $\sim 15^{\circ}\text{C}$, durante toda la trayectoria de $\sim 31.5^{\circ}\text{N}$ a 29°N que recorrió el derivador, lo cual fue consistente con los gradientes de temperatura de la época fría. En las dos trayectorias de verano si se apreció un incremento paulatino de temperatura conforme los derivadores viajaron al sur.

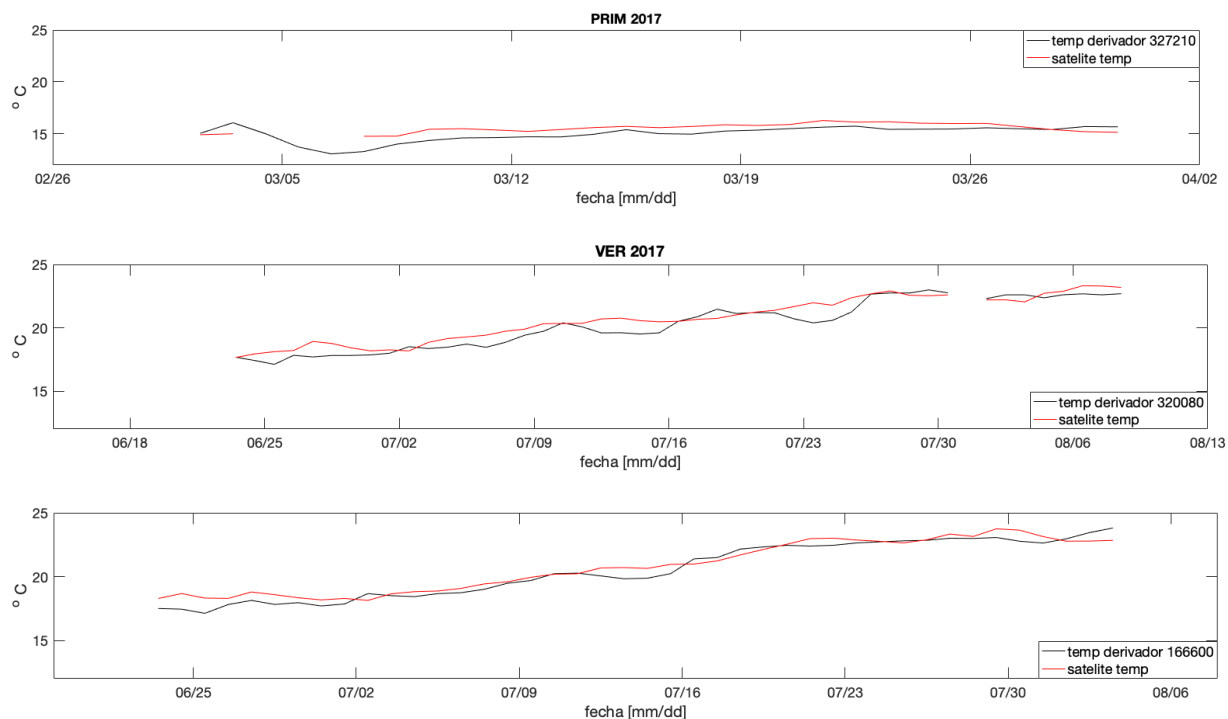


Figura 13.- Temperatura satelital y de los derivadores lanzados durante el 2017.

La figura 14 muestra las trayectorias medidas en primavera e invierno del 2018. Las magnitudes durante este año fueron mayores en los derivadores liberados en primavera (magnitud promedio de ~ 0.41 m/s) que en los de invierno (magnitud promedio de ~ 0.23 m/s), esto se puede relacionar a que en primavera la intensidad del viento y las velocidades geostróficas son mayores. Las trayectorias de invierno describieron una dirección al sur, de forma tal que siguieron la CAE (ver las figuras 6 y 14, panel de invierno) hasta latitudes de Punta Baja donde alcanzaron la RB e incursionaron en la “prolongación al Pacífico”.

Las trayectorias de primavera describieron el “serpenteo” hacia el sur, característico de las corrientes geostróficas de la región profunda (a más de ~ 100 km de la costa) y no la CAE, la cual es costera a menos de ~ 70 km de la costa. Los cuatro derivadores viajaron al sur hasta unirse con la corriente ‘prolongación al Pacífico’ que se desprende de la CAE en la RB a los $\sim 29^\circ$ N.

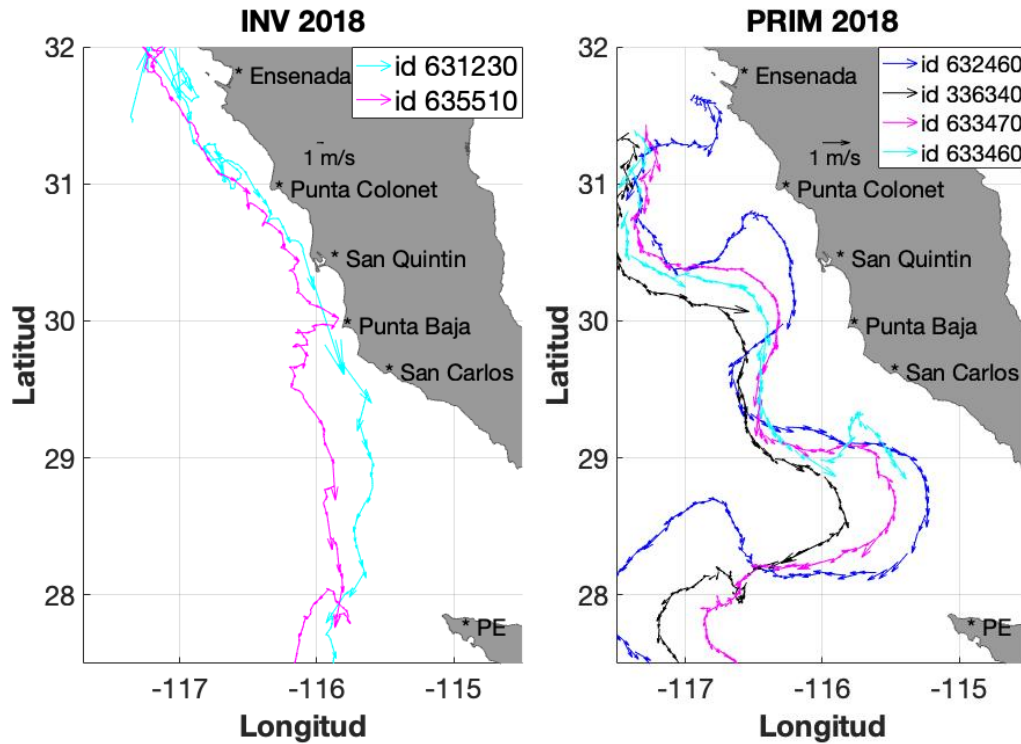


Figura 14. Magnitud de velocidad de los derivadores liberados durante el año 2018.

La figura 15 muestra las temperaturas de los derivadores DORIS y la temperatura satelital extraída en cada celda que describió la trayectoria para cada derivador. Las temperaturas de primavera aumentaron progresivamente con el tiempo mientras las boyas se dirigieron al sur, con diferencias mínimas ($<0.5^{\circ}\text{C}$) entre las mediciones obtenidas con las DORIS y las estimadas del producto satelital. En invierno también aumentan debido a la mancha de agua relativamente cálida ($\sim 19^{\circ}\text{C}$) que entra desde el sur (ver figura 6).

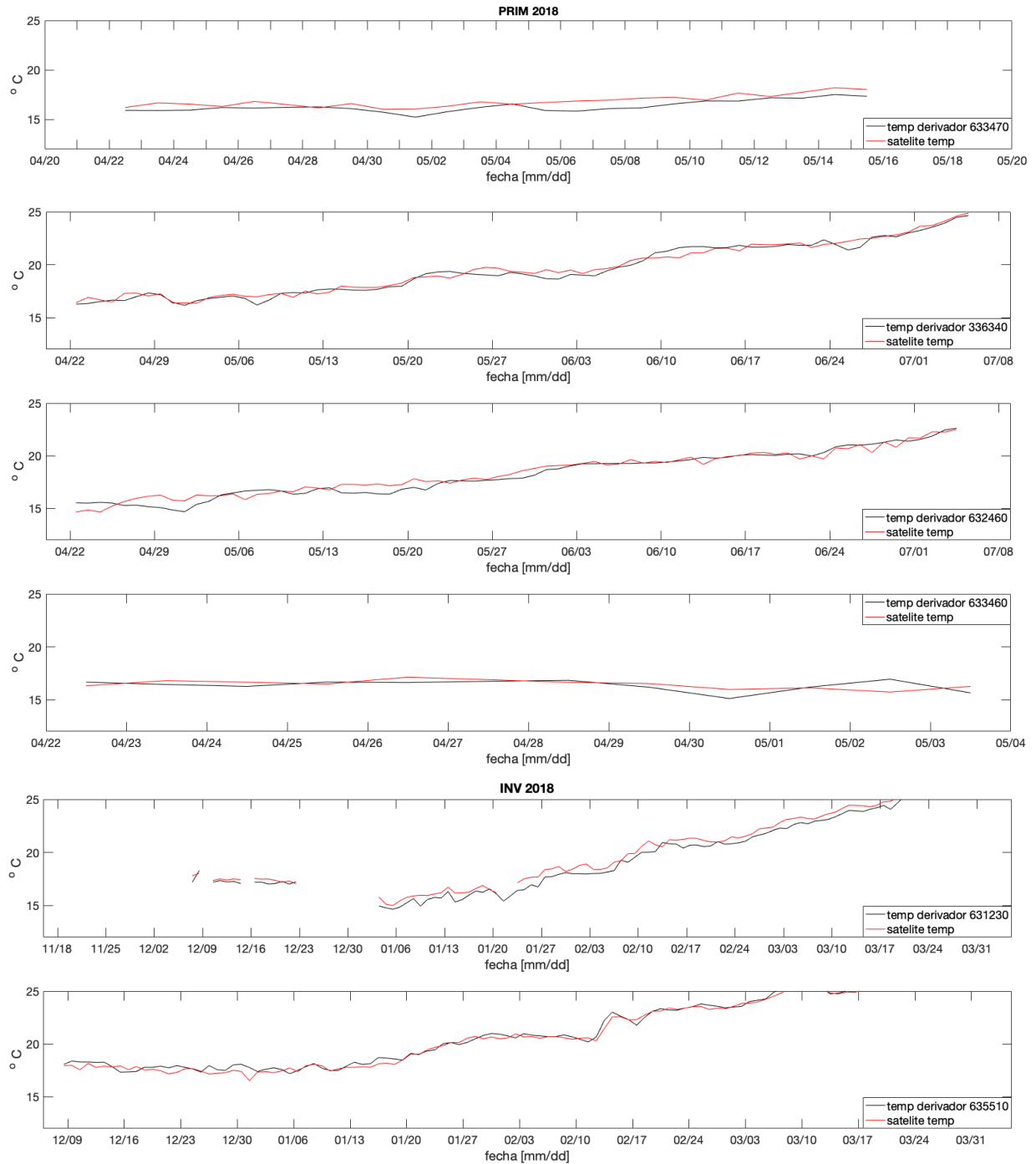


Figura 15.- Temperatura satelital y de los derivadores lanzados durante el 2018.

La figura 16 muestra las trayectorias medidas durante el otoño del 2019. Las magnitudes de las corrientes, en particular la CAE son las más débiles del año, como se puede apreciar también en la figura 7.

El derivador 402750 (trayectoria roja) siguió su dirección con la CAE relativamente cerca de la costa, propagándose al sur con velocidad promedio de ~ 0.25 m/s. En contraste, el derivador 168760 (trayectoria azul) entró en una travesía de giros ciclónicos durante 28 días que al final siguen su dirección hacia el sur con velocidad promedio de ~ 0.3 m/s, hasta encontrarse con una zona de convergencia a los $\sim 30^\circ$ N en la que el derivador queda atrapado por 16 días y gira hasta unirse con la CAE en la RB, y posteriormente dirigirse hacia el sur en lo que pareciera la corriente denominada 'prolongación al Pacífico'.

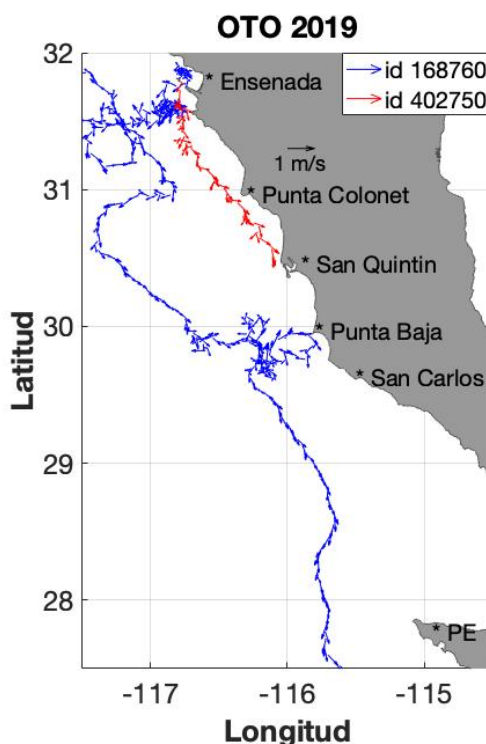


Figura 16. Magnitud de velocidad de los derivadores liberados durante el año 2019.

La figura 17 muestra las temperaturas de los derivadores DORIS y la temperatura satelital extraída en cada celda que describió la trayectoria para cada derivador. El derivador 168760 presenta temperaturas ligeramente más altas, ya que su deriva fue alejada de la costa (lejos de la región de surgencia), y mientras se dirigía al Ecuador su temperatura aumentó en $\sim 2.5^\circ$ C, ya que el agua del Ecuador provee de aguas cálidas a la región. Por otro lado, el derivador 402750 (trayectoria roja) realizó

su trayectoria cercana a la costa, dentro de la región de agua fría característica de las surgencias, como se observa en la figura 7.

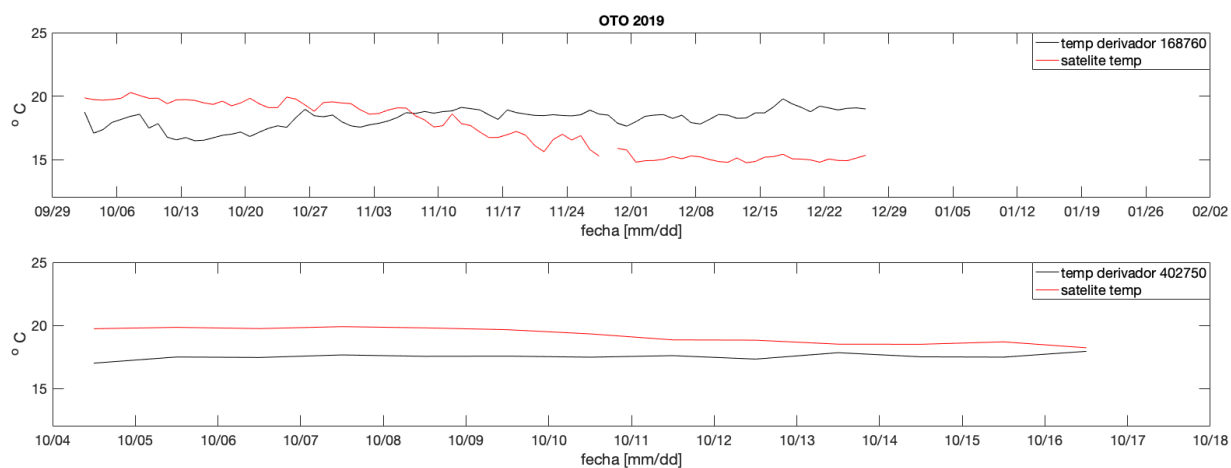


Figura 17.- Temperatura satelital y de los derivadores lanzados durante el 2019.

5. Discusión

En el presente estudio, el análisis de las corrientes superficiales frente a la zona costera de Baja California, muestra que los derivadores presentaron trayectorias variables según la época en que fueron liberadas. Todas las trayectorias Lagrangeanas tuvieron un desplazamiento en dirección al sureste, describieron un flujo cercano a la costa (<70 km) y con velocidades mayores durante la primavera y el verano. De los datos satelitales se observó que las corrientes geostróficas también reportaron dicho flujo costero hacia el sur y de igual forma que sus velocidades máximas fueron en primavera y verano, así como mínimas en otoño e invierno.

Este esquema de Corriente Al Ecuador (CAE), se observó durante los cuatro años de estudio y durante todo el año, lo cual es congruente con Lynn y Simpson (1987), así como la presencia muy débil de la contracorriente de California hacia el polo, misma que se observó en regiones a más de ~ 100 km de la costa durante relajación de los vientos en otoño (figura 6 y 7, panel de otoño) como se menciona en Velayarce (2019).

Una forma de explicar el hecho de que las velocidades de las corrientes son típicamente más intensas durante la primavera y verano, es que los vientos son más intensos durante estas épocas, esto es consistente con lo reportado por Durazo (2015), donde menciona que en la primavera y verano aumenta la intensidad de las corrientes debido a que los vientos del noroeste son más intensos y persistentes.

El principal forzamiento de la CAE, por lo tanto, pudiera ser el esfuerzo del viento y su dirección desde el noroeste, esto es consistente con lo que sugiere Parés *et al.* (1997) y Ramírez (2005) en que la estacionalidad de la CC se encuentra ligada a los vientos y centros de alta presión, lo que genera que tanto las corrientes geostróficas como los derivadores liberados en la zona costera, incrementen sus velocidades durante primavera y verano, esto es cuando el esfuerzo del viento es más intenso en la zona de estudio (figura 8 y 9).

Así mismo, como sugieren Pickett y Paduan (2003) y Durazo (2015), la variabilidad de la CC es fuertemente influenciada por los vientos, esto se apreció en las figuras de las elipses de viento (figura 8 y 9), en la que durante la primavera y verano

los vientos son sostenidos o de mayor intensidad con dirección sureste, mientras que, durante el otoño e invierno, los vientos presentaron una mayor variabilidad o fueron de menor intensidad. Esto concuerda con lo reportado por Durazo (2015), donde menciona que la menor variabilidad es durante la primavera y el verano, ya que un transporte uniforme de agua de la CC es derivado de la intensidad de los vientos del noroeste a lo largo de la costa.

Por otro lado, como menciona Strub *et al.* (1987), las surgencias resultantes de los esfuerzos del viento son generalmente durante primavera y verano, cuando los vientos a lo largo de la costa favorecen dicho efecto, esto se puede observar en las figuras 5, 6, 7 y 8, donde las surgencias costeras destacan durante primavera, verano e inclusive hasta en otoño. Además, como se menciona en Durazo (2015), al debilitarse los vientos durante el invierno se ve favorecida la entrada de agua tropical (caliente $\sim 18^{\circ}\text{C}$) desde el sur, la cual se puede apreciar durante los cuatro años de este estudio y en las figuras de temperatura obtenida por los DORIS, los cuales siempre al viajar hacia el sur empezaban a detectar agua más cálida.

Adicional a la variabilidad de las corrientes reportadas en la literatura, se encontró la presencia de una Región de Bifurcación (RB) en el límite sur de la CAE. Cuando las corrientes que conforman la CAE se intensifican, la RB migra hacia el sur ($\sim 28.5^{\circ}\text{N}$), mientras que cuando la intensidad de la CAE disminuye la RB migra hacia el norte ($\sim 29.5^{\circ}\text{N}$). Dos corrientes o flujos, se desprenden de la RB, denominados en este trabajo como ‘prolongación al Pacífico’ y la ‘corriente de Vizcaíno’. Dichas corrientes requieren más estudios y atención, ya que en este trabajo no se le pudo relacionar con alguna época del año o variabilidad estacional. Sin embargo, durante primavera y verano, la corriente de Vizcaíno fue más notoria que durante el otoño y el invierno.

El comportamiento de los derivadores dependió en gran medida tanto de la época del año, como de la distancia de la costa en las que fueron liberados, ya que los derivadores de primavera y verano, fueron los que presentaron mayores velocidades de hasta $\sim 1\text{ m/s}$. Estas trayectorias de deriva, al igual que los datos satelitales de corrientes geostroficas, siguieron los flujos al Ecuador durante todo el año (intensificándose en primavera-verano), tanto los costeros como la CAE como los de

regiones a más de ~100 km de la costa que forman corrientes en forma de “serpenteos” que circundan remolinos de mesoescala.

En general, durante el análisis de los derivadores, se encontró que, en la región de bifurcación, algunos siguieron a la prolongación al Pacífico, y en el caso contrario, ningún derivador se unió a la corriente de Vizcaíno, esto pudiera deberse a que quizá la prolongación al Pacífico sea más intensa que la de Vizcaíno, de forma tal que las boyas deriven con mayor frecuencia hacia el Pacífico.

En algunos de los derivadores de primavera y verano como los de las figuras 12 y 13 para dichas épocas, se observó un comportamiento destacable, un serpenteo lejano a la costa (>100 km), mismo que corresponde con lo mencionado por Durazo *et al.* (2010), en que menciona que este serpenteo durante la primavera es de aguas profundas (400 a 600 m), pero los autores al usar datos de estaciones hidrográficas obtuvieron un comportamiento de ausencia-presencia para dicha corriente, por lo que no lograron detectar un esquema de muestreo completo. Durazo (2015) utilizó mapas de contorno de la anomalía de la altura dinámica a 200 dbar, con las que detectó el serpenteo de la CC, que se dirige desde mar abierto hasta las costas de San Quintín y Punta Baja para serpentear de nuevo mar adentro hasta salir entre la Isla Guadalupe y Punta Eugenia. En este trabajo el serpenteo fue detectado a través de las corrientes geostróficas (derivadas de la altura del nivel del mar) y de algunos de los derivadores que se alejaron de la costa. Esto complementa lo mencionado por Durazo (2015), ya que no solo se registró el serpenteo de manera satelital, si no que también de una forma *in situ* gracias a los derivadores DORIS.

6. Conclusiones

Se estudió la circulación superficial estacional durante cuatro años, a partir de datos obtenidos de derivadores Lagrangeanos, y se complementaron con datos satelitales de temperatura, altura superficial del mar y campos de vientos.

Los patrones de circulación descritos por los derivadores liberados frente a la costa de Ensenada, Baja California, presentaron una dirección hacia el Ecuador durante todo el año. En general hubo dos trayectorias dominantes, una denominada como CAE, que es un flujo cercano a la costa, y otra que “serpentea” desde mar adentro hacia la costa y vuelve a salir al océano Pacífico entre Isla Guadalupe y punta Eugenia.

La intensidad de los vientos, jugó un papel importante en las velocidades de las corrientes, sobre todo durante las épocas de mayor esfuerzo (primavera y verano), donde la CAE incrementó su magnitud considerablemente. Al incrementar su magnitud, la CAE parece generar una Región de Bifurcación (RB) en su límite más sureño, de donde se desprenden dos corrientes importantes, denominadas en este trabajo como; ‘prolongación al Pacífico’ de la CAE y ‘corriente de Vizcaíno’. Tanto la región de bifurcación como las corrientes que de esta se desprenden, no presentaron una clara relación con los gradientes de temperatura, ya que estas se presentaron durante cualquier época del año, sin tener tampoco una estacionalidad bien definida. Sin embargo, más estudios son necesarios para evaluar de forma correcta la variabilidad tanto de la RB como de las corrientes que de esta se despenden.

7. Referencias.

- Castro, R., y J. A. Martínez. 2010. Variabilidad espacial y temporal del campo de viento, in *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. SEMARNAT-INE, edited by G. Gaxiola- Castro y R. Durazo, pp. 129–147, Environ. Agency of the Mexican Gov.
- Cepeda-Morales, J., G. Gaxiola-Castro., E. Beier., y V. M. Godínez. 2013. The mechanisms involved in defining the northern boundary of the shallow oxygen minimum zone in the eastern tropical Pacific Ocean off Mexico, *Deep Sea Res., Part I*, 76, 1–12.
- Donlon, C.J., M. Martin, J. Stark, J. Roberts-Jones, E. Fiedler and W. Wimmer. 2012. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of the Environment*. doi: 10.1016/j.rse.2010.10.017 2011.
- Durazo, R., A. M. Ramírez-Manguilar., L. E. Miranda., y L. Soto-Mardones. 2010. Climatología de variables hidrográficas, in *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. SEMARNAT- INE [in Spanish], edited by G. Gaxiola-Castro and R. Durazo, pp. 25–57, Environ. Agency of the Mexican Gov.
- Durazo-Arvizu R. 2003. Protocolo de propuesta SEMARNAT, 02MAC. Sometida a curso del fondo Sectorial SEMARNAT-CONACyT, junio 2001.
- Durazo, R. 2015. Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1173–1196.
- Emery, J., y Thompson, R. E. 1998. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon.
- Gómez-Roa, A., Flores-Vidal, X., Avendaño-Gastelum, O., Núñez, R., Sandoval-Rangel, A., Liera-Grijalva, C., y Nieto-Hipólito, J. 2020. Long autonomy unmanned aircraft vehicle (UAV) for quick release of ocean mini-drifters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.
- Hurlburt, H., y Thompson, J. D. 1973. Coastal upwelling on a β -plane. *Journal of Physical Oceanography*. 3(1), 16–32.
- IGN. 2020. Agenda Astronómica: Año 2017. Recuperado el 16 de marzo del 2020 de: https://astronomia.ign.es/rknowsys-theme/images/webAstro/paginas/documentos/Agendas_Astronomicas/Agenda_astronomica_2017.pdf

- González, J. J. 2017. "CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN PLATAFORMA CONTINENTAL Y AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO: OCTUBRE-NOVIEMBRE DE 2016" Tesis para obtener el grado de Oceanólogo. Universidad Autónoma de Baja California.
- Larrañaga, M. 2013. Variabilidad de la circulación superficial en la Bahía Todos Santos, Baja California, México. Tesis de pregrado. UABC. Ensenada, BC.
- Lynn, R. J., y J. J. Simpson., 1987. The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics, *J. Geophys. Res.*, 92(7), 12,947–12,966.
- Marchesiello, P., J. C. McWilliams., A. Shchepetkin., P. Physics., y L. Angeles. 2003. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System, *J. Phys. Oceanogr.*, 33(4), 753–783.
- McCreary, J. 1981. A linear stratified ocean model of the Equatorial undercurrent. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 298(1444), 603–635.
- Niiler, P., y Paduan, J. 1995. Wind-Driven Motions in the Northeast Pacific as Measured by Lagrangian Drifters. *Journal of Physical Oceanography - J PHYS OCEANOGR*. 25. 2819-2830. 10.1175/1520-0485(1995)025<2819:WDMITN>2.0.CO;2
- Parés, A., M. López., y E. G. Pavía. 1997. Contribuciones en la oceanografía física en México. Monografía No. 3 UGM, 1-24
- Pedlosky, J. 1974. Longshore currents, upwelling and bottom topography. *Journal of Physical Oceanography*. 4(2), 214–226.
- Pendón G. 2017. La costa de Huelva: Una introducción a los procesos y productos sedimentarios. Universidad de Huelva. Huelva, España.
- Pickett, M. H., y J. D. Paduan. 2003. Ekman transport and pumping in the California Current based on the U.S. Navy's high-resolution atmospheric model (COAMPS), *J. Geophys. Res.*, 108(C10), 3327, doi:10.1029/2003JC001902.
- Poulain, P., R., Gerin, E., Mauri y R., Pennel. 2009. Wind Effects on Drogued and Undrogued Drifters in the Eastern Mediterranean. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 26: 1144-1156. <https://doi.org/10.1175/2008JTECH0618.1>
- Ramírez, M. 2005. Variabilidad estacional e interanual en el sistema de la corriente de California frente a la costa de Baja California, México. Tesis de Maestría. UABC. Ensenada, BC.
- Reid, J. L., G. I. Roden., y J. G. Wyllien. 1958. Studies of the California Current system. *Progress Report, CalCOFI*, 1 July 1956 – 1 January 1958, 28 – 56, (La Jolla, Ca.).

- Romero, C. 2019. Estudio de la circulación superficial en la bahía de todos santos, Baja California, a través de experimentos con boyas de deriva. Tesis de pregrado. UABC. Ensenada, Baja California.
- Saavedra, J. 2017. Corrientes medidas con radio escaterómetros oceanográficos en las costas de Baja California. Tesis de Maestría. UABC. Ensenada, BC.
- Strub, P. T., J. S. Allen., A. Huyer., R. L. Smith., y R. C. Beardsley. 1987. Seasonal cycles of currents, temperatures, winds, and sea level over the northeast Pacific continental shelf: 35° N to 48° N, J. Geophys. Res., 92(C2), 1507–1526.
- Ulanski S. 2012. La corriente del Golfo: La increíble historia del río que cruza el mar. Turner publicaciones. Madrid, España.
- Velayarce, A. 2019. Estructura de la contracorriente subsuperficial frente a Baja California en junio de 2017. Tesis de pregrado. CICESE. Ensenada, Baja California.