

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



COMOPORTAMIENTO DE REMOLINOS DENTRO DE LA BAHÍA TODOS SANTOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE OCEANOLO

PRESENTA:

NATALIA PEREDIA MORALES

LA DIRECTORA DE TESIS: DR. XAVIER FLORES VIDAL

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, 2024

AGRADECIMIENTOS

Mi tutora Patricia Graef

Por desempeñar un excelente papel como maestra y tutora, dando consejos en dudas y momentos difíciles como estudiante.

Psicól. Mónica Ludvinsky

Por haberme apoyado desde el primer momento que me acerque para pedir ayuda con problemas de salud justo antes y después de la pandemia. Además de apoyarme activamente en mi caso de conflicto junto a la Dra. Lus Mercedes

Dra. Lus Mercedes

Por haber atendido un caso conflictivo que tuve casi al final de carrera apoyándome de manera constante durante su papel como directora de la Facultad de Ciencias Marinas.

División Acuática de Bomberos, Ensenada

En especial al Capitán Román Cortés por haberme dado la oportunidad de estudiar mientras trabajo en algo que me gusta (de salvavidas).

Mi mamá

Por apoyarme financieramente, sobre todo en pandemia.

Dr. Xavier flores

Por ser paciente en los inicios y falta de experiencia de mi parte siendo mi director de tesis. Y por haber logrado aprender a comunicarnos en el proceso.

Surfista y salvavidas Juan Valdivia

Al contar con más de 40 años de experiencia trabajando y conviviendo con el mar, me explicó y platicó muchas características de la bahía que me ayudó a comprender mucha literatura.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
CAMPUS ENSENADA**

**TESIS
“COMOPORTAMIENTO DE REMOLINOS DENTRO DE LA BAHÍA TODOS
SANTOS”**

**PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO
DE
OCEANOLOGO**

**PRESENTA:
NATALIA PEREDIA MORALES
344040**

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:


**Dr. Héctor García Nava
SINODAL**


**Dr. Xavier Flores Vidal
DIRECTOR**


**Dr. Napoleón Gudiño Elizondo
SINODAL**

“Por la Realización Plena del Ser”

C.c.p.- Archivo
C.c.p.- Minutario

Resumen

Un remolino refiere a un fluido que tiende a moverse en un patrón circular girando alrededor de un centroide, lo que ocasiona que se genere efectos dinámicos, tanto en la superficie del océano, como en la columna de agua. En el océano existen remolinos de diferentes escalas, generados por diferentes forzantes que afectan las propiedades físicas y biogeoquímicas del agua, llegando inclusive a tener impactos en diferentes organismos marinos.

En este trabajo se analizó una base de datos de corrientes marinas medidas en la Bahía de Todos Santos B.C. México, las cuales fueron obtenidas de manera sinóptica por medio de radares oceanográficos de alta frecuencia, los cuales generan mapas de corrientes superficiales ideales para el estudio de los remolinos superficiales. Se seleccionó un año de mediciones y se realizó un censo de los remolinos observados, con el objetivo de estudiar los patrones de comportamiento y/o estacionalidad en cuanto a su generación y características (como diámetro y sentido de rotación).

Los resultados más relevantes muestran que en 2016 existió un patrón de estacionalidad en la ubicación y probable de su zona de generación, tanto para los remolinos ciclónicos como para los anticiclónicos. Los remolinos ciclónicos fueron comunes en la parte norte de la bahía durante el invierno y emigraron hacia el interior de la bahía durante verano. Los remolinos anticiclónicos por su parte, solo se observaron en el interior de la bahía durante el invierno. En este trabajo se discuten posibles forzantes y se brindan hipótesis que coadyuvan a explicar mejor el comportamiento de los remolinos observados en la Bahía de Todos Santos.

Palabras clave:

Remolino, ciclónico, anticiclónico, diámetro, velocidad, variabilidad y estacionalidad.

Índice

INTRODUCCION.....	6
ÁREA DE ESTUDIO	9
Objetivo	12
Objetivos específicos	12
METODOLOGÍA.....	13
RESULTADOS.....	18
DISCUSIONES	29
CONCLUSIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA.....	33

INTRODUCCION

Oceanográfica y meteorológicamente, un remolino es un fluido (aire o agua) que tiende a moverse en un patrón circular girando sobre su mismo eje o centroide. En remolinos de gran escala esta tendencia a rotar es reforzada por la fuerza de Coriolis, mientras que en escalas más pequeñas los forzamientos comunes pueden ser cambios de presión atmosférica asociada con viento sinóptico, corrientes y cambios abruptos en la topografía o línea de costa. Independientemente de su tamaño, de su mecanismo y lugar de formación, los remolinos juegan un papel muy importante en el transporte de energía interna, de momentum y de propiedades bioquímicas del agua a lo largo de distancias mucho mayores a su diámetro (Cruz et al, 2008). Estos pueden influenciar en ciclos biogeoquímicos del mar, a través de diferentes mecanismos, como el transporte de nutrientes (Gaube *et al.*, 2014), la distribución de calor, sal y otros trazadores (Morrow y Le Traon, 2012) como contaminantes. Existen también evidencias de que el sentido de la rotación del remolino afecta la temperatura del agua: tal es el caso de los remolinos ciclónicos formados en el Estrecho de Florida que poseen anomalías negativas de temperatura (Gula *et al.*, 2015).

En el hemisferio norte, los remolinos anticiclónicos son aquellos que giran en sentido de las manecillas del reloj, lo que se conoce como vorticidad negativa; mientras que los remolinos ciclónicos giran en sentido contrario de las manecillas del reloj, presentando una vorticidad positiva (Olson, 1991).

La generación de remolinos de escala fina (metros a cientos de metros) se ha asociado principalmente a la intensificación del viento por la orografía, sobre todo la presencia de islas, y depresiones orográficas en cadenas montañosas. Sin embargo, algunos estudios como el de Wang *et al.* (2008) en el sureste de China, demuestran a partir de datos de radares oceanográficos HF y altimetría, que los remolinos (tanto ciclónicos como anticiclónicos) se generan a partir de campos sinópticos de gradientes de flujo de flotabilidad impuestos principalmente por los campos de calor de escala fina y cambios de temperatura en escalas de minutos a

horas en la superficie oceánica (Hogg y Gayen, 2020), siendo estos últimos más notorios en ausencia de viento.

Por otro lado, algunos otros autores como Zatsepin *et al*, (2011) asocian los remolinos ageostróficos (forzados por viento o gradientes de temperatura) y de submesoescala (definidos así ya que su radio es menor al radio de deformación de Rossby) a inestabilidades de sistemas de corriente unidireccionales y a la orografía del lugar.

Otro mecanismo de generación de remolinos es la fricción con el fondo (Gula et al., 2015), como es el caso del lado ciclónico de la Corriente del Golfo (en el Estrecho de Florida, E.U.A), cuya vorticidad es fuertemente intensificada en el estrecho debido al arrastre topográfico a lo largo del talud continental, además de que también se produce una capa turbulenta en el límite inferior. Cuando la corriente se hunde en el estrecho, se vuelve inestable al corte horizontal y forma un vórtice de algunos kilómetros de diámetro. Los remolinos que se forman alcanzan profundidades de alrededor de 50 m o más, y viajan hacia el norte (30-31°N), crecen lentamente hasta alcanzar un diámetro de 20 a 30 km y una profundidad de hasta 200 m.

Algunos autores que han identificado remolinos dentro de la Bahía Todos Santos, Baja California, desde la década de los 90's están: Argote M. et al. 1991, quienes simularon numéricamente la circulación influenciada por el viento en la Bahía y obtuvieron una circulación conformada por dos grandes remolinos inducidos principalmente por la línea de costa. Más recientemente Mateos E, et al., 2009; encontraron un remolino de periodicidad estacional, que asociaron a inestabilidades baroclínicas asociadas a la estructura vertical de los campos de temperatura. Otro trabajo similar, fue el publicado por Navarro et al. 2022, quienes encontraron evidencia de presencia de un remolino de submesoescala aparentemente forzado por viento. El estudio de dichos remolinos es relevante para la región, ya que la Bahía Todos Santos, por ser una costa bordeada por la ciudad y puerto de

Ensenada B.C. recibe presión considerable en forma de descargas, actividades portuarias, pesca y turismo.

Este trabajo se enfoca específicamente en la observación y censo de remolinos dentro de la Bahía Todos Santos (BTS). A partir de una base de datos media con radares HF durante el 2016, mismos que generaron información novedosa sobre la circulación superficial oceánica en forma de mapas sinópticos, lo que permitió identificar remolinos de forma directa y correlacionarnos con sus forzamientos.

ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía Todos Santos (BTS) se ubica en la costa oeste de la ciudad de Ensenada, Baja California, México, su ubicación geográfica está entre los 31° 42' y 31° 54' de latitud norte y los 116° 36' y 116° 48' de longitud oeste. Con una superficie aproximada de 200 km².

Las temperaturas más bajas de agua superficial en la BTS ocurren típicamente de febrero a abril (~12 a 14 °C) y las más altas de agosto a septiembre (~20 a 24 °C) (Cervantes, 2013; Zertuche, 2013; González, 2017).

Al ser una bahía semi-cerrada y relativamente somera (~60m), su circulación se ve afectada por la configuración de la batimetría y la línea de costa, por procesos locales y remotos generados por el viento y la marea, y por la influencia de la variabilidad estacional del Sistema de la Corriente de California (SCC) (Larragaña, 2013; Mateos *et al.*, 2009).

Como se muestra en la figura 1, en medio de la abertura que conecta con mar abierto a la BTS se encuentran dos islas, la isla sur que mide aproximadamente 2 km de longitud y la isla norte mide aproximadamente 1 km, ambas islas están separadas por un canal de aproximadamente 200 m de ancho; estas islas son nombradas, en conjunto, Isla Todos Santos (ITS). ITS divide la circulación e intercambio de agua entre la bahía y el océano abierto, en dos espacios llamados bocas: La boca norte se encuentra entre ITS y Punta San Miguel (SM), mide ~12 km de ancho y tiene profundidades menores a ~50 m. La boca sur se encuentra entre la ITS y Punta Banda (PB), mide ~5 km de ancho y tiene profundidades de hasta ~450 m debido a la presencia de un cañón submarino.

Lobaeto-Trejo E. *et al* (2005) hicieron campañas oceanográficas en agosto de 2004 y respecto a la superficie de la bahía reportan lo siguiente: temperatura superficial entre 18 y 22°C, relacionado a los cambios de marea (lo que influye en la dirección de corrientes) y el calor del medio día, los valores máximos de temperatura ocurrieron más adentro de la bahía y los valores mínimos más cerca de las bocas y

las islas; viceversa con las concentraciones de oxígeno disuelto. Los valores máximos de turbidez se apreciaron adentrándose más a la bahía (sin ser la parte más cercana a la costa). La temperatura del ambiente varió entre 20 y 27°C.

Rivas et al (2010) describieron la circulación Lagrangiana de la bahía, durante la primavera del 2007 después de un florecimiento algal nocivo (FAN), usando un modelo de escalas pequeñas basado en ROMS que incluyó forzamiento de las mareas. Los autores señalaron que las aguas del FAN provinieron principalmente del oeste de la Bahía acercándose a la plataforma continental, incrustadas en un flujo que se bifurcó y entró mayormente por el noroeste. El tiempo estimado de duración de las aguas dentro de la bahía y en la superficie bajo las condiciones impuestas en la simulación, fue de aproximadamente 60 días.

Rodríguez (2021) evaluó el comportamiento de oleaje en la Bahía Todos Santos con un enfoque hacia el aprovechamiento y generación de energía a través del oleaje. Para ello calculó la potencia del oleaje mediante modelación numérica comparado con mediciones in situ de un ADCP, en un periodo de 10 años (2008-2017). Los años con mayor potencia en promedio fueron 2010 y 2016. Los meses con menor potencia promedio sucedieron de junio a octubre y los meses con mayor potencia fueron de enero a marzo. Los puntos con mayor potencia, fueron (en orden descendente): Punta Banda, Bajo San Miguel (en medio de la boca norte) cuya altura significativa de la ola fue de 5.5 m, Isla Todos Santos con 5.35 m, Playa Hermosa con 4.59 m y Punta Morro con 4.45 m. El oleaje más grande se da durante el invierno y el oleaje remoto (swell) proviene de tormentas previas que se dan en el norte (Alaska, Hawaii y el Pacífico Nororiental); El oleaje de verano y otoño viene del sur y tormentas tropicales, pero no tiene mucho impacto en la bahía. En otoño la altura de oleaje suele ser entre 1.5 y 2 m con un periodo de 19 a 20 segundos. La altura predominante en los 10 años investigado fue de 0.5 a 2 m y el periodo predominante de 8 a 16 segundos.



Figura 1. Mapa de localidades a lo extenso de la línea de costa de la BTS.

Objetivo

Describir la variabilidad y características básicas de los remolinos de escala fina (con duración de algunas horas y escalas de algunos cientos de metros) observados dentro de la BTS, así como discutir sus posibles forzantes.

Objetivos específicos

A partir de una base de datos de un año de mapas de corrientes superficiales medidas en la BTS con radares oceanográficos de alta frecuencia, realizar lo siguiente:

- Un registro (tipo censo) de remolinos indicando características como: posición del núcleo, longitud del diámetro, velocidad y sentido de rotación.
- Generar figuras que ayuden a simplificar y visualizar la información recaudada.
- Explorar posibles forzantes.

METODOLOGÍA

Las corrientes superficiales del interior de la BTS fueron monitoreadas por tres radares oceanográficos de alta frecuencia (HFR) entre el año 2009 y 2019. Estos radares fueron operados en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) y la Facultad de Ciencias Marinas (FCM), de la Universidad Autónoma de Baja California. En este trabajo nos enfocamos en las mediciones del año 2016, pero la base de datos data de 10 años y se encuentra disponible en OORCo (<http://oorco.ens.uabc.mx>).

Como su nombre lo indica, los HF utilizan señales de radio de alta frecuencia (HF) con barrido de frecuencias y patrón de transmisión, además emplean arreglos de antenas para desacoplar la señal transmisora de la receptora (Flores-Vidal, 2015).

Las señales electromagnéticas tienen una frecuencia f_{RF} y una longitud de onda λ_{RF} que es programada en los instrumentos y transmitida hacia el océano donde, se reflejan sin dirección ni sentido sobre la rugosidad de la superficie oceánica (u ondas gravitacionales oceánicas). Para aquellas ondas electromagnéticas donde $\lambda_{ocean} = \lambda_{RF}/2$, las señales se reflejan con las mismas características y en un solo sentido hacia su origen, lo que se denomina condición Bragg. Las dos ondas (la transmitida y la originada por la superficie oceánica) se superponen, lo que ocasiona que la señal λ_{RF} se refleje y sea recibida por los HFR (Flores-Vidal, 2015).

La velocidad de fase de una onda gravitacional oceánica se puede definir teóricamente como:

$$Cp = \sqrt{\frac{g\lambda_{ocean}}{2\pi}}$$

Donde Cp es la velocidad de fase, λ es la longitud de la onda gravitacional oceánica y g es la gravedad.

Debido a la condición $\lambda_{ocean} = \lambda_{RF}/2$, la ecuación para la velocidad de las ondas Bragg sería:

$$Cp_{HFR} = \sqrt{\frac{g\lambda_{HFR}}{4\pi}}$$

Y la frecuencia Bragg se interpreta como:

$$f_{Bragg} = \sqrt{\frac{gf_{HFR}}{C\pi}}$$

Donde C es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s).

La diferencia de frecuencias Δf entre ondas Bragg teóricas y medidas se deben al efecto *Doppler* que la corriente oceánica origina sobre la onda.

Se utilizaron técnicas estándar para la estimación de la dirección de arribo de la señal (DF Direction Finding) como, MLE (Maximum likelihood estimation), tal cual es descrito en Kirincih A et. Al. (2019), con lo que se resolvió la dirección de arribo de la señal, y así se obtienen las corrientes radiales para cada estación de radar. La resolución de velocidad de la corriente radial corresponde a $\lambda\pi$ cambio de fase o a la propagación de los reflectores una longitud de onda λ , esto es:

$$v = \frac{\lambda}{nt} = \frac{\lambda}{T}$$

$$V = \frac{v}{n/2} = \frac{\lambda}{2t}$$

Donde v es la resolución de velocidad de las corrientes, V es la máxima velocidad, n es el número de barridos de pulsos con distintas frecuencias (típicamente 2048), t es la duración individual de cada barrido (normalmente 0.3 s) y T es la duración total de medición.

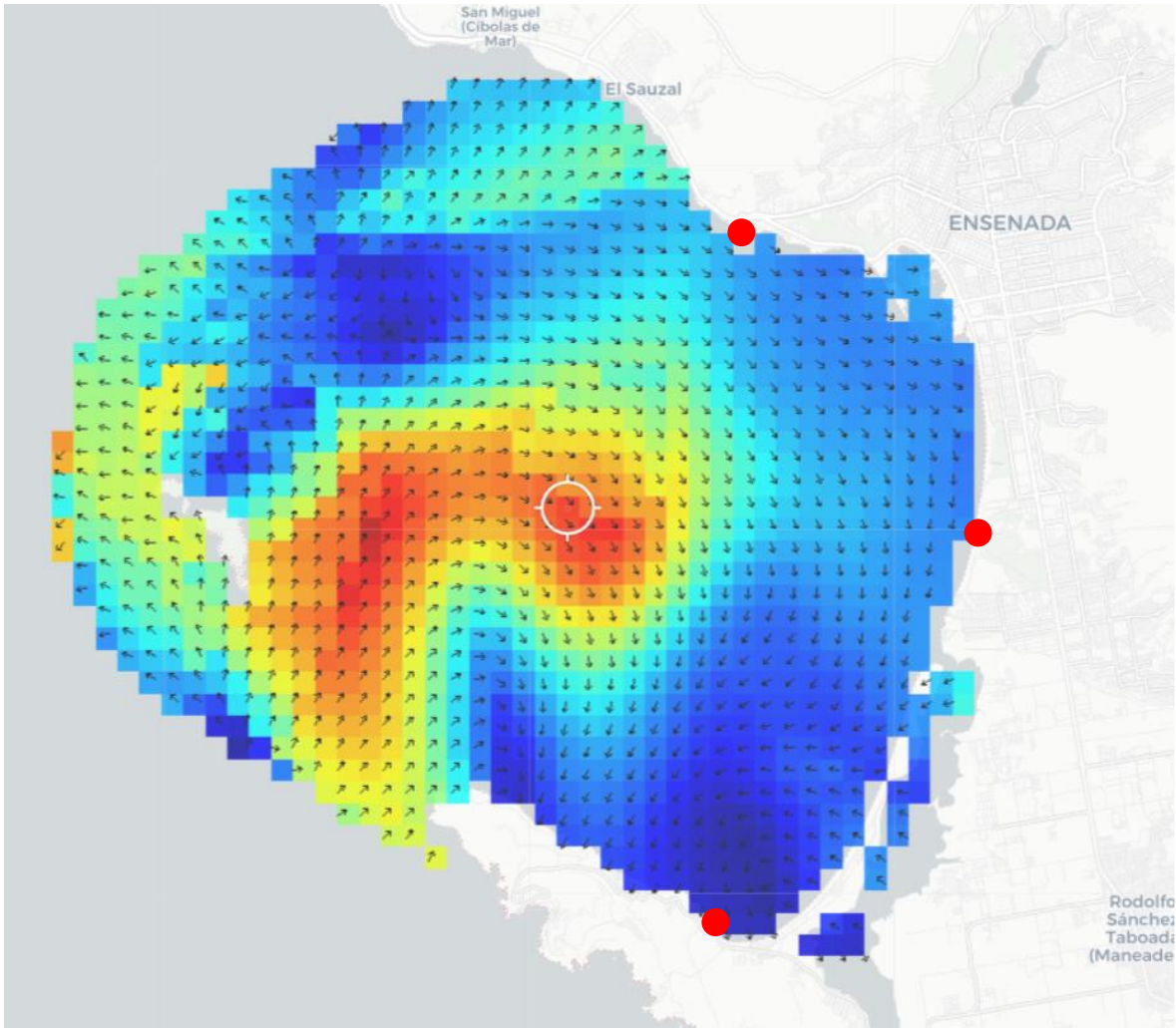


Figura 2.- mapa de corrientes superficiales obtenida en la BTS a partir de tres radares HFR instalados en la costa (círculos rojos).

La figura 2 muestra un ejemplo de los mapas de corrientes producidos por los radares HF y tomada directamente de <https://oorco.ens.uabc.mx/red-radares>, donde la resolución espacial fue de 500 m y la temporal de 1 hr. Con estos mapas se generaron mapas sinópticos diarios, que permitieron mejorar la cobertura y precisión de las mediciones.

Para este trabajo se utilizaron los promedios diarios de corriente superficial del año 2016, producidos por la red de radares oceanográficos de la BTS. La base de datos

fueron mapas sinópticos de corriente superficial que abarcó todo el interior de la BTS. A partir de estos datos, se elaboró un registro de los remolinos que se observaron, para cada mes del año y para cada sentido de rotación. Cada plantilla incluyó el día del mes, las coordenadas geográficas del núcleo del remolino, la longitud del diámetro y la velocidad tangencial del remolino.

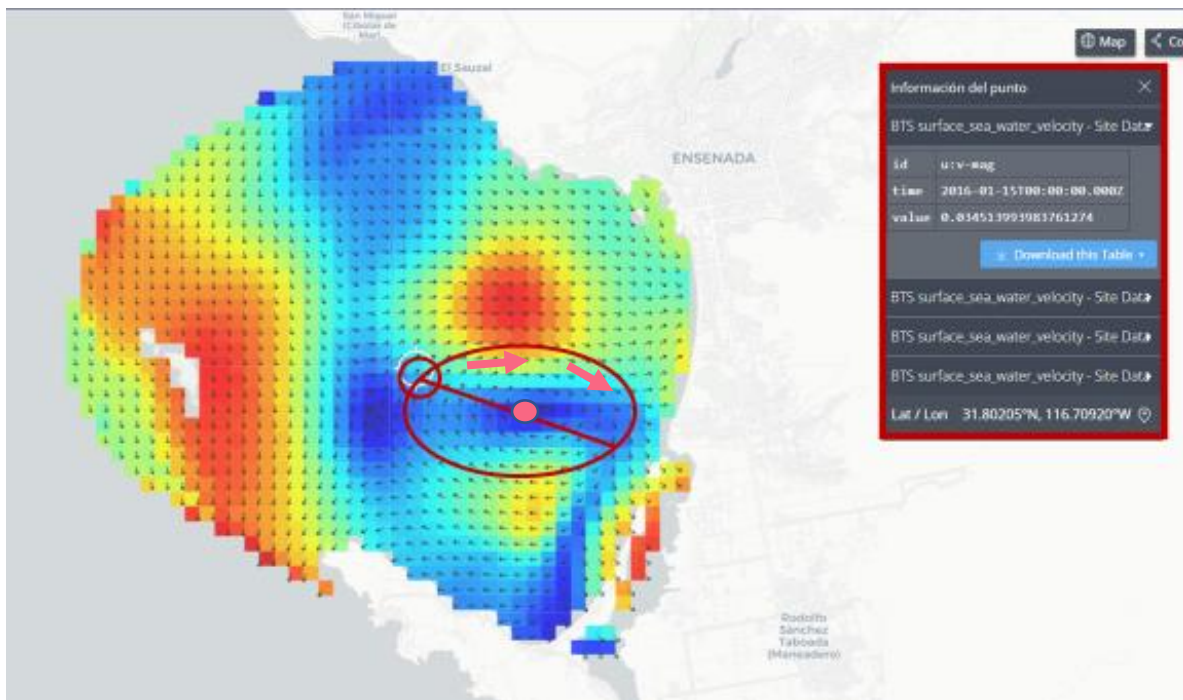


Figura 3.- Ejemplo de un remolino anticiclónico detectado en el interior de la Bahía de Todos Santos. Se indica la manera en que se obtuvo la posición del centroide, el diámetro y la velocidad tangencial (recuadro de la esquina superior derecha).

La figura 3 muestra un ejemplo de un remolino, indicando las características del remolino como; posición del núcleo (punto rosa), diámetro (línea diagonal roja), sentido de rotación (flechas rojas) y velocidad tangencial del mismo (seleccionado del sitio del círculo rojo, la velocidad es visible en el rectángulo gris de marco rojo).

Seleccionando cualquier punto del área monitoreada de la bahía, aparece un rectángulo a la derecha del mapa, dicho rectángulo proporciona las coordenadas del sitio seleccionado, la velocidad de corriente y la fecha. Así se obtuvieron las coordenadas del núcleo (seleccionando su sitio), al no ser círculos perfectos, el

diámetro se midió seleccionando la diagonal más grande que pasara por el centro del núcleo y la página web da la opción de tomar medidas entre dos puntos seleccionados, y la velocidad tangencial se obtuvo seleccionando un punto del perímetro más alejado del núcleo (regularmente la velocidad varía en dicho perímetro y se tomaba la media entre el máximo y mínimo).

En total se ubicaron 37 remolinos anticiclónicos y 75 remolinos ciclónicos durante el año 2016, los cuales con la ayuda de herramientas de programación (como Matlab) se graficaron dando a conocer ubicación de los núcleos, su diámetro y su sentido de rotación de manera mensual, buscando una estacionalidad y ocurrencia de los remolinos en la región con la finalidad de atribuirlos a algunos posibles forzantes.

RESULTADOS

Todos los parámetros presentados a continuación, provienen de un registro tipo censo de los remolinos presentes en la BTS. Dichos remolinos fueron identificados visualmente a partir de promedios diarios en forma de mapas sinópticos de corrientes marinas y superficiales. Lo que implica es que todos los remolinos, objeto del presente estudio tienen una variabilidad igual o mayor a la diaria.

La tabla 1 muestra el censo de los remolinos ciclónicos, indicando el valor de cada uno de los parámetros medidos. La tabla 2 muestra lo correspondiente a los remolinos anticiclónicos.

Tabla 1. Remolinos ciclónicos

Mes	Día	Diámetro (km)	Vel.Tangencial (m/s)
enero	1	3.42	0.029
enero	4	2.04	0.043
enero	12	4.54	0.027
enero	13	3.39	0.009
enero	14	4.48	0.026
enero	21	3.17	0.022
enero	27	3.86	0.057
febrero	3	3.95	0.059
febrero	5	2.09	0.071
febrero	6	3.85	0.015
febrero	7	4.11	0.028
febrero	14	2.95	0.010
febrero	15	3.99	0.024
febrero	16	7.26	0.030
febrero	23	6.23	0.033
febrero	24	5.73	0.098
febrero	25	6.33	0.027
febrero	26	6.14	0.058
febrero	27	3.83	0.039
febrero	29	2.72	0.009
marzo	1	3.08	0.012
marzo	2	2.98	0.011
marzo	4	4.88	0.026
marzo	17	7.15	0.117
marzo	25	4.37	0.061
marzo	28	4.9	0.038

abril	3	3.46	0.018
abril	12	2.88	0.063
abril	17	3.46	0.016
abril	18	4.23	0.031
abril	24	5.69	0.024
mayo	4	3.51	0.031
mayo	7	2.62	0.010
mayo	8	4.76	0.028
mayo	31	4.13	0.018
junio	3	3.81	0.013
junio	4	5.42	0.028
junio	4	4.18	0.031
junio	5	3.81	0.031
junio	7	4.27	0.034
junio	17	4.27	0.029
junio	18	7.16	0.064
junio	19	4.98	0.036
junio	23	7.8	0.064
junio	25	6.78	0.028
julio	4	5.04	0.013
julio	10	6.33	0.021
julio	18	5.62	0.012
julio	19	4.17	0.028
julio	21	3.74	0.006
agosto	1	7	0.022
agosto	12	3.27	0.018
agosto	17	7.4	0.108
agosto	19	5.02	0.058
agosto	21	5.26	0.020
agosto	26	5	0.021
septiembre	10	8	0.056
septiembre	11	3.59	0.023
septiembre	12	3.24	0.030
septiembre	15	4.04	0.038
septiembre	16	4.13	0.024
septiembre	19	3.56	0.022
septiembre	22	4.18	0.023
septiembre	23	3.91	0.021
octubre	6	5.14	0.028
octubre	9	4.74	0.029
octubre	14	2.39	0.006
octubre	22	5.14	0.073
octubre	23	4.51	0.019

noviembre	6	1.98	0.014
diciembre	5	2.74	0.023
diciembre	14	3.2	0.009
diciembre	15	2.7	0.006
diciembre	18	2.58	0.042
diciembre	19	2.62	0.040

Tabla 2. Remolinos anticiclónicos

Mes	Día	Diámetro (km)	Vel.Tangencial (m/s)
enero	1	3.51	0.020
enero	10	2.53	0.018
enero	12	3.6	0.017
enero	13	6.03	0.030
enero	14	4.71	0.023
enero	15	6.53	0.032
enero	22	2.23	0.015
enero	23	2.13	0.020
enero	28	2.54	0.020
enero	31	4.14	0.005
febrero	2	2.69	0.019
febrero	7	4.92	0.037
febrero	8	4.75	0.025
febrero	9	5.64	0.078
febrero	23	3.74	0.024
febrero	24	3.41	0.020
febrero	29	3.06	0.019
marzo	1	2.88	0.017
marzo	10	5.61	0.016
marzo	16	7.36	0.042
marzo	17	3.22	0.027
marzo	25	4.45	0.028
abril	18	3.34	0.026
abril	19	6.39	0.034
abril	20	5.26	0.034
abril	29	2.9	0.014
abril	30	3.07	0.011
mayo	1	2.55	0.028
julio	23	3.27	0.026
septiembre	29	2.83	0.014
octubre	8	4.51	0.024
octubre	9	3.71	0.016

octubre	22	2.31	0.015
octubre	22	2.75	0.020
octubre	24	3.13	0.006
octubre	27	3	0.021
noviembre	18	2.06	0.011
noviembre	19	2.85	0.023

La Figura 4 muestra la estacionalidad de la ubicación de los núcleos de los remolinos. Los paneles son los meses de enero a diciembre de 2016 en orden de izquierda a derecha. Los puntos azules y rojos identifican los núcleos de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, respectivamente.

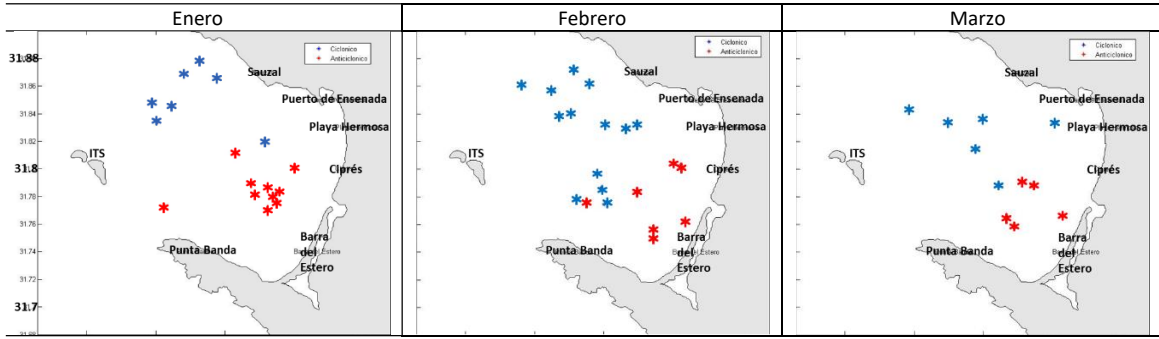
Como se observa en la figura 4, durante el invierno y la primavera, la zona de generación de los remolinos ciclónicos (puntos azules) se mantuvo en la porción media y norte de la bahía (siendo un total de 45 remolinos ciclónicos por ambas estaciones), posteriormente, en verano, la zona de generación migró hacia el sureste en el mes de julio (con 5 remolinos), durante agosto (con 6 remolinos) y septiembre (con 8 remolinos) la zona de generación pasó cercana a la costa este de la bahía hasta que volvió a colocarse por completo en el norte durante el otoño (donde hubo un total de 11 remolinos).

En el caso de los remolinos anticiclónicos (puntos rojos), durante los primeros 5 meses del año (el invierno y los primeros dos meses de primavera), su zona de generación se mantuvo en la parte media y sur de la bahía (con un total de 27 remolinos anticiclónicos). En 5 meses (mayo, junio, julio, agosto y septiembre) aparecieron solo tres remolinos: uno en la parte sur (casi parte media de BTS) durante mayo, otro en julio en la parte media de la bahía y el tercer núcleo anticiclónico apareció en septiembre al sur de BTS. Posteriormente los remolinos anticiclónicos reaparecieron en otoño, su zona de generación fue cercana a la costa este de la bahía durante octubre (con 6 remolinos), y solo dos remolinos en la parte media de la bahía en noviembre. En diciembre los remolinos anticiclónicos no fueron observados.

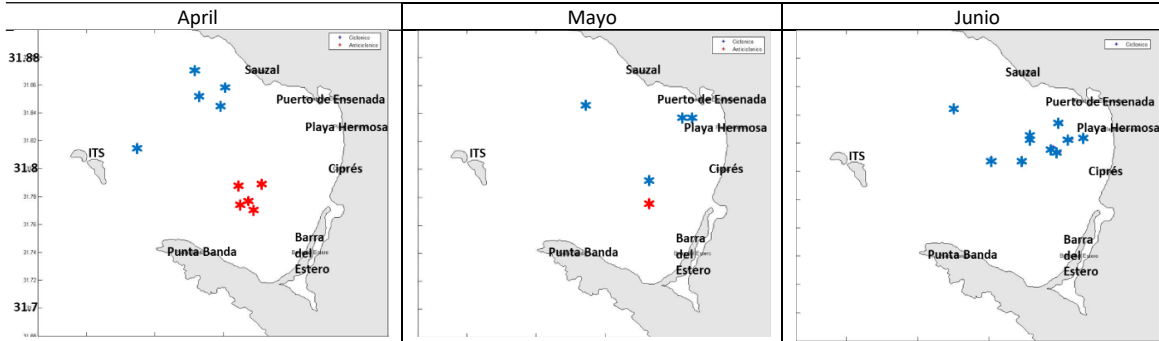
Esta variabilidad estacional, muestra remolinos ciclónicos prácticamente todo el año en la Bahía, los cuales fueron observados en la porción norte de la bahía durante el invierno y al centro de la bahía durante verano. Por el contrario, los remolinos anticiclónicos, únicamente se observaron en la parte central (y escasamente en la porción sur) durante el invierno.

* Ciclónico * Anticiclónico

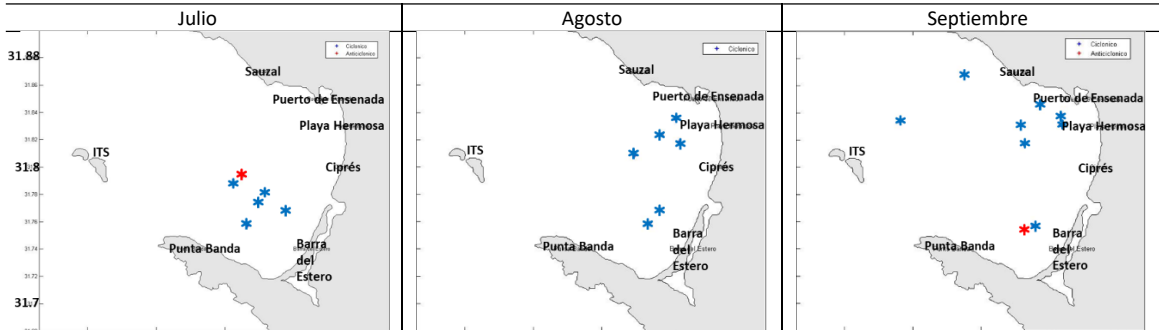
Invierno



Primavera



Verano



Otoño

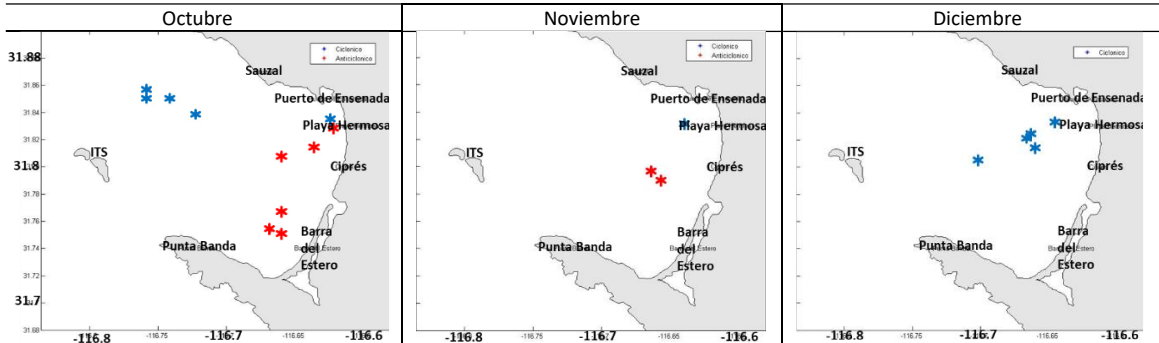


Figura 4. Ubicación geográfica de los núcleos de los remolinos. Los puntos azules identifican los núcleos de los remolinos ciclónicos, mientras que los puntos rojos a los anticiclónicos. Cada panel corresponde a los remolinos detectados durante los 12 meses del 2016.

Sin duda, el diámetro de estos remolinos está fuertemente ligado al proceso que los generó y a la dinámica de los mismos, Por ello la figura 5 muestra los remolinos observados en conjunto con su diámetro.

Los remolinos más grandes (~ 8 km) fueron detectados durante los meses de invierno, tanto ciclónicos como anticiclónicos, mientras que los menores diámetros (~ 2 km) fueron más característicos de finales de verano y durante el otoño.

En el caso específico de los remolinos ciclónicos, estos tuvieron una distribución de tamaños variable a través de todos los meses del año, aunque se puede apreciar un mayor número de remolinos ciclónicos relativamente grandes (~ 8km) más comúnmente en los meses de verano asociados a poca presencia de remolinos menores a 6 km de diámetro para los meses de julio y agosto. A diferencia de los meses de invierno, donde la distribución de remolinos chicos (entre 2 y 4 km) y grandes (entre 6 y 8 km) es casi homogénea.

En el caso de los anticiclónicos, fueron más evidentes los remolinos grandes (6 – 8 km) de diámetro durante el invierno y los remolinos pequeños (2-4 km de diámetro) durante el verano-otoño. Aunque si se observaron también algunos remolinos de menor dimensión durante el invierno.

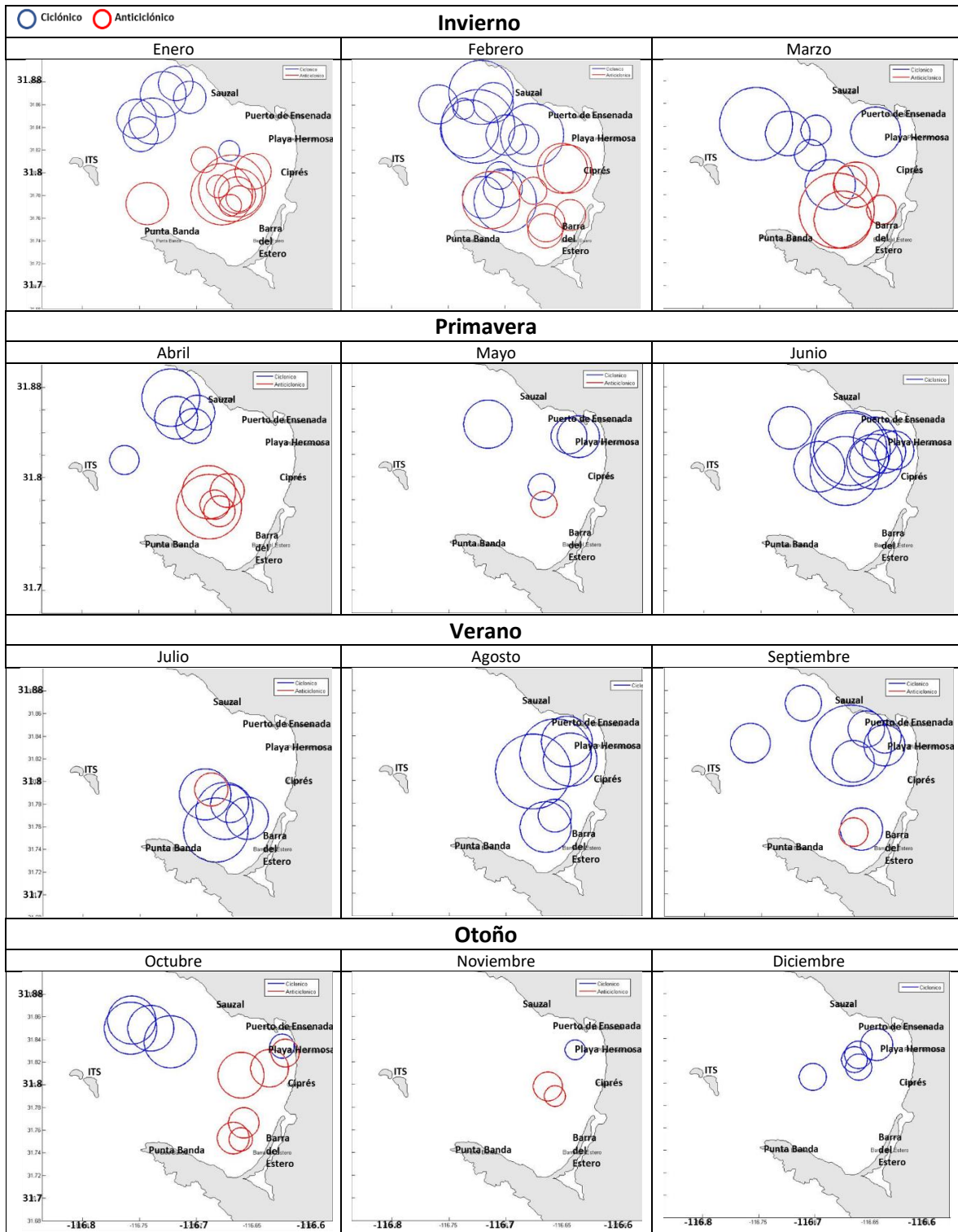


Figura 5. Ubicación geográfica y diámetro de los remolinos. Los paneles son los meses de enero a diciembre de 2016. El color de los círculos, azul y rojo, identifica

los remolinos ciclónicos y anticiclónico, respectivamente. El tamaño del círculo es proporcional al diámetro del remolino.

Con la finalidad de estudiar un poco más la relación entre los tamaños de los remolinos, su velocidad de rotación y su época del año, la figura 6 muestra la velocidad y radios entre ambos tipos de remolinos, en forma de serie de tiempo.

Se puede apreciar que durante el otoño-invierno el tamaño entre ambos tipos de remolinos fue similar y muy variable, con remolinos ciclónicos típicamente más veloces que los anticiclónicos. Se puede apreciar también que los remolinos de menor tamaño se asocian a menores velocidades y viceversa.

En primavera-verano la variabilidad en tamaño y velocidad disminuyo considerablemente para ambos tipos de remolinos, las velocidades de los remolinos ciclónicos fueron levemente menores en comparación con el invierno, así como levemente mayores en diámetro.

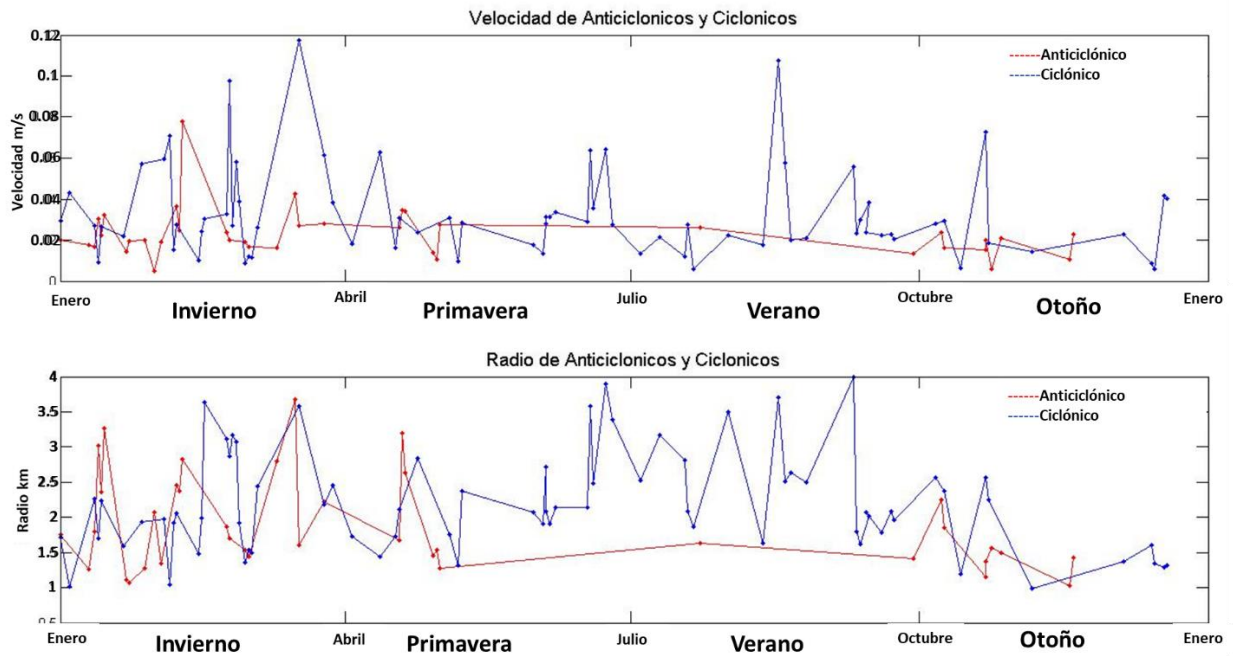


Figura 6. Comparación de velocidades (panel superior) y radio (panel inferior) entre remolinos ciclónicos (línea punteada azul) y anticiclónicos (línea punteada roja). Las

velocidades están en m/s (en el eje vertical superior) y el radio en km (en el eje vertical inferior). El eje horizontal de cada grafico representa el paso del tiempo durante el año 2016.

Las figuras 7 y 8 muestra una correlación directa y regresión lineal del diámetro vs velocidad tangencial de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, para la temporada otoño-invierno y primavera-verano. Se puede apreciar que todas las regresiones lineales (para ambos tipos de remolinos) muestran una relación directamente proporcional entre el diámetro y la velocidad, a mayor velocidad mayor diámetro. Aunque hay que considerar que los datos de los remolinos ciclónicos están más dispersos, mientras que los datos de los remolinos anticiclónicos, se ajustan mejor a una regresión lineal.

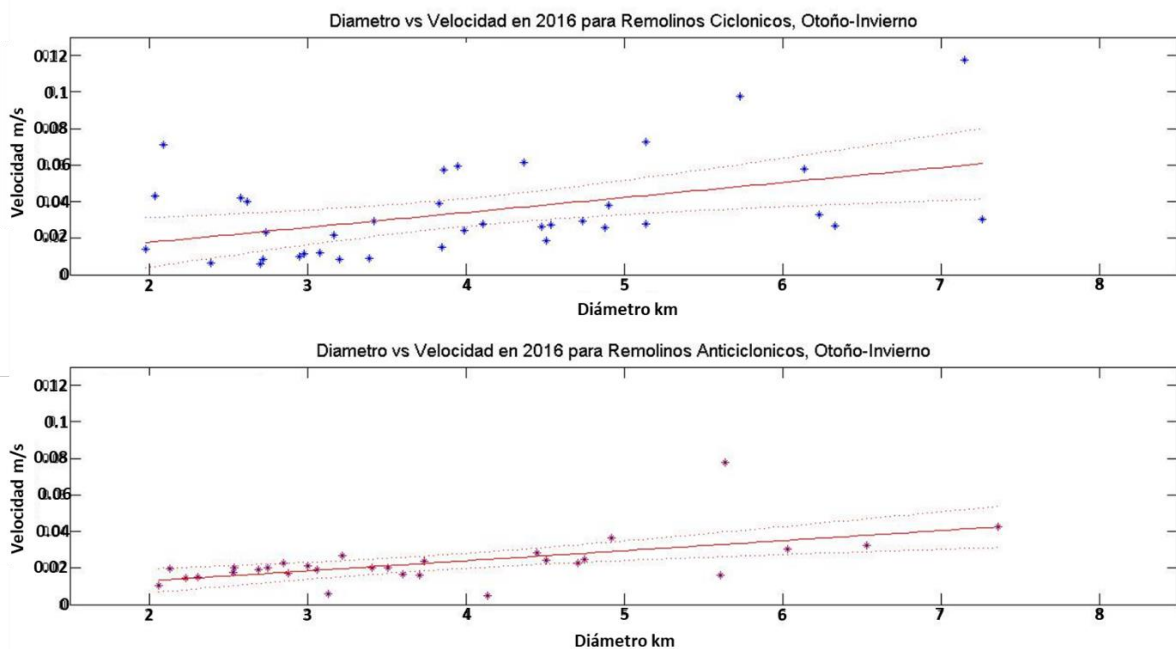


Figura 7. Gráficos de dispersión “Diámetro vs Velocidad” de los remolinos ciclónicos (gráfico superior con puntos azules) y anticiclónicos (gráfico inferior con puntos rojos) pertenecientes a la temporada de otoño-invierno. En el eje horizontal se ubica el tamaño del diámetro en Km y en el eje vertical está la velocidad radial del remolino en m/s.

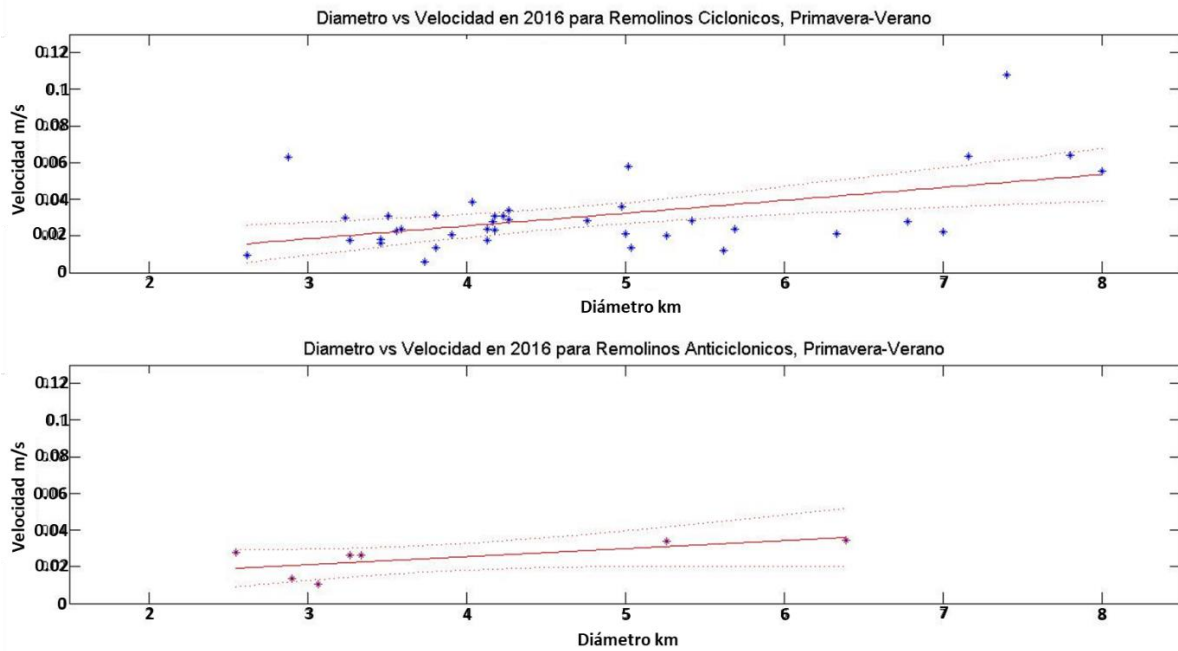


Figura 8. Gráficos de dispersión “Diámetro vs Velocidad” de los remolinos ciclónicos (gráfico superior con puntos azules) y anticiclónicos (gráfico inferior con puntos rojos) pertenecientes a la temporada de primavera-verano. En el eje horizontal se ubica el tamaño del diámetro en Km y en el eje vertical está la velocidad radial del remolino en m/s.

DISCUSIONES

En general los remolinos ciclónicos son más persistentes y presentan velocidades tangencial más rápidas que los anticiclónicos, excluyendo la temporada de verano. Es posible que el aumento de tamaño de los remolinos ciclónicos durante el verano se deba a la misma ausencia de los remolinos anticiclónicos en la bahía. La hipótesis de porque son más lentos en esta temporada: es que la estratificación inhibe el alcance de profundidad de los remolinos (siguiendo los principios de vorticidad). También es posible que los remolinos ciclónicos en zona norte sean forzados por una corriente muy persistente en el año y cercana a San Miguel, la cual tiene dirección que va desde el interior hacia el exterior de la bahía (Reportada por Zertuche y González). Cabe mencionar que los remolinos anticiclónicos se ausentan en una temporada donde los eventos de surgencia en las costas de California y Baja California son comunes.

Posiblemente la relación entre la meteorología y oceanografía local de la bahía, así como las características de la columna de agua afecten la ocurrencia y tamaño de cada tipo de remolino. Además, la morfología de la costa (bahía semi cerrada) favorece la formación de los remolinos redireccionando las corrientes superficiales; esto sumado a la batimetría (50m) afectan la escala de los remolinos.

Tanto para remolinos ciclónicos como para anticiclónicos, hay un mayor número de remolinos en invierno, misma temporada (sumando el primer mes de primavera, abril) en la que los remolinos anticiclónicos presentan un radio más grande y veloz, llegando a 3-3.5 km de radio y a 0.06-0.12 m/s. En cuanto a los remolinos ciclónicos, hay mayor distribución de tamaño a lo largo del año, un poco más grandes a finales de primavera y durante el verano alcanzando los 8 km de diámetro y con velocidades mayores durante el invierno, 0.06-0.12 m/s.

Acorde a los resultados de este trabajo y el de Rodríguez (2021) se puede decir que, en el invierno y los inicios de primavera, cuando la columna de agua está muy mezclada, la circulación de la bahía es más dinámica, muy influenciado por el oleaje remoto (swell) que viene del norte, este tiene mayor acceso a la bahía entrando por

la boca norte (entre ITS y San Miguel) que es más ancha, menos profunda y sin topografía haciendo barrera. De lo contrario al verano que el oleaje remoto viene del sur y Punta Banda hace función el rompeolas, sumado a que la boca sur es una entrada más estrecha y además cuenta con la presencia del cañón submarino de aproximadamente 450 m de profundidad.

Las gráficas que compara “diámetro vs velocidad” de cada tipo de remolino presenta en teoría una correlación lineal, en especial los remolinos anticiclónicos cuyos datos se ajusta mejor a una regresión lineal.

La literatura citada de Zatspein *et al*, (2011) sobre remolinos de diámetros similares a los de la BTS, reportan a lo mucho 3 remolinos en varios meses. Comparado a los reportados en 2016 en la bahía, esta presentó una alta cantidad de remolinos, además de que la circulación generó tanto remolinos ciclónicos como anticiclónicos. Sería muy interesante estudiar más censos de remolinos en la BTS, tanto de años anteriores como posteriores y así saber si se trató de un evento aislado o recurrente; además una mayor cantidad de datos ayudarían a afinar los patrones de comportamiento y características encontrados en este proyecto, e incluso obtener hallazgos nuevos.

CONCLUSIONES

- En términos generales, durante el año la cantidad de remolinos ciclónicos fue mayor que el de remolinos anticiclónicos, así fue en todos los meses a excepción de noviembre.
- Invierno fue la temporada con mayor número de remolinos ciclónicos (en especial el mes de febrero con 13 puntos azules en el mapa de la figura 4) y anticiclónicos (sobre todo el mes de enero con 10 puntos azules en la figura 4).
- El mes de noviembre hubo el menor número de remolinos en total (uno ciclónico y dos anticiclónicos)
- En tres meses no se apareció ningún remolino anticiclónico: en junio (mes de primavera), en agosto (mes de verano) y en diciembre (mes de otoño).
- Tanto Gonzales como Zertuche reportaron en sus investigaciones una y corriente muy cercana a San Miguel con flujo hacia afuera de la bahía, esta corriente fue muy consistente a lo largo de sus muestreos y/o simulaciones. Muy posiblemente esta corriente sea una forzante a generar los remolinos ciclónicos en la zona cercana a la boca norte.
- Acorde a los datos utilizados en la investigación presente se puede decir que: los remolinos ciclónicos son los más grandes y persistentes a lo largo del año, además su zona de generación tiene migraciones más notorias.
- A excepción del mes de julio, la zona de generación de los remolinos anticiclónicos está hacia el sur (por debajo) de los remolinos ciclónicos, y así se mantiene en el año.
- Algunos patrones de posición, tamaño y velocidad de los remolinos podrían coincidir con otros fenómenos estacionales, como, por ejemplo: la inhibición de remolinos anticiclónicos que va iniciando en primavera y permanece durante el verano, misma temporada donde el oleaje disminuye considerablemente en la bahía y se han reportado trampas de surgencias, principalmente en el área de Punta Banda. O la estratificación de la columna de agua que se da principalmente en

verano, mismo donde se dan los remolinos ciclónicos más grandes y más lentos (en su mayoría); que tomando en cuenta las leyes de vorticidad, posiblemente pierdan rapidez debido al poco alcance de profundidad que estos remolinos alcanzan.

- Hay que tomar en cuenta que se trata de remolinos de escala muy fina (tamaño muy chico y poca duración), por lo que es necesario tomar en cuenta forzantes medidas en escalas similares.

BIBLIOGRAFÍA

- Argote, M.L., Gavidia, F.J., Amador, A. (1991). Wind-induced circulation in Todos Santos Bay, B.C., México. *Atmósfera* 4, 101–115.
- Calva, M. A. (2014). Variación estacional y sinóptica de la trampa de surgencia en la Bahía de Todos Santos B. C. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Cervantes, I.G. (2013). Análisis de circulación y dispersión en la Bahía de Todos Santos, Baja California. Tesis de maestría. Universidad del Mar.
- Cruz, C., Raúl, Monreal, M. A, y Nicolaevich, S. (2008). Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*, 33(10), 741-746.
- Flores-Vidal, X. (2015). Hacia la creación de una red multinstitucional de radares oceanográficos para la medición de corrientes superficiales en el Golfo de México. *Revista de la Universidad Juárez de Tabasco*, 1(1), 29-49.
- Gaube, P., McGillicuddy Jr, D. J., Chelton, D. B., Behrenfeld, M. J., y Strutton, P. G. (2014). Regional variations in the influence of mesoscale eddies on near-surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12), 8195-8220.
- González, S. A. (2017). Procesos de intercambio entre la Bahía Todos Santos y el océano adyacente. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Baja California.
- Gula, J., Molemaker, M. J., y McWilliams, J. C. (2015). Topographic vorticity generation, submesoscale instability and vortex street formation in the Gulf Stream. *Geophysical Research Letters*, 42(10), 4054-4062.
- Hogg, A. M., y Gayen, B. (2020). Ocean gyres driven by surface buoyancy forcing. *Geophysical Research Letters*, 47(16).
- Larragaña, M. (2013). Variabilidad de la circulación superficial en la Bahía Todos Santos, Baja California, México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Lobedo, E., Ramirez, I., Flores, X., Argote, L., Plaza, F., Morales, C., Czitron, S., y Rendon, C. (2005). Circulación en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Campañas: BTS070804 y BTS130804. (Clave 27220). CICESE
- Mateos, E., Marinone, S. G., y Parés-Sierra, A. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, BC Mexico. *Ocean Modelling*, 27(1-2), 107-112.

Morrow, R., & Le Traon, P. Y. (2012). Recent advances in observing mesoscale ocean dynamics with satellite altimetry. *Advances in Space Research*, 50(8), 1062-1076.

Navarro, L. F., Hernandez, R., Castro, R. , Durazo, R. , Flores-Vidal, X., Flores, A. L., Martin, B. (2022). Evidence of submesoscale coastal eddies inside Todos Santos Bay, Baja California, México. *Ocean and Coastal Reseach*. ISSN 2675-2824.

Olson, B.D. (1991). Rings in the ocean. *Ann. Rev. Earth Planet.* 19: 283-311.

Rivas, D., Mancilla, R., García, E., y Almazán, A. (2010). Lagrangian Circulation in Todos Santos Bay and off Baja California During Spring 2007: Exploratory Experiments. *The Ocean, The Wine, and The Valley: The Lives of Antoine Badan*, 173-201.

Rodriguez, C. A. (2021). Evaluación de la conversión de la energía del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores, Ensenada, B.C., México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California.

Wang, G., Chen, D., y Su, J. (2008). Winter eddy genesis in the eastern South China Sea due to orographic wind jets. *Journal of Physical Oceanography*, 38(3), 726-732.

Zatsepin, A. G., Baranov, V. I., Kondrashov, A. A., Korzh, A. O., Kremenetskiy, V. V., Ostrovskii, A. G., y Soloviev, D. M. (2011). Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation. *Oceanology*, 51(4), 554-567.

Zertuche, R. (2013). Aplicación de un modelo numérico tridimensional para estudiar la hidrodinámica de la Bahía de Todos Santos. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California.