

# Comparación de la frecuencia y permanencia de frentes térmicos utilizando datos de diferente dimensión espacial y resolución de imágenes de satélite en la región sur de la Corriente de California

Comparison of thermal fronts frequency and permanence using data of different spatial dimensions and satellite images resolution in California Current southern region

Amelia De la O-Navarrete<sup>1\*</sup>, René Funes-Rodríguez<sup>1</sup> y Marlenne Manzano-Sarabia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n Col. Playa Palo de Santa Rita, C.P. 23096 La Paz, B.C.S., México

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Paseo Clausen S/N Col. Los Pinos, C.P. 80000, Mazatlán, Sinaloa, México

\*Autor corresponsal: [adelaon1400@alumno.ipn.mx](mailto:adelaon1400@alumno.ipn.mx)

**Abstract.** - The best dimension of spatial scale (quadrant dimension) and images resolution (1 and 4 km) were evaluated, with respect to frequency and permanence of oceanic thermal fronts that characterize seasonal and interannual variability of the California Current System during 2006-2010, from the analysis of daily images of sea surface temperature (1 km Ultra High-Resolution Multi-Scale and Advance Very High-Resolution Radiometer resolution of 4 km pixel resolution). Fronts identification was performed using Single Edge Detection (SIED) algorithm and to identify the best distribution in the area different quadrant dimensions were compared (0.5°, 1.0° and 2.0° geographical latitude and longitude). 1.0° quadrant turned out to be the most suitable because it presented a lower dispersion of front frequency and a greater number of observations. Together with high-resolution images (1 km) they allowed to detect a greater number of mesoscale structures, which identifies seasonal and year-to-year variability of ocean dynamics in California Current southern portion.

**Key words:** Temperature fronts, frequency of fronts, satellite oceanography, California Current

**Resumen.** - Se evaluó la mejor dimensión de la escala espacial (dimensión de cuadrantes) y resolución espacial de imágenes (1 y 4 km), con respecto a la frecuencia y permanencia de frentes oceánicos de temperatura que caracterizan la variabilidad estacional e interanual en la región sur del Sistema de la Corriente de California durante 2006-2010, a partir del análisis de imágenes diarias de temperatura superficial del mar ("Multi-scale Ultra-high Resolution" de 1 km y "Advanced Very High Resolution Radiometer" de 4 km de resolución de píxel). La identificación de los frentes oceánicos de temperatura se realizó mediante el algoritmo de detección de borde (SIED, por sus siglas en inglés). Para identificar la mejor distribución de los frentes se compararon diferentes dimensiones de cuadrantes (0,5°, 1,0° y 2,0° latitud y longitud geográfica). El cuadrante de 1,0° resultó ser el más adecuado por presentar una menor dispersión de la frecuencia de frentes y un mayor número de observaciones, aunado a las imágenes de alta resolución (1 km) que permitieron detectar un mayor número de estructuras de mesoescala de la variabilidad estacional e interanual de la dinámica oceánica de la porción sur de la Corriente de California.

**Palabras clave:** Frentes de temperatura, frecuencia de frentes, oceanografía satelital, Corriente de California

## INTRODUCCIÓN

En el Sistema de la Corriente de California (SCC), la distribución de gran escala de la frecuencia de frentes de temperatura superficial del mar (TSM) y de clorofila se identifican en una franja amplia (500-700 km); con valores elevados de frecuencia de frentes de temperatura (4-7%) en la costa occidental de la Península de Baja California, y valores máximos de frentes de clorofila hacia California, como resultado de una alta actividad de remolinos de mesoescala (Kahru *et al.* 2012).

La variabilidad estacional e interanual que determina la mayor concentración, frecuencia y persistencia de frentes de temperatura (FF), resulta de la complejidad en la dinámica de los procesos oceánicos en todo el Pacífico noroeste (remolinos, meandros, surgencias y corrientes) (Etnoyer *et al.* 2004). Adicionalmente a la inestabilidad del flujo costero de la Corriente de California, la geometría de la línea de costa y el patrón estacional de los vientos originan las surgencias costeras y, junto con la presencia estacional de dos remolinos o meandros ciclónicos, modulan la formación de frentes de temperatura superficiales y de clorofila en la zona de la



Península de Baja California, México (24-31°N) (Durazo & Baumgartner 2002, Soto-Mardones *et al.* 2004, Perez-Brunius 2007, Durazo 2009, Kahru *et al.* 2012, Durazo *et al.* 2010, 2017).

La detección de frentes oceánicos de temperatura a través de imágenes satelitales resulta ser un método más sencillo y accesible (Robinson 2010), en comparación a los métodos convencionales realizados en cruceros oceanográficos (Nieto *et al.* 2012). El método de histograma desarrollado por Cayula & Cornillon (1995), ha demostrado ser efectivo para identificar frentes verdaderos en imágenes con presencia de ruido (Cayula & Cornillon 1992, 1995; Belkin & Cornillon 2003, Etnoyer *et al.* 2004, Kahru *et al.* 2012, McClatchie *et al.* 2012, Nieto *et al.* 2012, 2017; Xu *et al.* 2017). El método de gradiente propuesto por Canny (1986) utiliza una estructura transversal de frente que es asociado a un gradiente máximo, pero su mayor inconveniente es la presencia de ruido en cada diferenciación (cálculo de gradiente), debido a una probable falsa detección de frentes que deberá ser ajustada previo a su aplicación en datos de temperatura superficial y clorofila (Belkin & O'Reilly 2009).

La resolución espacial de imágenes de 1 km es útil para detectar diferentes frentes en procesos de submesoescala (~ 0,1-10,0 km, 1-20 días) (Acha *et al.* 2004, Shulman *et al.* 2015, Jensen *et al.* 2018). No obstante, se ha sugerido utilizar imágenes de una resolución de 4 km, con la finalidad de observar diferencias en su detección, localización y longitud a nivel global (Roa-Pascuali *et al.* 2015).

Los frentes oceánicos generan una convergencia en la superficie del océano y límite inferior, generalmente asociados a una alta productividad primaria o secundaria (Franks 1992, Olson & Backus 1985, Acha *et al.* 2004, 2015; Etnoyer *et al.* 2004). Estos procesos de mesoescala (10-100 km), pueden tener una extensión vertical de poco más de 1000 m de profundidad e influir en la distribución de los organismos mediante su estructura, permanencia y su establecimiento espacio temporal (Belkin & Cornillon 2003, 2005, 2007; Bakun 2006). En estas zonas la distribución de las partículas de alimento tiende a concentrarse y los organismos realizan un menor gasto energético para alimentarse (Acha *et al.* 2004, Bakun 2006, McClatchie *et al.* 2012). La importancia de la duración y cuantificación de los frentes relacionados en la dinámica oceánica y el efecto de estos frentes oceánicos de temperatura en la distribución de organismos es evidente en la agregación de zonas de alimentación, concentración de peces

pelágicos, mamíferos marinos y objetos de deriva (Belkin & Cornillon 2003, 2005, 2007; Etnoyer *et al.* 2004, 2006), incluso en la retención de los productos del desove de los peces y depredadores (Sinclair 1988, McClatchie *et al.* 2012).

De acuerdo con estos antecedentes, el objetivo de esta investigación fue comparar la frecuencia y permanencia de frentes térmicos que caracterizan la variabilidad estacional e interanual, con base en el análisis de datos de diferente dimensión geográfica de tamaño de cuadrante y, a partir de la resolución de imágenes de satélite de 1 y 4 km, bajo la hipótesis de que la escala espacial (tamaño de cuadrantes) y la resolución de imágenes es determinante para identificar la distribución agregada de frentes de temperatura en cada dimensión (zonas con alta actividad y con menor actividad). Esta información podrá ser utilizada como evidencia en la determinación de zonas de importancia ecológica frente a la costa occidental de la Península de Baja California, debido a la implicación de los frentes como zonas de retención en el océano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La identificación de los frentes se realizó con imágenes satelitales diarias de temperatura superficial del mar de ultra alta resolución espacial (TSM) de 1 km derivadas de múltiples sensores remotos (base MUR<sup>1</sup>) y 4 km de resolución del sensor AVHRR<sup>2</sup>. A cada imagen de TSM se le aplicó el algoritmo de detección de borde (análisis de histograma; Cayula & Cornillon 1995), que estima la frecuencia mínima del frente en relación con las frecuencias máximas de las zonas adyacentes en un análisis de histograma bimodal, seguido de la representación gráfica del frente mediante un algoritmo de seguimiento (en el que detecta a los frentes con líneas de contorno) sobre las imágenes satelitales. El algoritmo se aplicó en una ventana de 32 x 32 píxeles, recomendada como la más adecuada (Belkin & Cornillon 2003, Etnoyer *et al.* 2004, Kahru *et al.* 2012). En esta investigación, el caso de estudio fue el conjunto de imágenes diarias (20 días) que corresponden a la duración aproximada del derrotero oceanográfico de cada crucero del programa de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), con periodicidad estacional (invierno, primavera, verano) de 2006 a 2010, con un evento El Niño-La Niña en la serie de datos (2007-2008); en los muestreos de otoño la mitad fueron cancelados en el periodo 2006-2010, y no fueron considerados para el análisis en el cálculo de los frentes.

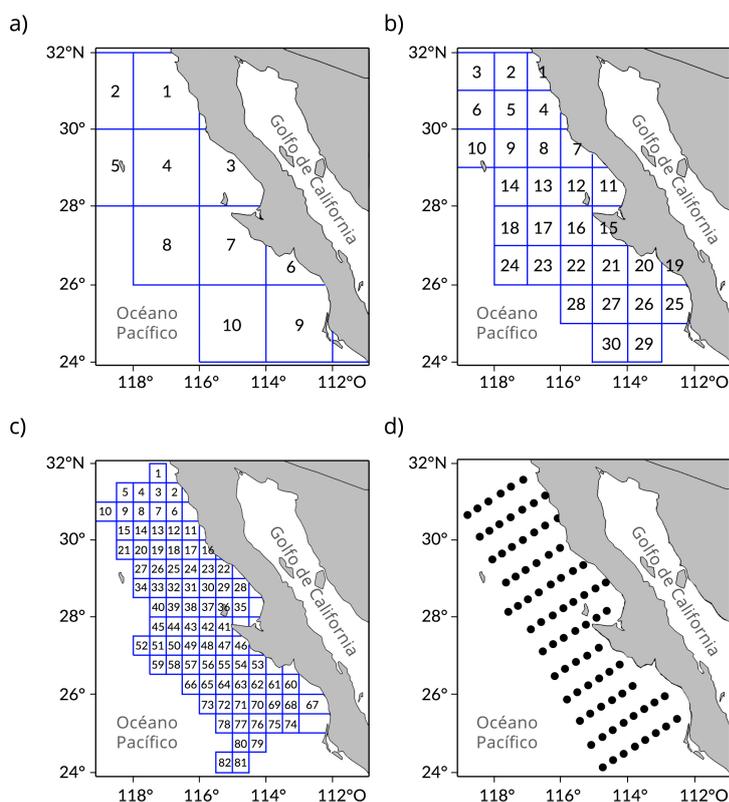
<sup>1</sup>Multi-scale Ultra-high Resolution (MUR) SST Analysis fv04.1, Global, 0.01°, 2002-present, Daily. NASA JPL (Dataset ID: jplMURSST41). <<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/jplMURSST41.html>>

<sup>2</sup><<https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/pathfinder/Version5.3/L3C>>

La frecuencia de frentes (FF) se obtuvo a partir del número de píxeles válidos de cada imagen diaria e identificada como frentes de temperatura y la proporción a partir del total de píxeles válidos de las imágenes analizadas. Esto es, si el total de imágenes diarias fueron 20, y los píxeles de frentes válidos se detectan en dos de las imágenes, entonces le corresponde el 10%, o bien 0,1 de la FF. De forma similar, se calculó el IFF (Índice de Frecuencia de Frente) para cada una de las tres dimensiones de cuadrantes (0,5°, 1,0° y 2,0° latitud y longitud geográfica; Fig. 1) y posteriormente, se realizaron pruebas de significancia estadística para observar si existían diferencias significativas, permitiendo elegir el tamaño más adecuado de cuadrante.

Para evaluar si los valores del IFF presentaban una distribución normal en cada una de las tres dimensiones de cuadrantes (0,5°, 1,0° y 2,0°), se aplicó una prueba de normalidad Lilliefors (Kolmogorov-Sminorff, K-S) a lo largo del área muestreada, bajo el supuesto de que los frentes de temperatura tienen una distribución en la misma intensidad de

frecuencias de frentes a lo largo de toda el área. A su vez, para comparar si la dimensión del cuadrante tenía un efecto sobre la distribución del IFF, se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis (K-W) debido a que la distribución del índice de frecuencia de frentes en cada uno de los tamaños de cuadrantes fue diferente de la distribución normal. La elección de la mejor dimensión de cuadrante fue con base a medidas de tendencia central (mediana, número de datos, error estándar) entre las diferentes dimensiones de cuadrantes. Una vez elegida la dimensión de cuadrante más adecuada, se aplicó la prueba de K-W para observar si hubiera diferencias entre temporadas (invierno, primavera, verano) y se aplicó una prueba *post hoc* (Dunn) para explicar entre cuales temporadas existen diferencias significativas (*e.g.*, primavera vs. invierno, verano vs. invierno, verano vs. primavera). Finalmente, se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis para observar si existían diferencias significativas entre cada temporada (invierno vs. invierno, primavera vs. primavera, verano vs. verano) de distintos años (2006-2010).



**Figura 1. Dimensiones de cuadrante o "ventana" en grados de longitud y latitud geográfica: a) 2° x 2°; b) 1° x 1°; c) 0,5° x 0,5°; y d) plan de muestreo de los cruceros oceanográficos IMECCAL, frente a la Península de Baja California / Quadrant or "window" dimensions in degrees of longitude and geographic latitude: a) 2 x 2°; b) 1 x 1°; c) 0.5 x 0.5°; and d) sampling plan of the IMECCAL oceanographic cruises, off the Baja California Peninsula**

## RESULTADOS

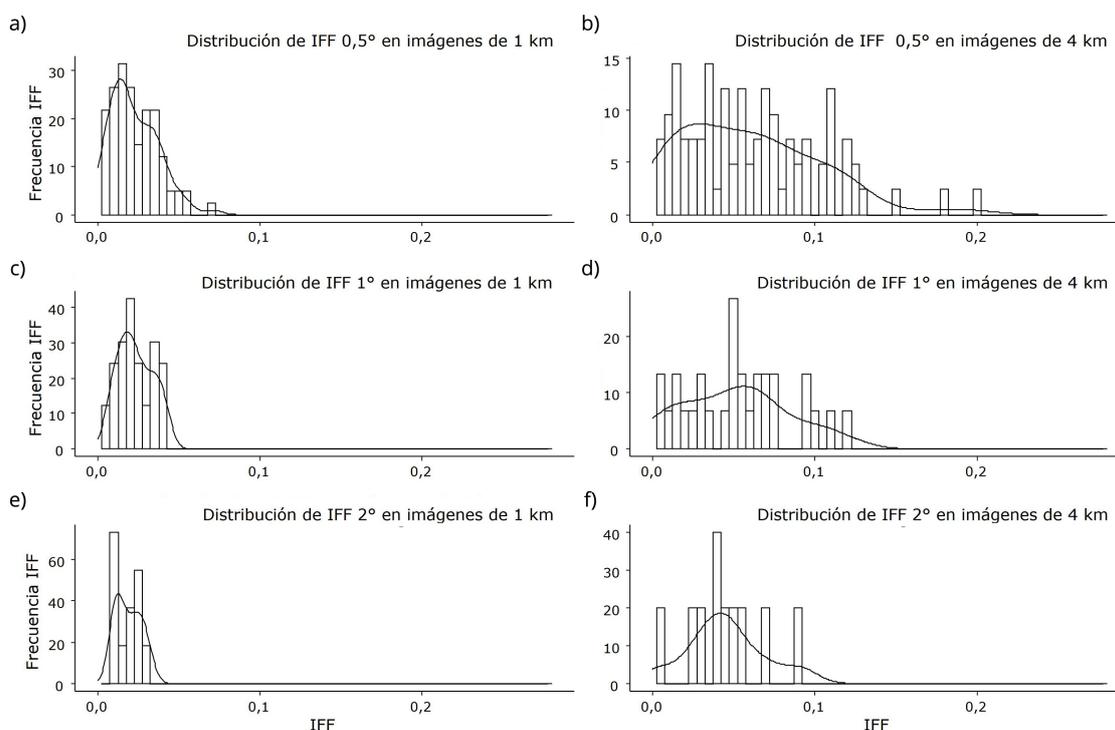
### ANÁLISIS DE CUADRANTES

La distribución del índice de frecuencia de frentes (IFF) no siguió una distribución normal (Fig. 2; Tabla 1), indicando que hay diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre el conjunto de cuadrantes que caracteriza cada dimensión o tamaño de cuadrante ( $0,5^\circ$ ,  $1,0^\circ$  y  $2,0^\circ$ ) en las imágenes de 1 y 4 km de resolución (Lilliefors: Kolmogorov-Smirnoff; Tabla 1), excepto para el tamaño de cuadrante de  $2,0^\circ$  a 1 km de resolución. Por el contrario, la comparación del IFF entre las dimensiones o tamaños de cuadrantes ( $0,5^\circ$ ,  $1,0^\circ$  y  $2,0^\circ$  de latitud y longitud), no presentaron diferencias significativas en las imágenes de 1 y 4 km ( $P = 0,3$  y  $P = 0,06$ , respectivamente; Lilliefors; Kruskal-Wallis; Tabla 1) pero si presentaron diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) con respecto al número de cuadrantes obtenidos por cada tamaño de área,  $\sim 500$  ( $0,5^\circ$  latitud y longitud),  $> 160$  ( $1^\circ$  latitud y longitud) y  $60$  ( $2^\circ$  latitud y longitud) cuadrantes (Tabla 1; Fig. 3c).

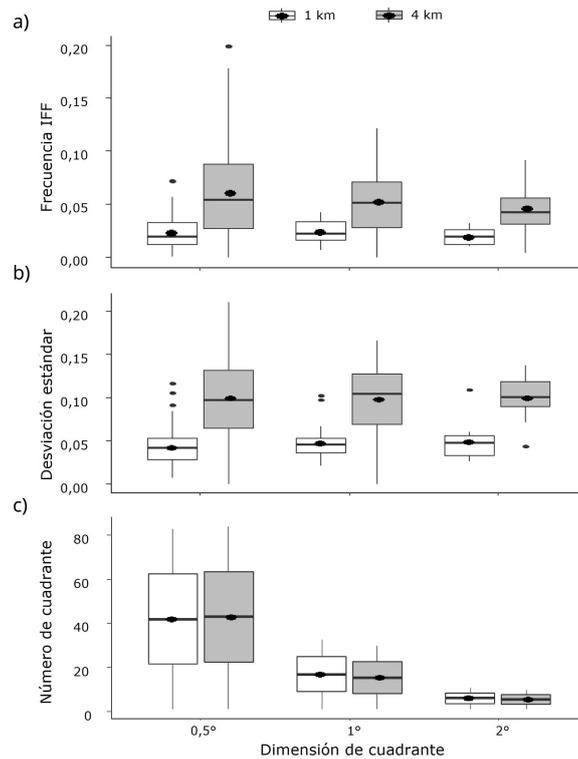
**Tabla 1. Significancia estadística de la frecuencia de frentes en los diferentes tamaños de cuadrantes ( $0,5^\circ$ ,  $1,0^\circ$  y  $2,0^\circ$  de latitud y longitud geográfica) en imágenes de 1 km y 4 km de resolución / Statistics significance of fronts frequency in different quadrant sizes ( $0.5^\circ$ ,  $1.0^\circ$  and  $2.0^\circ$  of latitude and geographic longitude) in images of 1 km and 4 km of resolution**

	Imagen 1 km			Imagen 4 km		
	$0,5^\circ$	$1,0^\circ$	$2,0^\circ$	$0,5^\circ$	$1,0^\circ$	$2,0^\circ$
Kolmogorov-Smirnoff	0,0001*	0,040*	0,855	0,0001*	0,0001*	0,0001*
Kruskal-Wallis	0,355			0,060		

\*Valores significativos



**Figura 2. Distribución del índice de frecuencia de frentes (IFF) en las diferentes dimensiones de cuadrantes ( $0,5^\circ$ ,  $1^\circ$  y  $2^\circ$  de latitud y longitud) para las resoluciones de imágenes de 1 km (a, c, e) y 4 km (b, d, f) / Front Frequency Index (IFF) distribution in the different quadrant dimensions ( $0.5^\circ$ ,  $1^\circ$  and  $2^\circ$  of latitude and longitude) for image resolutions of 1 km (a, c, e) and 4 km (b, d, f)**



**Figura 3. Diagramas de cajas para: a) el tamaño de cuadrante vs. Índice de Frecuencia de Frente (IFF), b) desviación estándar del IFF, y c) número de cuadrante en 1 km (cajas en blanco) y 4 km (cajas en gris) de resolución / Box plots for a) quadrant size vs. Front Frequency Index (IFF), b) standard deviation of IFF, and c) quadrant number at 1 km (white boxes) and 4 km (gray boxes) resolution**

**Tabla 2. Estadística descriptiva y valores de la comparación entre grupos (Kruskal-Wallis) para cada uno de los tamaños de cuadrantes (0,5°, 1,0°, 2,0° de latitud y longitud geográfica) por imagen con resolución de 1 y 4 km / Descriptive statistics and values of the comparison between groups (Kruskal-Wallis) for each quadrant sizes (0.5°, 1.0°, 2.0° latitude and geographic longitude) between each image with a resolution of 1 and 4 km**

	Imagen 1 km			Imagen 4 km		
	0,5°	1,0°	2,0°	0,5°	1,0°	2,0°
Número de cuadrantes	492*	169*	61*	504*	180*	60*
Mínimo	0	0,001	0,002	0	0	0
1er cuartil	0,007	0,011	0,01	0,01	0,01	0,02
Mediana	0,016	0,018	0,015	0,02	0,02	0,04
Media	0,018	0,019	0,016	0,07	0,07	0,08
3er cuartil	0,026	0,025	0,021	0,06	0,06	0,06
Máximo	0,071	0,046	0,032	1	1	0,8
Varianza	0,00021	0,00011	0,00005	0,01	0,001	0,0005
Desviación estándar	0,014	0,01	0,007	0,102	0,032	0,024

\*Valores significativos (Kruskal-Wallis < 0,05)

Las medidas de tendencia central indicaron que la mejor distribución de los datos es para los cuadrantes 0,5° y 1,0° de latitud y longitud geográfica, con respecto a su mediana ( $Q_2 = 0,03$ ) y desviación estándar (0,01) (Tabla 2; Fig. 3a, b). Sin embargo, entre ambos cuadrantes (0,5° y 1,0°), el de 1,0° presenta una menor dispersión de los datos (varianza) y es menos sesgado con respecto al cuadrante de 0,5°, por lo que se considera el más adecuado para los análisis (Fig. 2).

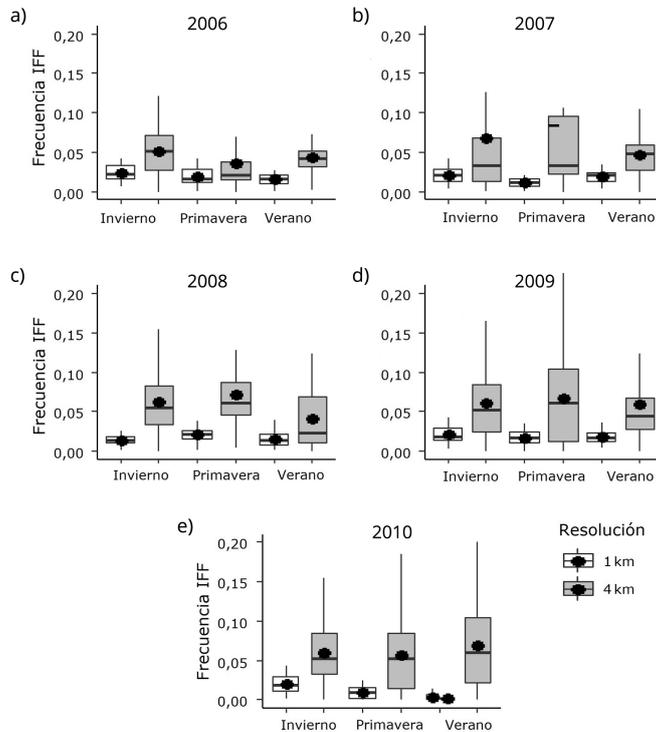
#### VARIACIÓN ESTACIONAL E INTERANUAL: FRECUENCIA Y PERMANENCIA DE FRENTE OCEÁNICOS DE TEMPERATURA EN DIFERENTES ESCALAS ESPACIALES 1 KM VS. 4 KM

La distribución del IFF en la imagen de 1 km presentó diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) estacionales para 2006 (Fig. 4a), 2007 (Fig. 4b), 2008 (Fig. 4c), y 2010 (Fig. 4e), mientras que en 4 km únicamente para 2006 (Fig. 4a) y 2008 (Fig. 4c) (Dunn; Tabla 3). Las imágenes de frentes oceánicos indican una frecuencia máxima de 0,4, que significa una mayor acumulación y persistencia máxima de hasta 8 días en las imágenes de 1 y 4 km (Figs. 5 y 6), debido a que la detección de frentes oceánicos se hizo sobre un periodo de 20 días o 20 imágenes. De esta forma, es posible observar una mayor detección de frentes oceánicos en las imágenes de 1 km, mientras que las frecuencias son menos intensas en las imágenes de 4 km (Figs. 5 y 6).

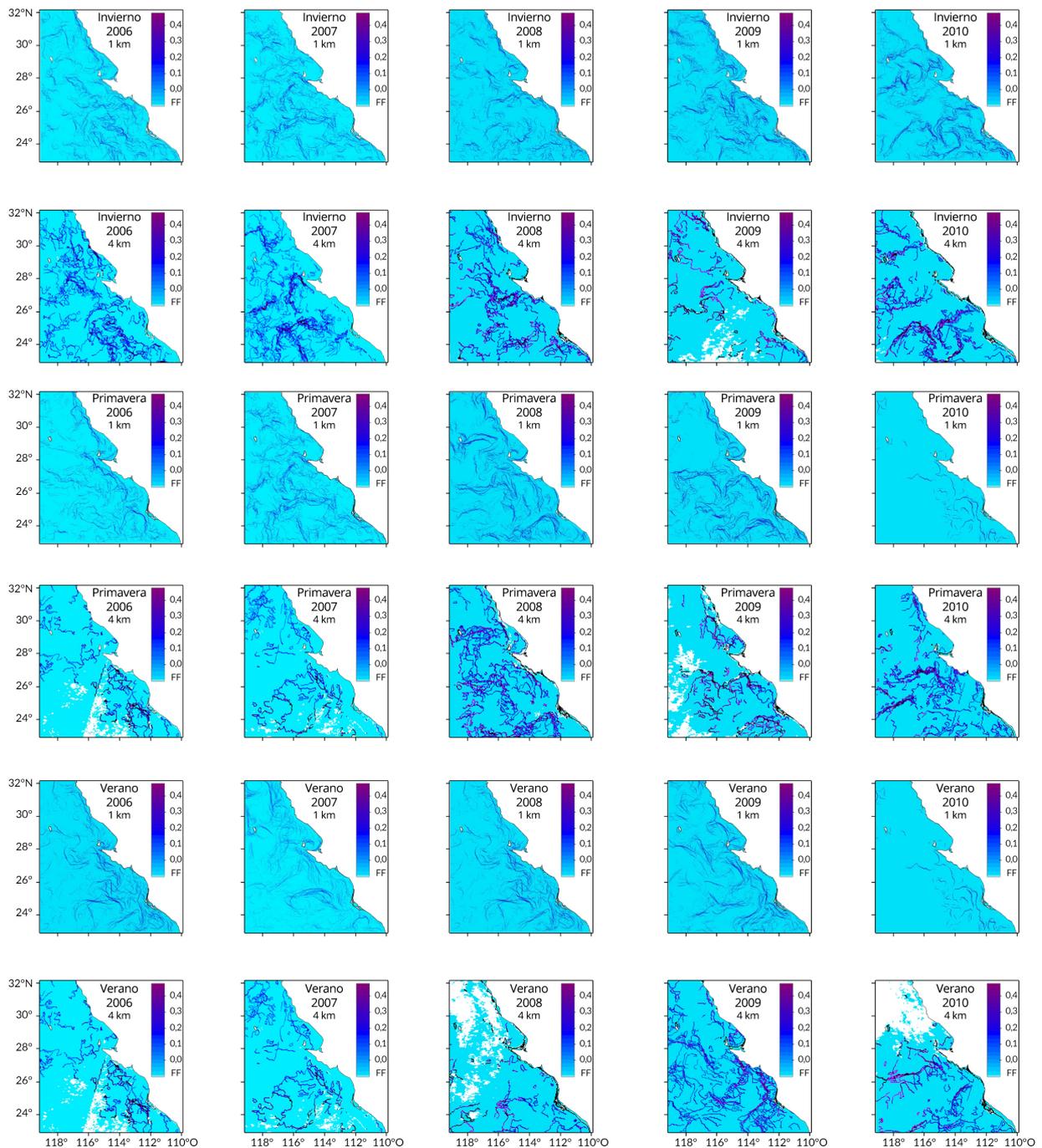
**Tabla 3. Diferencias estacionales e interanuales de la frecuencia de frentes en imágenes de 1 y 4 km / Seasonal and interannual differences in the frequency of fronts in 1 and 4 km images**

	Imagen 1 km					Imagen 4 km				
	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010
Kruskal-Wallis	0,025*	0,000*	0,008*	0,247	0,000*	0,013*	0,624	0,013*	0,947	0,847
Dunn										
Verano-invierno	0,022*	0,715	0,884	na	0,003*	0,51	na	0,06	na	na
Verano-primavera	0,354	0,000*	0,019*	na	0,000*	0,062	na	0,015*	na	na
Invierno-primavera	0,160	0,000*	0,018*	na	0,001*	0,015*	na	0,523	na	na
	Invierno - invierno	Primavera - primavera	Verano - verano			Invierno - invierno	Primavera - primavera	Verano - verano		
Kruskal-Wallis	0,006*	0,000*	0,000*			Kruskal-Wallis	0,847	0,043*	0,1978	
Dunn test						Dunn test				
2006-2007	1	0,038*	0,442			2006-2007	na	0,691	na	
2006-2008	0,005*	1	0,526			2006-2008	na	0,019*	na	
2007-2008	0,047*	0,002*	0,116			2007-2008	na	0,823	na	
2006-2009		0,697	0,941			2006-2009	na	0,500	na	
2007-2009	0,950	0,097	0,978			2007-2009	na	1,000	na	
2008-2009	0,051	0,738	0,701			2008-2009	na	0,935	na	
2006-2010	1	0,011*	0,000*			2006-2010	na	0,623	na	
2007-2010	1	1	0,000*			2007-2010	na	0,988	na	
2008-2010	0,096	0,000*	0,000*			2008-2010	na	0,961	na	
2009-2010	1	0,036*	0,000*			2009-2010	na	1,000	na	

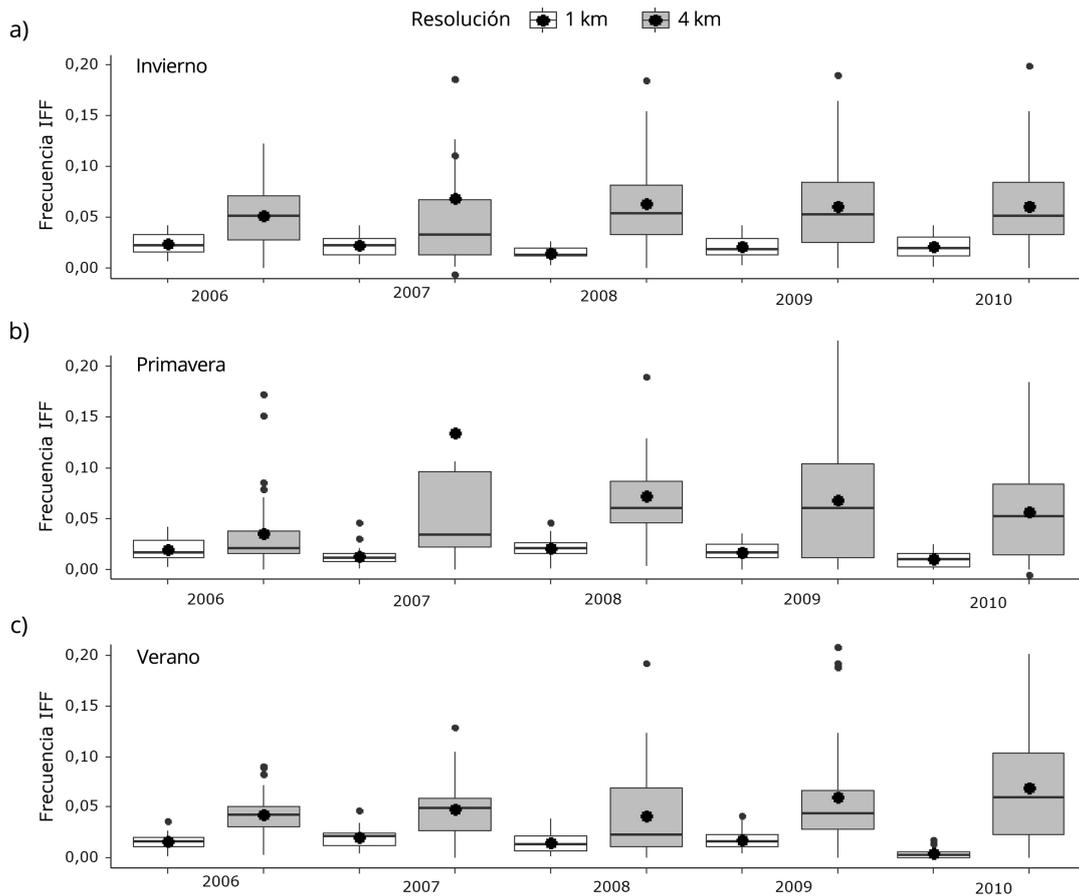
\*Valores significativos ( $P < 0,05$ ). na: no aplica por valor Kruskal-Wallis



**Figura 4. Diagramas de cajas de la estacionalidad de la frecuencia de frentes (IFF) en resoluciones de imágenes 1 km (cajas en blanco) y 4 km (cajas en gris) para a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009 y e) 2010 / Box plots of front frequency seasonality (IFF) at image resolutions 1 km (white boxes) and 4 km (gray boxes) for a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009 and e) 2010**



**Figura 5. Frecuencia de frentes (FF) durante invierno, primavera, y verano de 2006-2010 en la región sur de la Corriente de California. La escala > 0,3 indica una mayor persistencia de la frecuencia de frentes de temperatura durante una temporalidad de 20 días en imágenes con una resolución de 1 km (panel superior de cada estación) y 4 km (panel inferior de cada estación) / Frequency of fronts (FF) during winter, spring, and summer 2006-2010 in the southern California Current region. Scale > 0.3 indicates higher persistence of thermal front frequency over a 20-day temporality in 1 km (upper panel of each station) and 4 km (lower panel of each station) resolution imagery**



**Figura 6. Variación interanual de la frecuencia de frentes (IFF) de 2006 a 2010 en imágenes con una resolución de 1 km (cajas en blanco) y 4 km (cajas en gris), a) invierno, b) primavera y c) verano / Interannual variation of front frequency (IFF) from 2006 to 2010 in images with a resolution of 1 km (white boxes) and 4 km (gray boxes), a) winter, b) spring and c) summer**

De forma similar, las comparaciones entre muestreos de la misma temporada, pero entre distintos años (2006-2010) indicaron diferencias significativas (Fig. 6, Tabla 3;  $P < 0,05$ ), sugiriendo variaciones interanuales de frecuencia de frentes entre primavera, verano e invierno de 2006-2010 en la imagen de 1 km (Fig. 5), mientras que en la imagen de 4 km solamente se observaron estas diferencias en primavera (Fig. 6) (Kruskal-Wallis; Tabla 3).

## DISCUSIÓN

Se discute sobre la elección de la mejor dimensión espacial ( $0,5^\circ$ ,  $1,0^\circ$  y  $2,0^\circ$ ) entre imágenes de satélite de temperaturas de 1 y 4 km para identificar la distribución de frentes de temperatura que indiquen zonas de mayor y menor actividad.

### TAMAÑO DE CUADRANTE

El análisis de frentes de temperatura a diferentes escalas espaciales indicó que la dimensión  $1,0^\circ \times 1,0^\circ$  (latitud y longitud) es la más apropiada porque se logra aumentar el

número de datos para el análisis y evitar la dispersión del IFF. En este sentido, la dimensión del cuadrante tuvo un efecto en la cuantificación y distribución de frentes, lo que permitió mejorar la evaluación estacional de los frentes en una misma escala espacial. El tamaño de cuadrante para la detección de frentes pudiera ser determinante en su cuantificación, ya que al utilizar cuadrantes muy pequeños aumenta el número de datos por cada imagen de satélite, pero en su gran mayoría no capturan la presencia de frentes y, por el contrario, con dimensiones de cuadrantes muy grandes, se reduce el número de cuadrantes (datos) pero podría aumentar la ocurrencia de frentes, esto es debido a que la alta precisión de un tamaño de cuadrante para la obtención de una muestra es con base en un bajo error estándar o varianza (Krebs 2014).

La selección del cuadrante (ventana espacial) ha sido de gran importancia en la determinación de la riqueza de especies producto de agregaciones, porque existen diferencias a nivel local que no se observan a una escala regional (Holloway & Miller 2015). Por ejemplo, diferencias oceánicas en una misma dimensión espacial entre la ruta de migración de

poblaciones desovantes y el sitio de agregación específico (Hamilton *et al.* 2011, Asch & Checkley 2013), donde incluso el transporte podría ser menor debido a la localización cercana de zonas de alimentación (Woodson & McManus 2007). Aunado a la posibilidad de interactuar con procesos oceánicos como frentes de temperatura, donde los organismos son retenidos (Weber & McClatchie 2010), similar al efecto de Triada (Agostini & Bakun 2002) que considera una zona de enriquecimiento, convergencia (frente) y procesos de retención dentro del hábitat apropiado, o bien distribuidos en aguas estratificadas (Landaeta & Castro 2006). Igualmente, las áreas de retención son relacionadas con la riqueza poblacional y su abundancia (Nemeth 2012), las poblaciones se mantienen si los productos del desove son retenidos, al contrario de la dispersión (Sinclair 1988).

#### VARIACIÓN ESTACIONAL E INTERANUAL: FRECUENCIA Y PERMANENCIA DE FRENTES EN DIFERENTES ESCALAS ESPACIALES 1 KM VS. 4 KM

El estudio permitió identificar una diferencia en el número y la frecuencia (persistencia) de frentes de temperatura que varían de acuerdo con la estacionalidad (invierno-primavera-verano). Estas diferencias están dadas por los gradientes en las propiedades termohalinas de la porción sur de la CC (Corriente de California) ocasionadas por la presencia de un flujo hacia el Ecuador de procedencia subártica (Lynn & Simpson 1987, Durazo 2015). Sin embargo, el IFF fue significativamente diferente entre temporadas (invierno, primavera y verano) y más notorio en la imagen de 1 km (2006-2010), a diferencia de las imágenes de 4 km, donde solo se observaron diferencias significativas intra-estacionales en 2006 y 2008.

En invierno las diferencias son asociadas con la ocurrencia de remolinos (ciclónicos y anticiclónicos), que no se observan en primavera cuando las características hidrográficas son más homogéneas (Soto-Mardones *et al.* 2004). En cambio, durante el verano el número de frentes de temperatura se ve reducido por el incremento de la estratificación vertical, relacionado con el debilitamiento de los vientos e intenso calentamiento solar (Pegau *et al.* 2002, Takahashi & Kawamura 2005, Kahru *et al.* 2012). Aunado a que el núcleo de agua Subártica es delimitado a media península (28°N) por una contracorriente cálida hacia el polo (Valle-Rodríguez & Trasviña-Castro 2017), lo que conduce a un estrechamiento progresivo de la Corriente de California cerca de la superficie, resultado de la mezcla con agua más cálida de origen subtropical y tropical (Lynn & Simpson 1987, Durazo 2015).

Con el análisis de las imágenes de frentes (4 km) fue posible observar únicamente la formación de frentes en verano (2006 y 2007), sin ser estadísticamente diferentes. La persistencia de estos frentes fue principalmente en verano del 2006, relacionada con la variabilidad de eventos anómalos. Al respecto, Etnoyer *et al.* (2004) mencionan que la variabilidad estacional de frentes de temperatura es más activa durante eventos fríos La Niña, y por el contrario es menos activa durante eventos El Niño en la zona de transición del Pacífico Noroeste y la Península de Baja California. No obstante, en el verano de 2010 (La Niña) la frecuencia de frentes disminuyó, en coincidencia con el avance de agua subártica por toda la zona, lo que desencadenó propiedades homogéneas en superficie y gradientes térmicos más débiles (Bjorksted *et al.* 2011).

En la variabilidad interanual, observar diferencias significativas únicamente en la resolución de 1 km (invierno-invierno, primavera-primavera y verano-verano de 2006-2010), confirma su aplicación para identificar un mayor número de frentes, aunque de menor frecuencia y longitud. Lo contrario se obtiene de las imágenes de baja resolución de 4 km, con diferencias significativas en primavera de 2006 vs. 2008.

Esto confirma que el algoritmo de detección de frentes (Cayula & Cornillon 1996) tiene la bondad de utilizar una combinación de métodos que funciona a nivel local (píxel), de ventana (número de píxeles sobre la cual se hace la detección) e imagen (el total del área de la imagen), que es recomendado para la detección de la temporalidad de la estructura que origine al frente (Kahru *et al.* 2012) y no solo utiliza el método del gradiente de temperatura (Canny 1986).

En conclusión, no se observaron diferencias significativas entre la distribución de los frentes y las distintas escalas espaciales, pero sí en cuanto al número de cuadrantes obtenidos para cada dimensión. El cuadrante de 1,0° de latitud y longitud geográfica es el más adecuado porque presentó un mayor número de observaciones y menor dispersión (varianza) de frecuencia de frentes. En cuanto a la resolución de las imágenes de 1 y 4 km, ambas permitieron detectar diferencias en la variabilidad estacional, sin embargo, utilizar las imágenes de 1 km permiten detectar diferencias interanuales ( $P < 0,05$ ), que no se observan claramente en las imágenes de 4 km, debido a la mayor y mejor resolución para detectar. Tanto el tamaño de cuadrante, como la resolución de la imagen son claves al momento de analizar las frecuencias de frentes y a su vez determinar el tipo de procesos con los que pueden estar relacionados (submesoescala o mesoescala). Estos aspectos (dimensión de cuadrante, detección y permanencia de frentes), deberán ser considerados al momento de relacionar las estructuras con el hábitat que caracteriza la distribución de las especies, durante o parte del ciclo de vida biológica.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) (Secretaría de Investigación y Posgrado, SIP Proyectos 20220534 y 20230492). Agradecemos al Dr. Mati Kahru de Scripps Institution of Oceanography por su apoyo académico para el uso del programa Windows Image Manager (ver. 9.10). AON recibió apoyo financiero por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI). El autor RFR es beneficiario de la Comisión de Operación y Fomento de las Actividades Académicas del IPN y Sistema Nacional de Investigadores-CONACyT.

## LITERATURA CITADA

- Acha EM, HW Mianzan, RA Guerrero, M Favero & J Bava. 2004.** Marine fronts at the continental shelves of Austral South America: physical and ecological processes. *Journal of Marine Systems* 44(1/2): 83-105. <doi: 10.1016/j.jmarsys.2003.09.005>
- Acha EM, A Piola, O Iribarne & H Mianzan. 2015.** Ecological processes at marine fronts: Oases in the ocean. *SpringerBriefs in Environmental Science*, 68 pp. Springer, Cham. <doi:10.1007/978-3-319-15479-4\_1>
- Agostini VN & ABakun. 2002.** 'Ocean triads' in the Mediterranean Sea: physical mechanisms potentially structuring reproductive habitat suitability (with example application to European anchovy, *Engraulis encrasicolus*). *Fisheries Oceanography* 11(3): 129-142. <doi:10.1046/j.1365-2419.2002.00201.x>
- Asch RG & DM Checkley. 2013.** Dynamic height: A key variable for identifying the spawning habitat of small pelagic fishes. *Deep-Sea Research, Part I, Oceanographic Research Papers* 71: 79-91.
- Bakun A. 2006.** Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: Opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Scientia Marina* 70(S2): 105-122.
- Belkin IM & P Cornillon. 2003.** SST fronts of the Pacific coastal and marginal seas. *Pacific Oceanography* 1(2): 90-113.
- Belkin IM & PC Cornillon. 2005.** Bering Sea thermal fronts from pathfinder data: seasonal and interannual variability. *Pacific Oceanography* 3(1): 6-20.
- Belkin IM & PC Cornillon. 2007.** Fronts in the world ocean's large marine ecosystems. *Proceedings of the International Council on the Exploration of the Seas Annual Science Conference*, 17-21 September, Helsinki. ICES CM 2007/D:21: 1-33.
- Belkin IM & JE O'Reilly. 2009.** An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery. *Journal of Marine Systems* 78(3): 319-326.
- Bjorkstedt EP, R Goericke, S McClatchie & ED Weber. 2011.** State of the California Current 2010-2011: regional variable responses to a strong (but fleeting?) La Niña. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 52: 36-68.
- Canny JF. 1986.** A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 8(6): 679-698.
- Cayula JF & P Cornillon. 1992.** Edge detection algorithm for SST images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 9(1): 67-80.
- Cayula JF & P Cornillon. 1995.** Multi-Image edge detections for SST images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 12(4): 821-829.
- Durazo R. 2009.** Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997-2008. *Progress in Oceanography* 83(1/4): 361-368.
- Durazo R. 2015.** Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *Journal of Geophysical Research, Oceans* 120(2): 1173-1196.
- Durazo R & TR Baumgartner. 2002.** Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography* 54(1-4): 7-31.
- Durazo R, AM Ramírez-Manguilar, LE Miranda & LA Soto-Mardones. 2010.** Climatología de variables hidrográficas. En: Gaxiola-Castro G & R Durazo (eds). *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007*, pp. 25-58. SEMARNAT, CICESE, UABC, Ciudad de México.
- Durazo R, R Castro, LE Miranda, F Delgado-Hinojosa & A Mejía-Trejo. 2017.** Anomalous hydrographic conditions off the northwestern coast of the Baja California Peninsula during 2013-2016. *Ciencias Marinas* 43(2): 1-12.
- Etnoyer P, D Canny, B Mate & L Morgan. 2004.** Persistent pelagic habitats in the Baja California to Bering Sea (B2B) ecoregion. *Oceanography* 17(1): 90-101.
- Etnoyer P, D Canny, BR Mate, LE Morgan, JG Ortega-Ortiz & JN Wallace. 2006.** Sea-surface temperature gradients across blue whale and sea turtle foraging trajectories off the Baja California Peninsula, Mexico. *Deep-Sea Research, Part. II: Topical Studies in Oceanography* 53(3-4): 340-358.
- Franks PJS. 1992.** Phytoplankton blooms at fronts: patterns, scales, and physical forcing mechanisms. *Reviews in Aquatic Sciences* 6(2): 121-137.
- Hamilton R, YS De Mitcheson & A Aguilar-Perera. 2011.** The role of local ecological knowledge in the conservation and management of reef spawning aggregations. In: De Mitcheson YS & PL Colin (eds). *Reef fish spawning aggregations: biology, research and management*. *Fish & Fisheries Series* 35: 331-370. Springer, Dordrecht.
- Holloway P & JA Miller. 2015.** Exploring spatial scale, autocorrelation and non stationarity of bird species richness patterns. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4(2): 783-798.
- Jensen TG, I Shulman, W Hemantha, W Wijesekera, S Anderson & L Sherwin. 2018.** Submesoscale features and their interaction with fronts and internal tides in a high-resolution coupled atmosphere-ocean-wave model of the Bay of Bengal. In: Pascual A (ed). *Topical collection on the 48th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium, 23-27 May 2016*. *Ocean Dynamics* 68: 391-410.

- Kahru M, E Di Lorenzo, M Manzano-Sarabia & BG Mitchell. 2012.** Spatial and temporal statistics of sea surface temperature and chlorophyll fronts in the California Current. *Journal of Plankton Research* 34(9): 749-760.
- Krebs CJ. 2014.** Estimating density: quadrants counts. Version 5. 27. In: Krebs CJ (ed). *Ecological methodology*, pp. 136-204. <[https://www.zoology.ubc.ca/~krebs/downloads/krebs\\_chapter\\_04\\_2017.pdf](https://www.zoology.ubc.ca/~krebs/downloads/krebs_chapter_04_2017.pdf)>
- Landaeta MF & LR Castro. 2006.** Spawning and larval survival of the Chilean Hake *Merluccius gayi* under later summer conditions in the Gulf of Arauco, central Chile. *Fisheries Research* 77(1): 115-121.
- Lynn RJ & JJ Simpson. 1987.** The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research, Oceans* 92(C12): 12947-12966.
- McClatchie S, R Cowen, K Nieto, A Greer, JY Luo, C Guigand, D Demer, D Griffith & D Rudnick. 2012.** Resolution of fine biological structure including small Narcomedusae across a front in the southern California Bight. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117(4): 1-18.
- Nemeth RS. 2012.** Ecosystem aspects of species that aggregate to spawn. In: Mitcheson YS & PL Colin (eds). *Reef fish spawning aggregations: Biology, research and management*. Fish & Fisheries Series 35: 20-30. Springer, Dordrecht.
- Nieto K, H Demarcq & S McClatchie. 2012.** Mesoscale frontal structures in the Canary Upwelling System: New front and filament detection algorithms applied to spatial and temporal patterns. *Remote Sensing of Environment* 123: 339-346.
- Nieto K, Y Xu, SLH Teo, S McClatchie & J Holmes. 2017.** How important are coastal fronts to albacore tuna (*Thunnus alalunga*) habitat in the Northeast Pacific Ocean? *Progress in Oceanography* 150: 62-71.
- Olson DB & RH Backus. 1985.** The concentrating of organisms at fronts: A cold-water fish and a warm-core Gulf Stream ring. *Journal of Marine Research* 43(1): 113-137.
- Pegau WS, E Boss & A Martínez. 2002.** Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letter* 29(9): 1295. <<https://doi.org/10.1029/2001GL014076>>
- Perez-Brunius P. 2007.** Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports* 48: 204-214.
- Roa-Pascuali L, LH Demarc & AE Nieblas. 2015.** Detection of mesoscale thermal fronts from 4 km data using smoothing techniques: Gradient-based fronts classification and basin scale application. *Remote Sensing of Environment* 164: 225-237.
- Robinson IS. 2010.** The methods of satellite oceanography. In: Robinson IS (ed). *Discovering the ocean from space*, pp. 7-67. Springer-Verlag, Berlin.
- Shulman I, B Penta, J Richman, G Jacobs, S Anderson & P Sakalaukus. 2015.** Impact of submesoscale processes on dynamics of phytoplankton filaments. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120: 2050-2062. <[doi:10.1002/2014JC010326](https://doi.org/10.1002/2014JC010326)>
- Sinclair M. 1988.** *Marine populations: an essay on population regulation and speciation*. Seattle, 252 pp. Washington Sea Grant Program, University of Washington Press, Seattle.
- Soto-Mardones L, A Pares-Sierra, J Garcia, R Durazo & S Hormazabal. 2004.** Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California) from Hydrographic, ADCP and Altimetry Data. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 51(6/9): 785-798. <<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.05.024>>
- Takahashi W & H Kawamura. 2005.** Detection method of the Kuroshio front using the satellite-derived chlorophyll-a images. *Remote Sensing of Environment* 97(1): 83-91.
- Valle-Rodríguez J & A Trasviña-Castro. 2017.** Poleward currents from coastal altimetry: The west coast of Southern Baja California, Mexico. *Advances in Space Research* 59(9): 2313-2324.
- Weber ED & S McClatchie. 2010.** Predictive models of northern anchovy *Engraulis mordax* and Pacific sardine *Sardinops sagax* spawning habitat in the California Current. *Marine Ecology Progress Series* 406: 251-263.
- Woodson CB & MA McManus. 2007.** Foraging behavior can influence dispersal of marine organisms. *Limnology and Oceanography* 52(6): 2701-2709.
- Xu Y, K Nieto, SLH Teo, S McClatchie & J Holmes. 2017.** Influence of fronts on the spatial distribution of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the Northeast Pacific over the past 30 years (1982-2011). *Progress in Oceanography* 150: 72-78. <<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.04.013>>

Recibido el 13 de enero 2022

Aceptado el 4 de abril 2023