Universidad Austral de Chile
Escuela de Biología Marina

Profesor Patrocinante:
Dr. José Garcés Vargas
Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas
Facultad de Ciencias - Universidad Austral de Chile

Profesores Informantes:
Dr. Ricardo Giesecke Astorga
Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas
Facultad de Ciencias - Universidad Austral de Chile

Dr. Humberto González Estay
Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas
Facultad de Ciencias - Universidad Austral de Chile

VARIACIÓN TEMPORAL DE LA SURGENCIA EN LA REGIÓN CENTRO-SUR DE CHILE (39-41°S) A TRAVÉS DE INFORMACIÓN PROCEDENTE DE SATÉLITES

Tesis de Grado presentada como parte de los requisitos para optar al grado de ***Licenciado en Biología Marina*** **y** Título Profesional de ***Biólogo Marino*****.**

ANDRE SEBASTIÁN PINOCHET VELÁSQUEZ

VALDIVIA - CHILE

2015

Dedicado con mucho cariño a mis padres
Wladimir Pinochet Quiroz y Amelia Velásquez Subiabre

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer al Dr. José Garcés Vargas por brindarme la gran oportunidad de realizar mi tesis con él, por la paciencia y dedicación en cada momento en el que no comprendía alguna información. Se agradece enormemente su gran disposición a responder las diferentes interrogantes que me surgían, por confiar en mí con los diferentes trabajos realizados dentro de la universidad como la ayudantía en el ramo Oceanografía Física y pequeñas labores para la Unidad de Extensión. Sin nada más que agregar, le deseo el mayor de los éxitos en todo aspecto de su vida, se que seguirá entregando esa energía y dedicación en cada labor que desempeñe y espero en un futuro no muy lejano estar trabajando junto a usted. Muchas gracias por todo.

Quiero agradecer enormemente a la Sra. Pamela Silva López, nuestra secretaria de la Escuela de Biología Marina, por su constante ayuda y apoyo brindado en los temas administrativos de la tesis, guiando y aconsejándome en cada una de las etapas que desarrollé. Muchas gracias y le deseo el más grande de los éxitos en las nuevas etapas laborales y familiares que tenga a futuro.

Quisiera agradecer a mis amigos del instituto, primero a la Alexandra Gangas por ser mi compañera de oficina estando presente y ayudándome en cada momento desde los ramos que complican la existencia, hasta el momento en que escribí la última línea de mi tesis y celebramos juntos. A la Javiera Miranda por estar siempre presente desde los primeros ramos de la universidad hasta cuando empezamos casi juntos a hacer nuestra tesis, y esas conversaciones tomándonos un café durante la semana que eran sagradas. A Patricio Álvarez por la gran ayuda brindada en cada momento de frustración con los ramos y luego con la tesis, siempre con una

palabra de apoyo y de que sí puedo hacer las cosas. Finalmente, le doy las gracias a la Waleska Labraña y Camila Oyarzún, mis vecinas de laboratorio, que siempre me iba un rato a conversar y así despejar un poco la cabeza, siempre apoyándome en cada momento personal y académico. Sin nada más que agregar, les reitero las gracias a cada uno de ustedes y a muchas personas más que fueron parte de mi vida universitaria y me acompañaron en esta linda etapa de mi vida.

Debo agradecer a la tía Edith Ojeda, el tío Patricio Silva y a la Javiera Silva por brindarme su apoyo por más de 4 años y hacerme parte de su familia, alegrarme los días cuando estaba estresado y desconectarme por algunas horas de las complicaciones de la universidad, muchas bendiciones a la hermosa familia que tienen.

A mi polola Daniela Silva, muchas gracias por soportarme y apoyarme en cada momento difícil que se presentaba donde no encontraba la manera de solucionarlo y tú siempre tenias las ideas y palabras justas de cómo enfrentar ese obstáculo. Siempre he creído que llegastes en el momento justo de mi vida y siempre serás un gran apoyo para mí como yo lo soy para ti, te amo mucho.

Quisiera agradecer a mi hermano Francisco Pinochet y mi primo Rene Navarro por el apoyo y consejos que a veces me daban, por los momentos en el que un estudio se hacia más llevadero con las diferentes bromas que hacíamos y por las comidas que se nos ocurrían a las 2 de la mañana.

Y finalmente, quería agradecerles a mis padres, los pilares fundamentales de mí vida, desde un principio sentí un gran apoyo en cada momento de mi formación universitaria, les agradezco la paciencia que tuvieron cuando no comprendían mucho en que situación académica estaba y tenía que quedarme en Valdivia terminando algunos ramos o trabajos. También darle las gracias por el gran esfuerzo que colocaron para que pueda estudiar tan lejos de casa junto con mi hermano, se el inmenso sacrificio que eso implicó, desde lo económico hasta lo emocional de tener a sus hijos lejos, me siento enormemente agradecido de ustedes y por la familia que tenemos.

Gracias.

Índice general

1. RESUMEN 1

1.1 Abstract 2

2. INTRODUCCIÓN 3

2.1 Hipótesis 8

2.2 Objetivos 8

2.2.1 Objetivo General. 8

2.2.2 Objetivos Específicos. 8

3. MATERIALES Y MÉTODOS 9

3.1 Área de Estudio. 9

3.2 Metodologías. 10

3.2.1 Base de datos. 10

3.2.2 Análisis de datos. 12

4. RESULTADOS 14

4.1 Variabilidad estacional del Índice de Surgencia 14

4.2 Variabilidad estacional de los campos de la temperatura superficial del mar y el viento superficial del mar. 14

4.3 Efecto del forzamiento del viento superficial sobre la temperatura superficial del mar. 19

5. DISCUSIÓN. 24

5.1 Índice de surgencia costero y su relación con el afloramiento. 24

5.2 Efecto del forzamiento del viento superficial sobre la temperatura superficial del mar. 25

5.3 Potenciales implicancias del afloramiento en las principales pesquerías pelágicas comerciales de la Región de Los Ríos. 27

5.4 Conclusiones. 28

6. LITERATURA CITADA. 29

ÍNDICE DE FIGURAS.

Páginas

FIGURA 1. *Región de estudio (centro-sur de Chile) en donde se muestran las principales puntas (puntos rojos) y cañones (flechas negras). Los colores del mapa y la barra de la derecha muestran la batimetría basada en ETOPO2.* 8

FIGURA 2. *Gráfico espacio-tiempo de las climatologías de la TSM_{costa} (panel izquierdo) y la TSM_{ocean} (panel derecho) utilizados para obtener el ISC_{TSM}.* 14

FIGURA 3. *Gráfico espacio-tiempo de las climatologías del ISC_{TSM}.* 14

FIGURA 4. *Campos climatológicos de la TSM (color, °C) y el viento (vectores m s^{-1}). (A) verano, (B) otoño, (C) invierno y (D) primavera. En la parte inferior de cada panel se muestra una flecha que indica la escala del viento. El límite de la plataforma continental es indicado con el veril de los 200 metros (línea roja).* 16

FIGURA 5. *Histograma de frecuencia de la magnitud y dirección de los vientos superficiales diarios para el área de estudio. (A) verano, (B) otoño, (C) invierno, (D) primavera.* 17

FIGURA 6. *Correlación cruzada entre el viento paralelo a la costa y la temperatura superficial del mar en el área de estudio. La línea azul muestra el 95% de confianza.* 19

FIGURA 7. *Correlación cruzada entre las anomalías del viento paralelo a la costa y las anomalías de la temperatura superficial del mar en el área de estudio. (A) verano, (B) otoño, (C) invierno y (D) primavera. La línea azul muestra el 95% de confianza..* 20

FIGURA 8. *Estructura espacial de la correlación entre las anomalías diarias promedio del campo del viento paralelo a la costa desfasada y las anomalías diarias del campo de TSM. (A) verano (2 días de desfase), (B) otoño (5 días de desfase), (C) invierno (5 días de desfase) y (D) primavera (2 días de desfase). La plataforma continental es indicada con el veril de los 200 metros (línea roja).* 21-22

LISTA DE ABREVIATURAS.

TSM:	Temperatura Superficial del Mar
SCH:	Sistema de Corriente de Humboldt
ASPS:	Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste
VSM:	Vientos Superficial del Mar
ISC:	Índice de Surgencia Costera

1. RESUMEN

La costa central y norte de Chile es parte del Sistema de Corriente de Humboldt sustentando una de las pesquerías más importantes del mundo producto de la surgencia costera. A lo largo de la costa chilena existen varios focos de surgencia, sin embargo, desde un punto de vista físico, la región entre 39-41°S no ha sido estudiada en detalle a pesar de ser la segunda región más importante en la extracción de sardina común del país. Este trabajo de investigación evaluó la variabilidad estacional de la surgencia costera en el centro-sur de Chile, a través de datos diarios satelitales de alta resolución de temperatura superficial del mar y viento superficial del periodo 2003 y 2013. Para esto, se analizó la variabilidad estacional de del afloramiento mediante un índice de surgencia costera como también la TSM y los vientos. La dirección de los vientos superficiales es controlada durante el año por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste, los mismos que ocasionan una "lengua de agua fría" y una "sombra de surgencia" al norte de Punta Galera (40°S) durante primavera y verano. Un análisis de correlación cruzada entre la TSM y los vientos paralelos a la costa estableció que ésta punta es una importante área de surgencia en primavera y verano, en donde el viento paralelo a la costa conduce 2 días después a la TSM. Se discuten las implicancias de la línea de costa y del afloramiento sobre las principales pesquerías pelágicas comerciales en la región.

1.1 Abstract

The central and north coasts of Chile are part of the Current System of Humboldt (CSH) supporting one of the biggest fisheries in the world, as a result of the coastal upwelling. Along of the Chilean coast there are several cores of coastal upwelling, however, from a physical point of view, the region between 39-41°S has not been studied on detail despite being considered the second most important area of sardine fisheries in the country. The aim of this research evaluated the season variability of the coastal upwelling in the central-south of Chile, through daily high resolution satellite data of sea surface temperature (SST) and surface wind between 2003 y 2013. For this, the seasonal variability of the upwelling was analyzed by coastal upwelling index (CUI) as well as SST and winds. During the year the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone (SPSA) controls the surface wind direction, this generate a "cold water tongue" and "upwelling shadow" to the north of Punta Galera (40°S), during spring and summer. An spatial correlation analysis between SST and alongshore wind shows that this point is an important upwelling area on spring and summer, where the alongshore wind leads 2 days after the SST. The implications of the coastal shape and the upwelling on the main commercial pelagic fisheries of the region are discussed.

2. INTRODUCCIÓN

En los océanos, los centros de mayor productividad biológica se encuentran localizados a lo largo de los bordes orientales. En esas áreas se producen importantes centros de surgencia costeros generados por la dirección dominante del viento, orientación de la costa y efecto de la rotación de la tierra (Bello *et al.*, 2004). Por efecto de Coriolis, las aguas marinas próximas a la costa son advectadas desde el área de transporte por el flujo horizontal, desplazadas hacia el océano abierto y desviadas hacia la izquierda en el hemisferio sur, lo que se conoce como transporte de Ekman. Por éste mecanismo asciende agua, la cual proviene de niveles más profundos y aporta nutrientes a la superficie oceánica (Farías & Castro, 2008).

Las regiones de California, Canarias, Humboldt y Benguela son las zonas biológicamente más productivas de los océanos del mundo, y al mismo tiempo sustentan las grandes pesquerías (Patti *et al.*, 2008). El Sistema de Corriente de Humboldt (SCH), también conocido como Sistema Chile-Perú, se ubica en el borde oriental del giro Subtropical del Pacífico Sudeste, y está limitado en el norte por el Sistema de Corrientes Ecuatoriales y en el sur por la Corriente del Pacifico Sur conocida comúnmente como la Corriente de Deriva del Oeste (WWD, West Wind Drift). El SCH sustenta las principales pesquerías a lo largo de Chile, en las que se encuentran el jurel (*Trachurus murphyi*), la sardina común (*Strangomera bentincki*) y anchoveta (*Engraulis ringens*). La sardina y anchoveta son los recursos más importante del país, sólo en el año 2012, se extrajeron aproximadamente 1.750.000 toneladas entre ambas especies para todo Chile (Sernapesca, 2012).

El SCH es forzado principalmente por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste (ASPS), el cual controla los vientos a lo largo de la costa (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015). Durante otoño e invierno el ASPS se encuentra ubicado en latitudes bajas, con su centro

alrededor de 27 - 29° S, que permite que los vientos sean favorables a la surgencia sólo en la parte norte de Chile (18 - 28°S). En primavera y verano el ASPS se encuentra ubicado en latitudes medias, con su centro alrededor de 30 - 33°S, permitiendo que los vientos sean favorables a la surgencia desde el norte hasta el centro-sur de Chile (28 - 41°S). La migración de norte-sur y viceversa del ASPS incide en la formación de filamentos de surgencia. A lo largo de Chile se presentan varios filamentos de surgencia asociados a la llegada de aguas frías a la costa, existiendo un mayor número de filamentos de baja intensidad en el norte en contraste con la zona sur, donde existe menor número de filamentos aunque más intensos (Nieto, 2009). Aparte de los filamentos referidos anteriormente, existen los meandros y remolinos de mesoescala, relacionados con la exportación mar afuera de nutrientes, materia orgánica y plancton. Los efectos que tengan los remolinos sobre el sistema oceánico van a depender en gran medida de su origen, profundidad (superficiales o subsuperficiales), sitios de generación, intensidad y tiempo de permanencia en el sistema (Morales *et al.*, 2013). La velocidad de desplazamiento de los remolinos en promedio es relativamente baja (~1,7 km d^{-1}) (Correa-Ramirez *et al.*, 2007) pero la distancia que pueden llegar a alcanzar es amplia (600 - 800 km.) (Hormazabal *et al.*, 2004). Estas características de los remolinos mencionadas anteriormente permiten estimar su trayectoria en el sistema y de esta manera evaluar el sustento biológico en el océano.

A lo largo de Chile la surgencia costera ocurre cuando predominan los vientos sur y suroeste (Bello *et al.*, 2004), o un rotor del viento negativo en el hemisferio sur (Croquette *et al.*, 2004), provocando que las masas de agua asciendan. La surgencia a lo largo de la costa central de Chile corresponde a aguas ecuatoriales subsuperficiales, que provoca una disminución de la temperatura superficial del mar (TSM), oxígeno disuelto, aumento de nutrientes, logrando que estas zonas sean refertilizadas favoreciendo a la productividad primaria (Bello *et al.*, 2004). El

surgimiento de aguas frías se han observado con mayor intensidad en puntas y cabos (Bello *et al.*, 2004) particularmente en zonas con una plataforma continentales anchas y someras (Patti *et al.*, 2008). En Chile, varios focos de surgencia se han identificado y entre los más importantes se pueden mencionar: Península de Mejillones (23°S), Punta Lengua de Vaca (30°S) (Rutllant & Montecino, 2002), Punta Curaumilla (33°S), Punta Topocalma (34º10'S), Punta Nugurne (35º57'S), Punta Lavapié (37º15'S) y Punta Galera (40ºS) (Letelier *et al.*, 2009). En muchos de estos lugares se han observado las denominadas "sombras de surgencia", zonas interiores en que la temperatura superficial del mar es más alta que las aguas propias de la surgencia costera. Por ejemplo, en la Península de Mejillones, hacia al interior de la Bahía de Antofagasta, localizada al sur de la Península, se presentan aguas más cálidas que hacia el exterior, formándose un gradiente térmico entre la bahía y fuera de la misma que prevalece durante todo el año (Piñones *et al.*, 2007). Otra particularidad de éstas zonas de surgencia es el tiempo de respuesta máxima que tiene la disminución de la TSM a los vientos paralelos a la costa. Así, en esta misma Bahía de Antofagasta la TSM ha respondido al viento con 1 día de retardo para la estación de verano (Piñones *et al.*, 2007), mientras que en la Punta Curaumilla y Punta Topocalma con 3 días de rezago (Bello *et al.*, 2004).

La plataforma continental al sur de Perú es bastante estrecha hasta el norte de Chile (10 - 15 km), enanchándose hacia la zona centro y sur del país (hasta 65 km.), siendo interrumpida por cañones submarinos (San Antonio 33°S y Bío-Bío 37°S) (Muñoz *et al.*, 2004). Hacia el sur entre 39 - 40°S la plataforma se encuentra interrumpida por los cañones de Toltén, Lingue, Callecalle y Chaihuín (Díaz-Naveas & Frutos, 2010) (Fig. 1).

Los registros de las pesquerías en la Región de Los Ríos (Chile, centrada alrededor de los 40°S) que datan desde comienzos de la década de los 70s indican que las principales especies

encontradas son la sardina común y la anchoveta, las que se asocian a focos de surgencia (Lamilla & Bustamante, 2010). En la actualidad también existen otros recursos pesqueros como la merluza de cola (*Macruronus magellanicus*) y sierra (*Thyrsites atun*), sin embargo, la sardina común es la que mayormente se extrae, con aproximadamente un 96,8% del total entre las 4 especies mencionadas. La Región de Los Ríos es la segunda región más importante en la extracción de sardina común con un 16,3% después de la Región del Bío-Bío (localizada más al norte, alrededor de 36°S). En la Región de Los Ríos en la época de primavera y verano es donde ocurren las mayores extracciones de sardina común, la cual representó un 71,5% del total anual para el año 2012 (Sernapesca, 2012).

En Chile se ha estimado que para el año 2100, bajo un escenario de cambio global moderado e intenso, el ASPS se dirigiría más hacia el sur, con un aumento en la intensidad de los vientos del sur a lo largo de las costas subtropicales (Garreaud & Falvey, 2009). Esto ocurriría entre 37 - 41°S durante la primavera y verano, expandiendo el tiempo de los vientos favorables a la sugerencia por casi dos meses alrededor de los 40°S, esperando que la Región de Los Ríos sea una de las más importantes en el ámbito pesquero del país (Garreaud & Falvey, 2009).

En la zona sur de Chile (39 - 41°S) existen diferentes puntas expuestas a la costa, de norte a sur se encuentran Punta Maiquillahue (39,45°S), Punta Chanchán (39,53°S), Punta Curiñanco (39,8°S), Punta Chaihuín (39,91°S), Punta Falsa Galera (39,96°S) y finalmente Punta Galera (40°S) (Fig. 1). Además, existen otras puntas menos expuestas como es Punta Colún (40,08°S), Punta Hueicolla (40,15°S), Punta Lameguapi (40,19°S), Punta Escalera (40,22°S), Punta Pucatrihue (40,44°S), Punta Kopaitic (41°S). De todas las puntas que existen entre los 39 - 41°S, Galera es la punta más saliente y por tanto más expuesta a los vientos que prevalecen en el sector y ha sido nombrado como un importante foco de surgencia por Letelier *et al.* (2009). Estos

autores, investigaron la variabilidad estacional del afloramiento costero en la zona centro-sur de Chile, sin embargo, no estudiaron en detalle la variabilidad sinóptica y estacional de todas las salientes entre 39 - 41°S.

En la presente investigación se evaluará la variabilidad estacional de la surgencia en el centro-sur de Chile a través de datos de alta resolución espacial de temperatura superficial del mar y viento superficial obtenidos de diferentes sensores satelitales. Este estudio permitirá mejorar el entendimiento de la dinámica costera producto de la surgencia y servirá como base para establecer los posibles cambios debido a diferentes escenarios de calentamiento global.

2.1 Hipótesis

En la región centro-sur de Chile (39-41°S) los vientos del sur paralelos a la costa predominantes en primavera y verano favorecen la surgencia costera generando la máxima disminución en la temperatura superficial del mar de forma desfasada (2 días) y generando una "sombra de surgencia" (al noreste de Punta Galera), al igual que ocurre en otros focos de afloramiento a lo largo de Chile.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General.

Caracterizar espacial (39-41 °S) y temporalmente (11 años) la surgencia en la región centro-sur de Chile.

2.2.2 Objetivos Específicos.

1. Establecer la estacionalidad de la surgencia mediante un índice basado en la temperatura superficial del mar en el área de estudio.
2. Establecer la estacionalidad de la temperatura superficial del mar y del viento en el área de estudio.
3. Establecer la frecuencia de la magnitud y dirección de los vientos superficial en el área de estudio.
4. Establecer la relación entre el viento superficial paralelo a la costa y la temperatura superficial del mar en el área de estudio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de Estudio.

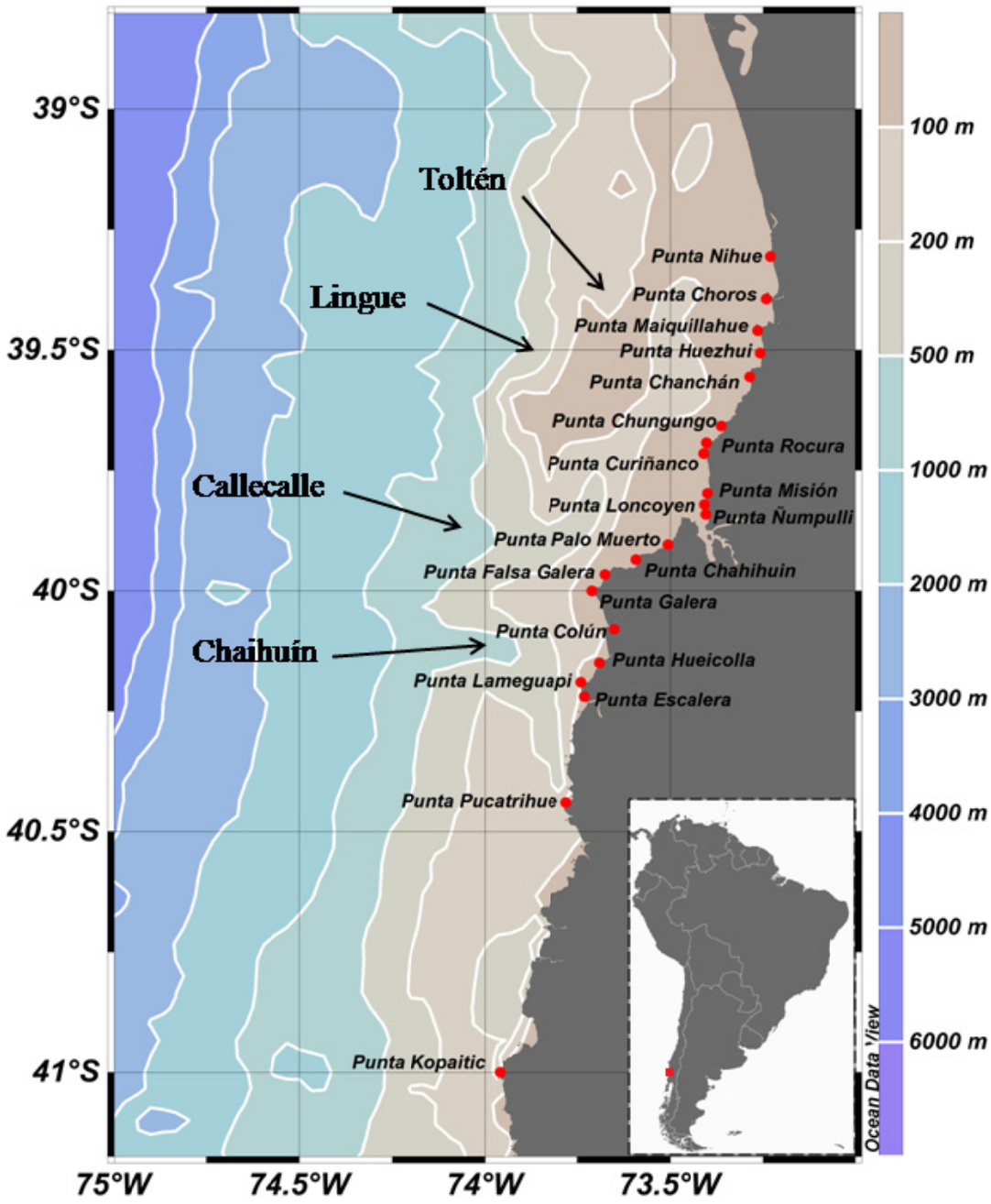


Figura 1. *Región de estudio (centro-sur de Chile) en donde se muestran las principales puntas (puntos rojos) y cañones (flechas negras). Los colores del mapa y la barra de la derecha muestran la batimetría basada en ETOPO2.*

3.2 Metodologías.

3.2.1 Base de datos.

Temperatura superficial del mar.

La Temperatura Superficial del Mar (TSM) diaria fue obtenida de la página web http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/JPL-L4UHfnd-GLOB-MUR entre 2003 y 2013 (11 años). Estos datos provienen de los sensores MODIS y AMSR-E a bordo los satélites Aqua y Terra, sensor AVHRR-3 a bordo del satélite NOAA-18 y el sensor WindSat a bordo del satélite Coriolis. A través del análisis MUR (Multi-sensor Ultra-high Resolution) los datos de TSM provenientes de 8 satélites son objetivamente interpolados a nivel 4 (L4), con una resolución espacial de 0,011° (latitud) x 0,011° (longitud), es decir, de 1 a 2 km de resolución (Chin *et al.*, 2013). MUR utiliza la técnica MRVA (Multi-Resolution Variation Analysis) para obtener el producto L4 el cual está basado en una descomposición wavelet. Mayor información acerca de la forma de producir el nivel 4, los procedimientos de control de calidad y descripción del algoritmo MRVA pueden ser encontrados en Chin *et al.* (2013). Estos datos han sido usados exitosamente en la localización y movimiento de estructuras frontales ayudando a identificar mejor las escalas de afloramiento dentro de la costa peruana (Vazquez-Cuervo *et al.*, 2013).

Magnitud y dirección del viento.

La magnitud y dirección del esfuerzo del Viento Superficial del Mar (VSM) diario corresponden a productos desarrollados por el IFREMER. Estos productos fueron interpolados mediante el método objetivo y basados en los obtenidos por los escaterómetros a bordo del satélite QuikSCAT (sensor SeaWind) (Piolle & Bentamy, 2002) y MetOP (sensor ASCAT) (Bentamy & Fillon, 2012) y ambos tienen una resolución espacial de 0,25º (latitud) x 0,25º (longitud), es decir aproximadamente 25 km. Se utilizó la información registrada por QuikSCAT entre enero de 2003 y octubre de 2009 (tiempo en que aproximadamente dejó de operar) y por ASCAT entre el 21 de marzo de 2007 (tiempo que comenzó a funcionar) y diciembre de 2013. La información que se presenta corresponde a los productos derivados del satélite ASCAT y a los datos obtenidos después de octubre de 2009 mediante regresión lineal entre las dos bases de datos en donde las variables independientes fueron los productos derivados de QuikSCAT. Una fusión de las componentes del esfuerzo del viento mediante regresión lineal pero con datos mensuales se usó a lo largo de la costa centro-norte de Chile con muy buenas correlaciones en especial para la componente meridional (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015).

Batimetría.

Los datos de topografía se obtuvieron de ETOPO2 v2. Esta base de datos mundial tiene una resolución de 2-minutos y la batimetría se deriva de la altimetría de radar por satélite de 1978 de la superficie del mar que se interpoló como anomalías de gravedad y se extrapoló equivalentemente en profundidad (Smith & Sandwell, 1994). La versión de batimetría contenida en ETOPO2v2 es la 8.2. ETOPO2v2 es un producto obtenido del Centro Nacional de Datos Geofísicos cuyos datos fueron obtenidos de la Oficina Naval de Oceanografía de los EE.UU.

3.2.2 Análisis de datos.

Índice de surgencia.

Con el fin de evaluar la surgencia y contrastarlo con el viento favorable al afloramiento en el área de estudio, se utilizó la metodología propuesta por Benazzouz *et al.* (2014). Este índice de surgencia costera está basado en la TSM (ISC_{TSM}) obtenida de la diferencia entre la temperatura de aguas oceánicas (aguas más cálidas) y costeras (aguas frías por la surgencia) para una misma latitud. Esto se puede representar en una fórmula simple:

$$ISC_{TSM(lat,\ tiempo)} = TSM_{ocean(lat,\ tiempo)} - TSM_{costa(lat,\ tiempo)}$$

La TSM_{costa} se considera la temperatura mínima desde la costa hasta el borde de la plataforma continental (veril de los 200 m), siendo más amplia (60 km.) alrededor de 74 °W. La $TSM_{ocean,}$ se considera la temperatura máxima desde el borde de la plataforma continental hasta donde eventualmente llegan los remolinos de surgencia. El caso de Chile, llegan hasta alrededor de los 85°W (Correa-Ramirez *et al.*, 2007), con una distancia aproximada de 1.200 km. desde la costa. Los mayores valores en el ISC indicarían surgencia. Este índice tiene la ventaja de considerar la batimetría de la plataforma continental y por lo tanto representar la complejidad de la estructura espacial en dos dimensiones de la surgencia, tales como celdas de surgencia costera, efectos de puntas y filamentos (Benazzouz *et al.*, 2014)

Con el fin de conocer la estacionalidad de los campos de TSM y de los vientos superficiales, se obtuvieron las climatologías mensuales para el período de estudio. Luego, las climatologías mensuales fueron promediadas por estación, es decir, verano (enero-marzo), otoño (abril-junio), invierno (julio-septiembre) y primavera (octubre-diciembre).

Para establecer la frecuencia de la magnitud y dirección de los vientos en el área de estudio se promedió cada campo del viento y se separó por estaciones del año.

Por último, para relacionar el viento superficial paralelo a la costa y la TSM en el área de estudio, se promediaron las anomalías diarias del campo de ambas variables de tal forma de obtener dos series de tiempo. A través de un análisis de correlación cruzada entre ambas series se estableció su desfase. Este mismo análisis se realizó por separado por estaciones del año. Una vez establecido el desfase por estaciones del año y para conocer en qué sectores sobre el área de estudio existió una mejor relación, se correlacionó la serie del viento superficial paralelo a la costa desfasado (mejor correlación cruzada obtenida con la TSM) con cada punto de la grilla del campo de la TSM. En todas las correlaciones se consideraron un nivel de significancia del 95%.

El análisis de los datos se realizó con la ayuda del programa MATLAB *versión R2013a*.

4. RESULTADOS

4.1 Variabilidad estacional del Índice de Surgencia.

La climatología de la TSM_{costa} obtenida dentro de la plataforma continental casi no varió latitudinalmente en cada uno de los meses, especialmente entre marzo y diciembre (Fig. 2). Los mayores valores de TSM_{costa} (13 - 15°C) se observaron entre diciembre y marzo, siendo menores el resto del año (10 - 12°C). Por el contrario, la climatología de TSM_{ocean} obtenida fuera de la plataforma continental, varió latitudinalmente en cada uno de los meses con valores mayores hacia el norte. La estacionalidad de la TSM_{ocean} es mucho más marcada que la TSM_{costa}, siendo los valores máximos en verano (16 - 18°C) y los mínimos en invierno y comienzos de primavera (12 -13°C) (Fig. 2). Debido a que las TSM_{costa} latitudinalmente casi no variaron, el ISC_{TSM} cambio latitudinalmente en concordancia a los cambios de la TSM_{ocean}. De acuerdo a este índice el afloramiento se produciría mayormente en los meses de verano y otoño especialmente entre los 38,5 y 40°S en donde las diferencias de temperatura fueron mayores a 3,5°C, no obstante, para la época de invierno y primavera el afloramiento sería menos probable, ya que las diferencias fueron menores a 1,5 °C (Fig. 3).

4.2 Variabilidad estacional de los campos de la temperatura superficial del mar y el viento superficial del mar.

El VSM en el centro-sur de Chile cambia de dirección e intensidad a medida que transcurre el año (Fig. 4). En general, durante el verano los vientos son paralelos a la costa, dirigidos hacia el noreste con una velocidad de alrededor de 5 m s^{-1} y con las menores TSMs dentro de la plataforma continental (Fig. 4A). Durante el otoño y fuera de la plataforma continental los vientos se dirigen levemente hacia el noreste al norte de 40,5°S y hacia el sureste

al sur de la posición señalada, con una velocidad inferior a los 5 m s^{-1}, mientras que sus velocidades fueron entre 2 y 0 m s^{-1} cerca de la costa (Fig. 4B). El patrón de las TSMs en otoño

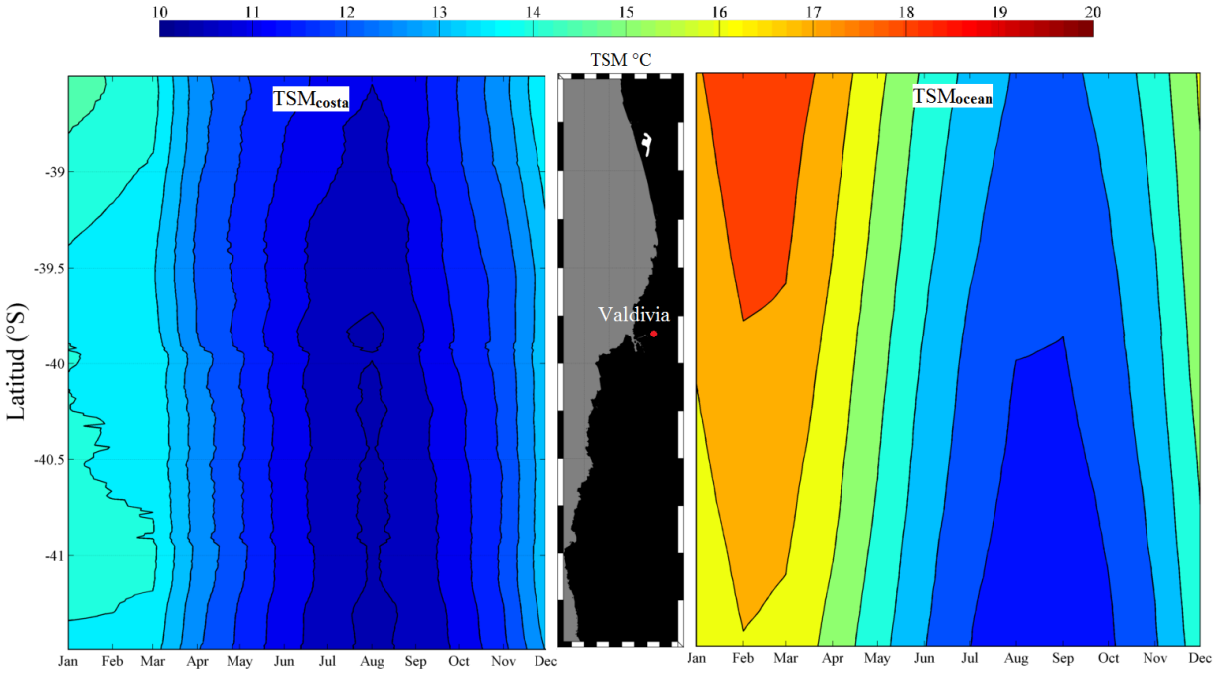


Figura 2. *Gráfico espacio-tiempo de las climatologías de la TSM_{costa} (panel izquierdo) y la TSM_{ocean} (panel derecho) utilizados para obtener el ISC_{TSM}.*

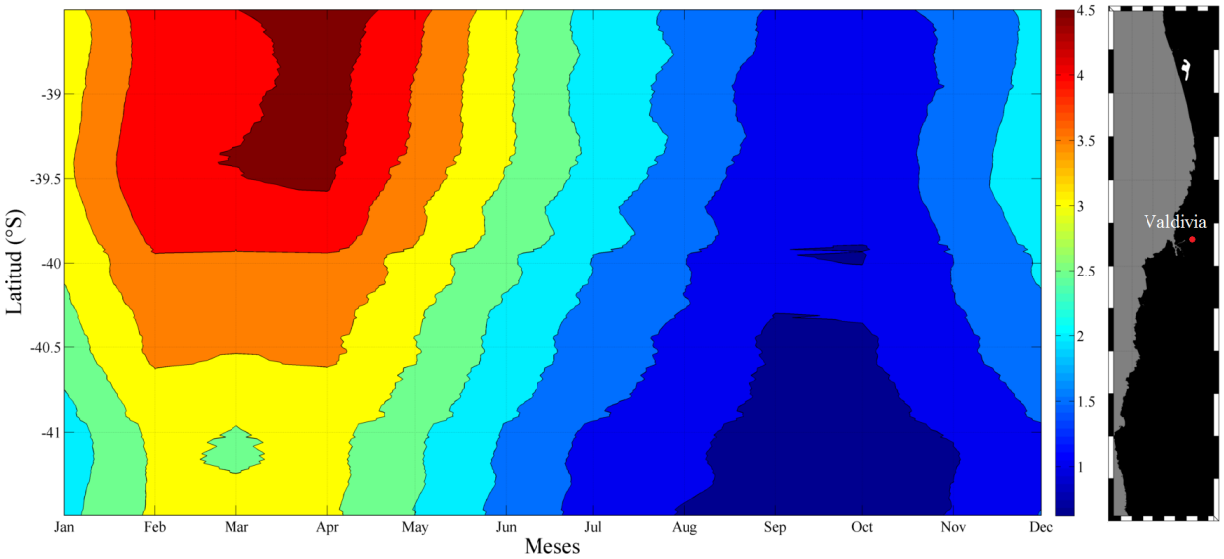


Figura 3. *Gráfico espacio-tiempo de las climatologías del ISC_{TSM}.*

es muy parecido al del verano, sin embargo, sus temperaturas son menores. Para el invierno, el patrón de la magnitud y dirección de los vientos es similar al de otoño (Fig. 4C). No obstante, en lo que respecta a la TSM, sus valores bajan drásticamente hacia afuera de la plataforma continental (11°C) y por lo tanto los gradientes costa-océano que se apreciaban en verano (14 - 17°C) y otoño casi desaparecieron. Para la época de primavera, los vientos cambian drásticamente su dirección y magnitud respecto al invierno, éstos tienen una velocidad de aproximadamente 5 m s^{-1} y se dirigen hacia el noreste (Fig. 4D). Los valores de TSM aumentan (14°C) y comienzan a establecerse los gradientes costa-océano, además empieza a proyectarse una lengua de agua fría (12 °C) hacia el norte de Punta Galera sobre la plataforma continental.

El histograma de la frecuencia de la magnitud y dirección de los vientos superficiales diarios (Fig. 5) da una visión más real de los vientos dominantes de la zona ya que no promedia sobre toda la estación del año.

Durante el verano más del 60% se dirigió entre el noroeste y noreste, con magnitudes predominantes que fluctuaron entre los 6 y 10 ms^{-1} (Fig. 5A). La frecuencia de la magnitud y dirección de los vientos superficiales para el otoño e invierno es muy parecida, el mayor porcentaje de los vientos se dirigió hacia el sureste (18 - 29% aproximadamente), con velocidades que fluctuaron entre los 6 - 14 ms^{-1} (Fig. 5B y 5C).

En primavera, el patrón de la dirección y velocidad del viento superficial tuvo un comportamiento similar al del verano, no obstante, la dirección de los vientos predominantes que se dirigieron entre el noroeste y noreste fue de alrededor del 50% (Fig. 5D).

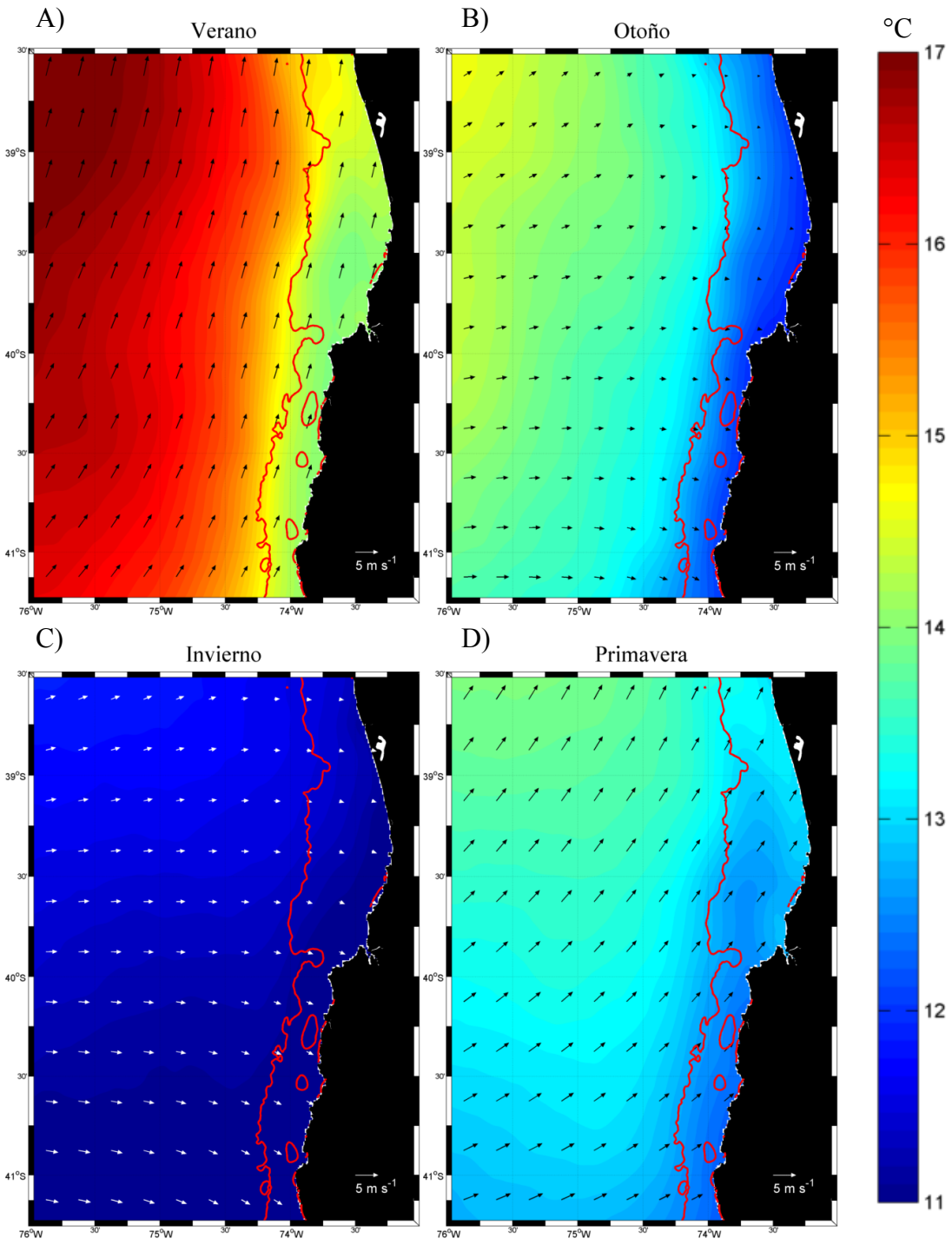


Figura 4. *Campos climatológicos de la TSM (color, °C) y el viento (vectores m* s^{-1}*). (A) verano, (B) otoño, (C) invierno y (D) primavera. En la parte inferior de cada panel se muestra una flecha que indica la escala del viento. El límite de la plataforma continental es indicado con el veril de los 200 metros (línea roja).*

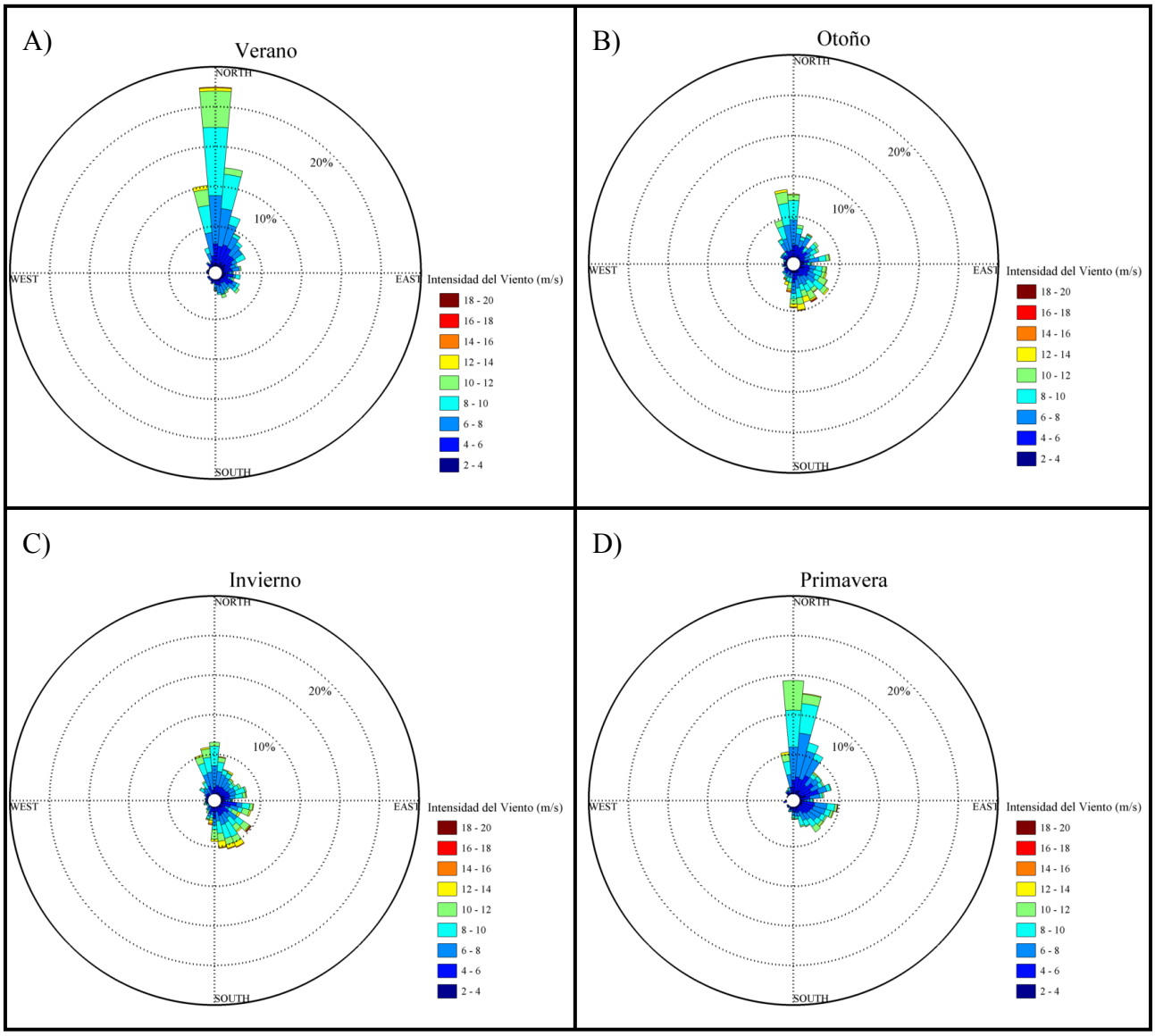


Figura 5. *Histograma de frecuencia de la magnitud y dirección de los vientos superficiales diarios para el área de estudio. (A) verano, (B) otoño, (C) invierno, (D) primavera.*

4.3 Efecto del forzamiento del viento superficial sobre la temperatura superficial del mar.

Si existe afloramiento de aguas frías producto del transporte de Ekman producido por el viento favorable a la surgencia, se espera que este efecto no sea inmediato. Así, la correlación cruzada realizada entre la anomalía diaria del viento superficial paralelo a la costa y las anomalías diarias de la TSM del área de estudio mostró la más alta correlación a 3 días de desfase aunque ésta fue baja (R= -0,19) (Fig. 6). Cuando el análisis se realizó por estaciones del año, las correlaciones mejoraron para el verano y primavera, alcanzando un R de -0,32 y -0,26 respectivamente, con dos días de desfase (Fig. 7A y 7D). Sin embargo, en otoño e invierno, las correlaciones fueron muy bajas, menores a 0,1 y con 5 días de desfase y en límite del 95% de confianza (Fig. 7B y 7C).

El análisis anterior da indicios del acoplamiento entre el viento paralelo a la costa y la TSM y se estaría dando mayormente durante las estaciones de verano y primavera, sin embargo, no indica en qué región la relación es mejor. Para explorar mejor este acoplamiento se realizó la correlación con dos días de desfase entre la anomalía diaria del viento superficial paralelo a la costa y el campo de la TSM para ambas estaciones (Fig. 8A y 8D). Las mejores correlaciones (R>0,35) se presentaron alrededor de Punta Galera en ambas estaciones, aunque en verano, un poco más alejada de la costa y con otro núcleo en torno a los 39°S.

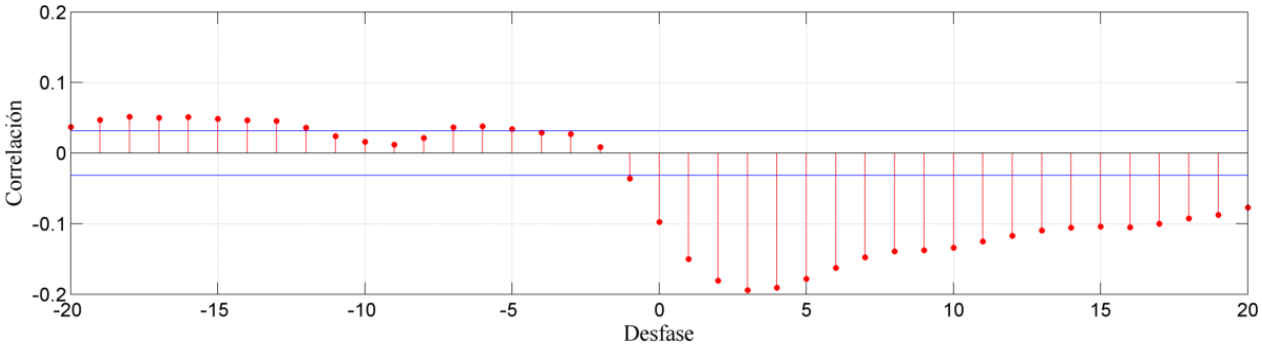


Figura 6. *Correlación cruzada entre el viento paralelo a la costa y la temperatura superficial del mar en el área de estudio. La línea azul muestra el 95% de confianza.*

Para las estaciones de otoño e invierno se realizó el mismo análisis pero con cinco días de desfase. En general existió una baja correlación entre el viento paralelo a la costa y la TSM. Las mejores correlaciones se encontraron aproximadamente dentro de la plataforma continental para ambas (R= > 0,10) (Fig. 8B y 8C). Sin embargo, en otoño se hallaron a lo largo de la costa las mayores correlaciones, mientras que en invierno sólo al norte de Punta Galera.

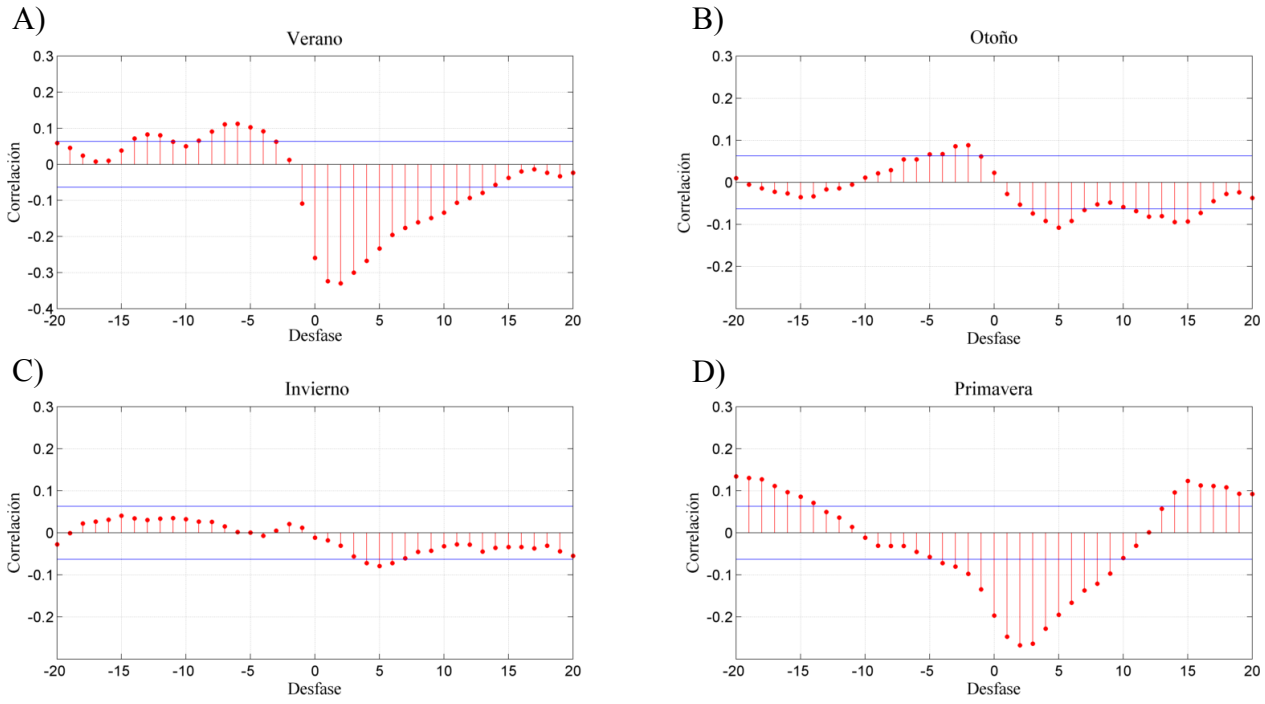
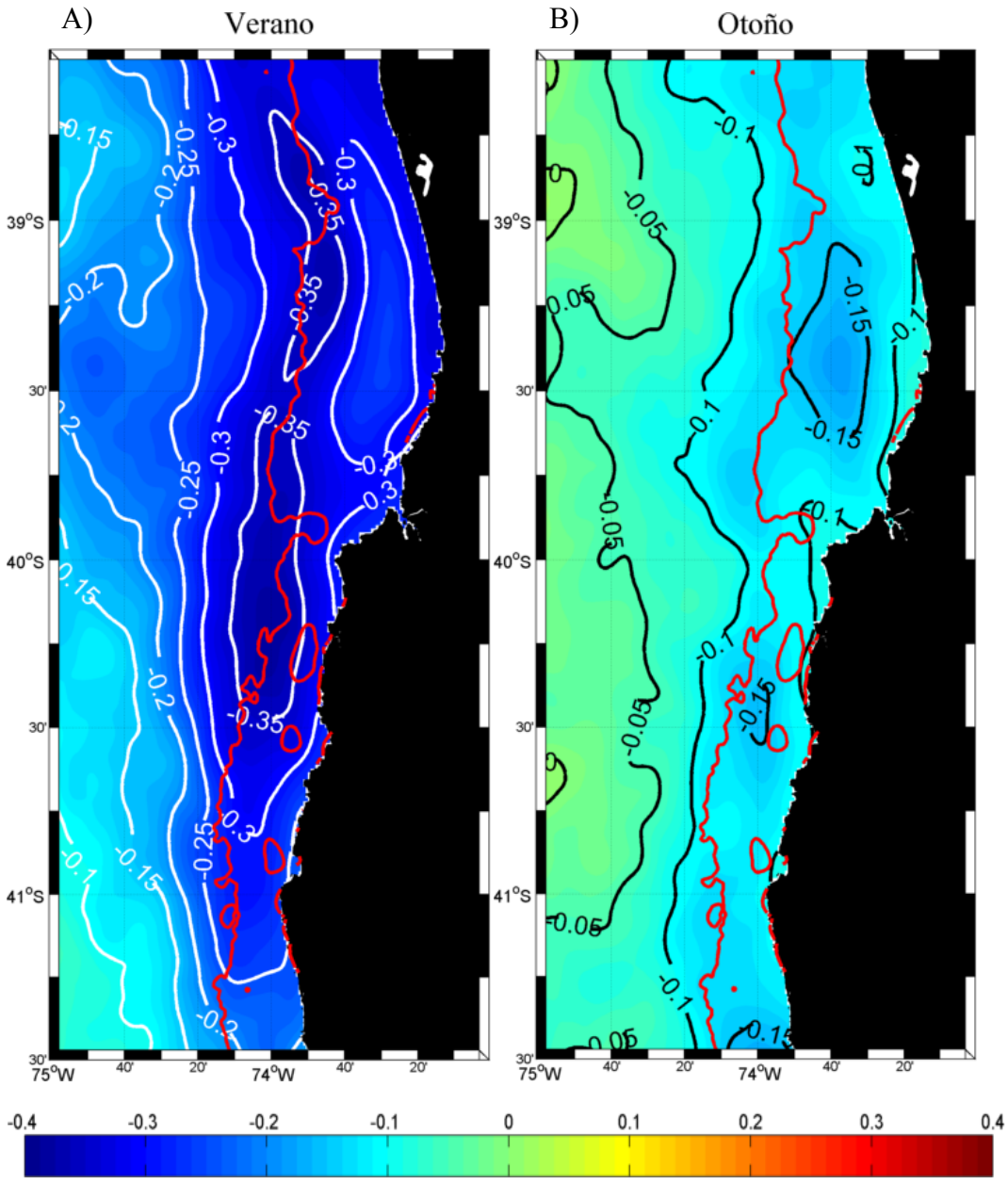


Figura 7. *Correlación cruzada entre las anomalías del viento paralelo a la costa y las anomalías de la temperatura superficial del mar en el área de estudio. (A) verano, (B) otoño, (C) invierno y (D) primavera. La línea azul muestra el 95% de confianza.*


A)
Verano
B)
Otoño
39°S
40°S
41°S
30'
75°W
74°W
40'
20'
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

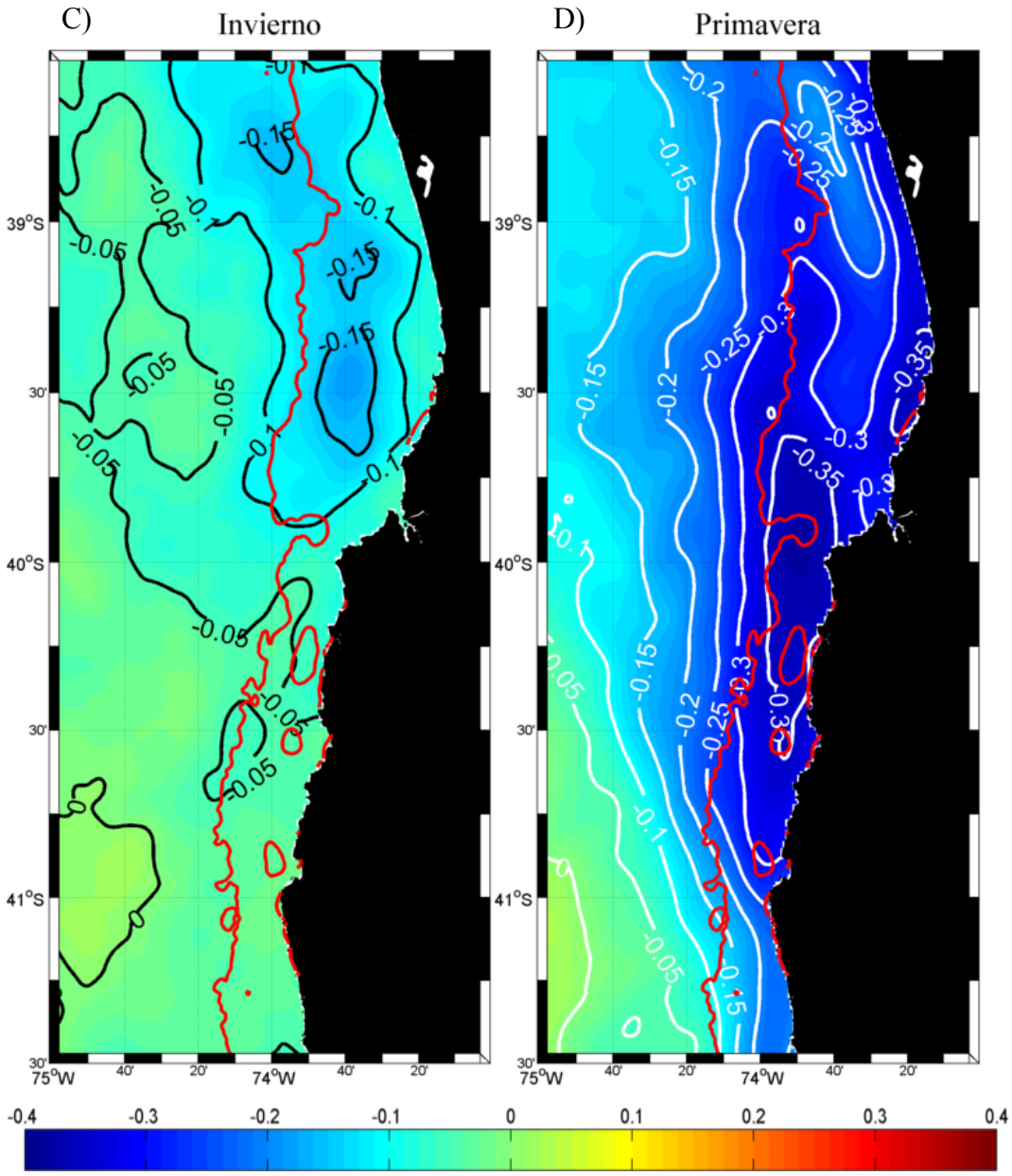


Figura 8. *Estructura espacial de la correlación entre las anomalías diarias promedio del campo del viento paralelo a la costa desfasada y las anomalías diarias del campo de TSM. (A) verano (2 días de desfase), (B) otoño (5 días de desfase), (C) invierno (5 días de desfase) y (D) primavera (2 días de desfase). La plataforma continental es indicada con el veril de los 200 metros (línea roja).*

5. DISCUSIÓN.

5.1 Índice de surgencia costero y su relación con el afloramiento.

De acuerdo al ISC_{TSM}, en la época de verano y otoño se presentarían condiciones de surgencia con los mayores gradientes costa-océano al norte de Punta Galera. Estos gradientes coinciden con los observados en los campos climatológicos de TSM (restringidos hasta sólo ~200 km. fuera de la costa, Fig. 4). La climatología de la TSM_{ocean} muestra claramente que fuera de la plataforma continental la radiación solar es el principal forzante, ya que se observó una estacionalidad muy marcada con las temperaturas mayores hacia el norte y las menores hacia el sur en concordancia con la posición latitudinal del sol. Sin embargo, la climatología de la TSM_{costa} no presentó el mismo patrón de cambio latitudinal sobre todo al finalizar la primavera y durante el verano, dando indicios que otros procesos océano-atmósfera y advectivos (e.g. la surgencia), estarían explicando sus cambios. En general, los términos turbulentos (flujo de calor latente y sensible, proporcionales a la magnitud del viento), no deberían cambiar drásticamente entre la costa y el océano ya que la magnitud del viento es similar (Fig. 4). Con respecto a los términos radiactivos, la radiación de onda corta y la radiación de onda larga tampoco deberían variar mucho debido a que el primero a una misma latitud depende de la cobertura de nubes la que es parecida en la región y la segunda es relativamente constante (Garcés-Vargas & Abarca-del-Río, 2012). Por tanto, los términos advectivos (horizontales y verticales) serían los que marcarían las diferencias entre las temperaturas dentro de la plataforma continental y más afuera. Cuando se analizó el campo de los vientos climatológicos y diarios, las condiciones más favorables a la surgencia fueron para el verano y primavera cuando el mayor porcentaje de los vientos se dirigían entre el noroeste y noreste. Por lo tanto, esta aparente discrepancia se derivaría del hecho que el ISC_{TSM} en la zona de estudio es un índice de todos los procesos advectivos entre

los que se incluye el afloramiento. Lo más probable es que durante el otoño exista una gran advección de aguas procedentes del sur dentro de la plataforma continental, lo cual explicaría los grandes gradientes costa-océano durante ésta época del año y que podrían estar relacionadas con un mayor volumen de agua subantártica presente en la zona (Nieto, 2009). Además, el estudio de Letelier *et al.* (2009) que alcanza nuestra zona de estudio mostró que las mayores concentraciones de clorofila *a* son consistentes con el ciclo estacional de los vientos favorables a la surgencia como lo encontrado en la presente investigación.

5.2 Efecto del forzamiento del viento superficial sobre la temperatura superficial del mar.

El análisis de correlación cruzada entre el viento favorable a la surgencia y la TSM también reafirma el acoplamiento entre ambas variables. Para todo el año hubo un desfase de 3 días, sin embargo, las mayores correlaciones se encontraron justamente en primavera y verano con 2 días de desfase, mientras que las menores correlaciones fueron en otoño e invierno con 5 días de desfase. En la Bahía de Antofagasta (23° 42' S) los vientos favorable a la surgencia son permanentes durante el año, existiendo en verano una mayor correlación entre el viento paralelo a la costa y la disminución de la TSM con desfase de 1 día (Piñones *et al.*, 2007). De igual forma, en el centro de Chile (32 - 36°S) en donde sobresalen Punta Curaumilla (33°S) la Punta Topocalma (34° 07' S) existe un rezago de 3 días entre ambas variables (Bello *et al.*, 2004).

El análisis de correlación espacial entre el viento promedio de la zona y la TSM, mostró que el foco de surgencia se centra alrededor de Punta Galera y además muestra la influencia del viento en clara concordancia con el movimiento del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste (ASPS). Así, durante el verano las mayores correlaciones se encontraron un poco alejadas de la costa justo donde el porcentaje de los vientos se dirige más hacia el norte, el ASPS se encuentra más hacia el sur, intenso y lejano del continente (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015). En

primavera, si bien la intensidad del ASPS es similar a la del verano, su posición es ~2° más hacia el norte y ~5° más cercano a la costa y con un menor porcentaje de vientos dirigidos hacia el norte respecto a la misma estación lo que explicaría las mayores correlaciones más cercanas a la costa. Por otro lado, durante el invierno, el mayor porcentaje de los vientos se dirigió hacia el sureste y las máximas correlaciones sólo se encontraron al norte de Punta Galera cuando el ASPS se encuentra más al norte, débil y cercano al continente. En otoño, las mayores correlaciones se dispersaron hacia el norte y sur de Punta Galera cuando los vientos aún se dirigen hacia el norte, el ASPS comienza a debilitarse, dirigirse hacia el norte y acercarse a la costa (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015).

Si bien en general el mejor acoplamiento entre el viento paralelo a la costa y la TSM se restringió a la plataforma continental la cual es más ancha hacia el norte de Punta Galera que hacia el sur, existe una lengua de agua fría que nace en este punto geográfico y que es más evidente durante primavera cuando los vientos se ajustan más paralelos a la costa en ésta posición y que en cierta medida extienden el área del afloramiento fuera de la plataforma continental. Esto es muy parecido a lo que ocurre en los principales focos de surgencia señalados en la introducción.

La lengua de agua fría nacida en Punta Galera también forma una pequeña sombra de surgencia que es muy costera y que se extiende desde aproximadamente la desembocadura del río Valdivia hasta los 39°S y que sólo se aprecia en las estaciones en que se produce afloramiento con una mejor definición durante la primavera, parecido a lo que ocurre en la Península de Mejillones (23° 42' S, Bahía de Antofagasta) (Piñones *et al.*, 2007). Sin embargo, en la Península de Mejillones esta sombra es permanente debido a que el viento es siempre favorable a la surgencia ya que forma propiamente una bahía, lo cual no ocurre en nuestra zona de estudio.

5.3 Potenciales implicancias del afloramiento en las principales pesquerías pelágicas comerciales de la Región de Los Ríos.

La distribución espacial de la Sardina común y Anchoveta desde el norte de Chile hasta Chiloé (42 °S) está asociada a la surgencia costera. Por esta razón, el límite costero de sus distribuciones no superan los 60 km desde la costa (Lamilla & Bustamante, 2010). Especialmente importante es la zona al norte de Punta Galera en donde se han encontrado las mayores abundancias de huevos de ambas especies (Cubillos *et al.*, 2008), en clara concordancia con la mayor persistencia de afloramiento. De hecho, para ambas especies, ésta zona es propuesta como un área muy importante de distribución de reclutas y adultos en diferentes estados de madurez en los diferentes meses del año (Cubillos *et al.*, 2009). Si bien las puntas menos expuestas de la Región de Los Ríos no expandirían la surgencia, podrían jugar un rol muy importante, favoreciendo la concentración y retención de los huevos de la sardina y anchoveta y lo más probable es que puedan mantenerse por un mayor tiempo dentro de la sombra de surgencia debido a que los gradientes de temperatura actuarían como barreras.

Algunos autores hacen referencia que bajo el presente escenario de cambio climático y con el sostenido incremento de las temperaturas esperado, el centro del ASPS migraría más al sur trasladándose en el verano austral de los 35°S (situación actual) a los 40°S (finales del siglo 21) (Garreaud & Falvey, 2009), provocando una mayor persistencia de los vientos favorables a la surgencia con el consecuente descenso de las TSM en la Región de Los Ríos. Esta situación se ha estado observando entre el 2000 al 2012 (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015). Si éstas proyecciones se cumplen se podría esperar que también el sur de Punta Galera sea un importante área de desove de sardina y anchoveta, transformando la punta Kopatic (41°S) como otro foco de surgencia importante.

5.4 Conclusiones.

El ISC_{TSM} aplicado en este estudio si bien mostró claramente los gradientes de temperatura entre el océano y la plataforma continental, no fue un índice adecuado para estimar los meses en que se produce mayoritariamente la surgencia costera, debido a que hay otros procesos advectivos además de la surgencia que están controlando la TSM, tales como el ingreso de aguas subantarticas.

La dirección de los vientos superficiales es controlada durante el año por el ASPS, los mismos que provocan una sombra de surgencia costera en la región durante primavera y verano.

El análisis de correlación espacial entre el viento paralelo a la costa y la TSM reafirmó que Punta Galera es un importante foco de surgencia en la Región de Los Ríos habiendo un desfase de 2 días para la máxima correlación durante la época de primavera y verano y por tanto se acepta la hipótesis planteada.

Las puntas menos expuestas podrían ser muy relevantes para la sardina y la anchoveta, principales especies pelágicas comerciales, actuando como sitios de retención de sus larvas y huevos.

6. LITERATURA CITADA.

Ancapichún, S. & Garcés-Vargas, J., (2015). Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile. *Cienc Mar*: 41(1), 339-358.

Bello, M., Barbieri, M., Salinas, S. & Soto, L. (2004) Surgencia costera en la zona central de Chile, durante el ciclo El Niño - La Niña 1997 - 1999. En: S. Avaria, J. Carrasco, J. Rutland y E. Yañez (ed.), El Niño-La Niña 1997-2000: su efecto en Chile: 77-94. Comité Oceanográfico Nacional. CONA, Valparaíso.

Benazzouz, A., Mordane, S., Orbi, A., Chagdali, M., Hilmi, K., Atillah, A., Pelegri, J.L. & Demarcq, H., (2014). An improved coastal upwelling index from sea surface temperature using satellite-based approach - The case of the Canary Current upwelling system. *Cont Shelf Res*, 81: 38-54.

Bentamy, A. & Fillon, D.C., (2012). Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements. *Int J Remote Sens*, 33(6): 1729-1754.

Correa-Ramirez, M.A., Hormazábal, S. & Yuras, G., (2007). Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29 degrees-39 degrees S). *Geophys Res Lett*, 34(12).

Croquette, M., Eldin, G. & Echevin, V., (2004). On the contributions of Ekman transport and pumping to the dynamics of coastal upwelling in the South-East Pacific. *Gayana (Concepción)*, 68: 136-141.

Cubillos, L., Pedraza, M., Gatica, C., González, C., Ruiz, P., Giacaman, J. & Arteaga, M. (2009). Identificación de indicadores de dinámica poblacional y dinámica de la flota que opera sobre sardina común y anchoveta entre la IX y X Región. Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, 155 pp.

Cubillos, L.S., Castro, L. & Claramunt, G. (2008). Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X regiones, año 2007. Departamento de Oceanografía Universidad de Concepción, 126 pp.

Chin, T.M., Vazquez, J. & Armstrong, E. (2013). Algorithm Theoretical Basis Document: A multi-scale, hight-resolution analysis of global Sea Surface Temperature. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 13 pp.

Díaz-Naveas, J. & Frutos, J. (2010). Geología Marina de Chile. Comité Oceanográfico Nacional de Chile - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, Valparaíso, 115 pp.

Farías, M. & Castro, C., (2008). Variabilidad de la temperatura superficial del mar, identificación de surgencias costeras y su relevancia en un área marina costera protegida del desierto de Atacama Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 41: 49-61.

Garcés-Vargas, J. & Abarca-del-Río, R., (2012). The surface heat fluxes along the eastern Pacific coast from 10 degrees N to 40 degrees S. *Aust Meteorol Ocean*, 62(2): 71-82.

Garreaud, R.D. & Falvey, M., (2009). The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *Int J Climatol*, 29(4): 543-554.

Hormazabal, S., Shaffer, G. & Leth, O., (2004). Coastal transition zone off Chile. *J Geophys Res-Oceans*, 109(C1): doi: 10.1029/2003jc001956.

Lamilla, J. & Bustamante, C., (2010). Innovación y sustentabilidad bioconómica en la pesquería artesanal de peces pelágicos pequeños en la Región de Los Ríos. *Gobierno Regional de Los Ríos, Valdivia*: 310 pp.

Letelier, J., Pizarro, O. & Nuñez, S., (2009). Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *J Geophys Res-Oceans*, 114: doi: 10.1029/2008jc005171.

Morales, C.E., Hormazábal, S., Andrade, I. & Correa-Ramirez, M.A., (2013). Time-Space Variability of Chlorophyll-a and Associated Physical Variables within the Region off Central-Southern Chile. *Remote Sens-Basel*, 5(11): 5550-5571.

Muñoz, P., Lange, C.B., Gutierrez, D., Hebbeln, D., Salamanca, M.A., Dezileau, L., Reyss, J.L. & Benninger, L.K., (2004). Recent sedimentation and mass accumulation rates based on Pb-210 along the Peru-Chile continental margin. *Deep-Sea Research II*, 51(20-21): 2523-2541.

Nieto, K., (2009). Variabilidad Oceánica de Mesoescala en los Ecosistemas de Afloramiento de Chile y Canarias: Una comparación a partir de datos satelitales. Tesis de Doctorado, Biología Animal. Universidad de Salamanca, 161 pp.

Patti, B., Guisande, C., Vergara, A.R., Riveiro, I., Maneiro, I., Barreiro, A., Bonanno, A., Buscaino, G., Cuttitta, A., Basilone, G. & Mazzola, S., (2008). Factors responsible for the differences in satellite-based chlorophyll a concentration between the major global upwelling areas. *Estuarine Coastal and Shelf Sci*, 76(4): 775-786.

Piñones, A., Castilla, J.C., Guinez, R. & Largier, J.L., (2007). Nearshore surface temperatures in Antofagasta Bay (Chile) and adjacent upwelling centers. *Cienc Mar*, 33(1): 37-48.

Rutllant, J. & Montecino, V., (2002). Multiscale upwelling forcing cycles and biological response off north-central Chile. *Rev Chil Hist Nat*, 75(1): 217-231.

Sernapesca, 2012. Anuario 2012 - Desembarque Total Región Servicio Nacional de Pesca. www.sernapesca.cl / Revisado en Mayo de 2014.

Smith, W.H.F. & Sandwell, D.T., (1994). Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry. *J Geophys Res-Sol Ea*, 99(B11): 21803-21824.

Vazquez-Cuervo, J., Dewitte, B., Chin, T.M., Armstrong, E.M., Purca, S. & Alburqueque, E., (2013). An analysis of SST gradients off the Peruvian Coast: The impact of going to higher resolution. *Remote Sens Environ*, 131: 76-84.