



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA
SURGENCIA COSTERA EN CHILE, MEDIANTE EL
ANÁLISIS DE TENDECIAS DE VIENTO Y TEMPERATURA
SUPERFICIAL DEL MAR**

Diego Andrés Silva Díaz

Agosto 2019

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA SURGENCIA COSTERA EN
CHILE, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE VIENTO Y
TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR

Diego Andrés Silva Díaz

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Dra. Catalina Aguirre Galaz Profesora guía	_____	_____
Claudia Pincheira Araya Meteoróloga SERVIMET	_____	_____
Mónica Bello Mejía Oceanógrafa	_____	_____

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Diego Silva Díaz

Catalina Aguirre Galaz

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ALCANCES	2
3	OBJETIVOS	2
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
4	MARCO TEÓRICO	3
4.1	DINÁMICA DE EKMAN	3
4.2	SURGENCIA COSTERA.....	4
4.3	DINÁMICA DE LA SURGENCIA	5
4.3.1	ANTICICLÓN.....	5
4.3.2	BALANCE GEOSTRÓFICO.....	6
4.3.3	OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO.....	6
5	METODOLOGÍA.....	7
5.1	DOCUMENTACIÓN DE LAS BASES DE DATOS UTILIZADAS	7
5.1.1	MODELOS GLOBALES ATMOSFÉRICOS Y ACOPLADOS.....	7
5.1.2	REANÁLISIS.....	8
5.1.3	OBSERVACIONES	8
5.2	ÁREA DE ESTUDIO	10
5.3	VIENTO A LO LARGO DE LA COSTA	10
5.4	ANÁLISIS DE TENDENCIA.....	12
5.4.1	PRUEBA DE MANN-KENDALL	13
5.5	ATRIBUCIÓN A LA OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO.....	14
6	RESULTADOS.....	16
6.1	COMPARATIVA ENTRE BASES DE DATOS	16
6.2	TENDENCIAS EN PUNTOS DE INTERÉS	21
6.3	ATRIBUCIÓN A LA PDO.....	23
6.3.1	ATRIBUCIÓN DE LA PDO AL VIENTO DE ERA-INTERIM.....	24
6.3.2	ATRIBUCIÓN DE LA PDO A LA TSM DEL SHOA.....	25
6.3.3	ATRIBUCIÓN DE LA PDO A LA TSM DE ERA-INTERIM	26
7	DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
8	CONCLUSIONES.....	28
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
10	ANEXOS.....	31

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1: Bases de datos.....	9
Tabla 8.1: Resumen	29
Tabla 10.1: AMIP	31
Tabla 10.2: CMIP5 – Diario	32
Tabla 10.3: CMIP5 - Mensual.....	33
Tabla 10.4: SHOA	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Transporte de masa.....	4
Figura 2: Surgencia costera.	5
Figura 3:Estaciones de monitoreo SHOA.....	9
Figura 4: Grados de corrección para viento.	11
Figura 5: Tendencia del viento solo con viento meridional	12
Figura 6: Tendencia del viento aplicando la corrección	12
Figura 7: Área de estudio y puntos de interés.....	10
Figura 8: Puntos de comparación para ERA y la PDO.....	15
Figura 9: Mapas de Magnitud Anual [m/s].....	17
Figura 10: Mapas de Pendiente Anual [m/s/década].....	18
Figura 11: Mapas de Pendiente invierno [m/s/década].	19
Figura 12: Mapas de Pendiente verano [m/s/década].....	20
Figura 13: Tendencia anual en puntos de interés [m/s/década].	21
Figura 14: Tendencia de invierno en puntos de interés [m/s/década].	22
Figura 15: Tendencia de verano en puntos de interés [m/s/década].	22
Figura 16: PDO vs ERA (viento). Pendiente del viento [m/s/década].....	24
Figura 17: PDO vs SHOA (TSM). Pendiente de la temperatura [°C/década].....	25
Figura 18: PDO vs ERA (TSM). Pendiente de la temperatura [°C/década].....	26
Figura 19: Mapas de Pendiente otoño [m/s/década].....	35
Figura 20: Mapas de Pendiente primavera [m/s/década].....	36
Figura 21: Mapas de Pendiente Comparación CMIP5 [m/s/década],	37
Figura 22: Mapas de Pendiente Anual [m/s/década].....	38
Figura 23: Mapas de Pendiente Invierno [m/s/década].	39
Figura 24: Mapas de Pendiente verano [m/s/década].....	40
Figura 25: PDO vs SHOA (TSM). Pendiente del viento [m/s/década].	41
Figura 26: Serie de tiempo de datos SHOA (promedios anuales), estaciones de Arica e Iquique.....	41
Figura 27: Serie de tiempo de datos SHOA (promedios anuales), estaciones de Antofagasta, Caldera, Coquimbo y Valparaíso.....	42
Figura 28: Serie de tiempo de datos SHOA (promedios anuales), estaciones de Talcahuano, Corral, Isla de Pascua y Punta Arenas.....	43

RESUMEN

En este trabajo se busca caracterizar la evolución de la surgencia costera en Chile a través de la comparación entre distintas bases de datos de viento y temperatura superficial del mar. La surgencia costera es un fenómeno producido por el viento paralelo a la costa, viento el cual se ve influenciado por la existencia del anticiclón del pacífico sur. Para el desarrollo de este estudio se utilizaron bases de datos con distintos orígenes, resoluciones y periodos de datos disponibles; los distintos tipos utilizados se dividen en observación satelital, reanálisis, conjuntos de modelos y mediciones in situ.

La razón de utilizar distintas bases de datos viene dada porque se busca caracterizar la evolución de la surgencia costera y Chile carece de un modelo propio con la cantidad espacial y temporal de datos de viento necesaria para realizar un estudio como este. Esto induce a que se comparen los resultados de distintas bases de datos, utilizando la misma metodología estadística para todas. Todas las bases de datos se analizaron en base a tendencias, las cuales fueron respaldadas mediante el método de Mann-Kendall el cual se asegura que los resultados sean estadísticamente significativos.

Los resultados de los análisis estadísticos se presentan en mapas generales y en gráficas comparativas. Estas demuestran que existe el viento favorable a la surgencia en verano y primavera principalmente, dependiendo de la base de datos se pueden observar que el viento presenta concentraciones de altas velocidades en algunas zonas costeras. Muchas de estas concentraciones de vientos favorables a la surgencia son además significativas estadísticamente, es decir, el viento favorable se mantiene constante por largos periodos de tiempo.

La distribución espacial de las tendencias positivas se concentra en el norte de Chile y en su mayoría son significativas, durante el verano se concentran en el sur y durante el invierno en el norte. Mientras que las tendencias de la temperatura superficial del mar describen a lo largo del país que toda la temperatura tiende a disminuir, en su mayoría, homogéneamente con algunas atenuaciones en sectores al sur de Chile.

1 INTRODUCCIÓN

La surgencia es un proceso que involucra un movimiento vertical ascendente de una masa de agua que se relaciona, entre otras cosas, con el aporte de agua fría y rica en nutrientes a las aguas superficiales. La evolución de largo plazo de la surgencia costera durante las últimas décadas en Chile ha sido escasamente estudiada debido a la falta de estaciones meteorológicas con un periodo de registro suficiente en el país.

La importancia de estudiar la evolución de largo plazo de la surgencia tiene relación con los impactos que puede producir a nivel biogeoquímico, ecológico y pesquero, así como también en otras ramas de la ciencia. Por ejemplo, la surgencia libera CO₂ a la atmósfera, lo que podría contribuir al calentamiento global, a la vez, también produce una disminución de la temperatura en las aguas superficiales, lo que puede significar intensificaciones en la brisa marina de un sector costero (Sydeman, y otros, 2014).

La comprensión de la variabilidad de este fenómeno es también clave para la evaluación de la salud del ecosistema marino, en factores como la acidificación del océano y la desoxigenación. El estudio de todo el fenómeno de la surgencia costera es esencial para comprender la biodiversidad de los sectores donde esta ocurre (Sydeman, y otros, 2014).

En el caso de Chile la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste (ASPS) provoca un reforzamiento constante de los vientos provenientes del sur, los cuales son favorables a la surgencia, aunque el viento se mantiene todo el año, el ASPS tiene un patrón estacional, y durante el verano es más intenso en la zona centro-sur de Chile (aproximadamente 35°S), lo que incrementa la magnitud de los vientos provenientes del sur. Por otro lado, en invierno el anticiclón se desplaza hacia el norte (aproximadamente 25°S), lo que provoca una disminución en la magnitud de los vientos provenientes del sur y, por tanto, los vientos favorables a la surgencia se ven disminuidos. (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015).

Esta tesis pretende aportar en el estudio a largo plazo de la surgencia costera en Chile, evaluando las tendencias de distintas bases de datos globales, tanto de viento como de temperatura superficial del mar. Para esto se utilizarán datos con distintos orígenes (conjunto de modelos, observaciones satelitales, por mencionar algunas), por lo que se podrá tener una primera impresión de cuáles son las bases de datos que mejor se acoplan a las características de Chile.

2 ALCANCES

Desde el ámbito académico el presente estudio permitirá llenar, en alguna medida, el vacío actual que existe sobre el conocimiento de la evolución a largo plazo de la surgencia costera en las costas de Chile.

Dentro del estudio de la surgencia costera se realizará un análisis de la evolución de esta en el tiempo. Se intentará explicar el fenómeno en función de los campos de presión y la temperatura superficial del mar, pero no se llegará a estudiar temas como su influencia en el ecosistema. Además, solo se abordará la zona costera de Chile acotado entre la ciudad de Mejillones y la isla grande de Chiloé.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la evolución de la surgencia costera en Chile, mediante el análisis de distintas bases de datos de viento y de temperatura superficial del mar.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un análisis de tendencias a distintas bases de datos de viento.
2. Efectuar un análisis de tendencias a distintas bases de datos de temperatura superficial del mar.
3. Comparar las tendencias de viento de forma general a lo largo de Chile y en puntos específicos a lo largo del mapa.
4. Comparar mediciones in situ de temperatura superficial del mar con las bases de datos utilizadas.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 DINÁMICA DE EKMAN

A continuación, se presenta un extracto del capítulo sobre la dinámica de Ekman expuesta en el libro "Introduction to physical Oceanography" (Stewart, 2008).

La capa de Ekman, que debe su nombre al Profesor Walfrid Ekman quien desarrolló su teoría, consiste en una capa superficial del océano donde actúa el viento. El viento al soplar sobre la superficie del océano mueve el agua por fricción, pero debido al efecto Coriolis, el transporte neto del agua es perpendicular a la dirección del viento, a la izquierda en el hemisferio sur (Stewart, 2008).

Para llegar a estas conclusiones, Ekman comenzó por considerar un flujo permanente y constante en la horizontal (dirección x e y) por lo que las propiedades varían solo en la vertical (dirección z), por lo tanto, las derivadas horizontales y temporales se hacen cero:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Como la tierra rota, se produce un equilibrio entre la fuerza de fricción y la fuerza de Coriolis.

$$\rho f U - \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} = 0, \quad f = 2\omega \sin \varphi \quad (2)$$

Donde U es la velocidad del fluido. Para f (parámetro de Coriolis), ω es la rotación de la tierra en coordenadas fijas y φ es latitud.

Además, Ekman asume como constante el coeficiente de viscosidad turbulenta vertical (A_z), quedando de la forma:

$$T_{xz} = \rho A_z \frac{\partial u}{\partial z}, \quad T_{yz} = \rho A_z \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3)$$

Donde T_{xz} y T_{yz} son las componentes del esfuerzo del viento en las direcciones X (este-oeste) e Y (norte-sur) y ρ corresponde a la densidad del agua de mar.

Gracias a la dinámica de Ekman en la superficie del océano ocurre un transporte de masa (M_E), el cual es determinado como la integral de las velocidades de Ekman U_E (velocidad zonal), V_E (velocidad meridional) desde la superficie hasta la profundidad (d) de la capa de Ekman. Los dos componentes del transporte son M_{EX} , M_{EY} :

$$M_{EX} = \int_{-d}^0 \rho U_E dz, \quad M_{EY} = \int_{-d}^0 \rho V_E dz \quad (4)$$

Este transporte de masa tiene unidades de $kg/m * s$, que corresponde a la masa de agua que pasa a través de un plano vertical de un metro de ancho que es perpendicular a la de transporte y que se extiende desde la superficie hasta la profundidad d.

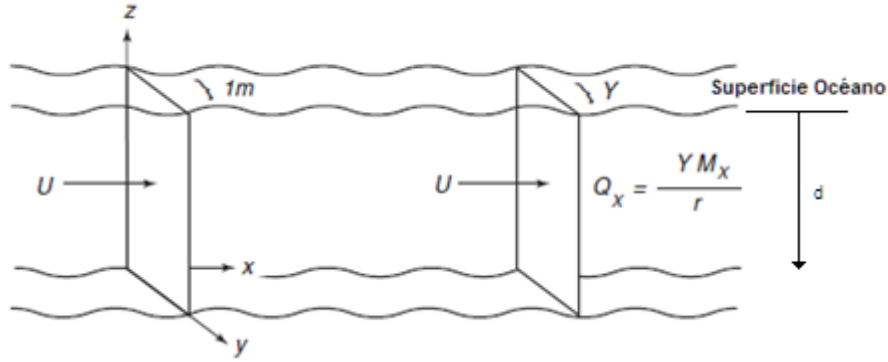


Figura 1: Transporte de masa. Fuente: (Stewart, 2008).

Se puede obtener el transporte de masa mediante la integración de la ecuación 2 en la ecuación 4:

$$f \int_{-d}^0 \rho V_E dz = f M_{Ey} = - \int_{-d}^0 dT_{xz} \quad (5)$$

$$f M_{Ey} = -T_{xz}|_{z=0} + T_{xz}|_{z=-d}$$

A medida que la profundidad (d) se hace más grande, las velocidades se aproximan a cero, y el último término de la ecuación 5 es cero. De esta manera, el transporte de masa se debe solamente al esfuerzo del viento en la superficie del mar (z=0). De manera similar se puede calcular el transporte en la dirección x, para obtener los dos componentes del transporte de Ekman:

$$f M_{Ey} = -T_{xz}(0) \quad (6)$$

$$f M_{Ex} = T_{yz}(0) \quad (7)$$

4.2 SURGENCIA COSTERA

En la sección anterior se demostró que bajo la acción del viento existe un transporte de masa de Ekman. Si a las ecuaciones de Ekman, agregamos la ecuación de continuidad para flujo incompresible (ecuación 8) y se estudia un caso en alguna costa (Figura 2) que reúna condiciones específicas, se producirá la surgencia costera.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

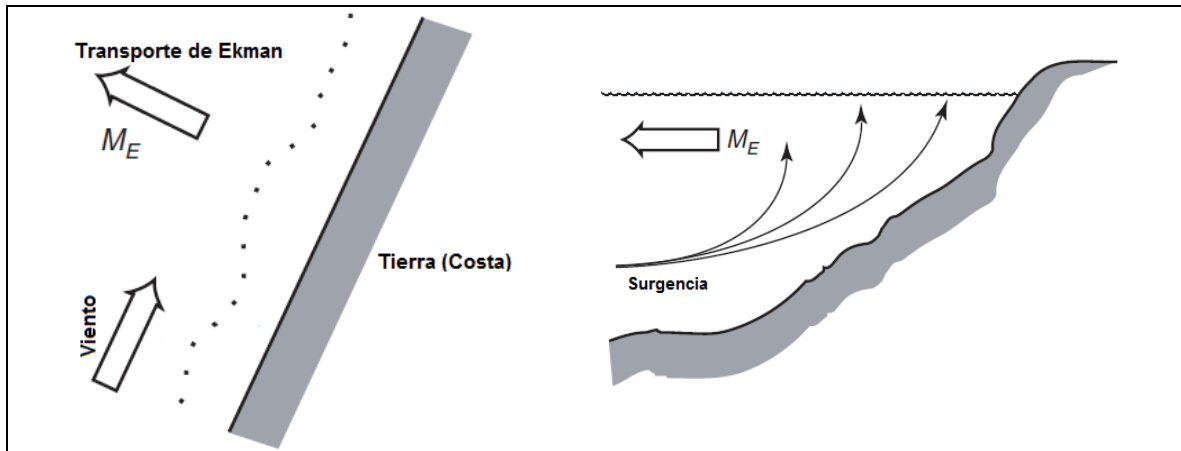


Figura 2: Surgencia costera. Fuente: (Stewart, 2008)

En la parte derecha de la figura 1 se puede apreciar que al considerar un volumen de control de dos dimensiones (x,z) el transporte de masa ocurre en dirección perpendicular a la costa, por lo que la componente $\partial u / \partial x$ es distinta de cero. Pero al estar imposibilitado físicamente por el límite que impone la costa (no puede aportar masa), se produce un cambio en la componente $\partial w / \partial z$ produciendo así un ascenso de agua fría desde zonas profundas y dando así cumplimiento a la ecuación 8. A este fenómeno se le denomina surgencia costera.

Para que ocurra la surgencia costera, los vientos deben soplar paralelos a la costa y tener un sentido específico, para el caso de Chile, el viento debe soplar desde dirección sur hacia el norte.

4.3 DINÁMICA DE LA SURGENCIA

4.3.1 ANTICICLÓN

Un anticiclón es un centro de alta presión en él, el viento que se genera gira en sentido antihorario en el hemisferio sur y horario en el hemisferio norte. Una de sus características distintivas es que en su centro se forma convergencia lo que produce subsidencia, esto debido al transporte de Ekman que dirige las aguas hacia el centro incrementando el nivel del mar.

El anticiclón del pacífico sur es un sistema atmosférico, el cual se extiende sobre toda la cuenca oceánica y es el forzante dominante de las corrientes que aquí se encuentran (corriente de Humboldt, corriente del pacífico sur, corriente ecuatorial sur), también se caracteriza por originar presiones atmosféricas relativamente altas (mayores a 1020 milibares en promedio) (Otkin, 2004).

El anticiclón mantiene una posición semi permanente, es decir, varía su posición en función de la estación. En verano el anticiclón se encuentra aproximadamente en los 35° S y es intenso en las costas del centro-sur de Chile, mientras que en invierno se desplaza hasta

aproximadamente los 25° S y es más intenso frente a la costa de la Serena aproximadamente (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015).

4.3.2 BALANCE GEOSTRÓFICO

En el interior del océano, lejos de las capas superiores e inferiores de Ekman, para distancias horizontales superiores a unas pocas decenas de kilómetros y para tiempos superiores a unos pocos días, los gradientes horizontales de presión en el océano equilibran casi exactamente la fuerza de Coriolis resultante de las corrientes horizontales. Este equilibrio se conoce como el equilibrio geostrófico. (Stewart 2008, cap10).

El equilibrio geostrófico requiere que la fuerza de Coriolis equilibre el gradiente de presión horizontal. Las ecuaciones para el equilibrio geostrófico se derivan de las ecuaciones de movimiento suponiendo que el flujo no tiene aceleración, $du/dt = dv/dt = dw/dt = 0$; Que las velocidades horizontales son mucho más grandes que verticales, $w \ll u, v$; Que la única fuerza externa es la gravedad; Y que la fricción es pequeña. Con estos supuestos se obtiene. (Stewart 2008, capítulo 10.2)

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho f v; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = -\rho f u; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (9)$$

Como resultado del balance geostrófico surge el viento geostrófico, el cual se caracteriza porque su intensidad depende de la distancia entre las isobaras, entre más cerca estén, más viento. Además, su dirección debiera ser recta entre las líneas isobáricas, pero el efecto Coriolis implica que esta corriente se incline hacia la izquierda (en el hemisferio sur), lo que produce que el viento tenga una trayectoria helicoidal y sea ideal para la surgencia costera (EcuRed, 2018).

4.3.3 OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO

La oscilación decadal del pacífico o PDO¹ es un patrón de temperatura en el océano pacífico que alterna fases de calentamiento y de enfriamiento cada 20 o 30 años. Estas oscilaciones se detectan midiendo la temperatura de las aguas del pacífico Norte, en la fase fría se encuentra una masa de agua más caliente de lo normal en el pacífico oeste y una franja de agua más fría de lo normal en la parte este del pacífico. Mientras que, en la fase caliente de la PDO, el pacífico oeste se vuelve más frío y la franja del pacífico este se calienta (Northwest Fisheries Science Center, 2018).

Estas fases en el hemisferio norte son el resultado de la dirección de los vientos, cuando soplan principalmente desde el suroeste dan como resultado condiciones cálidas en el norte (ya que trae aire más cálido desde el ecuador). Por el contrario, cuando los vientos soplan principalmente desde el norte produce condiciones más frías.

¹ Pacific Decadal Oscillation

5 METODOLOGÍA

5.1 DOCUMENTACIÓN DE LAS BASES DE DATOS UTILIZADAS

Se han utilizado ocho bases de datos, cada una con distinta resolución espacial y temporal, además de distintos reanálisis, modelos globales, mediciones remotas e in situ. En esta sección se documentan brevemente cada una de las bases de datos utilizadas, indicando el tipo de variable, el periodo disponible de datos y su resolución temporal y espacial.

5.1.1 MODELOS GLOBALES ATMOSFÉRICOS Y ACOPLADOS

AMIP

El proyecto de inter-comparación de modelos atmosféricos, AMIP por sus siglas en inglés, es un protocolo experimental estándar para modelos globales de circulación general de la atmósfera creado en 1990. Una comunidad de científicos e instituciones internacionales de manera sistemática apoyan el diagnóstico, validación, inter-comparación y documentación de los modelos, lo que facilita la mejora de los modelos y la comprensión de procesos climáticos.

Las simulaciones de AMIP tienen como condición de borde inferior la temperatura superficial del mar y el hielo marino desde 1979 hasta casi el presente, esta configuración permite a los científicos centrarse en el modelo atmosférico sin la complejidad añadida de la retroalimentación océano-atmósfera en el sistema climático.

CMIP5

Por otra parte, los modelos climáticos globales acoplados, CMIP5 por sus siglas en inglés, es un proyecto similar a AMIP. Sin embargo, las simulaciones de CMIP5 incluyen la interacción océano-atmósfera, ya que ambos sistemas se encuentran acoplados.

Dentro de los objetivos de CMIP5 está evaluar qué tan realistas son los modelos en la simulación del pasado reciente; proporcionar proyecciones del cambio climático futuro en dos escalas de tiempo, a corto plazo (30 años aprox.) y a largo plazo (más de 100 años); además de comprender algunos factores responsables de las diferencias en las proyecciones de los modelos, incluida la cuantificación de algunas retroalimentaciones clave, como las que implican las nubes y el ciclo del carbono.

La diferencia clave entre AMIP y CMIP5 en este estudio, es que el primero contiene la variabilidad natural de la atmósfera, ya que contiene la variabilidad observada de la temperatura superficial del mar, en cambio cada simulación de CMIP5 contiene una variabilidad diferente, así al utilizar el promedio de una gran cantidad de simulaciones, la variabilidad natural es suprimida, obteniéndose en el promedio solo la señal del cambio climático antropogénico.

5.1.2 REANÁLISIS

CFSR

Se utilizó el Reanálisis del Sistema de Pronósticos Climáticos, CFSR² por sus siglas en inglés (Climate Forecast System Reanalysis) del Centro Nacional para la Predicción del Medio Ambiente (NCEP). Este reanálisis fue diseñado y ejecutado como un sistema global acoplado de alta resolución. El CFSR incluye el acoplamiento de la atmósfera y el océano, un modelo interactivo de hielo marino y la asimilación de datos de las radiaciones observadas por satélites.

La resolución espacial para esa base de datos es de 0.25 grados, mientras que su periodo es entre los años 1979 y 2010.

ERA-interim

Otra base de datos utilizada es ERA-Interim³ desarrollado en ECMWF⁴ es un reanálisis atmosférico global desde 1979 al presente, continuamente actualizado en tiempo real. El sistema de asimilación de datos utilizado para producir ERA se basa en un modelo lanzado en 2006 llamado IFS (Integrated Forecasting System).

Desde esta base de datos se extrajeron dos variables, el viento y temperatura superficial del mar, ambas con una resolución espacial de 0.75 grados. El periodo disponible para los datos de viento fue desde 1979 al 2016, mientras que para la temperatura superficial del mar se dispuso de un periodo entre 1980 y el 2005.

5.1.3 OBSERVACIONES

CCMP

Observaciones remotas del viento superficial y registros de datos de boyas meteorológicas son combinadas en un producto grillado denominado CCMP por sus siglas en inglés (Cross-Calibrated Multi-Platform). Los vientos superficiales satelitales que incorpora este producto provienen de los scaterómetros QuikSCAT y ASCAT, los cuales son calibrados con las observaciones de instrumentos utilizando un Método de Análisis Variacional (VAM) para producir cuatro mapas diarios con una resolución espacial de 0.25 grados. El periodo disponible de esta base de datos es desde 1988 hasta 2005.

² Mayor información y la descarga de los datos están disponible en línea en <https://rda.ucar.edu/#!/pub/cfsr.html>

³ Los datos pueden ser descargados en <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>

⁴ European Center for Medium-Range Weather Forecasts

TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR

Registros in situ de temperatura superficial del mar (TSM) a lo largo de la costa fueron facilitados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), quienes mantienen una red de estaciones para monitorear variables ambientales oceánicas y atmosféricas (Figura 3). La TSM fue registrada desde los años 1950, en un principio de forma manual y en la actualidad se adquieren de forma automática con la plataforma Handar. En la tabla 9 se detallan los puntos de observación y los periodos de medición.

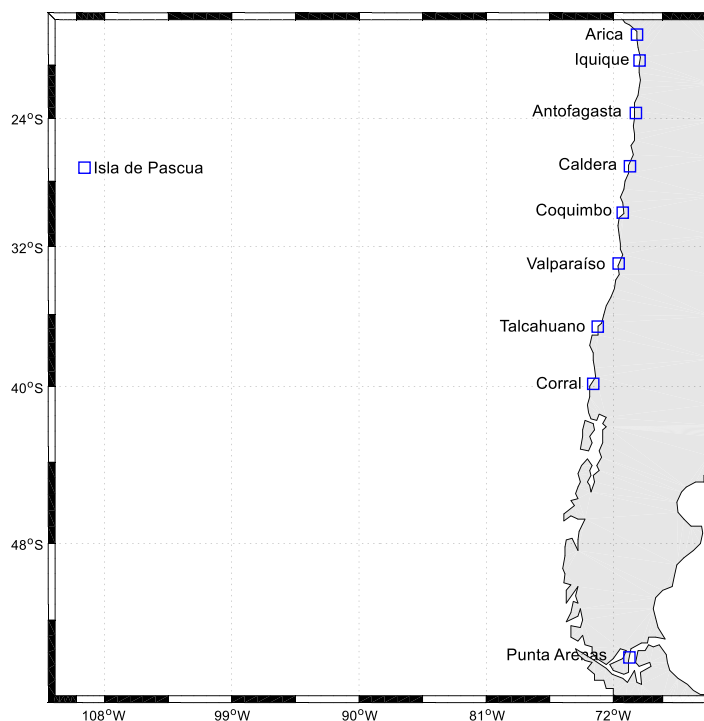


Figura 3: Estaciones de monitoreo SHOA. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se muestra una tabla resumen de las bases de datos y variables utilizadas, en este estudio.

Tabla 5.1: Bases de datos

Base de datos	Datos disponibles	Tipo de datos
AMIP	Promedios diarios	Conjunto de modelos
CMIP5 – Diario	Promedios diarios	Conjunto de modelos
CMIP5 – Mensual	Promedios mensuales	Conjunto de modelos
CFSR	Promedios diarios	Reanálisis
ERA-Interim (viento)	Promedios mensuales	Reanálisis
ERA-Interim (tsm)	Promedios mensuales	Reanálisis
CCMP	Datos cada 6 horas	Observación satelital
SHOA	Medición diaria	Medición in situ

Fuente: Elaboración propia.

5.2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se delimita entre las latitudes -18° a -45° S y las longitudes 275° (85° W) a 290° E (70° W) aproximadamente y corresponde a la zona de surgencia costera de Chile. Además, se definieron puntos de interés frente a las ciudades más representativas a lo largo de Chile para comparaciones puntuales (Figura 4) y tienen las siguientes coordenadas: frente a Iquique 20° S y 72° W; frente a Copiapó (Caldera) 27° S y 72° W; frente a Valparaíso 33° S y 73° W; frente a Concepción 37° S y 75° W; frente a Puerto Montt 41° S y 75° W.

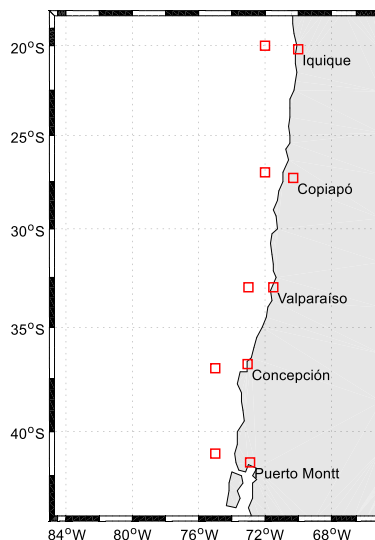


Figura 4: Área de estudio y puntos de interés. Fuente: Elaboración propia.

5.3 VIENTO A LO LARGO DE LA COSTA

Las bases de datos de viento superficial utilizadas contienen las variables viento zonal U (dirección este-oeste) y viento meridional V (dirección norte-sur). Chile cuenta con una costa orientada de forma norte-sur casi en su totalidad, Por lo tanto, aunque es una buena aproximación trabajar solo con la componente V del viento para estimar el viento favorable a la surgencia, de todas formas, utilizando la orientación de la costa se obtuvo la componente del viento paralelo a la costa. (Figura 5).

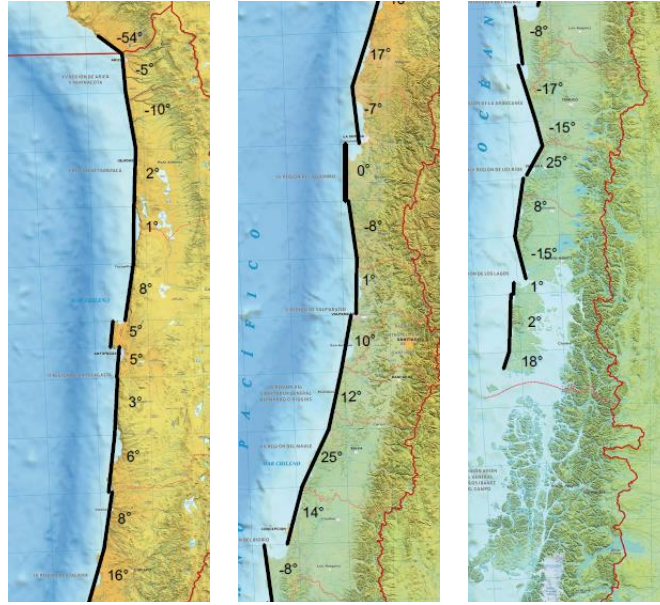


Figura 5: Grados de corrección para viento. Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM), <https://www.igm.cl>

Para obtener la orientación de la línea de costa se utilizó el software Matlab. Se ajustó una línea recta en la costa cada un grado de latitud. Para calcular los grados de inclinación aproximados de la costa, se consideró la dirección norte como cero, como positivas las inclinaciones hacia el este y negativas las inclinaciones hacia el oeste.

Luego el procedimiento es meramente trigonométrico y consiste en encontrar la dirección real del viento calculado con sus dos componentes:

$$\text{Dirección del viento } (\phi) = \tan^{-1} \left(\frac{U}{V} \right) \quad (10)$$

Una vez se tiene la dirección del viento (ϕ) se agrega el valor de la inclinación de la costa (β) que corresponda respecto de su latitud.

$$\alpha = \beta + \phi \quad (11)$$

Por último, a la magnitud del viento se le multiplica el coseno de α para obtener un valor mucho más cercano del viento paralelo a la costa según la geografía a lo largo de Chile.

$$\text{Magnitud del viento} = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (12)$$

$$\text{Alongshore} = \text{Magnitud del viento} * \cos \alpha \quad (13)$$

A continuación, a modo de ejemplo, se presentan las tendencias del viento para el reanálisis CFSR, para el viento meridional y el resultado después de aplicar la corrección anteriormente descrita.

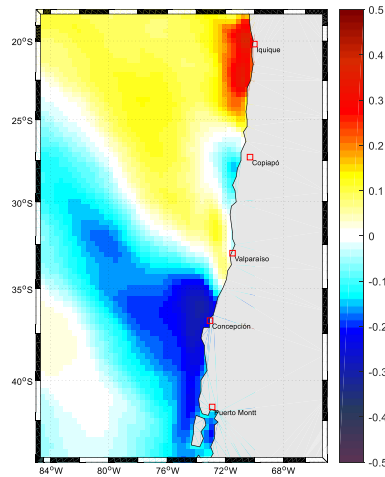


Figura 6: Tendencia del viento solo con viento meridional, CFSR [m/s/década]. Periodo 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

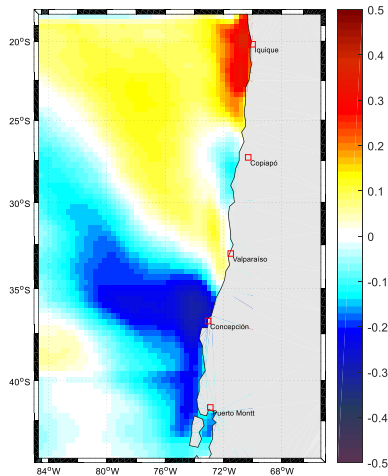


Figura 7: Tendencia del viento aplicando la corrección CFSR [m/s/década]. Periodo 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar al comparar las Figura 6 y Figura 7, las diferencias observadas son muy pequeñas, la escala de valores se mantiene igual y el cambio más relevante corresponde a las pequeñas diferencias espaciales luego de la modificación del viento.

5.4 ANÁLISIS DE TENDENCIA

Para obtener la tendencia del viento favorable a la surgencia y la TSM se utilizó una regresión lineal. El objetivo de la regresión lineal es encontrar la recta que mejor se ajusta a los valores de la serie de tiempo y para ello se emplea una técnica matemática llamada mínimos cuadrados, en la cual la recta que se ajusta siempre tiene la siguiente forma:

$$y = mx + b$$

5.1

Donde m es la pendiente y b el intercepto con el eje y . Para obtener estos dos datos se utilizó la siguiente formulación.

$$m = \frac{\sum xy - \frac{\sum x * \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad 5.2$$

$$b = \frac{\sum y}{n} - m \frac{\sum x}{n} \quad 5.3$$

Una vez obtenidos los resultados de las ecuaciones 5.2 y 5.3, solo queda reemplazar en la ecuación 5.1 para obtener la ecuación de la recta (Milton, 2016).

Este modelo teórico es utilizado para obtener el valor de la pendiente de la recta ajustada a los datos de viento paralelo a la costa y la temperatura superficial del mar la cual corresponde a la tendencia lineal de los datos en el tiempo.

Debido a los diferentes periodos de tiempo disponibles en las bases de datos, se consideró una ventana de tiempo común entre los años 1980 y 2005 para obtener resultados comparables entre cada una de ellas. El análisis de tendencia se realizó para cada uno de los puntos de grilla en el área de estudio, por lo que se pueden aislar y comparar ciertos puntos específicos de interés (Figura 4) o generar un mapa general.

5.4.1 PRUEBA DE MANN-KENDALL

La prueba estadística de Mann-Kendall (Gilbert, 1987) es utilizada para determinar si la tendencia obtenida es estadísticamente significativa, se basa en la hipótesis que la ausencia de tendencia corresponde a una serie de tiempo fluctuando en torno a un promedio constante, sin un patrón aparente. La forma en que esta prueba se calcula es formando relaciones entre pares de datos, cuando la medición anterior es de menor magnitud que el dato siguiente se le asigna un valor de 1. Si el valor anterior es de mayor magnitud que el siguiente, se le asigna un valor de -1; cuando el par de datos son idénticos se le asigna un 0.

Después de asignarles un valor a cada par de datos y sumando el total, se obtiene el estadístico de Mann-Kendall (S), cuando el valor de S es positivo, implica que la mayoría de las diferencias entre las mediciones anteriores y posteriores son positivas, lo que sugiere una tendencia al alza. De la misma forma, si se obtiene un valor de S negativo implica que la mayoría de las diferencias entre pares de datos son negativas, lo que sugiere una tendencia decreciente. Un valor cercano a cero indica que existe un número similar de diferencias positivas y negativas.

$$S(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad 5.4$$

Para incluir en el análisis el azar y la variabilidad inherente de la muestra, la prueba de Mann-Kendall se basa en los rangos críticos del estadístico S. Cuanto mayor es el valor absoluto de S, más fuerte es la evidencia de una verdadera tendencia creciente o decreciente. Los puntos críticos para la identificación de una tendencia se hacen más grandes a medida que el nivel de significancia cae. Sólo si el valor absoluto de la prueba estadística (S) es mayor que el punto crítico es estadísticamente significativo.

La prueba de Mann-Kendall es bastante utilizada dentro de los análisis de tendencia de variables ambientales, por lo que se utilizará un código ya establecido el cual se modificará mediante Matlab, para automatizar el proceso de aplicar la prueba a cada una de las bases de datos.

5.5 ATRIBUCIÓN A LA OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO

Para determinar la influencia de la PDO sobre las tendencias obtenidas con las bases de datos de ERA (viento y TSM) y el SHOA (TSM) se realizó un análisis de atribución. Para el procedimiento se utilizaron promedios anuales entre los años 1980 y 2005. Para estimar la atribución de las tendencias a la PDO se calcula el coeficiente de correlación entre la serie de tiempo de una variable y el índice de la PDO, luego este coeficiente es multiplicado por la tendencia del índice de la PDO, lo que resulta en una tendencia que sería atribuible a esta oscilación natural. Este método ha sido utilizado previamente para estimar la contribución de la PDO a las tendencias observadas en precipitación (Boisier et al.,2016) y temperatura del aire.

Para la atribución de la PDO con ERA-Interim se utilizaron 26 puntos a lo largo de la costa Chilena con una separación de 0.5° de latitud (Figura 8), esta resolución fue conseguida por medio de una interpolación lineal.

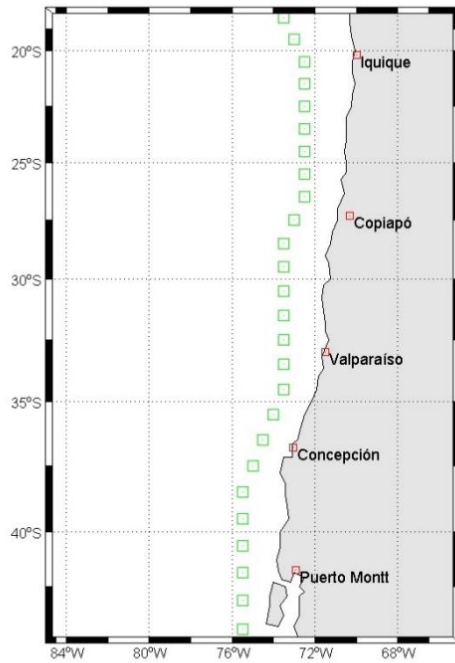


Figura 8: Puntos de comparación para ERA y la PDO. 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

La regresión lineal y la interpolación se calcularon por medio del software Matlab. Para el caso de la comparación entre la PDO y los datos de TSM del SHOA, se realizó el mismo procedimiento, pero se utilizaron como puntos a evaluar las coordenadas de las estaciones donde los datos fueron registrados (Figura 3, Tabla 10.4).

6 RESULTADOS

6.1 COMPARATIVA ENTRE BASES DE DATOS

Los resultados que se presentan a continuación se enmarcan en un periodo de tiempo entre el año 1980 y 2005. Se anexan los resultados de algunas estaciones, además de los resultados utilizando todo el periodo de tiempo disponible de cada base de datos (sección 10).

De las 8 bases de datos utilizadas se presentan 7, esto debido que al comparar las bases de datos de CMIP5 y CMIP5-Mensual en la ventana de tiempo mencionada, ambas presentaban una distribución espacial y escalar muy similar, por lo que se hace innecesario presentar ambas, de todas formas, se puede apreciar en el anexo las gráficas de ambas bases para todos los datos disponibles (Figura 22, Figura 23, Figura 24).

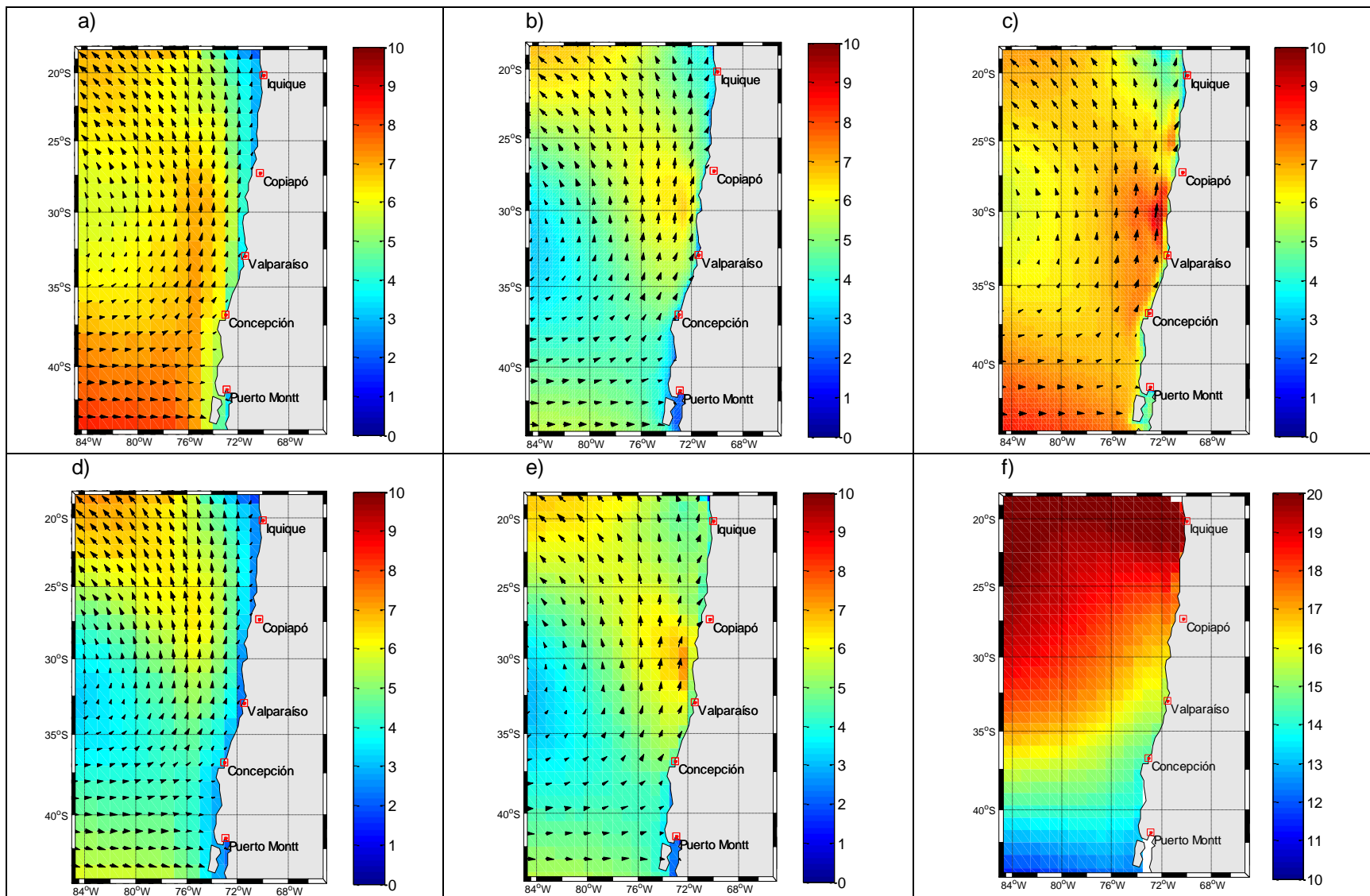


Figura 9: Mapas de Magnitud Anual. a) AMIP (viento [m/s/década]), b) CCMP (viento [m/s/década]), c) CFSR (viento [m/s/década]), d) CMIP5 (viento [m/s/década]), e) ERA (viento [m/s/década]) y f) ERA (tsm [°C/década]). Periodo 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

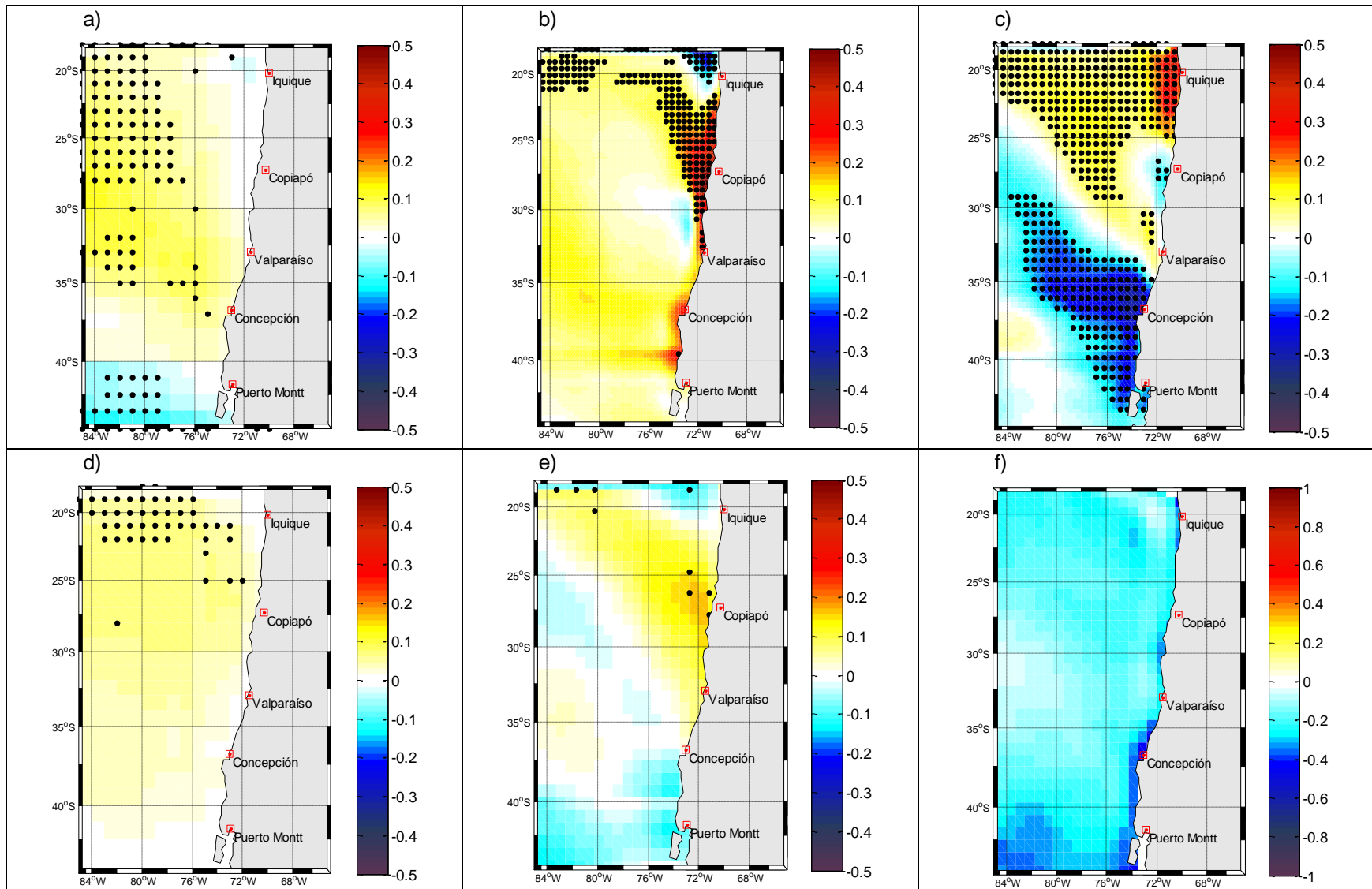


Figura 10: Mapas de Pendiente Anual. a) AMIP (viento [m/s/década]), b) CCMP (viento [m/s/década]), c) CFSR (viento [m/s/década]), d) CMIP5 (viento [m/s/década]), e) ERA (viento [m/s/década]) y f) ERA (tsm [°C/década]). Periodo 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

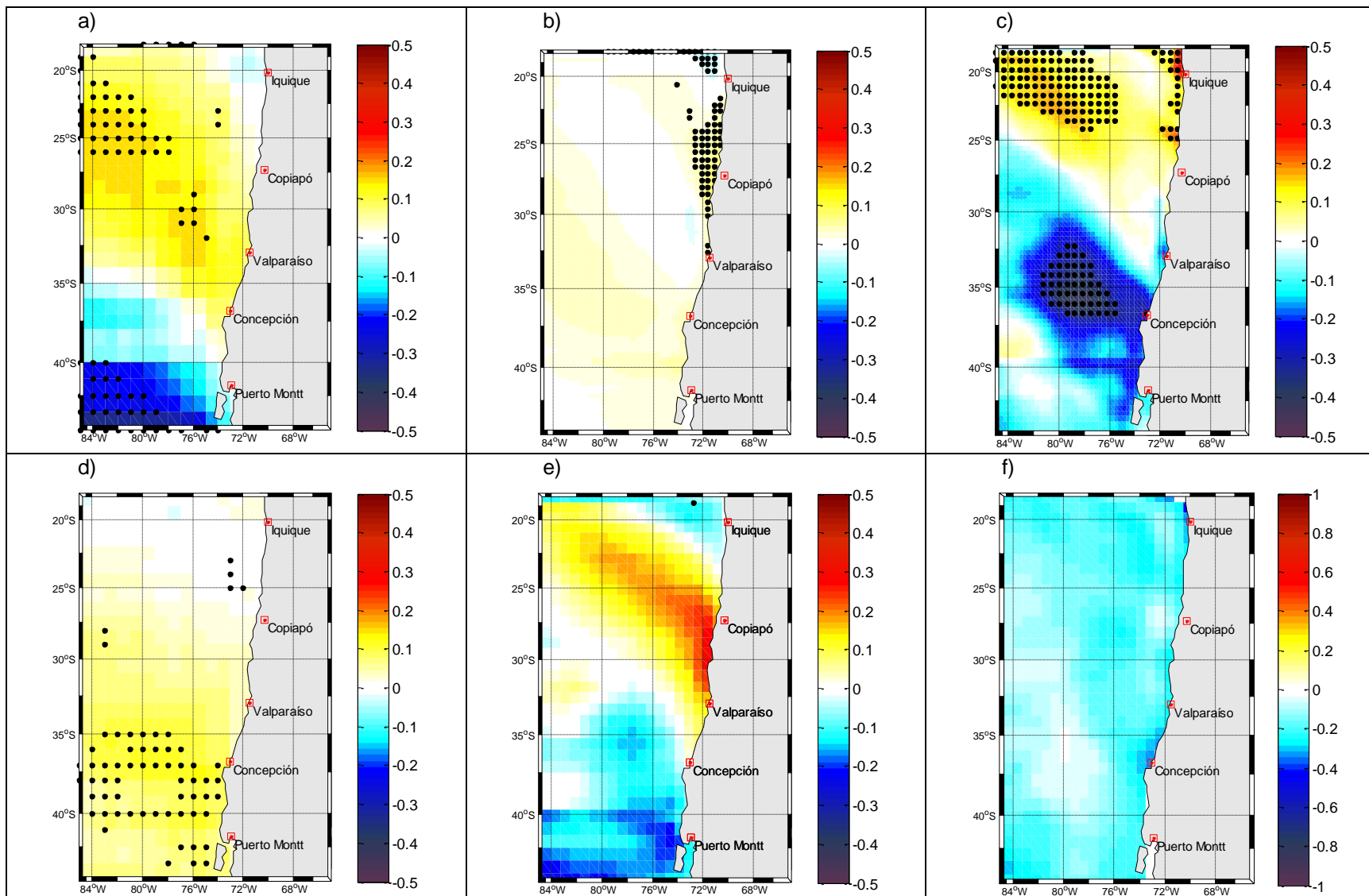


Figura 11: Mapas de Pendiente invierno. a) AMIP (viento [m/s/década]), b) CCMP (viento [m/s/década]), c) CFSR (viento [m/s/década]), d) CMIP5 (viento [m/s/década]), e) ERA (viento [m/s/década]) y f) ERA (tsm [°C/década]). Periodo 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

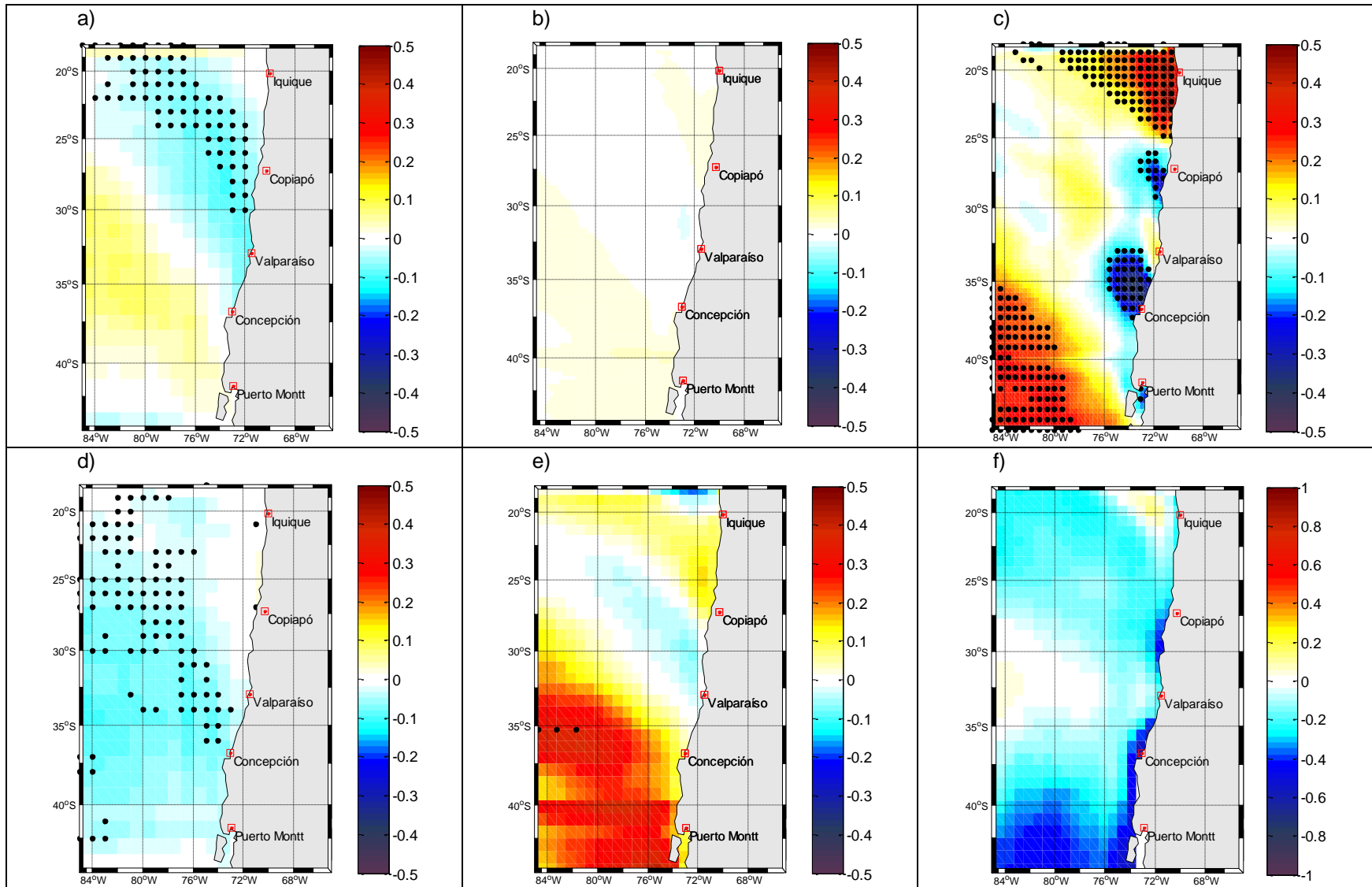


Figura 12: Mapas de Pendiente verano. a) AMIP (viento [m/s/década]), b) CCMP (viento [m/s/década]), c) CFSR (viento [m/s/década]), d) CMIP5 (viento [m/s/década]), e) ERA (viento [m/s/década]) y f) ERA (tsm [°C/década]). Periodo 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

En todas las bases de datos se puede apreciar parte del patrón del anticiclón que provoca viento de dirección sur a lo largo de la costa Chilena, además de una concentración de altas velocidades entre la región de Coquimbo y Biobío. También se puede apreciar cómo se distribuye la temperatura superficial del mar (TSM) a lo largo del país (Figura 9).

La mayor cantidad de tendencias positivas se concentra en el norte y en la mayoría de los modelos estas tendencias son significativas. Las tendencias de la TSM anual muestran que a lo largo del país toda la temperatura tiende a disminuir y en mayor medida en el sur de Chile (Figura 10).

La distribución espacial en invierno muestra tendencias positivas en el norte y tendencias negativas al sur. La TSM se observa con una tendencia negativa homogénea a lo largo del área de estudio (Figura 11).

En verano las tendencias positivas se concentran al norte y al sur, mientras que en la zona de Valparaíso predominan las tendencias negativas. A diferencia de invierno la TSM en verano es mucho menos homogénea, se observan tendencias más negativas en el sur y en la zona costera alrededor de Concepción (Figura 12).

6.2 TENDENCIAS EN PUNTOS DE INTERÉS

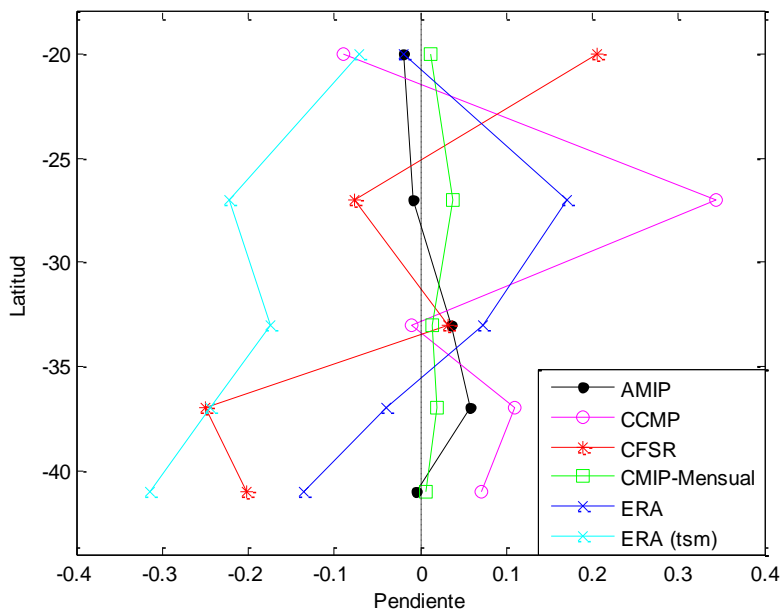


Figura 13: Tendencia anual en puntos de interés [m/s/década] [°C/década]. 1980-2005. Fuente: Elaboración propia

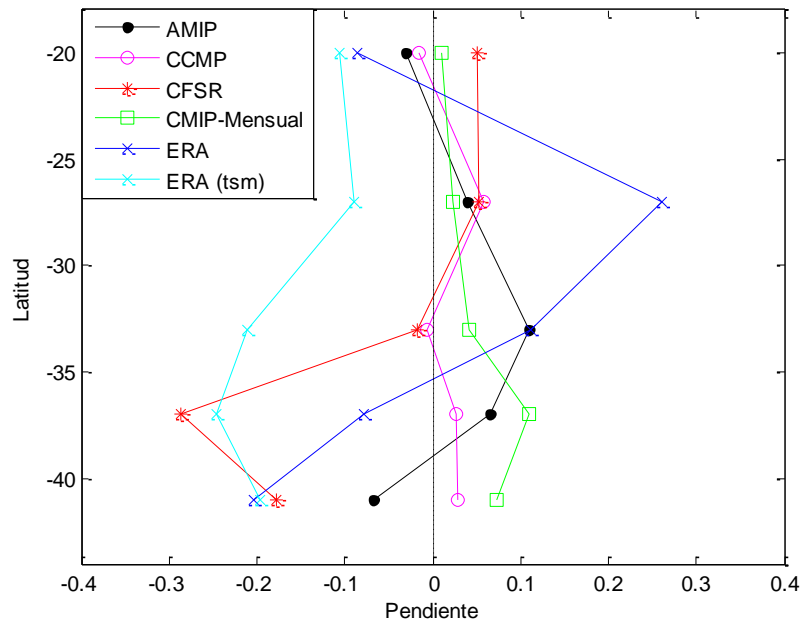


Figura 14: Tendencia de invierno en puntos de interés [m/s/década] [°C/década]. 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

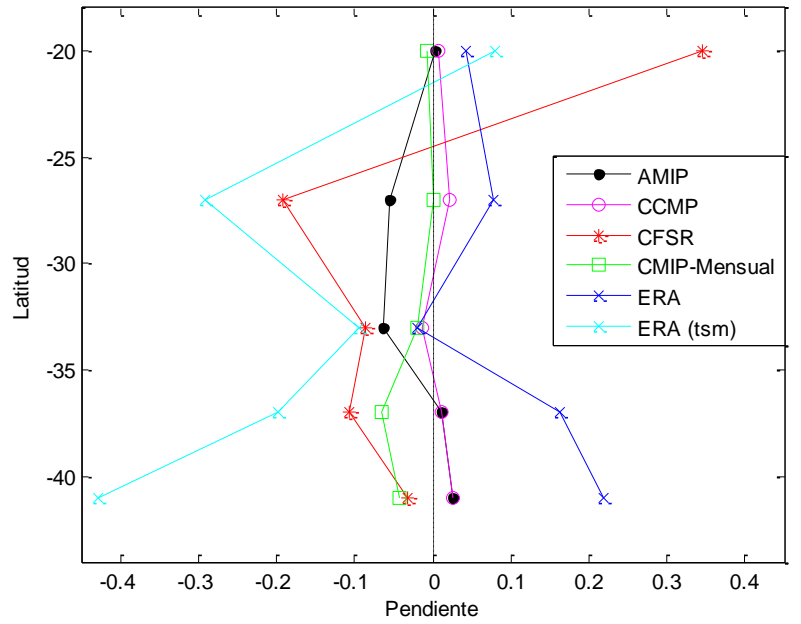


Figura 15: Tendencia de verano en puntos de interés [m/s/década] [°C/década]. 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

Previamente se definieron puntos de interés en la costa frente a distintas ciudades (Figura 4). Este tipo de gráficas se realizó con el fin de comparar de manera más precisa los valores que entregó cada base de datos.

En todos los puntos de control las bases de datos muestran que al menos dos de los modelos siempre entregan valores de signo opuesto, a excepción de Valparaíso donde los valores son bastante similares (entre 0 y 0.1 [m/s/década]). CMIP5 y AMIP se mantienen con valores en torno al cero que no superan los 0.05 [m/s/década] (Figura 13).

CCMP tiende a hacerse positivo a medida que se va hacia el sur, lo contrario sucede con CFSR que tiende a hacerse negativo, ambas bases de datos con una recaída de Valparaíso donde se mantiene el signo con el que comenzaron en el norte (Figura 13).

En invierno las bases de datos tienden a converger a valores entre los 0 y 0.1 [m/s/década] en la costa de la región de Atacama, a excepción de ERA la cual tiene un pico de aproximadamente 0.25 [m/s/década]. CCMP y CMIP5 tienen un comportamiento muy ajustado a lo que muestra la TSM (Figura 14). En general las bases de datos tienen un pico de valor positivo entre Valparaíso y Puerto Montt, aunque CFSR muestra un peak negativo en Concepción (Figura 14).

Los valores de las bases de datos convergen en los primeros tres puntos de control con valores bastante cercanos, CFSR se dispara en Iquique (0.35 [m/s/década]) y en Caldera (0.2 [m/s/década]). En esta estación los valores de la TSM son mucho más negativos (Figura 15).

6.3 ATRIBUCIÓN A LA PDO

Para cada una de las comparaciones que se muestran en esta sección se presentan cuatro gráficas en las cuales se muestran: la pendiente de la recta ajustada a los datos de viento (o TSM) en cada punto, la pendiente resultante al hacer una regresión entre las variables, la multiplicación de la pendiente de la PDO y la pendiente de regresión (alfaxm) y la finalmente la correlación entre variables

6.3.1 ATRIBUCIÓN DE LA PDO AL VIENTO DE ERA-INTERIM

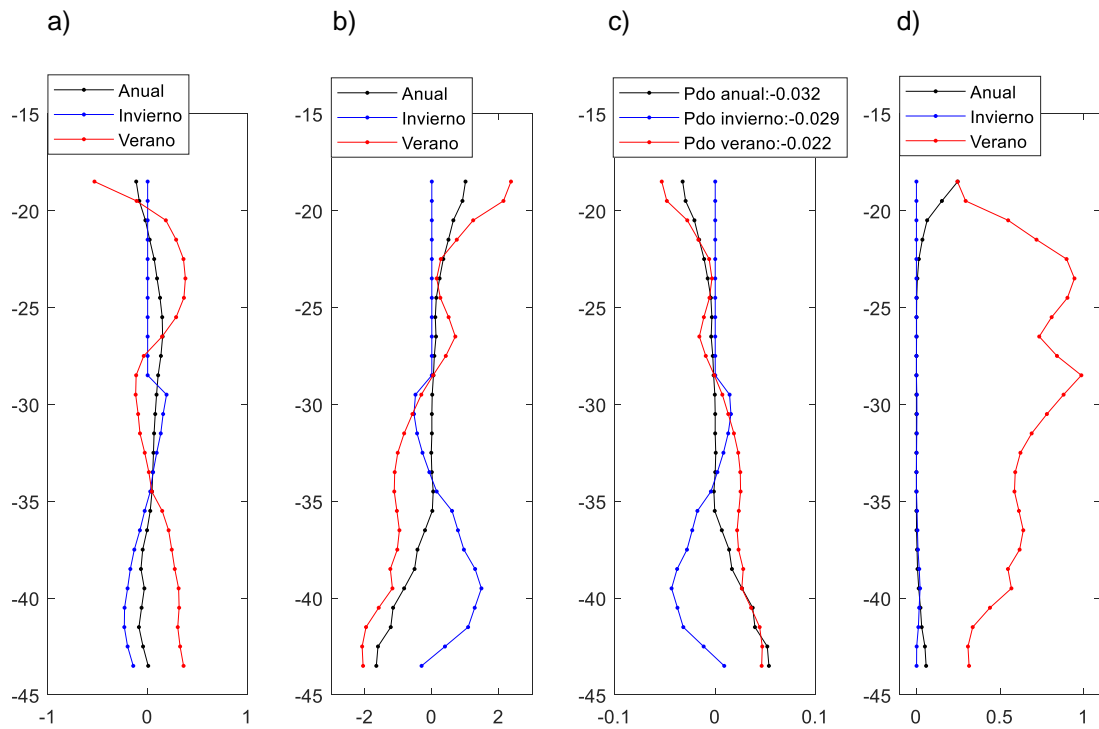


Figura 16: PDO vs ERA (viento). Pendiente del viento [m/s/década] (a), pendiente de regresión entre variables [m/s/década] (b), alfaxm [m/s/década] (c), correlación (d). 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

Las pendientes en verano son mucho más intensas que las de invierno, sobre todo en la zona norte donde las tendencias de invierno son prácticamente cero. En la zona sur en ambas estaciones se observa un aumento en las tendencias (verano positivas e invierno negativas). Las correlaciones entre la PDO y la base de datos de viento ERA son bastante bajas en invierno, prácticamente cero, lo que provoca la baja de los valores para la correlación anual, aunque en verano existe una estrecha relación entre la PDO y el comportamiento del viento, en la mayor parte de Chile se excede el 50% de correlación (Figura 16).

6.3.2 ATRIBUCIÓN DE LA PDO A LA TSM DEL SHOA

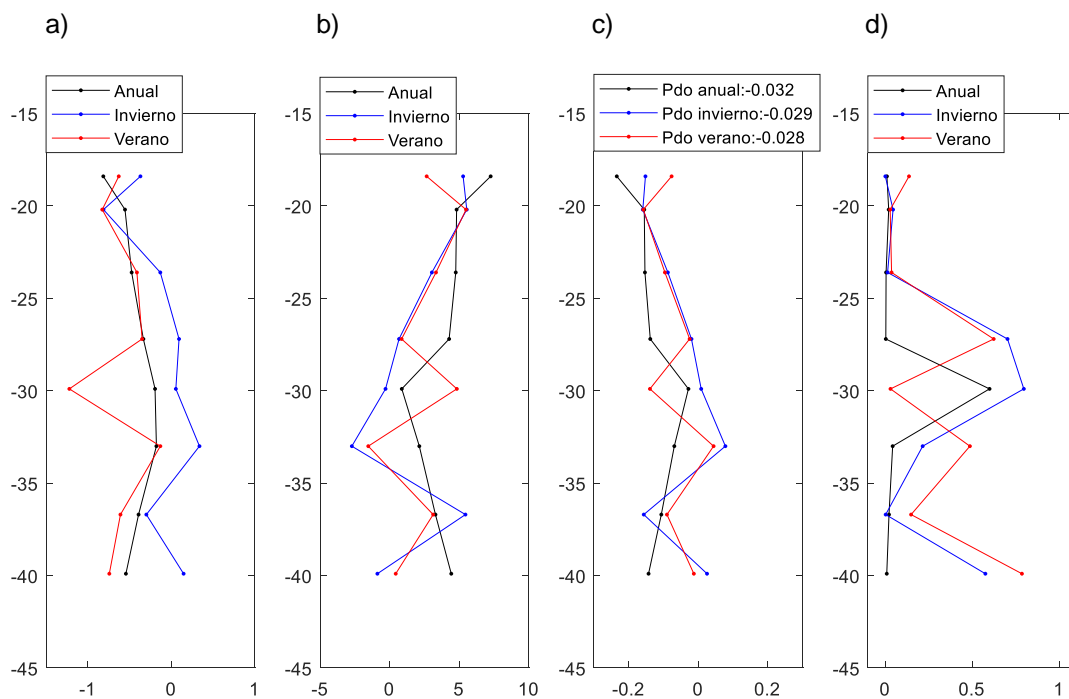


Figura 17: PDO vs SHOA (TSM). Pendiente de la temperatura [°C/década] (a), pendiente de regresión entre variables [°C/década] (b), alfaxm [°C/década] (c), correlación (d). 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

Para la Figura 17 no se consideraron las estaciones de Punta Arenas e Isla de Pascua, porque para los efectos de esta tesis se encontraban fuera del rango de estudio, pero en la sección 10 (Figura 25) se puede encontrar esta gráfica con todas las estaciones disponibles.

Las tendencias de las TSM en verano en las estaciones tienden a ser negativa, aunque la correlación supera el 50% en solo dos lugares (Corral y Caldera). En el caso de invierno las tendencias tienden a quedarse en torno a cero (son muy pequeñas) y similar al caso de verano, las correlaciones superan el 50% en dos lugares de la zona central (Coquimbo y Caldera) (Figura 17).

Es importante tener en cuenta que para la ventana de tiempo utilizada a la mayor parte de las estaciones les falta entre 1 y 5 años de datos aproximadamente, solo las estaciones de Arica y Antofagasta están completas (Figura 26, Figura 27, Figura 28).

6.3.3 ATRIBUCIÓN DE LA PDO A LA TSM DE ERA-INTERIM

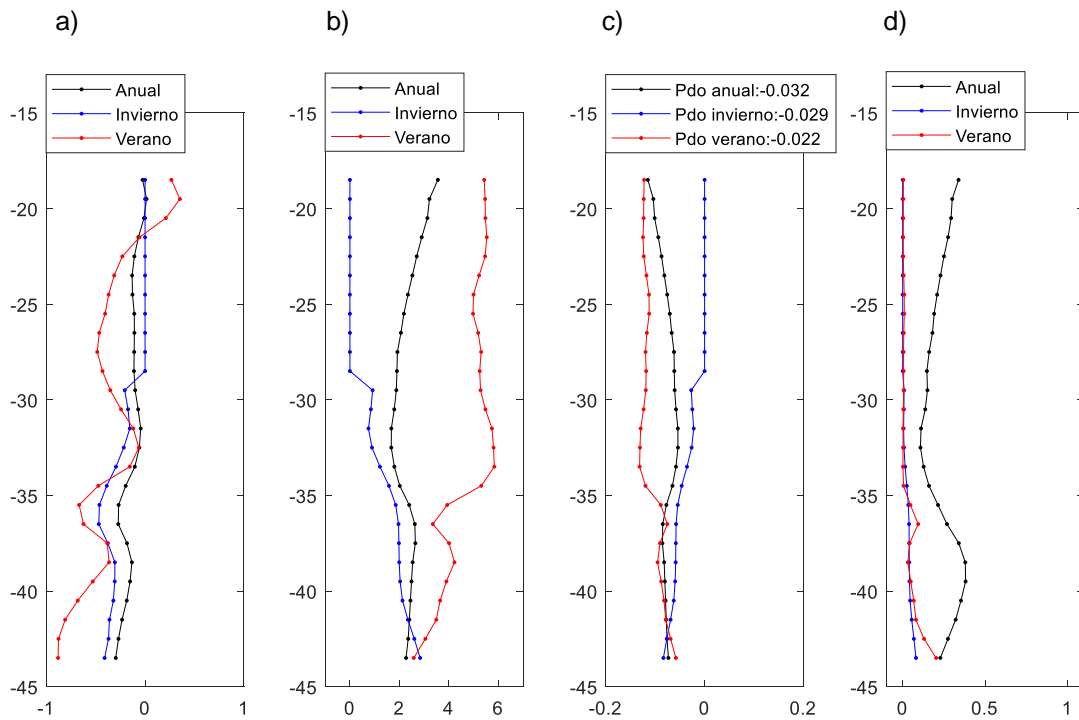


Figura 18: PDO vs ERA (TSM). Pendiente de la temperatura [$^{\circ}\text{C}/\text{década}$] (a), pendiente de regresión entre variables [$^{\circ}\text{C}/\text{década}$] (b), alfaxm [$^{\circ}\text{C}/\text{década}$] (c), correlación (d). 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

Las correlaciones entre la PDO y ERA (TSM) se mantienen cercanas a cero en verano e invierno en casi toda la costa, con excepción de la zona sur donde en verano la correlación alcanza el 20%. Aunque al comparar datos de todo el año la correlación crece, esta no alcanza el 40% en el peak de la zona sur. Es importante destacar que en invierno la correlación es prácticamente cero a lo largo de todo Chile.

7 DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES

Uno de los objetivos de esta investigación era comparar distintas bases de datos, por lo tanto, fue necesario acotar la cantidad de datos disponibles en algunas bases para obtener un periodo de tiempo común entre ellas. Un ejemplo de esto es la base de datos de CMIP5-Mensual, donde se disponían de datos entre 1950 y 2005, pero solo se utilizaron desde 1980 al 2005 para comparar con datos de reanálisis y datos satelitales. Esta diferencia de 30 años de datos tiene como consecuencia cambios en los patrones espaciales de las tendencias que son significativas (Figura 21).

Es por esto que la metodología usada para obtener las pendientes favorables a la surgencia, utilizada en varios estudios oceanográficos que tratan temas similares, no son lo bastante tajante a la hora de asegurar una conclusión que sirva para comparar con esta tesis, ya que los resultados de esta investigación muestran que la tendencia del viento depende fuertemente del periodo de tiempo considerado.

La TSM mantiene una tendencia hacia el enfriamiento de -0.2 [°C/década], según Ancapichún y Garcés-Vargas (2015). Esta disminución de la temperatura se explicaría por cambios en el Anticiclón del Pacífico Sur, el cual se ha intensificado y desplazado hacia el suroeste lo que ha producido un aumento de los vientos favorables a la surgencia, los cuales dejan su huella en la TSM costera.

Una recomendación para futuras investigaciones de este tipo es filtrar las bases de datos que se utilizarán según su cantidad de datos, ya que como quedó demostrado en los resultados de esta tesis, si bien algunas bases de datos entregan valores similares, se puede dar el caso en que los resultados sean distintos (Figura 12, CMIP5 y ERA viento). Para evitar esto es que a la hora de trabajar con bases de datos se deben priorizar aquellas con la mayor cantidad de datos en el tiempo, para que la brecha comparativa no sea una limitante.

Está claro que existe una tendencia al aumento en el viento favorable a la surgencia y no solo se limita a la ventana de tiempo estudiada en este trabajo, ya que en otro estudio con una ventana de tiempo similar (1980 - 2015) se encontraron que las tendencias favorables a la surgencia en Chile son positivas principalmente en los meses de abril, mayo y noviembre. A esto se suma que la temperatura presenta una tendencia negativa en toda la columna de agua, particularmente en aguas superficiales (Aguirre et al., 2018).

Además, entre los años 2003 y 2016 se estudiaron las tendencias de otras variables en la columna de agua, que estarían asociadas al aumento de la surgencia. Por ejemplo, los flujos de nitrato y fosfato hacia la superficie muestran tendencias positivas, lo que demuestra el aumento del transporte de Ekman durante del periodo del estudio. Este mayor flujo de nutrientes hacia la capa fótica tendría impactos sobre la productividad primaria. De hecho, se han localizado dos sectores costeros donde la concentración de clorofila (como medida de producción primaria) tiene una tendencia positiva, desde 25°S a 31°S y desde 36°S a 40°S . Estos sectores son consistentes con los resultados obtenidos en algunas de las bases de datos Tabla 8.1.

8 CONCLUSIONES

En la sección 6.1 donde se encuentran los resultados presentados en mapas, las estaciones de invierno y verano no muestran casi tendencias significativas positivas cerca de la costa, en cambio, para las estaciones de otoño y primavera se presentan en gran medida (sobre todo en ésta última, Figura 20). Esta presencia de tendencias favorables a la surgencia estacionales se mantiene presente aun cuando se realiza el procedimiento con todos los datos (resultados anuales, Figura 10), lo que según la metodología expone que a lo largo del año y a pesar que en las estaciones de invierno y verano las tendencias sean pocas, al tomar el panorama completo las tendencias de viento costero son significativas en las bases de datos AMIP, CCMP y CFSR (Figura 10) para el periodo de tiempo entre 1980 y 2005.

La base de datos de ERA para TSM no muestra tendencias significativas de forma anual (Figura 10), ni de forma estacional (Figura 11, Figura 12) y aunque no son significativas se observa claramente como en verano la temperatura en la costa tiende a disminuir aún más, sobre todo en la costa entre la Región de Atacama y la Región de Los Lagos. Los datos de TSM proporcionados por el SHOA muestran cómo en Valparaíso durante el verano hay un peak de tendencia negativa que supera el -1 [°C/década], de forma anual las tendencias se mantienen en torno a los -1 y 0 [°C/década] (Figura 17).

Así como con el anticiclón, la distribución espacial de las tendencias de viento tiene una variabilidad estacional. Durante el invierno hay un predominio de las tendencias positivas, estas se concentran en la zona norte y/o centro (dependiendo de la base de datos). En cambio, para verano hay una predominancia de las tendencias negativa en la zona centro y/o norte.

Al menos en tres bases de viento distintas se observan tendencias favorables a la surgencia (Figura 10), esto sumado a las tendencias a la baja en la temperatura superficial del mar (Figura 10f) dan por hecho que la surgencia costera existe en el país, además si se observan los resultados que contienen todos los datos (Figura 22, Figura 23, Figura 24) se observa como las tendencias significativas se incrementan de manera considerable.

Realizar una comparación entre las bases de datos fue posible gracias a que se aplicó la misma metodología en todas ellas, aunque como fue necesario ajustar una ventana de tiempo lo más amplia posible entre tantas bases de datos, se limitó la obtención de resultados, esto porque los datos de viento y temperatura tienen bastante variabilidad y entre más datos se utilizan más fieles son los resultados, esto queda en evidencia al ver los resultados que se obtienen de la base de datos de CMIP5-Mensual (Figura 21) en la cual de los 55 años disponibles, solo se utilizan 25 años.

A continuación, se presenta una tabla que detalla solo los sectores en los que se presentan tendencias positivas significativas y así caracterizar el viento favorable a la surgencia según cada base de datos de viento.

Tabla 8.1: Resumen

AMIP (Conjunto de modelos)	<ul style="list-style-type: none"> • Invierno: el viento favorable a la surgencia se manifiesta lejos de la costa entre los 20 y 26°S con valores en torno a los 0.1 [m/s/década]. • Primavera: el sector donde se manifiesta el viento favorable a la surgencia se ha expandido, se extiende entre los 25 y 40°S desde la costa hasta los 84°W con valores entre 0.1 y 0.2 [m/s/década].
CCMP (Observación satelital)	<ul style="list-style-type: none"> • Otoño: el viento favorable a la surgencia se manifiesta en un sector muy pequeño entre los 23 y 29°S apegado a la costa con valores en torno a los 0.05 [m/s/década]. • Invierno: el viento favorable a la surgencia se encuentra entre los 20 y 30°S y sus valores están en torno a 0.1 [m/s/década]. • Primavera: el sector que presenta vientos favorables a la surgencia se mantiene idéntico a lo presentado en invierno, así como sus valores, que se mantienen en torno a los 0.1 [m/s/década].
CFSR (Reanálisis)	<ul style="list-style-type: none"> • Verano: el viento favorable a la surgencia se manifiesta en dos sectores. El primero entre 18 y 25°S cerca de la costa y con valores que alcanzan hasta los 0.5 [m/s/década]. El segundo sector se encuentra entre los 35 y 44°S cercano a los 84°W con valores entorno a los 0.3 [m/s/década]. • Otoño: el viento favorable a la surgencia se manifiesta entre los 18 y 27°S con valores entre los 0.1 y 0.5 [m/s/década]. • Invierno: el viento favorable a la surgencia se muestra entre los 18 y 25°S, los valores oscilan entre 0.1 y 0.15 [m/s/década]. • Primavera: Hay pequeñas zonas con vientos favorables a la surgencia, el más destacable esta entre 18 y 22°S con valores que alcanzan los 0.25 [m/s/década].
CMIP5 (Conjunto de modelos)	<ul style="list-style-type: none"> • Invierno: el viento favorable a la surgencia se manifiesta entre los 35 y 44°S con valores de 0.1 [m/s/década]. • Primavera: el sector donde se manifiesta el viento favorable a la surgencia se desplaza a los 40 y 44°S manteniendo los 0.1 [m/s/década].

Fuente: Elaboración propia.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ancapichún, S., & Garcés-Vargas, J. (2015). Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre. *Ciencias Marinas*.
- Ancapichún, S., & Garcés-Vargas, J. (2015). Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile. *Ciencias Marinas*.
- Butler, K. (2015). Mann-Kendall for autocorrelated data.
- Catalina Aguirre, S. G.-L. (2018). Insight into anthropogenic forcing on coastal upwelling off south-central Chile. *ELEMENTA*.
- David A. Rahna, R. D. (2013). A synoptic climatology of the near-surface wind along. *RMets*.
- E.D. Barton, D. F. (2013). Canary current upwelling: More or less? *ELSEVIER*, 167-178.
- EcuRed. (6 de 8 de 2018). *EcuRed*. Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/Viento_Geostrófico
- Gilbert, R. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. New York.
- Hyodae Seo, K. H. (2012). What determines the spatial pattern in summer upwelling trends. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*.
- Juan P. Boisier, R. R. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast. *AGUPUBLICATIONS*.
- M. Garcia-Reyes, J. L. (2010). Observations of increased wind-driven coastal. *Journal of Geophysical Research*.
- Mantua, P. W. (2002). Coastal upwelling in a warmer future. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*.
- Mathias Vuille, E. F. (2015). Impact of the global warming hiatus. *AGUPUBLICATIONS*.
- Milton, M. (16 de Julio de 2016). *Itescam*. Obtenido de <http://web.archive.org/web/20120813054215/http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r71988.PDF>
- Murphy, J. J. (1999). *Technical analysis of the Financial Markets*.
- Northwest Fisheries Science Center. (5 de 10 de 2018). *NOAA Fisheries*. Obtenido de Pacific Decadal Oscillation (PDO): <https://www.nwfsc.noaa.gov/research/divisions/fe/estuarine/oeip/ca-pdo.cfm>
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction To Physical Oceanography*.
- Sydeman, W. J., García-Reyes, M., Schoeman, D. S., Rykaczewski, R. R., Thompson, S. A., Black, B. A., & Bograd, S. J. (2014). Climate change and wind intensification in coastal upwelling ecosystems. *Science*.
- Thomas E. Cropper n, E. (2014). Spatial and temporal seasonal trends in coastal upwelling off. *ELSEVIER*, 94-111.
- Torrelavega. (s.f.). Física 1. *AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS*. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2009). *Statiscal analysis of groundwater monitoring data at rcra facilities*.

10 ANEXOS

Tabla 10.1: AMIP

Bases de datos	Resolución en grados	Periodo	Institución
CMCC-CM	0.7 x 0.7	01/ene/1979 – 03/sept/2009	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
CNRM.CM5	1.4 x 1.4	01/ene/1979 – 31/dic/2008	Centre National de Recherches Météorologiques
GFDL-CM3	2 x 2.5	01/ene/1979 – 09/dic/2010	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-HIRAM-C180	0.5 x 0.6	01/ene/1979 – 09/dic/2010	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-HIRAM-C360	0.2 x 0.3	01/ene/1979 – 09/dic/2010	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HadGEM2-A	1.2 x 1.8	01/ene/1979 – 30/dic/2008	Met Office Hadley Centre
Inmcm4	1.5 x 2	01/ene/1979 – 31/dic/2008	Institute for Numerical Mathematics
IPSL-CM5A-LR	1.9 x 3.7	01/ene/1979 – 31/dic/2008	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5A-MR	1.2 x 2.5	01/ene/1979 – 31/dic/2008	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5B-LR	1.9 x 3.7	01/ene/1979 – 31/dic/2008	Institut Pierre-Simon Laplace
MPI-ESM-LR	1.8 x 1.8	01/ene/1979 – 31/dic/2008	Max Planck Institute for Meteorology
MPI-ESM-MR	1.8 x 1.8	01/ene/1979 – 31/dic/2008	Max Planck Institute for Meteorology

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.2: CMIP5 – Diario

Base de datos	Resolución	Fecha	Institución
BNU-ESM	2.8 x 2.8	1/ene/1979 – 31/dic/2005	College of Global Change and Earth System Science
CanCM4	2.8 x 2.8	1/ene/1979 – 31/dic/1994	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CMCC-CESM	3.7 x 3.7	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Centro Euro-Mediterraneo per-I Cambiamenti Climatici
CMCC-CM	0.75 x 0.75	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Centro Euro-Mediterraneo per-I Cambiamenti Climatici
CMCC-CMS	1.8 x 1.8	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Centro Euro-Mediterraneo per-I Cambiamenti Climatici
CNRM-CM5	1.4 x 1.4	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Centre National de Recherches Meteorologiques
CSIRO-Mk3-6-0	1.8 x 1.8	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence
GFDL-CM3	2 x 2	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-ESM2G	2 x 2	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-ESM2M	2 x 2.5	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HadGEM2-AO	1.2 x 1.2	1/ene/1979 – 30/dic/2005	Met Office Hadley Centre
HadGEM-CC	1.2 x 1.2	1/ene/1979 – 30/nov/2005	Met Office Hadley Centre
HadGEM-ES	1.2 x 1.2	1/ene/1979 – 30/nov/2005	Met Office Hadley Centre
Inmcm4	1.5 x 2	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Institute for Numerical Mathematics
IPSL-CM5A-LR	1.9 x 3.7	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5A-MR	1.2 x 2.5	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5B-LR	1.9 x 3.7	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Institut Pierre-Simon Laplace
MPI-ESM-LR	1.9 x 1.8	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Max Planck Institute for Meteorology
MPI-ESM-MR	1.8 x 1.8	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Max Planck Institute for Meteorology
MPI-ESM-P	1.8 x 1.8	1/ene/1979 – 31/dic/2005	Max Planck Institute for Meteorology

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.3: CMIP5 - Mensual

Bases de datos	Resolución	Fecha	
CMCC-CESM	3.7 x 3.7	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Centro Euro-Mediterraneo per-I Cambiamenti Climatici
CMCC-CM	0.7 x 0.7	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Centro Euro-Mediterraneo per-I Cambiamenti Climatici
CMCC-CMS	1.8 x 1.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Centro Euro-Mediterraneo per-I Cambiamenti Climatici
CNRM-CM5-2	1.4 x 1.4	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Centre National de Recherches
CNRM-CM5	1.4 x 1.4	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Centre National de Recherches Meteorologiques
FGOALS-s2	1.6 x 2.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
GFDL-CM2p1	2 x 2.5	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-CM3	2 x 2.5	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-ESM2G	2 x 2.5	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-ESM2M	2 x 2.5	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HadCM3	2.5 x 3.7	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Met Office Hadley Centre
HadGEM2-AO	1.2 x 1.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Met Office Hadley Centre
HadGEM2-CC	1.2 x 1.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Met Office Hadley Centre
HadGEM2-ES	1.2 x 1.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Met Office Hadley Centre
Inmcm4	1.5 x 2	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Institute for Numerical Mathematics
IPSL-CM5A-LR	1.8 x 3.7	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5A-MR	1.2 x 2.5	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5B-LR	1.8 x 3.7	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Institut Pierre-Simon Laplace
MIROC4h	0.5 x 0.5	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MIROC5	1.4 x 1.4	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MIROC-ESM-CHEM	2.7 x 2.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, and National Institute for Environmental Studies

MIROC-ESM	2.7 x 2.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, and National Institute for Environmental Studies
MPI-ESM-LR	1.8 x 1.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Max Planck Institute for Meteorology
MPI-ESM-MR	1.8 x 1.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Max Planck Institute for Meteorology
MPI-ESM-P	1.8 x 1.8	01/ene/1950 – 01/dic/2005	Max Planck Institute for Meteorology

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.4: SHOA

Base de datos	Ubicación		Fecha
	Latitud	Longitud	
Antofagasta	23° 39' 11"	70° 24' 16"	01/ene/1946 – 19/jun/2016
Arica	18° 28' 33"	70° 19' 23"	01/ene/1951 – 19/jun/2016
Caldera	27° 03' 52"	70° 49' 29"	01/ene/1951 – 20/jun/2016
Coquimbo	29° 57' 00"	71° 20' 07"	12/abr/1960 – 20/jun/2016
Corral	39° 52' 42'	73° 25' 22"	17/ago/1962 – 19/jun/2016
Isla de Pascua	27° 09' 17"	109° 26' 22"	14/ene/1957 – 19/jun/2016
Iquique	20° 12' 16"	70° 08' 52"	26/oct/1958 – 19/jun/2016
Punta Arenas	53° 07' 25"	70° 51' 37"	01/ene/1961 – 19/jun/2016
Talcahuano	36° 41' 43"	73° 06' 22"	01/ene/1949 – 21/jun/2016
Valparaíso	33° 01' 38"	71° 37' 33"	02/ene/1945 – 15/jun/2016

Fuente: Elaboración propia.

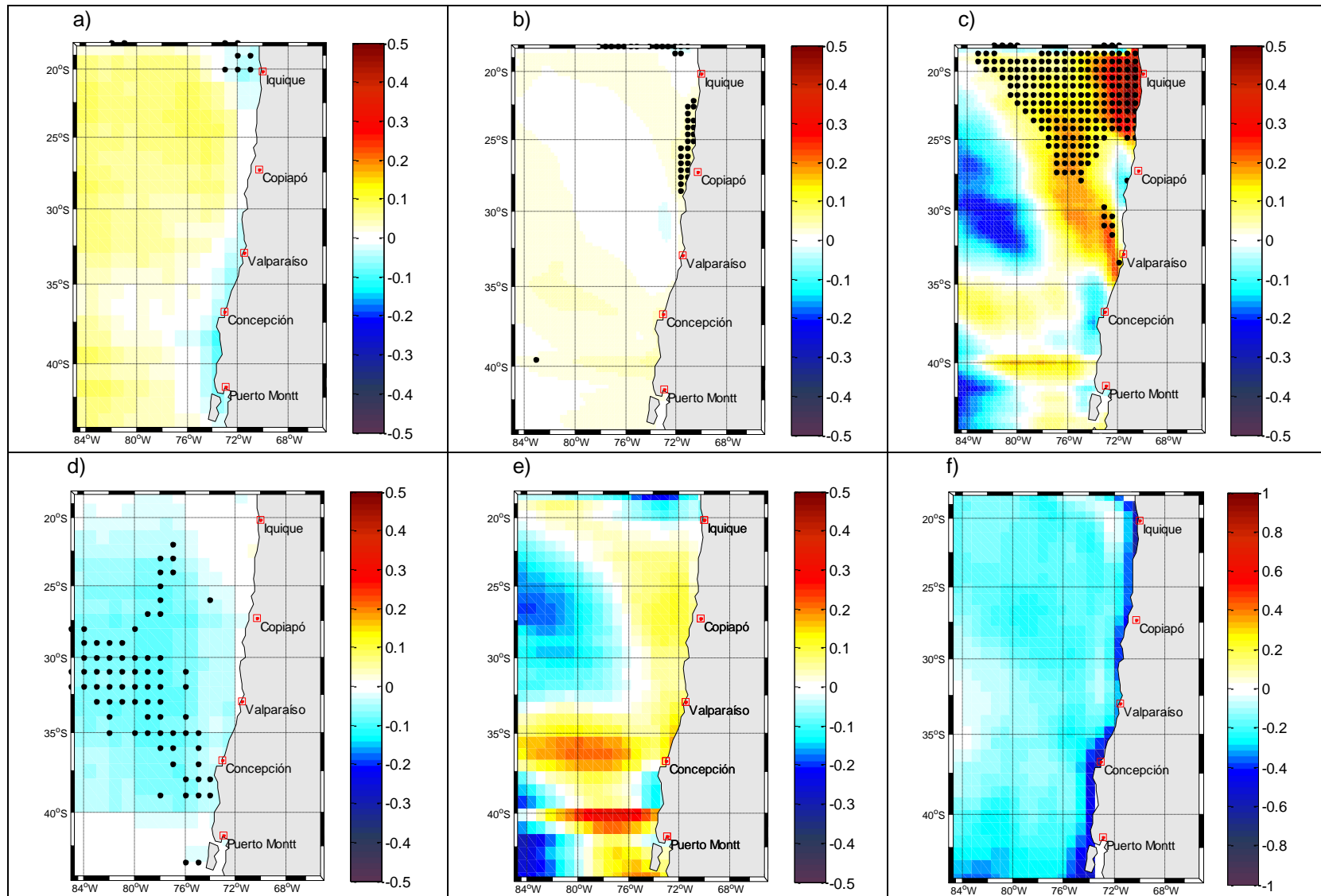


Figura 19: Mapas de Pendiente otoño. a) AMIP (viento [m/s/década]), b) CCMP (viento [m/s/década]), c) CFSR (viento [m/s/década]), d) CMIP5 (viento [m/s/década]), e) ERA (viento [m/s/década]) y f) ERA (tsm [°C/década]). Período 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

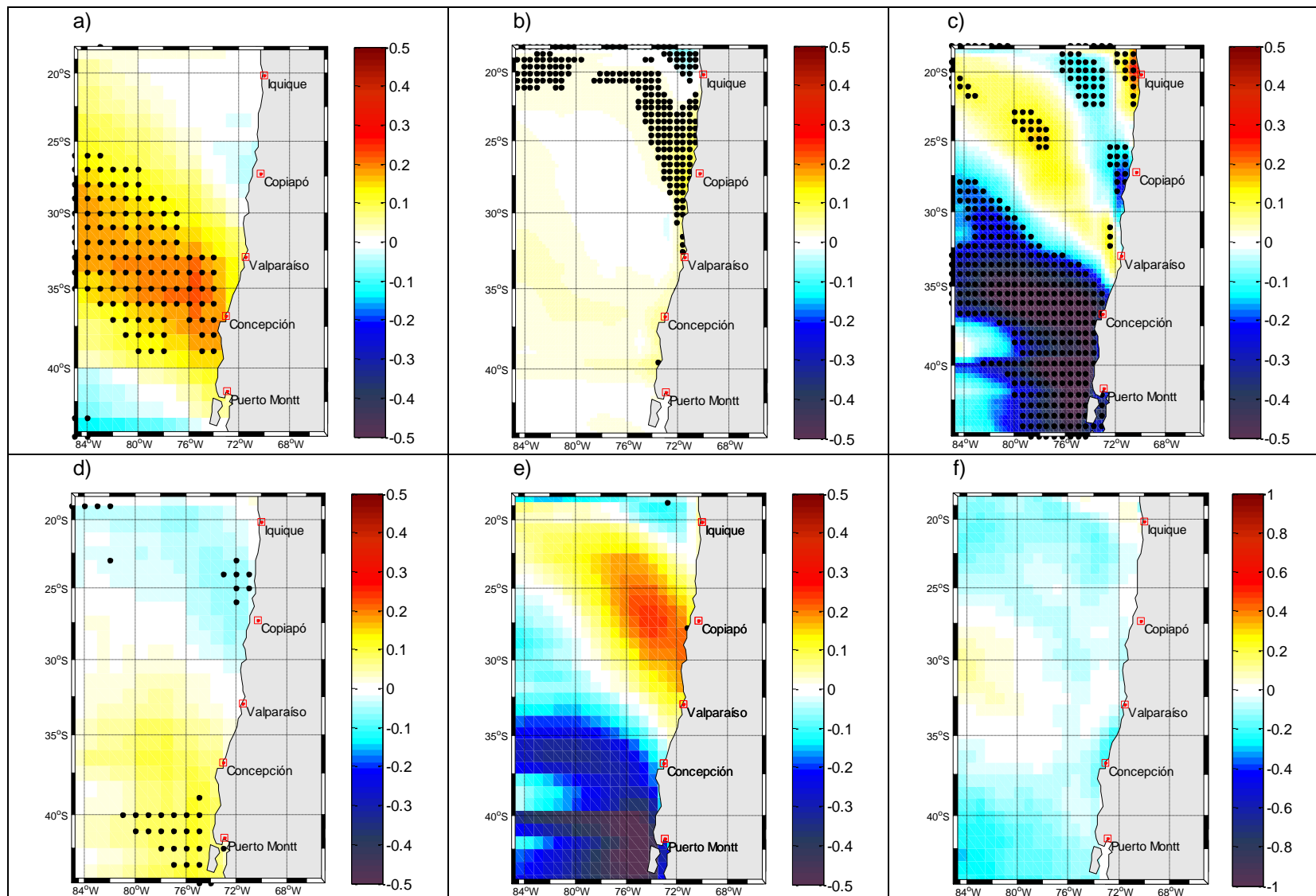


Figura 20: Mapas de Pendiente primavera. a) AMIP (viento [m/s/década]), b) CCMP (viento [m/s/década]), c) CFSR (viento [m/s/década]), d) CMIP5 (viento [m/s/década]), e) ERA (viento [m/s/década]) y f) ERA (tsm [°C/década]). Período 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

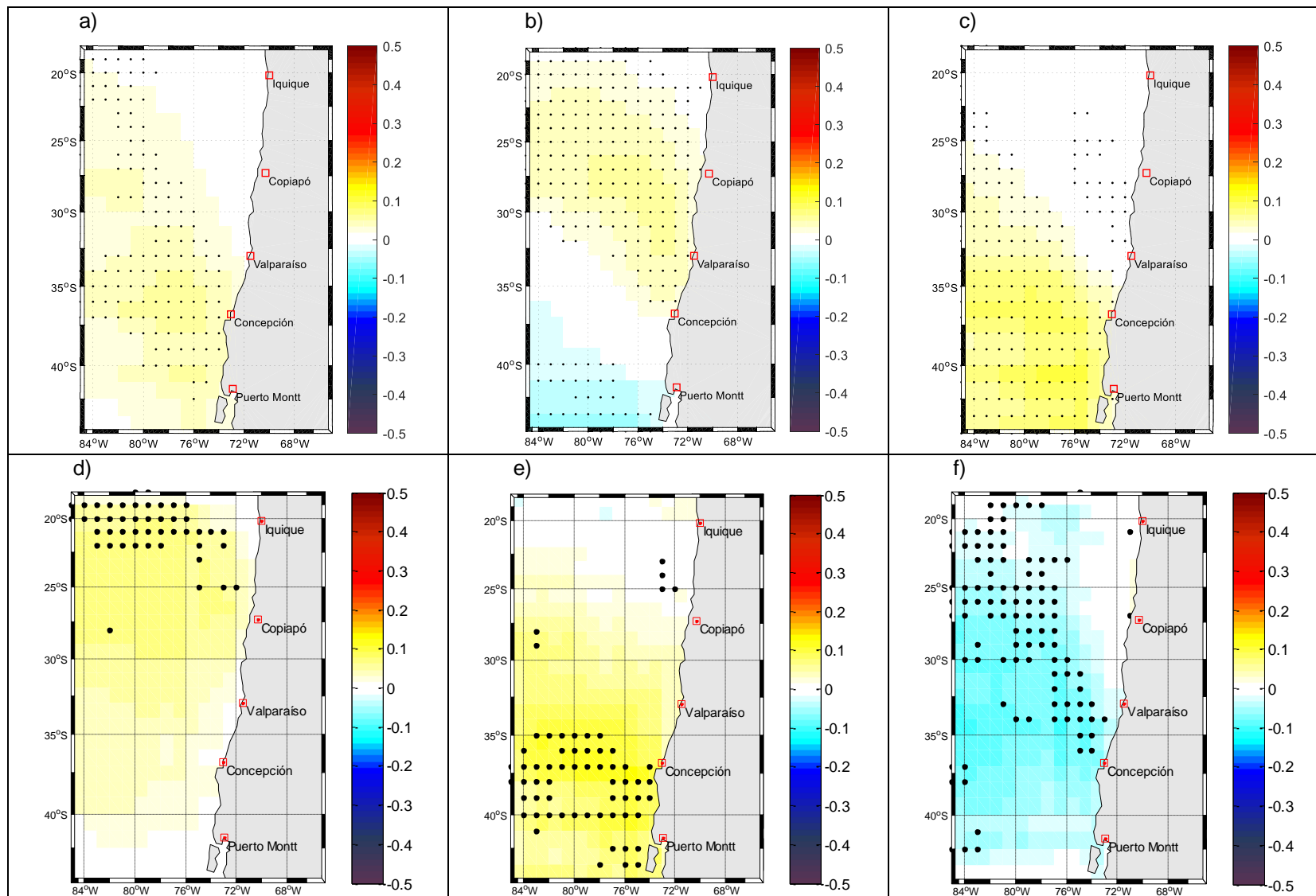


Figura 21: Mapas de Pendiente Comparación CMIP5 [m/s/década], CMIP5 - Mensual 1950-2005: a) anual, b) invierno, c) verano. CMIP5 – Mensual 1980-2005: a) anual, b) invierno, c) verano. Fuente: Elaboración propia.

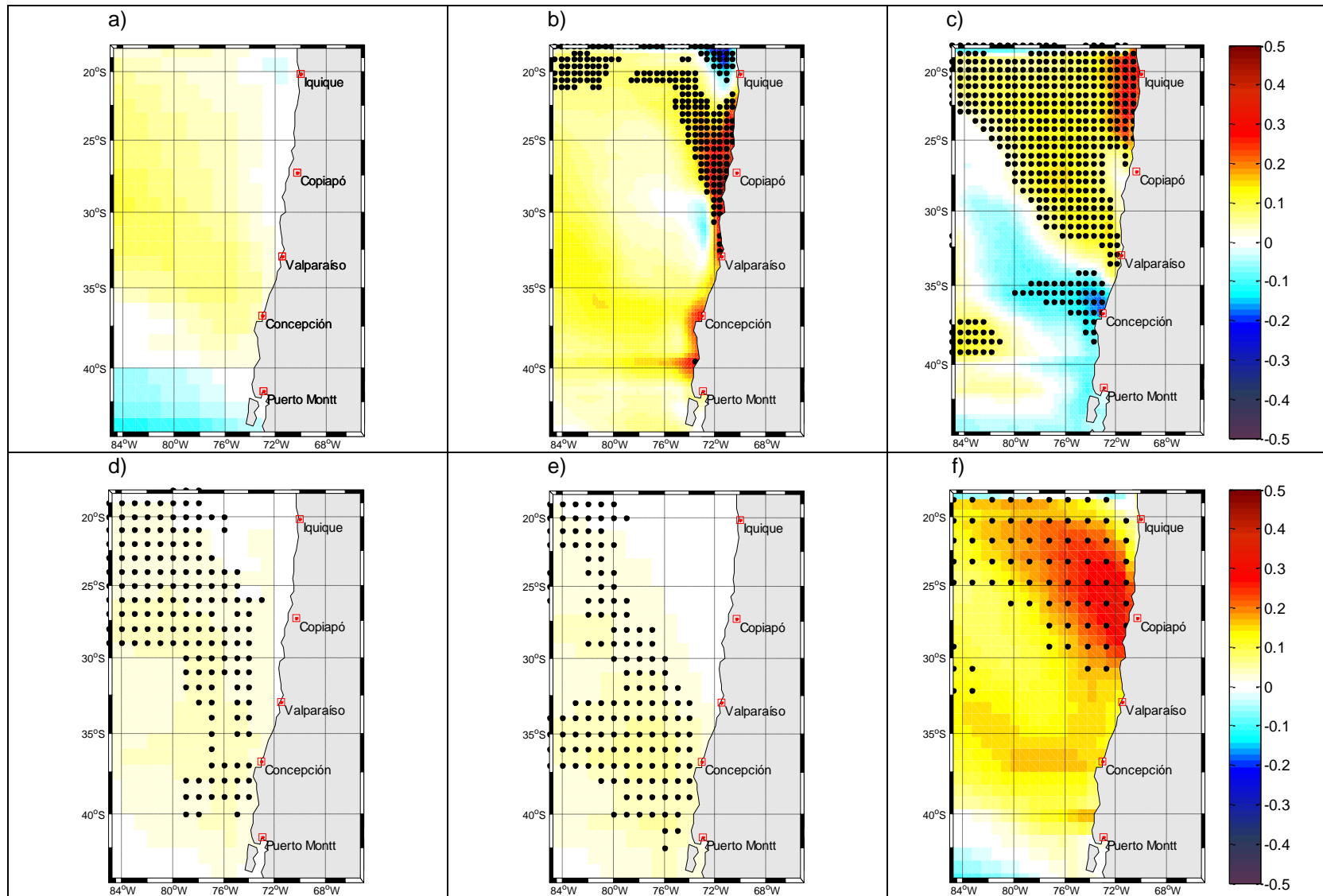


Figura 22: Mapas de Pendiente Anual [m/s/década]. a) AMIP, b) CCMP, c) CFSR, d) CMIP5, e) CMIP5-Mensual, f) ERA (viento). Periodo: Todos los datos disponibles de cada base de datos. Fuente: Elaboración propia.

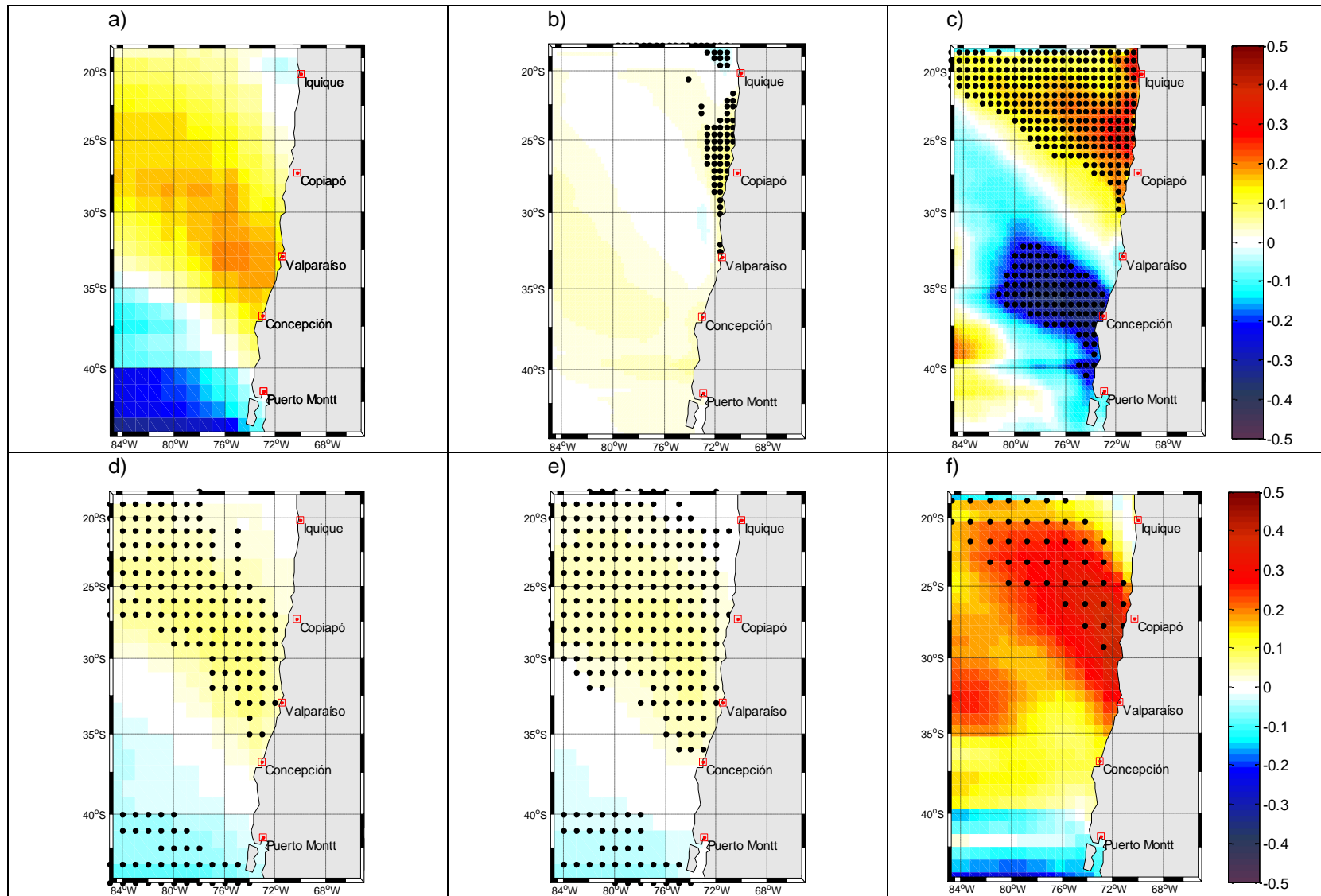


Figura 23: Mapas de Pendiente Invierno [m/s/década]. a) AMIP, b) CCMP, c) CFSR, d) CMIP5, e) CMIP5-Mensual, f) ERA (viento). Período: Todos los datos disponibles de cada base de datos. Fuente: Elaboración propia.

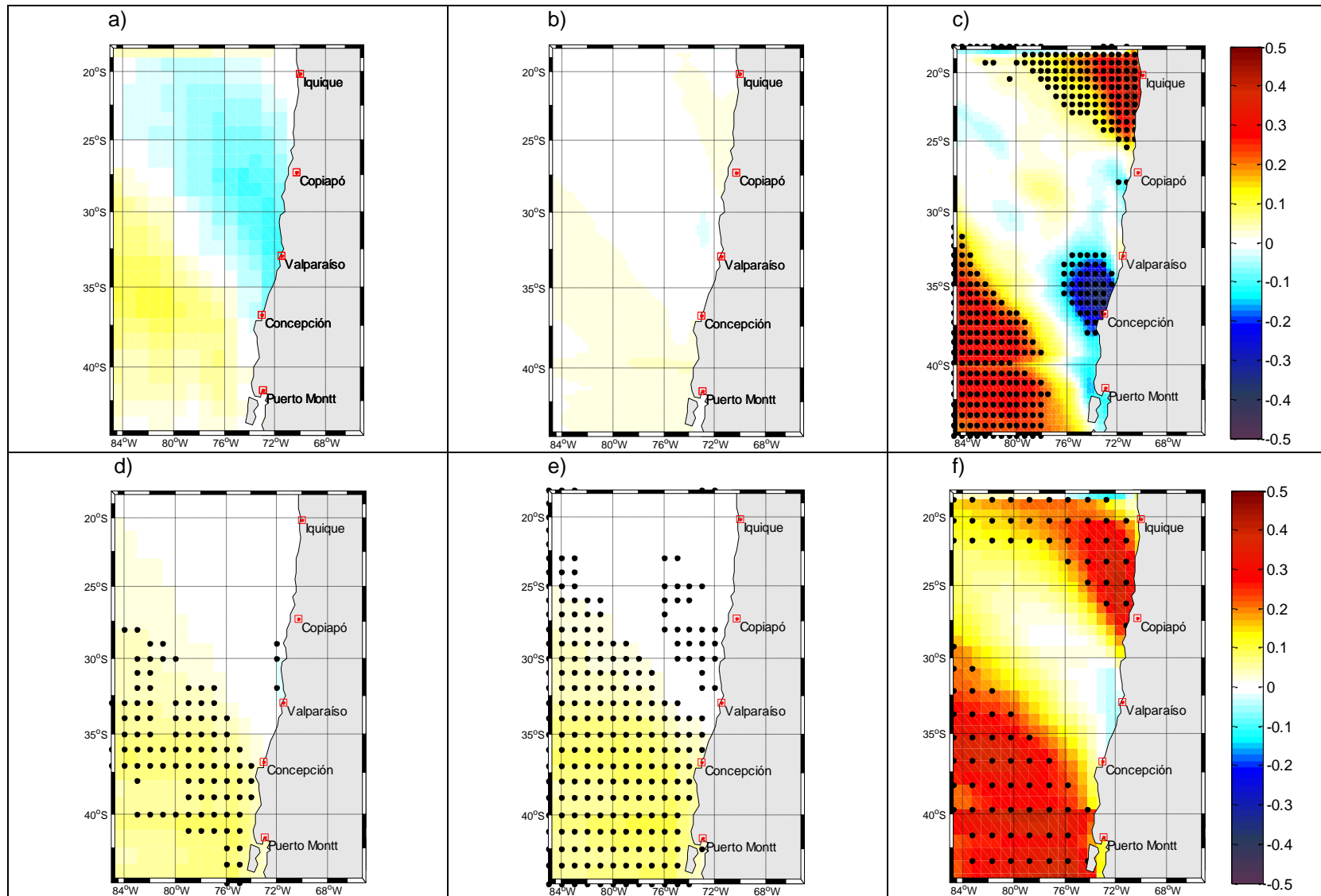


Figura 24: Mapas de Pendiente verano [m/s/década]. a) AMIP, b) CCMP, c) CFSR, d) CMIP5, e) CMIP5-Mensual, f) ERA (viento). Periodo: Todos los datos disponibles de cada base de datos. Fuente: Elaboración propia.

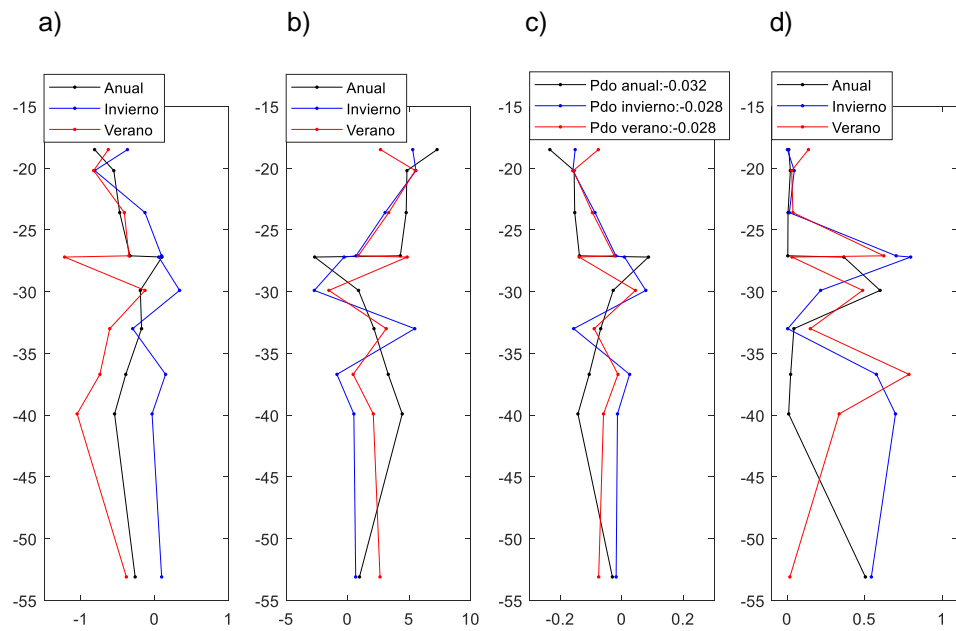


Figura 25: PDO vs SHOA (TSM). Pendiente del viento [m/s/década] (a), pendiente de regresión entre variables [m/s/década] (b), alfaxm [m/s/década] (c), correlación (d). 1980-2005. Fuente: Elaboración propia.

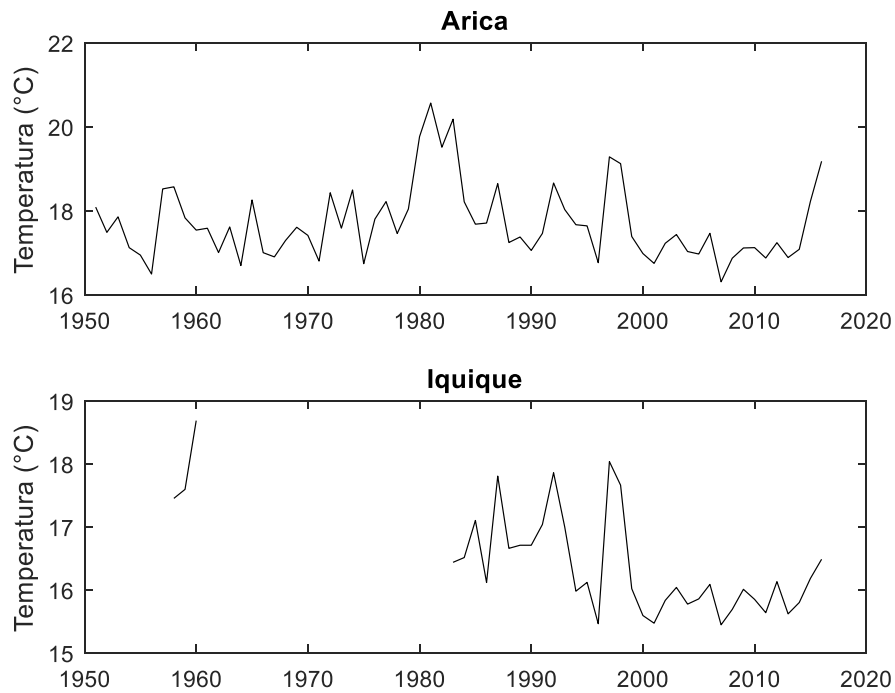


Figura 26: Serie de tiempo de datos SHOA (promedios anuales de temperatura superficial del mar), estaciones de Arica e Iquique. Fuente: Elaboración propia.

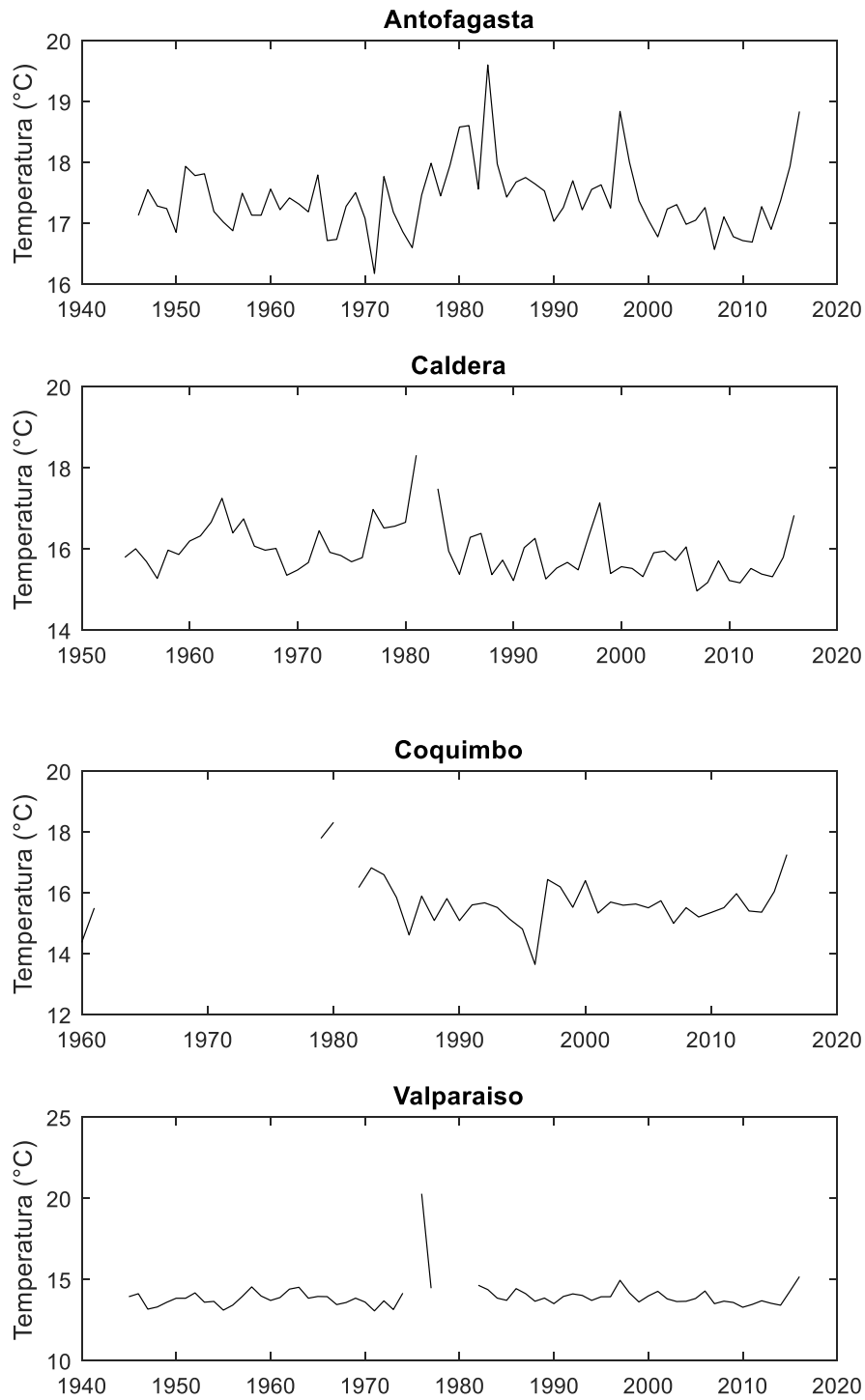


Figura 27: Serie de tiempo de datos SHOA (promedios anuales de temperatura superficial del mar), estaciones de Antofagasta, Caldera, Coquimbo y Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.

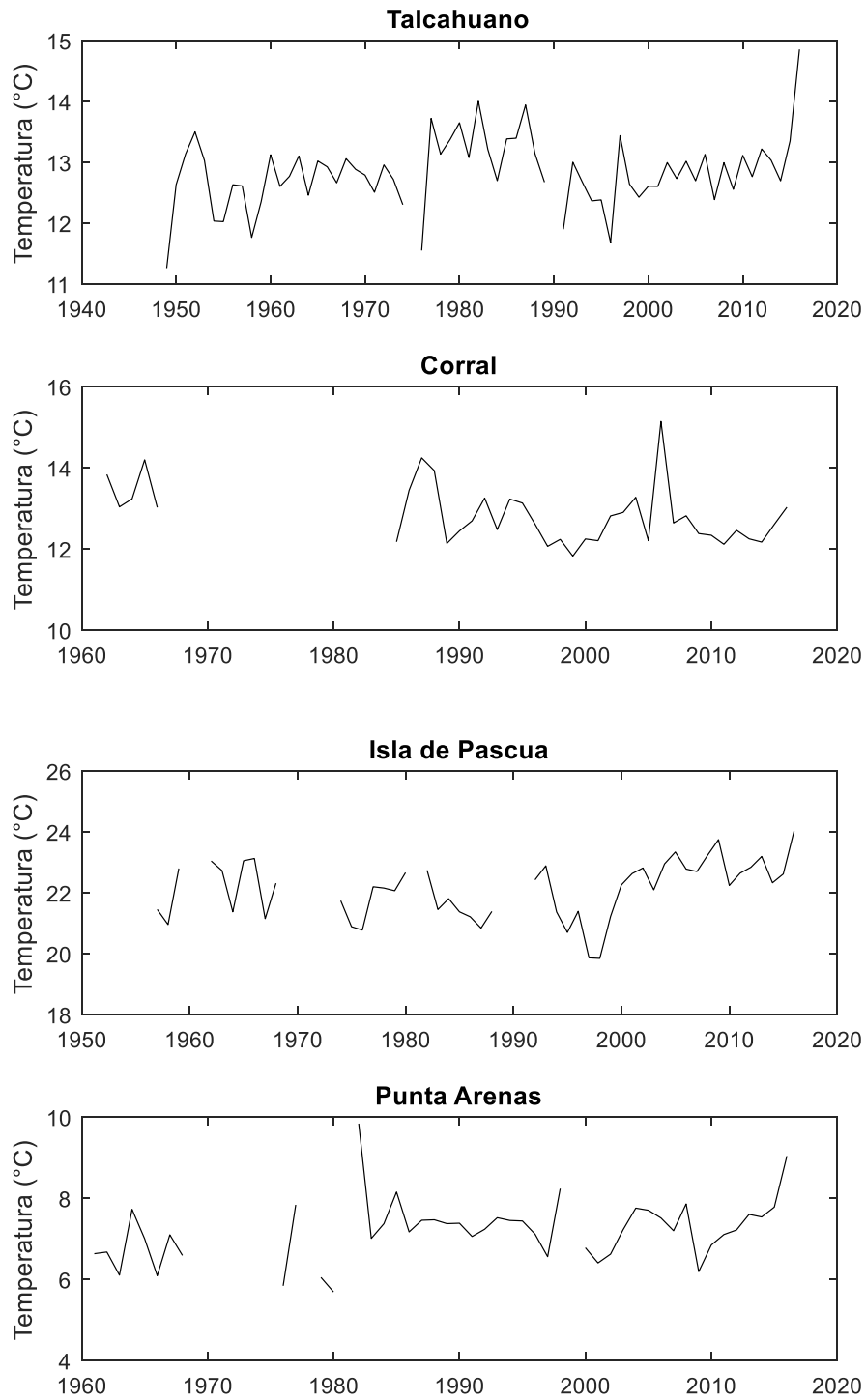


Figura 28: Serie de tiempo de datos SHOA (promedios anuales de temperatura superficial del mar), estaciones de Talcahuano, Corral, Isla de Pascua y Punta Arenas. Fuente: Elaboración propia.