

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del mar**

Análisis de la influencia del fenómeno de La Niña 2020-2022  
en la precipitación y temperatura del aire en Chile  
continental

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniera Oceanográfica**

Presentado por:

Nathalie Lissette Rodríguez Lara

Iliana Noemi Salazar Ventura

Tutor: Msc. Jonathan Cedeño

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

## DEDICATORIA

A la persona que rio y lloró para que yo pueda vivir momentos como este.

- Nathalie Rodríguez

Este trabajo se lo dedico a las personas que amo con todo mi ser.

- Iliana Salazar

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sincero agradecimiento a la ESPOL por su predisposición a ayudarnos, a nuestro tutor quién nos guio y CIIFEN por el apoyo constante, sus valiosas retroalimentaciones y, por último, a la Dirección Meteorológica de Chile quienes siempre fueron muy amables y se mostraron dispuestos a colaborar.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Nathalie Rodríguez e Iliana Salazar* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual".



---

Nathalie Rodríguez  
Lara



---

Iliana Salazar  
Ventura

# EVALUADORES

---

**Jorge Espinoza Amaguaña**

Profesor de la materia

---

**Jonathan Marcelo Cedeño Oviedo**

Profesor tutor

## RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto es analizar la influencia del fenómeno de La Niña 2020- 2022 en la precipitación y temperatura del aire en Chile continental, este trabajo surge por la necesidad de estudiar la influencia de fenómenos meteorológicos en la climatología de la región chilena para la mejora de los servicios de predicción, donde se tome en cuenta el cambio temporal y espacial a lo largo del año. Como parte de la metodología se agrupó a las estaciones acorde a las 5 Zonas Naturales de Chile y con la técnica de EOF se validó esta agrupación. También se realizó mapas con las anomalías de precipitación y temperatura de La Niña 2020- 2022, y tablas comparativas entre varios eventos La Niña. Además, se realizó la correlación de las variables con índices oceánicos y atmosféricos para determinar su influencia, con lo cual se obtuvo que la variación del Pacífico ecuatorial en las regiones Niño 3.4 y Niño 1+2 está relacionado con el comportamiento de anomalías, pero no explica en su totalidad la variabilidad observada. Se concluyó tres puntos principales, las anomalías de temperatura se vuelven positivas conforme se acercan a las estaciones en la Zona Austral, las anomalías de precipitación disminuyen en magnitud conforme se trasladan al sur del país y por último la Zona Central y la Zona Sur presentan mayor variabilidad entre las 5 Zonas.

**Palabras clave:** ENOS, anomalías, variabilidad, Zonas Naturales, Chile

## **ABSTRACT**

*The aim of this project is to analyze the influence of La Niña 2020-2022 in precipitation and air surface temperature in continental Chile. This work resulted from the necessity of studying the influence of different meteorological phenomena in the climate of the Chilean region for the betterment of the climate prediction services covering spatial and temporal range throughout the year. During the process the weather stations were grouped into the 5 established Natural Zones of Chile and validated with the EOF technique. Maps for anomalies were made as well for precipitation and temperature during La Niña 2020-2022. Additionally, a correlation analysis was made between the variables and oceanic and atmospheric indexes to determine their influence in the weather variability, with this it was determined that the variability in the regions Niño 3.4 and Niño 1+2, in the Equatorial Pacific Ocean, is related to the anomalies but doesn't explain the totality of this behavior. There are three main conclusions, the temperature anomalies turn positive as they approach the Austral Zone, precipitation anomalies are less intense in the south of the country and the Central Zone and Sur Zone are the most variable out of the 5 Zones.*

*Keywords: ENSO, anomalies, variability, Natural Zones, Chile*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
Índice de figuras .....	VIII
Índice de tablas .....	X
CAPÍTULO 1 .....	1
1    Introducción.....	1
1.1    Descripción del problema.....	1
1.2    Justificación del problema .....	2
1.3    Objetivos .....	3
1.3.1    Objetivo general .....	3
1.3.2    Objetivos específicos.....	3
1.4    Marco teórico .....	3
1.1.1    Evento ENOS .....	3
1.1.2    Chile Niño/Niña:.....	5
1.1.3    La Niña 2020-2022 .....	6
1.1.4    Variables meteorológicas en condiciones normales .....	6
1.1.5    Variables meteorológicas durante La Niña .....	6
1.1.6    Climatología en Chile .....	7
1.1.7    Climatología en Chile durante La Niña .....	7

1.1.8	Sequía en Chile .....	8
1.1.9	Histórica relación de la precipitación con el ENOS en Chile.....	9
CAPÍTULO 2 .....		11
2	Metodología.....	11
2.1	Localización .....	11
2.2	Selección de datos.....	12
2.3	Control de calidad de datos .....	16
2.4	Procesamiento de la data .....	16
2.5	Significancia estadística.....	17
2.6	Funciones ortogonales empíricas .....	17
2.7	Correlación.....	18
2.8	Elaboración de mapas .....	19
CAPÍTULO 3 .....		20
3	Resultados y Análisis .....	20
3.1	Test de Montecarlo .....	20
3.2	EOF.....	20
3.3	Correlación.....	21
3.3.1	Correlación de Pearson .....	21
3.3.2	Método Kendall-Tau .....	27
3.4	Comportamiento de La Niña Típica.....	30
3.5	Mapas de anomalías de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación de Las Niñas 2020-2022.....	31
3.6	Comparación de Las Niñas 20-21 y 21-22 con Niñas históricas por Zona.....	39
3.6.1	Comparación de anomalías precipitación por Zonas.....	39
3.6.2	Comparación de anomalías de temperatura máxima por Zonas.....	42

3.6.3	Comparación de anomalías de temperatura mínima por Zonas.....	47
3.7	Análisis de costos .....	53
CAPÍTULO 4 .....		54
4	Conclusiones y recomendaciones.....	54
4.1	Conclusiones.....	54
4.1.1	Correlaciones con los índices del El Niño.....	54
4.1.2	Comparación entre Las Niñas. ....	56
4.2	Recomendaciones .....	57
Referencias .....		58

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
ENOS	El Niños Oscilación Sur
EOF	Función ortogonal empírica
DMC	Dirección Meteorológica de Chile
CIIFEN	Centro de Investigación para la Investigación del Fenómeno de El Niño.
DJF	Periodo de diciembre, enero, febrero
MAM	Periodo de marzo, abril, mayo
JJA	Periodo de Junio, julio y agosto
SON	Periodo de septiembre, octubre y noviembre

## SIMBOLOGÍA

m	metro
mm	milímetro
°C	Grados Celsius

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 <i>Esquema de la metodología utilizada durante el proyecto</i> .....	11
Figura 2.2 <i>Ubicación de las estaciones en el área de estudio</i> .....	12
Figura 2.4 <i>Eventos de Niñas escogidos durante 1981-2022</i> . ....	15
Figura 3.1 <i>Anomalías de precipitación durante La Niña Típica</i> .....	30
Figura 3.2 <i>Anomalías de temperatura máxima durante La Niña Típica</i> .....	30
Figura 3.3 <i>Anomalías de temperatura mínima durante La Niña Típica</i> .....	31
Figura 3.4 <i>Anomalías de temperatura máxima durante La Niña 2020-2021</i> .....	32
Figura 3.5 <i>Anomalías de temperatura máxima durante La Niña 2021-2022</i> .....	33
Figura 3.6 <i>Anomalías de temperatura mínima durante La Niña 2020-2021</i> .....	35
Figura 3.7 <i>Anomalías de temperatura mínima durante La Niña 2021-2022</i> .....	36
Figura 3.8 <i>Anomalías de precipitación durante La Niña 2020-2021</i> .....	37
Figura 3.9 <i>Anomalías de precipitación durante La Niña 2021-2022</i> .....	38
Figura 3.10 <i>Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en Norte Grande</i> .....	39
Figura 3.11 <i>Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en Norte Chico</i> .....	40
Figura 3.12 <i>Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en la Zona Central</i> .....	40
Figura 3.13 <i>Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en la Zona Sur</i> .....	41
Figura 3.14 <i>Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en la Zona Austral</i> .....	42
Figura 3.15 <i>Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña en Norte Grande</i> .....	43
Figura 3.16 <i>Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña en Norte Chico</i> .....	44

Figura 3.17 <i>Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña en la Zona Central</i> .....	45
Figura 3.18 <i>Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña la Zona Sur</i> .....	46
Figura 3.19 <i>Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña en la Zona Austral</i> .....	47
Figura 3.20 <i>Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en Norte Grande</i> .....	48
Figura 3.21 <i>Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en Norte Chico</i> .....	49
Figura 3.22 <i>Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en la Zona Central</i> .....	50
Figura 3.23 <i>Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en la Zona Sur</i> .....	51
Figura 3.24 <i>Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en la Zona Austral</i> .....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 <i>Información de estaciones meteorológicas en Chile</i> .....	13
Tabla 3.1 <i>Variabilidad de los 6 primeros EOF para cada Zona en Chile</i> .....	20
Tabla 3.2 <i>Coeficientes de correlación para cada Zona</i> .....	21
Tabla 3.3 <i>Coeficientes de correlación con respecto a todas las series de tiempo – método de Pearson</i> .....	22
Tabla 3.4 <i>Correlaciones estacionales en el Norte Grande – método de Pearson</i> .....	23
Tabla 3.5 <i>Correlaciones estacionales en el Norte Chico – método de Pearson</i> .	24
Tabla 3.6 <i>Correlaciones estacionales en la Zona Central – método de Pearson</i>	25
Tabla 3.7 <i>Correlaciones estacionales en la Zona Sur– método de Pearson</i> .....	26
Tabla 3.8 <i>Correlaciones estacionales en la Zona Austral– método de Pearson</i> .	26
Tabla 3.9 <i>Coeficientes de correlación para las series de tiempo de las estaciones en precipitación– método de Kendall-Tau</i> .....	28
Tabla 3.10 <i>Coeficientes de correlación estacionales para precipitación– método de Kendall-Tau</i> .....	28
Tabla 3.11 <i>Descripción de insumos utilizados en el proyecto</i> .....	53
Tabla 3.12 <i>Descripción de recursos humanos solicitados en el proyecto</i> .....	53

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN

El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno natural asociado a fluctuación de la temperatura superficial del Océano Pacífico que influye en las condiciones climáticas, en los últimos años se han logrado progresos científicos que ayudan a comprender y poder modelizar el ENOS, y las predicciones ayudan a conocer hasta con 9 meses de antelación, (Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2022) sin embargo el ENOS, no es la única variable que influye en la climatología de los países, cada país y cada subregión de ese país tiene un comportamiento distinto que es necesario desglosar para mejorar los modelos.

### 1.1 Descripción del problema

Durante los años 2020-2022 se ha experimentado un evento multianual La Niña, estos eventos son poco estudiados debido a su aparente baja frecuencia, ocasionando que se presentan mayores errores en los modelos de predicción y pronóstico.

Actualmente, se han observado variaciones entre el comportamiento de La Niña pronosticado con modelos en el territorio chileno, estas variaciones pueden deberse a la megasequía presentada en la última década que influencia las señales del evento La Niña y genera anomalías no predichas.

La variable meteorológica y oceanográficas más estudiadas hasta la actualidad es de precipitación y temperatura superficial del mar TSM, pero se considera que también es necesario estudiar la temperatura superficial del aire, así como un estudio actualizado del comportamiento de estas variables durante La Niña 2020-2022, este estudio debe considerar la variabilidad estacional, temporal y espacial.

Debido a las razones planteadas se requiere un análisis temporal y espacial del comportamiento durante el evento La Niña 2020-2022 que considere la variación durante todas las estaciones del año en toda la extensión territorial de Chile, y observar las variaciones que se han presentado en contraste con eventos anteriores.

## **1.2 Justificación del problema**

El estudio planteado en este documento sirve de base para aumentar los conocimientos del comportamiento estacional y espacial de eventos La Niña en Chile, considerando dos variables atmosféricas: precipitación y temperatura del aire.

Estudios similares han sido realizados con baja frecuencia debido a la extensión del trabajo y la variabilidad de las influencias en las diferentes zonas geográficas de Chile; también se considera que gran parte de los estudios previos se han enfocado en el efecto del fenómeno de El Niño durante los meses de invierno, pero es necesario un análisis más fino que considere la variabilidad a lo largo del evento y las distribución espacial y temporal que se presenta en el territorio, por lo el trabajo cubre esta demanda con un análisis en todas las regiones de Chile y considerando las cuatro estaciones del año.

Adicionalmente, este estudio ayuda a mejorar los servicios de pronóstico y prevención de riesgos por eventos La Niña, ya que al aumentar la cobertura a todo el país aumenta de información climática disponible para la entidad meteorológica y para la evaluación y planificación de gestión de riesgos, beneficiando así a los pobladores chilenos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Analizar la influencia del fenómeno de La Niña 2020-2022 en la precipitación y temperatura del aire en Chile que contribuya a la mejora de los servicios de pronóstico meteorológico.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Comparar La Niña 2020-2022 con eventos históricos a partir de las características oceánicas y atmosféricas.

Analizar las anomalías estacionales de precipitación y temperatura del aire en estaciones meteorológicas correspondientes a la Dirección Meteorológica de Chile para el periodo 1991-2020.

Describir la variación espacial de las anomalías de temperatura y precipitación presentes en Chile durante La Niña 2020-2022.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.1.1 Evento ENOS**

El Niño Oscilación Sur (ENOS) es un fenómeno oceánico -atmosférico que afecta de manera importante la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico ecuatorial, las zonas central y oriental, alterando los patrones climáticos.

Entre las características principales están:

- Formación cada 3-7 años
- Alteración de la temperatura superficial del océano Pacífico ecuatorial
- Aumento o debilitamiento de los vientos Alisios
- Anomalías en la precipitación de diversos continentes

Durante este trabajo se estudia el evento La Niña, conocido como la fase fría de ENOS donde se evidencia el aumento de presión en el Pacífico tropical oeste y un decrecimiento de la presión en la zona de Indonesia y Australia, esto fortalece los vientos Alisios, que a su vez intensifican el movimiento de masas de agua en las costas ecuatorianas y peruanas, fortaleciendo los procesos de surgencia en la costa y reduciendo la termoclina, generando anomalías negativas de temperatura superficial del mar. La reducción de la temperatura genera una reducción de precipitación en Pacífico este, ocasionando el déficit de precipitación en la costa de América del Sur y aumento de las precipitaciones en Indonesia, Malasia y el Norte de Australia (Maturana et al, 2004).

Para la identificación, clasificación de fase y magnitud de eventos ENOS se utilizan diferentes índices, donde se suele estudiar la temperatura superficial del océano Pacífico ecuatorial seccionado en diferentes regiones (Niño 1+2, Niño 3, Niño 4, Niño 3.4). Estos índices han sido desarrollados y utilizados por diversas entidades meteorológicas y se pueden destacar: Servicio Meteorológico de Japón (JMA), el Índice Costero El Niño (ICEN) de Perú y el Índice Oceánico El Niño (ONI) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Adicionalmente existe el estudio de componentes atmosféricos con el Índice de Oscilación Sur (IOS) e índices más experimentales como el índice multivariado ENOS.

El ICEN estudia las anomalías de temperatura del océano frente a las costas de Ecuador y Perú, la zona Niño 1+2, con una media móvil de tres meses donde se considera un evento El Niño cuando se presentan por al menos 3 meses consecutivos condiciones cálidas (mayores a 0.4) y La Niña cuando son condiciones frías (menor a -1.0) (Takahashi et al, 2014).

La NOAA utiliza el Índice Oceánico El Niño (ONI) para la predicción de eventos futuros y su intensidad, este índice se basa en el cálculo de las anomalías de la superficie del océano en la zona Niño 3.4, por medio de una media móvil de 3

meses consecutivos donde un evento es identificado cuando existen 5 anomalías calculadas consecutivas que superen el valor absoluto de 0.5 (Guevara, 2008). Este índice ha sido el más adoptado por las diferentes naciones, incluyendo la Dirección de Meteorología de Chile.

Un evento ENOS puede tomar diferentes formas dependiendo de la zona del Pacífico donde se observan las anomalías principales: ENOS Central o Modoki, cuando se observan anomalías en el Pacífico ecuatorial Central, ENOS Oriental o Canónico, donde se observan anomalías en la zona del Pacífico ecuatorial (Tedeschi, 2017).

Debido a los cambios presentados actualmente en los sistemas climáticos y el calentamiento de los océanos, se prevé que las predicciones pierdan precisión en magnitud y presencia por la tendencia a aumento de temperatura y nivel del mar (Turkington, Timbal, & Rahmat, 2019), o incluso puedan incrementar la probabilidad de eventos extremos El Niño (Lopez et al, 2022).

### **1.1.2 Chile Niño/Niña:**

En el 2020 se publicó la identificación del Chile Niño/Niña, un evento independiente de los patrones de ENOS y que explica un patrón océano-atmosférico que se presenta en las costas de Chile, donde se presencia una reducción de los procesos verticales en la columna de agua, el incremento en el calentamiento por radiación en la superficie del agua y una reducción del tamaño de la capa mezcla, estos procesos combinados generan anomalías positivas de temperatura de la superficie del océano, estos procesos pueden ser originados por variaciones en la teleconexión del Anticiclón del Pacífico Sur y Zona de Convergencia del Pacífico Sur (Xue et al, 2020).

### **1.1.3 La Niña 2020-2022**

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) indica que las condiciones de La Niña que empezaron en septiembre del 2020 continúan hasta mediados de agosto del 2022. Los componentes oceánicos y atmosféricos se han fortalecido levemente desde mediados de julio hasta mediados de agosto del 2022 y los modelos climáticos y los expertos indican que quizás se convierta en la primera “triple caída” de La Niña evento del siglo (OMM, 2022).

Acorde a la OMM (2022), en 2021 se presentaron anomalías de temperaturas positivas en las zonas centrales y noreste de Chile, existió una disminución de precipitación en el sur y se evidencia un aumento de frecuencia e intensidad de sequías, siendo notable la megasequía presente, adicionalmente se han presentado eventos extremos en la forma de olas de calor y olas de frío en diferentes regiones.

### **1.1.4 Variables meteorológicas en condiciones normales**

En condiciones normales, Chile tiene dos influencias meteorológicas, el anticiclón subtropical del sureste del Pacífico y la circulación de los vientos del oeste (donde se forman los sistemas frontales y sus asociados bajos). El anticiclón está asociado a la región del norte y centro de Chile con presiones altas casi todo el año que migran desde 30–35°S durante el invierno hasta 35–40°S durante el verano, respecto a la circulación de los vientos, esta define el ciclo de precipitación estacional en Chile central, las bandas frontales se desplazan desde el oeste, este desplazamiento es más frecuente de abril a septiembre, el cual aporta más del 70% de la precipitación anual (Quintana, 2000).

### **1.1.5 Variables meteorológicas durante La Niña**

Durante La Niña influye el anticiclón subtropical del Pacífico suroeste, el cual se intensifica y su influencia se extiende hacia el sur. Este desplazamiento evita que los sistemas frontales provenientes del Pacífico occidental ya no se desplacen

hacia las latitudes medias continentales. Además, se intensifica la corriente en chorro polar y se debilita la corriente en chorro subtropical, favoreciendo una mayor actividad frontal en el sur de Chile. Por lo que se reduce la frecuencia de bandas de nubosidad frontal en el centro y norte de Chile, bloqueando y debilitando el paso de frentes activos hacia el continente la actividad convectiva y con ello disminuyendo las precipitaciones (Quintana, 2000).

### **1.1.6 Climatología en Chile**

Chile central (20°S-35°S) posee condiciones semiáridas, las precipitaciones anuales en promedio en el periodo de 1965 – 2010 es de 445 mm, los resultados muestran que el índice de concentración diaria (CI) disminuye latitudinalmente de norte a sur, y también disminución hacia las cordilleras de la Costa y de los Andes, donde las precipitaciones son menos irregulares, mientras que los valores de CI son más elevados en los valles centrales de Chile (Sarricolea Espinoza, Araya Escobar, & Carrión Salazar, 2014).

### **1.1.7 Climatología en Chile durante La Niña**

En Chile durante La Niña, el comportamiento es opuesto a las condiciones observadas durante el Niño, De manera general, (Pizarro & Montecinos, 2004) menciona que La Niña produce disminución de la precipitación y caudales de ríos en Chile Central.

Entre 30°S y 35°S en invierno y entre 35°S y 38°S a fines de primavera, la condición es seca-normal, mientras que entre 38°S y 41°S y en el Altiplano chileno la condición es lluviosa-normal (Cai, y otros, 2020).

Desde la latitud 45°S hacia el norte se registra un déficit de precipitaciones, siendo más marcado durante el invierno (abril-septiembre), el más vulnerable a estas anomalías. Mientras que la región central de Chile (30°S a 40°S) presenta

anomalías negativas, con valores de precipitación 35% a 100% por debajo del promedio climatológico anual (Quintana, 2000). En Chile, La Niña suele producir temperaturas del aire más bajas de lo normal, las desviaciones van desde 0°C hasta -1°C (Quintana, 2000).

Un estudio de la señal ENOS realizado en 1995 indica que el impacto de ENSO en la región Sur es menos severo que en la región Central, el cual considero la estación Concepción para la región Centro y la estación Puerto Montt para la región Sur (Nuñez, Richards, & O'Brien, 1998).

### **1.1.8 Sequía en Chile**

Se han identificado cambios en la escala de tiempo decenal en asociación con la Oscilación del Pacífico Interdecadal (IPO), cabe mencionar que la fase IPO cálida se asocia con un aumento de la precipitación, mientras que ocurre lo contrario durante la fase IPO fría. Y durante el siglo XX estos cambios en las escalas de tiempo interanuales y decenales se superponen a una disminución de las precipitaciones, es decir una intensificación de la sequía. Además, acorde a los registros de temperatura, a mediados de 1970 hubo un calentamiento abrupto, asociado con un aumento de temperatura mínima diaria y aumento de nubosidad, que coincidía con el cambio de la fase IPO fría a la fase cálida IPO. Por lo que se decía que los registros de temperatura indicaban una tendencia positiva a largo plazo, sin embargo, el período posterior a este calentamiento escalonado se ha caracterizado por una tendencia de enfriamiento persistente, más evidente en la temperatura máxima diaria, que incluso es coherente con una tendencia negativa en la temperatura de la superficie del mar en una gran región oceánica frente a la costa del norte de Chile (Schulz, Boiser, & Aceituno, 2012).

La investigación publicada por Journal of Climate indica que la masa de agua caliente localizada en el sur del Pacífico, al este de Nueva Zelanda, es natural,

pero se exacerbo por el cambio climático probablemente ya que no es normal su ritmo de calentamiento, la mancha es 1,5 °C más cálida que hace 40 años, y eleva la temperatura del aire y es transportada por los vientos hacia Chile, y así amplificando la gravedad de las megasequías. (Garreaud, Clem, & Vicencio, Cover Journal of Climate, 2021).

Desde el 2010 Chile central ha experimentado déficits de lluvia promedio de 20 a 40% y se denomina La Mega Sequía (MD), es el evento más largo registrado y en los últimos milenios casi no se han registrado eventos similares. Cabe mencionar que mayormente ha ocurrido bajo condiciones ENSO-neutrales, excepto por los inviernos de 2010 (La Niña) y 2015 (El Niño fuerte) (Garreaud, y otros, 2020).

El fenómeno afecta principalmente a la Zona Central, la distribución espacial del fenómeno abarca desde la Región de Coquimbo hasta la Región de Los Ríos. (Universidad de Chile).

Un estudio que considero 27 estaciones meteorológicas a resolución diaria entre 1981-2010, indicó que la mayor persistencia de días secos en la región de Valparaíso, con longitud de rachas de sequias mayor a 22 días al año, mientras que las zonas donde impacta de menor manera con la precordillera y la cordillera ubicadas en las regiones de Valparaíso y Metropolitana. Durante el invierno de 1998 en el evento de La Niña, se presentó la mayor cantidad de días sin lluvia del trimestre lluvioso (67 días). Finalmente, mencionan que las megasequías no posee un patrón claro, pero acorde a la reducción de la precipitación, las sequías serán más frecuente (Sarricolea & Meseguer-Ruiz, 2016).

#### **1.1.9 Histórica relación de la precipitación con el ENOS en Chile**

Un estudio relaciona la anomalía de la TSM en la región 3, con la precipitación invernal en Santiago, aunque si existe el comportamiento de que

cuando las anomalías negativas de TSM se intensifican, disminuye la precipitación, concluyó que la relación no es perfecta y buena parte de la variabilidad de la precipitación no es explicada por las fluctuaciones del ciclo ENOS en el Pacífico tropical. Se cree que no han existido anomalías pluviométricas estadísticamente bien relacionadas con el ciclo ENOS también porque los eventos ENOS generalmente se inician o terminan durante el otoño (Schulz, Boiser, & Aceituno, 2012).

# CAPÍTULO 2

## 2 METODOLOGÍA

La metodología del proyecto en general se resume en el siguiente esquema:



Figura 2.1 Esquema de la metodología utilizada durante el proyecto

### 2.1 Localización

El área geográfica de estudio es el país sudamericano, Chile, el país limita al norte con Perú, al este Argentina y Bolivia, al oeste el Océano Pacífico, al sur además del Océano Pacífico con el Territorio Antártico.



**Figura 2.2** *Ubicación de las estaciones en el área de estudio*

## 2.2 Selección de datos

Lista de estaciones meteorológicas en Chile. Provisión de datos: Dirección Meteorológica de Chile

**Tabla 2.1 Información de estaciones meteorológicas en Chile**

Clave	Región	Longitud	Latitud	Altura	Datos perdidos (%)
550001	PTO. WILLIAMS	-67.616	-54.932	12	0.14%
530005	PORVENIR FUENTES MARTINEZ AD.	-70.326	-53.254	25	0.11%
520006	PUNTA ARENAS CARLOS IBAÑEZ AP.	-70.839	-53.002	36	0.00%
470001	COCHRANE LORD AD.	-72.583	-47.244	209	0.04%
460001	CHILE CHICO AD.	-71.685	-46.585	311	0.04%
450005	BALMACEDA AD.	-71.678	-45.918	517	0.00%
450004	COYHAIQUE TNE. VIDAL AD.	-72.102	-45.591	299	0.00%
450001	PUERTO AYSÉN AD.	-72.677	-45.399	11	0.21%
430004	ALTO PALENA AD.	-71.801	-43.612	256	0.17%
430002	FUTALEUFÚ AD.	-71.852	-43.189	347	0.04%
410005	PUERTO MONTT EL TEPUAL	-73.096	-41.448	87	0.00%
390006	VALDIVIA AP. PICHROY	-73.087	-39.657	18	0.00%
380013	TEMUCO	-72.632	-38.768	86	0.00%
370033	LOS ÁNGELES	-72.424	-37.397	118	0.16%
360019	CONCEPCION	-73.066	-36.781	13	0%
360011	CHILLAN	-72.037	-36.586	155	0.00%
340044	CHIMBARONGO	-71.02	-34.721	321	0%
330030	SANTO DOMINGO	-71.613	-33.656	77	0%
330019	TOBALABA	-70.549	-33.455	650	0.00%
330020	SANTIAGO DMC	-70.683	-33.445	520	0.00%
330021	PUDAHUEL	-70.787	-33.378	482	0.00%
330007	RODELILLO	-71.556	-33.065	330	0.00%
330002	VALPARAISO	-71.648	-33.023	51	0%
320028	LA CRUZ INIA	-71.227	-32.828	176	0%
320019	SAN FELIPE ESC. AGRICOLA	-70.707	-32.076	662	0.00%
290004	LA SERENA	-71.207	-29.914	137	0.00%
270009	COPIAPO U ATACAMA	-70.353	-27.359	362	0.00%
270008	DESIERTO ATACAMA	-70.781	-27.254	197	0.00%
230001	ANTOFAGASTA	-70.445	-23.454	112	0%
220002	CALAMA	-68.892	-22.498	2321	0.00%
200006	IQUIQUE	-70.181	-20.549	48	0%
180005	ARICA	-70.34	-18.356	50	0.00%

*Nota.* El porcentaje de datos perdidos corresponden al máximo valor entre precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima. Datos tomados del Dirección Meteorológica de Chile (2022)

La DMC proporcionó 36 estaciones, en este estudio se consideró solo Chile continental, omitiendo 2 estaciones en el océano Pacífico, estudiando 34 estaciones en el periodo de 1991-2022. Adicionalmente existen estaciones en la parte occidental de la cordillera (Pto. Williams, Porvenir Fuentes Martinez Ad., Punta Arenas Carlos Ibañez Ap., Cochrane Lord Ad., Chile Chico Ad., Balmaceda Ad., Coyhaique Tne. Vidal Ad., Alto Palena Ad., Futaleufú Ad.), esto puede crear discontinuidad en los patrones de precipitación entre estaciones debido a que, en la Patagonia las regiones al oeste de la cordillera presentan condiciones secas y las regiones al este son húmedas (Garreaud, Lopez, & Rojas, 2013).

El porcentaje de datos perdidos en todas las estaciones fue bastante bajo, por lo que no se realizó ningún procedimiento para compensar los datos perdidos.

Los eventos La Niña elegidos fueron los presentados en el portal de la NOAA para eventos medios y fuertes basado en el índice MEI (NOAA, 2023), debido al ciclo natural de ENOS, cada evento fue separado en año 0 y año 1. Esta clasificación considera un ciclo desde el mes de junio del año 0 a mayo del año 1, siendo el año 0 el primer año donde se presentan las anomalías en el Pacífico ecuatorial.

Año 0	Año 1
1988	1989
1998	1999
1999	2000
2007	2008
2010	2011
2011	2012
2020	2021
2021	2022

The diagram below the table shows two rows of month abbreviations. The first row, labeled 'Año 0', contains the months J, J, A, S, O, N in a teal background. The second row, labeled 'Año 1', contains the months D, J, F, M, A, M in a red background. Brackets above the rows indicate that the first row corresponds to the 'Año 0' column of the table above, and the second row corresponds to the 'Año 1' column.

**Figura 2.3 Eventos de Niñas escogidos durante 1981-2022. Datos tomados de NOAA (2023)**

Con la selección de los eventos durante el periodo de estudio, se procedió a realizar una “Niña Típica”, es decir realizar una base de comportamiento esperado durante La Niña en Chile Continental, esto se realizó con RStudio, se introducen los años de eventos La Niña de la Tabla 2.2 junto con la matriz de anomalías por cada estación, con esto se calcula el promedio de precipitación acumulada, la temperatura máxima y la temperatura mínima para cada mes definido de un ciclo de La Niña.

Este proceso permitió la comparación de la intensidad de los eventos entre sí, y observar cambios en los patrones de anomalías de precipitación y temperatura. Esta comparación fue realizada por medio de porcentajes de anomalías, donde el cálculo se planteó con la siguiente formula:

$$\text{Porcentaje de anomalia \%} = \frac{\text{Observado} - \text{climatologia}}{\text{climatologia}} \times 100$$

El porcentaje fue también calculado para las estaciones del año definidas para el hemisferio Sur: verano, diciembre a febrero (DJF), otoño, marzo a mayo (MAM), invierno, junio a agosto (JJA) y primavera, septiembre a noviembre (SON).

### **2.3 Control de calidad de datos**

Para la calidad de datos se escogió el software Climdex, que es una herramienta integrada en RStudio que reemplaza datos faltantes y codificarlos en el formato que R reconoce, reemplaza los valores no razonables. Evaluar si los valores de precipitación diaria son menores que cero y verificar que el valor de temperatura mínima diaria sea menor a la temperatura máxima diaria (Zhang & Yang, 2004).

### **2.4 Procesamiento de la data**

#### Cálculo de las anomalías de precipitación y temperatura del aire

Los datos trabajados constan de la serie de tiempo de 1981-2022, para realizar el cálculo de la normal climática se tomó el periodo de 30 años requerido, constando de los años 1991-2020. Siguiendo los criterios establecidos en la Guía de prácticas climatológicas para el cálculo de normales (OMM, 2017) utilizando el promedio de los datos diarios dentro de un mes para la temperatura y la suma de los datos diarios dentro de un mes para la precipitación.

Durante este proyecto se trabajó con normales estacionales con el siguiente método:

- Temperatura: promedio de los valores mensuales correspondientes a los meses de la estación
- Precipitación: suma de los valores mensuales correspondientes a los meses de la estación

Una vez obtenidas las normales climáticas, el cálculo de las anomalías se realiza de la siguiente manera:

$$\text{anomalía} = \text{observación} - \text{normal climática}$$

Para el análisis posterior se utilizaron anomalías mensuales y estacionales para todos los datos de la serie de tiempo.

Primero se calculó las normales mensuales en el periodo de 1981-2020.

En nuestro proyecto si cumplió con los criterios establecido en la Guía de prácticas climatológicas (OMM, 2011), ya que no faltaron observaciones para 11 o más días del mes.

## **2.5 Significancia estadística**

El Test de Monte Carlo es utilizado para determinar la significancia de un set de datos por medio de la comparación entre una muestra aleatoria y la muestra de datos en un numero de iteraciones grande, usualmente 1000 (Hope, 1968). En este caso, el test consistió de un agrupamiento aleatorio de 8 años, simulando un grupo de eventos La Niña y así determinar sus características, este procedimiento se realizó 1000 veces, con los resultados se obtuvo una distribución aleatoria la cual fue comparada con La Niña Típica calculada previamente. Si La Niña Típica se encuentra fuera de los percentiles definidos por el valor  $\alpha$  en distribución aleatoria, quiere decir que las características encontradas no son dados aleatoriamente y tienen significancia estadística, en este caso se usa  $\alpha=0.05$  con los percentiles 5% y 95%

## **2.6 Funciones ortogonales empíricas**

Las Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) son métodos de análisis espaciotemporal utilizados para determinar los componentes principales de una serie de tiempo para variables de cualquier tipo, este método descompone el comportamiento de una variable en modos espaciales y temporales, buscando un

grupo de variables que explique el comportamiento de los datos analizados (Hannachi, Jolliffe, & Stephenson, 2007).

La zona de estudio fue seccionada en las 5 Zonas Naturales de Chile:

- Norte Grande: regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama
- Norte Chico: regiones Coquimbo y Valparaíso
- Central: regiones Metropolitana de Santiago, Del Libertador Bernardo O'Higgins, del Maule y Ñuble
- Sur: regiones de Bío-Bío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos
- Austral: regiones de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y la región de Magallanes y Antártica chilena

Las EOF fueron calculadas utilizando un script de Matlab para cada Zona, con el objetivo de determinar si esta división geográfica explica la variación en las anomalías observadas y poder realizar el análisis posterior. El script toma como entrada las anomalías de precipitación correspondientes a una zona y calcula el porcentaje de variabilidad de los 6 primeros modos de las EOF correspondientes. Una vez calculada la variabilidad se procede al cálculo de la correlación de cada estación con el primer modo del EOF, de este modo se obtiene si existe una relación significativa entre el EOF y la estación que permita explicar la variación de las anomalías.

## **2.7 Correlación**

Adicionalmente se determinó si existe alguna relación entre los factores oceánicos y la variabilidad de las anomalías calculadas, esto se realizó mediante la correlación de Pearson de las anomalías de cada estación y los índices oceánicos y atmosféricos seleccionados:

- Índice El Niño (ONI)

- Índice Oscilación Sur (IOS)
- Región Niño 3.4
- Región Niño 1+2

La correlación se hizo en dos partes, utilizando toda la serie de tiempo y de manera estacional para cada estación, este último se realizó con el propósito de definir relaciones estacionales que puedan existir entre diferentes Zonas y estaciones.

Debido a que la precipitación no tiene una distribución normal se realizó un proceso de estandarización para la correlación de Pearson, adicionalmente se utilizó la correlación de Kendall-Tau para observar relaciones entre estas variables y los índices.

## **2.8 Elaboración de mapas**

Utilizando la librería ggplot2 se graficó en el software R los mapas con los valores de precipitación y temperatura del aire máxima y mínima. Se realizó mapas durante La Niña 2020-2021 y La Niña 2021-2022 en cada estación del año JJA, SON, DJF y MAM.

# CAPÍTULO 3

## 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Test de Montecarlo

Con el Test de Monte Carlo es posible aseverar que las anomalías obtenidas durante los años de La Niña no son causadas por eventos aleatorios con una significancia del 95%, con lo cual se procede al análisis de los eventos seleccionados.

### 3.2 EOF

Los 6 primeros modos de variabilidad fueron calculados para cada Zona, donde el primer modo contiene el mayor porcentaje de variabilidad para cada Zona.

**Tabla 3.1 Variabilidad de los 6 primeros EOF para cada Zona en Chile**

	Norte Grande	Norte Chico	Central	Sur	Austral
<b>1° Modo</b>	98.85	72.72	75.22	67.88	52.32
<b>2° Modo</b>	0.90	17.83	18.48	12.61	23.98
<b>3° Modo</b>	0.15	4.99	3.36	7.26	8.46
<b>4° Modo</b>	0.06	2.57	2.014	5.18	4.75
<b>5° Modo</b>	0.03	1.17	0.63	2.56	3.95
<b>6° Modo</b>	0.01	0.71	0.29	2.09	3.80

La variabilidad de las zonas explicadas por el análisis de EOF es mayor en las regiones del Norte y decrece conforme se traslada al sur del país, siendo la menor en la Zona Austral con un 52.32%.

Adicionalmente, la correlación entre cada una de las estaciones y el primer modo de variabilidad fue calculado, se obtuvo una correlación significativa para todas las estaciones menos las correspondientes a Porvenir Fuentes Martínez Ad. y

Punta Arenas Carlos Ibáñez Ap. El resumen de las correlaciones se presenta a continuación:

**Tabla 3.2 Coeficientes de correlación para cada Zona**

<b>Zona</b>	<b>Coeficiente de correlación</b>
<b>Norte Grande</b>	0.99-0.97
<b>Norte Chico</b>	0.98-0.3
<b>Central</b>	0.91-0.30
<b>Sur</b>	0.99 - 0.86
<b>Austral</b>	0.89-0.11

La Zona Austral presenta gran variabilidad entre sus coeficientes de correlación, además del porcentaje del primer modo.

### **3.3 Correlación**

Para el análisis de la correlación entre las variables de estudio y los índices oceánicos y atmosféricos se tomaron en cuenta solo los coeficientes mayores a 0.1, con significancia del 95%.

#### **3.3.1 Correlación de Pearson**

Una tabla de resumen con los resultados para las series de tiempo de cada estación es presentada a continuación:

**Tabla 3.3 Coeficientes de correlación con respecto a todas las series de tiempo – método de Pearson**

	ONI	IOS	Niño 3.4	Niño 1+2
Precipitación	Norte Chico a Sur: positivo bajo (0.12-0.14)	Norte Chico a Sur: negativo bajo (-0.1 a -0.17)	Norte Grande: negativo bajo (-0.25) Austral: positivo bajo (0.12-0.3)	Norte Grande: positivo bajo (0.25) Austral: negativo bajo (-0.1 a -0.24)
Temperatura Máxima	Norte: positivo bajo (0.11-0.27) Central a Austral: negativo bajo (-0.1 a -0.14)	Norte: negativo bajo (-0.1 a -0.25)	Norte: positivo moderado - alto (0.3-0.57)	Norte Grande: negativo alto (-0.5) Norte Chico a Sur: positivo bajo (0.1-0.2)
Temperatura Mínima	Norte Grande a Sur: positivo bajo- moderado (0.1-0.44) Austral: negativo bajo (-0.1)	Norte a Sur: negativo bajo (-0.1 a -0.35) Austral: positivo (0.1)	Norte: moderado - alto positivo (0.2-0.58) Central: negativo bajo (-0.1) Sur: positivo bajo (0.2) Austral: negativo bajo (-0.13 a -0.3)	Norte a Central: positivo bajo a moderado (0.2-0.45)

Las relaciones más predominantes fueron las encontradas entre el Norte Grande y la región Niño 3.4 y Niño 1+2, para temperatura y temperatura máxima respectivamente.

En la siguiente tabla se presentan la correlación entre las anomalías estacionales y los índices para cada Zona, donde más de la mitad de las estaciones presentó correlaciones significativas con las variables estudiadas: precipitación (Prpc), temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin)

### 3.3.1.1 Norte Grande

**Tabla 3.4 Correlaciones estacionales en el Norte Grande – método de Pearson**

	ONI	IOS	Niño 3.4	Niño 1+2
<b>JJA</b>	<p>T<sub>max</sub>: positiva moderada: 0.32-0.45</p> <p>T<sub>min</sub>: positiva baja-alta: 0.35-0.57</p>	<p>T<sub>max</sub>: negativa baja: 0.28-0.38</p> <p>T<sub>min</sub>: negativa baja-alta: -0.3 a -0.56</p>	<p>Prcp: negativa bajo: -0.17 a -0.4</p> <p>T<sub>max</sub>: positiva moderada-alta: 0.48-0.62</p> <p>T<sub>min</sub>: positiva baja-alta: 0.28-0.59</p>	<p>Prcp: negativo bajo – moderado: -0.23 a -0.55</p> <p>T<sub>max</sub>: positiva alta: 0.42-0.79</p> <p>T<sub>min</sub>: positiva baja-alta: 0.27-0.39</p>
<b>SON</b>	<p>T<sub>max</sub>: positivo moderado: 0.3-0.52</p> <p>T<sub>min</sub>: positivo bajo-moderado: 0.19-0.57</p>	<p>T<sub>max</sub>: negativo bajo a moderado: -0.3 a -0.55</p> <p>T<sub>min</sub>: negativo bajo a moderado: -0.21 a -0.54</p>	<p>T<sub>max</sub>: positivo bajo-moderado: 0.23-0.49</p> <p>T<sub>min</sub>: positivo bajo-moderado: 0.19-0.58</p>	<p>Prcp: positivo bajo: 0.32</p> <p>T<sub>max</sub>: positivo bajo-moderado: 0.17-0.42</p> <p>T<sub>min</sub>: positivo bajo-moderado: 0.21-0.45</p>
<b>DJF</b>	<p>T<sub>max</sub>: positiva baja-moderada: 0.3-0.5</p> <p>T<sub>min</sub>: positiva baja-moderada: 0.23-0.56</p>	<p>T<sub>max</sub>: negativa baja: -0.17 a -0.25</p> <p>T<sub>min</sub>: negativa baja-moderada: -0.18 a -0.47</p>	<p>T<sub>max</sub>: positiva baja a moderada: 0.17-0.52</p> <p>T<sub>min</sub>: positiva baja -moderada: 0.2-0.58</p>	<p>Prcp: Positivo alta: 0.66-0.8</p> <p>T<sub>max</sub>: positivo baja-alta: 0.21-0.29</p> <p>T<sub>min</sub>: positivo moderada-alta: 0.4-0.62</p>
<b>MAM</b>	<p>T<sub>max</sub>: positiva baja-moderada: 0.27-0.4</p> <p>T<sub>min</sub>: positiva baja -moderada: 0.35-0.58</p>	<p>T<sub>max</sub>: negativa baja: -0.2 a -0.3</p> <p>T<sub>min</sub>: negativa baja-moderada: -0.18 a -0.47</p>	<p>Prcp: negativa baja: -0.3</p> <p>T<sub>max</sub>: positiva moderada-alta: 0.4-0.6</p> <p>T<sub>min</sub>: positiva baja-moderada: 0.27-0.63</p>	<p>Prcp: positiva alta: 0.6</p> <p>T<sub>max</sub>: negativa baja-moderada: -0.19 a -0.5</p> <p>T<sub>min</sub>: positiva baja-moderada: 0.25-0.5</p>

El Norte Grande presenta correlaciones bajas entre ONI e IOS, positivas y negativas respectivamente, y la temperatura. La región Niño 3.4 tienen correlaciones negativas con la precipitación y positiva con temperatura. El Niño 1+2 y la temperatura presenta una correlación positiva.

La relación más fuerte fue entre la región Niño 1+2 y precipitación en DJF, esta correlación se debilita en los otros meses del año, pero se mantiene con una significancia estadística.

### 3.3.1.2 Norte Chico

**Tabla 3.5 Correlaciones estacionales en el Norte Chico – método de Pearson**

	<b>ONI</b>	<b>IOS</b>	<b>Niño 3.4</b>	<b>Niño 1+2</b>
<b>JJA</b>	Prcp: positiva baja: 0.23-0.38 T <sub>max</sub> : positiva baja: 0.2 T <sub>min</sub> : positiva moderada: 0.3- 0.44	Prcp: negativa bajo: -0.25 a -0.4 T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.2 a -0.3 T <sub>min</sub> : negativa baja: -0.3 a -0.37	Prcp: positiva baja: 0.25 T <sub>max</sub> : positiva moderada: 0.33- 0.48 T <sub>min</sub> : positiva moderada: 0.35	T <sub>max</sub> : positiva moderada: 0.3- 0.48 T <sub>min</sub> : positiva baja: 0.2-0.3
<b>SON</b>	Prcp: positivo bajo: 0.2 T <sub>max</sub> : positivo bajo: 0.2-0.3 T <sub>min</sub> : positivo bajo-moderado: 0.26-0.35	Prcp: negativa baja: -0.25 T <sub>min</sub> : negativo bajo: -0.3	Prcp: positivo bajo: 0.22 T <sub>max</sub> : positivo bajo: 0.2-0.38 T <sub>min</sub> : positivo bajo-moderado: 0.2-0.36	Prcp: positivo bajo: 0.2
<b>DJF</b>	T <sub>max</sub> : positiva baja: 0.2-0.3	T <sub>max</sub> : negativa baja -0.25 a -0.36 T <sub>min</sub> : negativa baja: -0.1 a -0.26	T <sub>max</sub> : positiva baja: 0.25	Prcp: Positivo baja-alta: 0.31-0.77 T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.2 T <sub>min</sub> : positivo baja-moderado: 0.1-0.48
<b>MAM</b>	T <sub>max</sub> : positiva baja: 0.18-0.26 T <sub>min</sub> : positiva moderada: 0.25-0.47	T <sub>min</sub> : negativa baja: -0.23 a -0.3	T <sub>max</sub> : positiva moderada: 0.3-0.48 T <sub>min</sub> : positiva baja-moderada: 0.17-0.51	T <sub>max</sub> : negativa baja-moderada: -0.26 a -0.43 T <sub>min</sub> : positiva baja-moderada; 0.32-0.56

Para el Norte Chico, la temperatura presenta relaciones positivas entre el ONI y negativa con IOS, con la región Niño 3.4 se presenta una correlación positiva y la región Niño 1+2 tiene una correlación positiva alta en DJF y baja en SON, la

temperatura mínima presenta una correlación positiva baja constante durante DJF, MAM y JJA

### 3.3.1.3 Zona Central:

**Tabla 3.6 Correlaciones estacionales en la Zona Central – método de Pearson**

	ONI	IOS	Niño 3.4	Niño 1+2
<b>JJA</b>	Prcp: positiva baja: 0.2-0.36 T <sub>min</sub> : positiva baja; 0.18-0.34	Prcp: negativa bajo: -0.37 T <sub>min</sub> : negativa baja-moderada; -0.22 a -0.42	Prcp: positiva baja: 0.25 T <sub>min</sub> : positiva baja; 0.2	-
<b>SON</b>	Prcp: positivo bajo -moderado: 0.2-0.42 T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.23 a -0.34	Prcp: negativa baja-moderada: -0.17 a -0.45 T <sub>max</sub> : positivo bajo: 0.17-0.25	Prcp: positivo bajo-moderado: 0.17-0.42 T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.24 a -0.35	Prcp: positivo bajo: 0.19-0.27 T <sub>min</sub> : positiva baja: 0.2-0.37
<b>DJF</b>	-	-	-	T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.17 a -0.29
<b>MAM</b>	-	-	T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.22 a -0.28	T <sub>max</sub> : positiva baja-moderada: 0.24-0.5 T <sub>min</sub> : positiva baja-moderada; 0.26-0.53

En la Zona Central hay un número menor de correlaciones significativas, donde las correlaciones más fuertes son las presentadas en MAM entre la temperatura y la región Niño 1+2.

### 3.3.1.4 Zona Sur:

**Tabla 3.7 Correlaciones estacionales en la Zona Sur– método de Pearson**

	ONI	IOS	Niño 3.4	Niño 1+2
<b>JJA</b>	T <sub>min</sub> : positiva baja: 0.19-0.25	Prcp: negativa bajo: -0.37 T <sub>min</sub> : negativa baja-moderada; --- 0.22 a -0.34	T <sub>min</sub> : positiva baja: 0.18-0.31	-
<b>SON</b>	Prcp: positivo bajo -moderado: 0.2-0.38 T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.22 a - 0.34	Prcp: negativa moderada: -0.32 a -0.41 T <sub>max</sub> : positivo bajo: 0.21-0.33	Prcp: positivo bajo-moderado: 0.2-0.38 T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.19 a -0.33	-
<b>DJF</b>	-	-	-	-
<b>MAM</b>	T <sub>max</sub> : positiva baja: 0.2	T <sub>min</sub> : negativa baja: -0.18 a -0.28	T <sub>min</sub> : positiva moderada:0.32- 0.42	T <sub>max</sub> : positiva baja- moderada: 0.19-0.48

En la Zona Sur no se presentan correlaciones significativas mayores a 0.1 en DJF, durante MAM la correlación más fuerte de la Zona Sur entre la temperatura máxima y la región Niño 1+2.

### 3.3.1.5 Zona Austral:

**Tabla 3.8 Correlaciones estacionales en la Zona Austral– método de Pearson**

	ONI	IOS	Niño 3.4	Niño 1+2
<b>JJA</b>	-	-	-	-
<b>SON</b>	T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.21 a -0.34	Prcp: negativa baja: -0.2 a -0.28 T <sub>max</sub> : positivo bajo: 0.19-0.35	T <sub>max</sub> : negativa baja: -0.2 a -0.33	-
<b>DJF</b>	-	-	-	-
<b>MAM</b>	T <sub>max</sub> : positiva baja: 0.2	-	-	T <sub>max</sub> : positiva moderada: 0.35-0.45

La Zona Austral presenta el menor número de correlaciones. La correlación más fuerte registrada es durante MAM entre la temperatura máxima y la región Niño 1+2 con un coeficiente positivo.

En general el Norte Grande y Chico presentan mayor cantidad de correlaciones, donde DJF tiene las relaciones más fuertes entre precipitación y la región Niño 1+2 para ambas Zonas, para temperatura máxima se presenta la mayor relación en MAM entre la región Niño 3.4 y temperatura máxima y mínima en el Norte Chico, para el Norte Grande esta relación se da en JJA. Además, a lo largo del año en ambas Zonas se presentan relaciones significativas entre temperatura y los índices ONI e IOS, positiva y negativa, respectivamente.

El número de relaciones entre las variables y las Zonas Central, Sur y Austral se reduce considerablemente, sugiriendo que la variabilidad de estas Zonas no hay una relación lineal estrecha con las variables oceánicas del Pacífico ecuatorial como las regiones Niño y los índices ONI e IOS

### **3.3.2 Método Kendall-Tau**

Los resultados de la correlación de Kendall-Tau entre las anomalías de precipitación y los índices son los siguientes. Para la serie de tiempo:

**Tabla 3.9 Coeficientes de correlación para las series de tiempo de las estaciones en precipitación– método de Kendall-Tau**

	<b>ONI</b>	<b>IOS</b>	<b>Niño 3.4</b>	<b>Niño 1+2</b>
<b>Precipitación</b>	Norte Chico a Sur: positivo bajo (0.1)	Norte Chico a Sur: negativo bajo (-0.1 a -0.17)	Norte Grande a Norte Chico: negativo bajo (-0.23)	Norte Grande a Central: positivo bajo (0.1-0.2)
			Central y Sur: positivo bajo (0.1-0.9)	Sur: negativo bajo (-0.1)
			Austral: Negativo bajo (-0.1)	Austral: Positivo bajo (0.1-0.2)

Para las estaciones del año, los resultados de correlación son los siguientes:

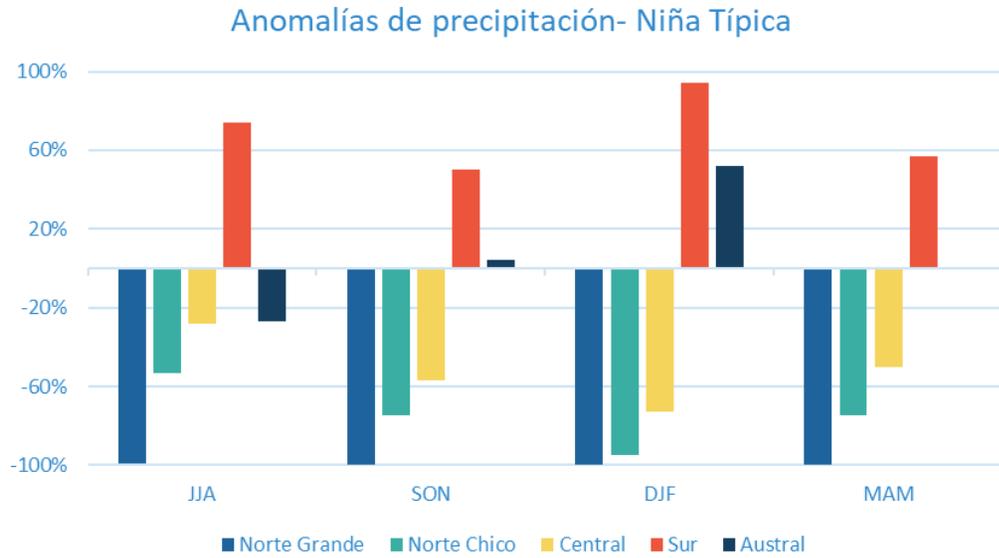
**Tabla 3.10 Coeficientes de correlación estacionales para precipitación– método de Kendall-Tau**

	<b>ONI</b>	<b>IOS</b>	<b>Niño 3.4</b>	<b>Niño 1+2</b>
<b>JJA</b>	Norte Chico a Central: positivo bajo (0.1-0.25)	-	Norte Grande: negativo bajo (-0.2 a -0.3) Norte Chico – Central: positivo bajo (0.1-0.16)	Norte Grande: negativo bajo-moderado (-0.27 a -0.46)
<b>SON</b>	Norte Chico a Sur: positivo bajo (0.1-0.3)	-	Norte Chico a Sur: positivo bajo (0.13-0.32)	Norte Grande a Central: positivo bajo (0.1-0.27) Austral: Positivo bajo (0.1-0.2)

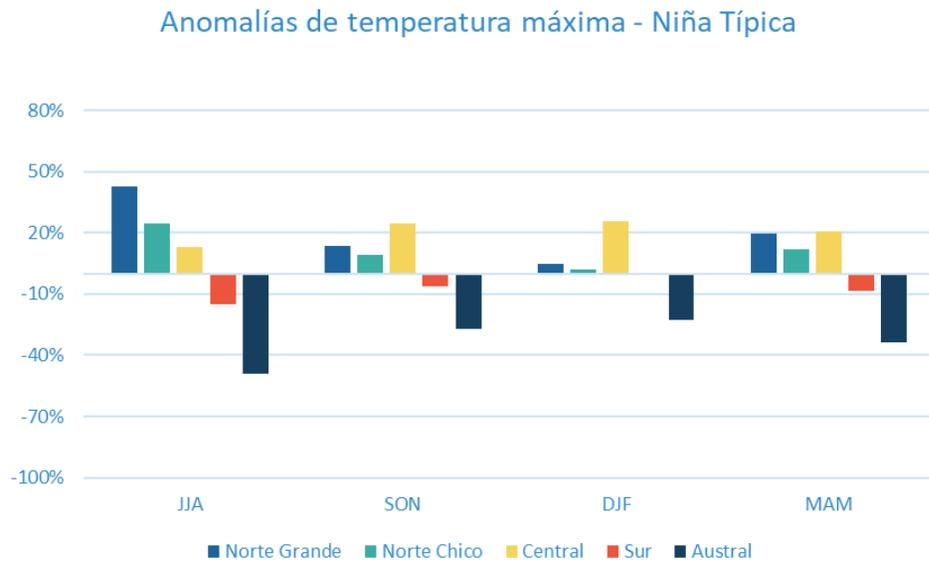
<b>DJF</b>	-	-	-	Norte Grande a Central: positivo alta (0.4-0.7)
<b>MAM</b>	-	-	Norte Grande a: negativo bajo (-0.23)	Norte Grande: positivo alto (0.5) Norte Chico-Central: positivo bajo (0.15-0.4) Austral: positivo bajo (0.1-0.3)

La correlación de Kendall-Tau muestra una relación fuerte entre la Zona de Norte Grande y la región Niño 1+2, similar a Pearson, con esto es posible asegurar que existe una influencia oceánica del Pacífico en el comportamiento de precipitación en el Norte Grande de Chile, manteniéndose significativa en todo el año y tomando mayor fuerza durante DJF.

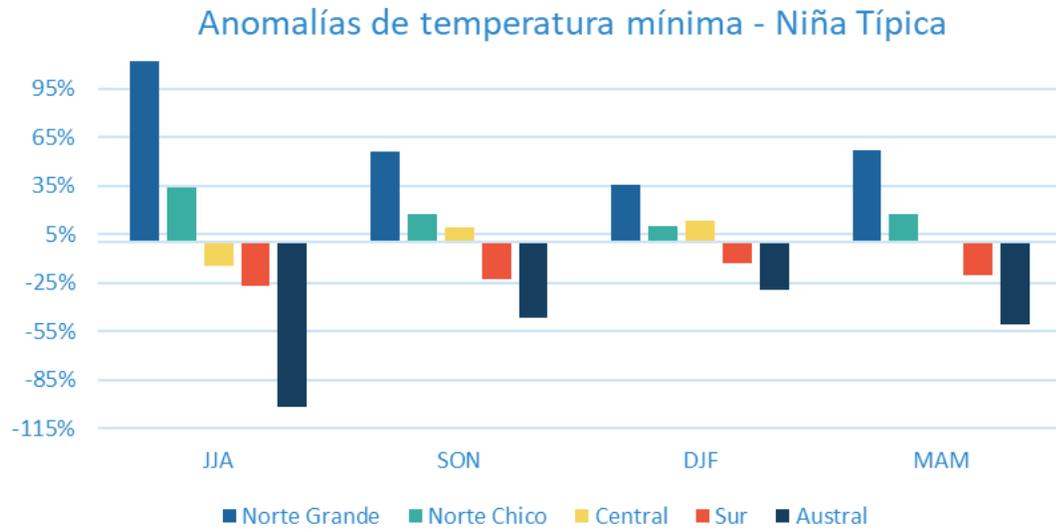
### 3.4 Comportamiento de La Niña Típica



**Figura 3.1 Anomalías de precipitación durante La Niña Típica**



**Figura 3.2 Anomalías de temperatura máxima durante La Niña Típica**

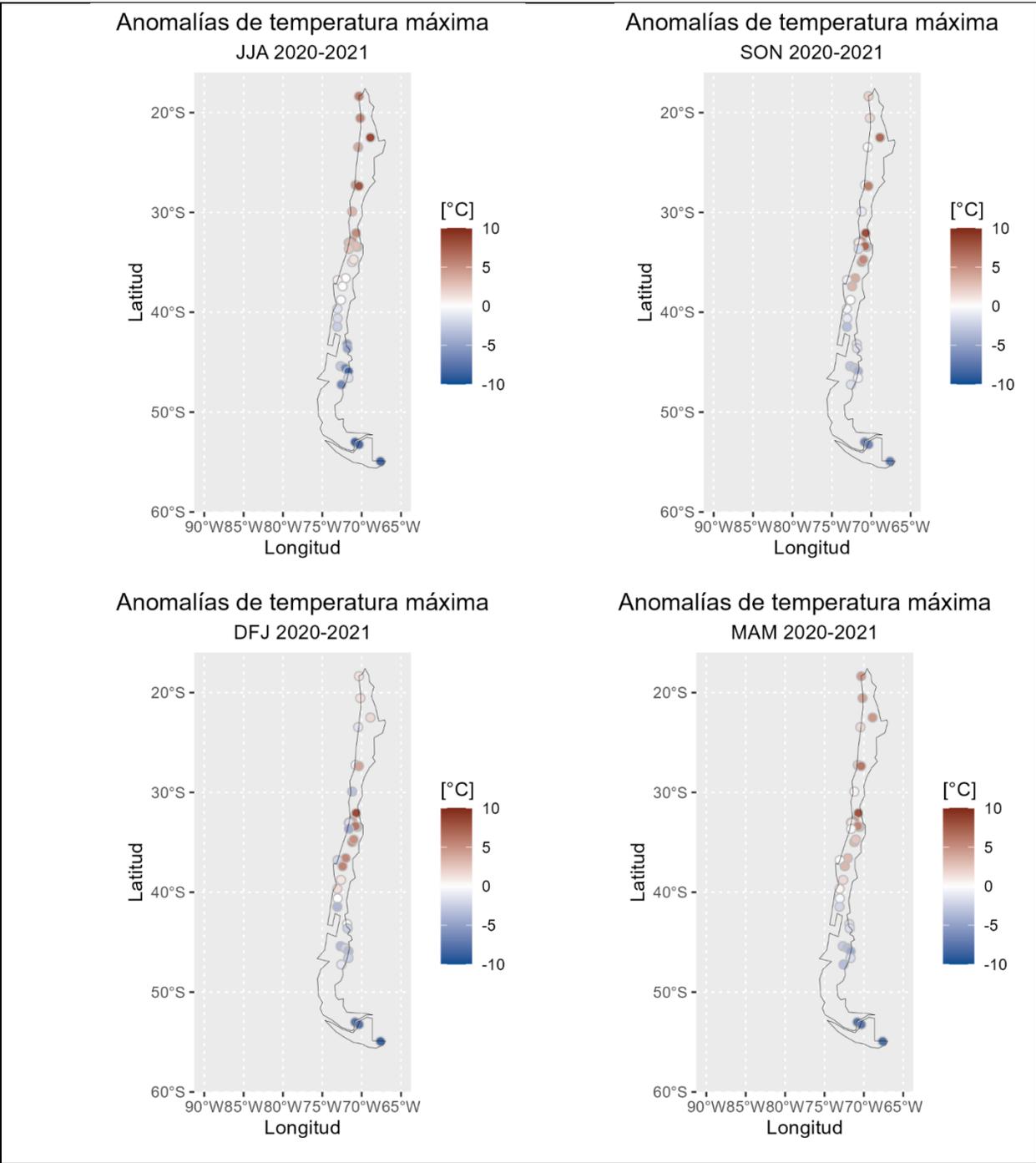


**Figura 3.3 Anomalías de temperatura mínima durante La Niña Típica**

Durante La Niña Típica, el Norte Grande y Norte Chico presentaron anomalías negativas de precipitación y anomalías de temperatura positivas; la Zona Central registró un patrón similar para precipitación y temperatura máxima, pero la temperatura mínima se observaron valores negativos y positivos.

En la Zona Sur las anomalías de precipitación fueron positivas y las anomalías de temperatura negativas, mientras que en la Zona Austral registró anomalías de precipitación positivas y negativas, y anomalías de temperatura negativas.

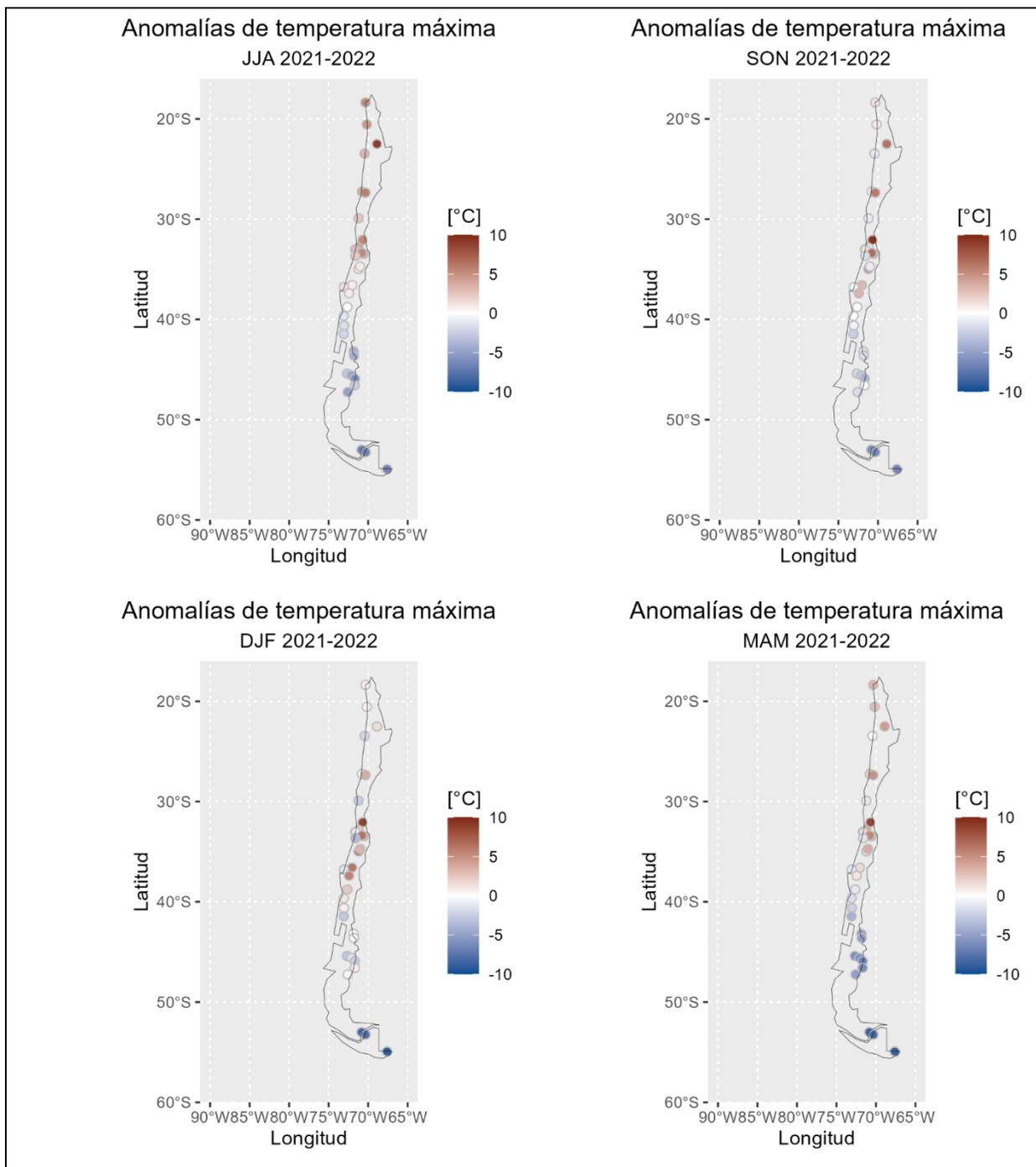
### **3.5 Mapas de anomalías de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación de Las Niñas 2020-2022.**



**Figura 3.4 Anomalías de temperatura máxima durante La Niña 2020-2021**

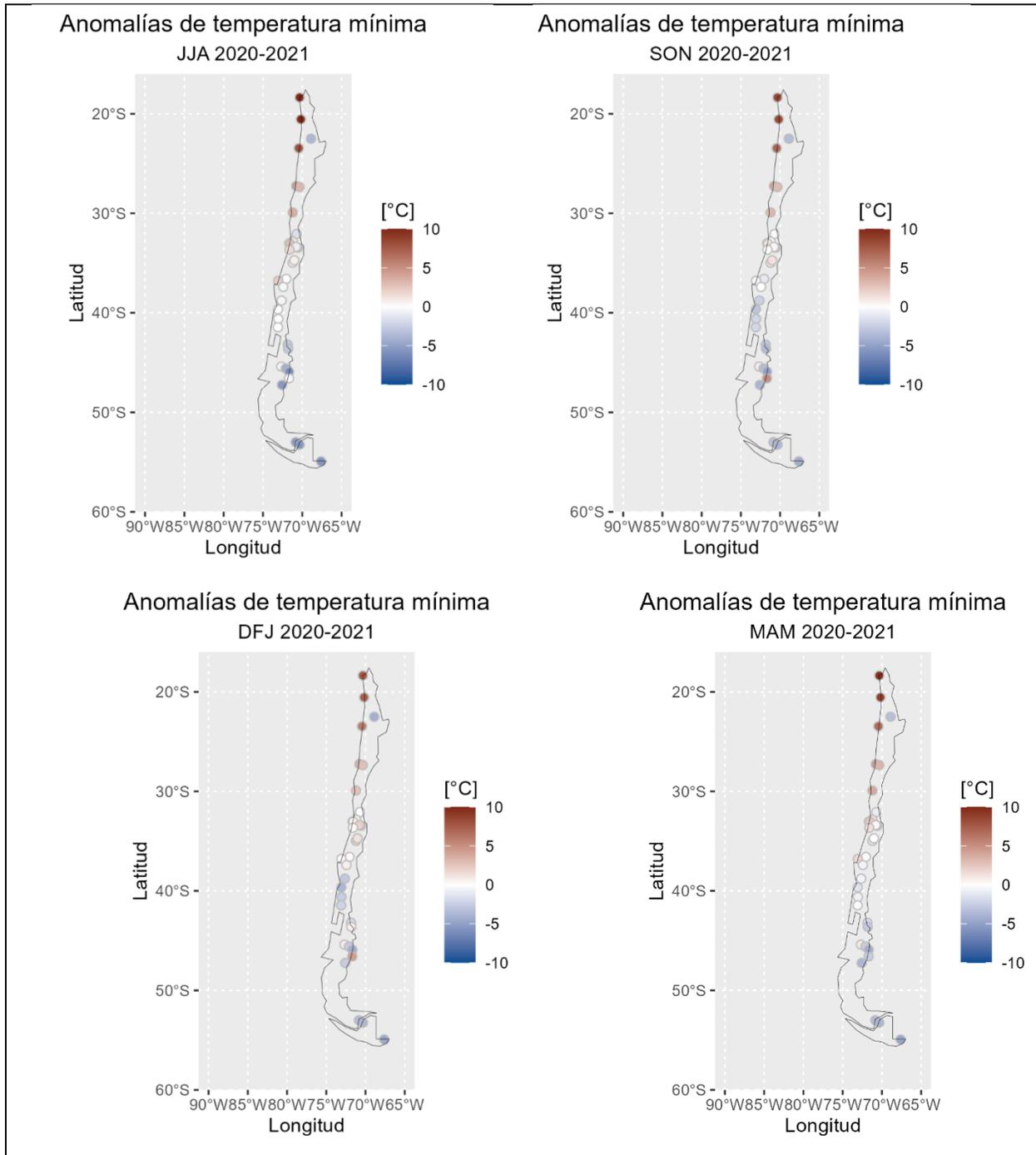
Norte Grande y Norte Chico presentaron anomalías positivas que disminuyen durante DJF. La Zona Austral presenta anomalías negativas durante todo el ciclo,

las que se encuentran en el límite entre la Zona Central y Sur se intensificaron durante JJA. La Zona Central, durante JJA, mantuvo anomalías cercanas a 0 y el resto del año aumentaron ligeramente.



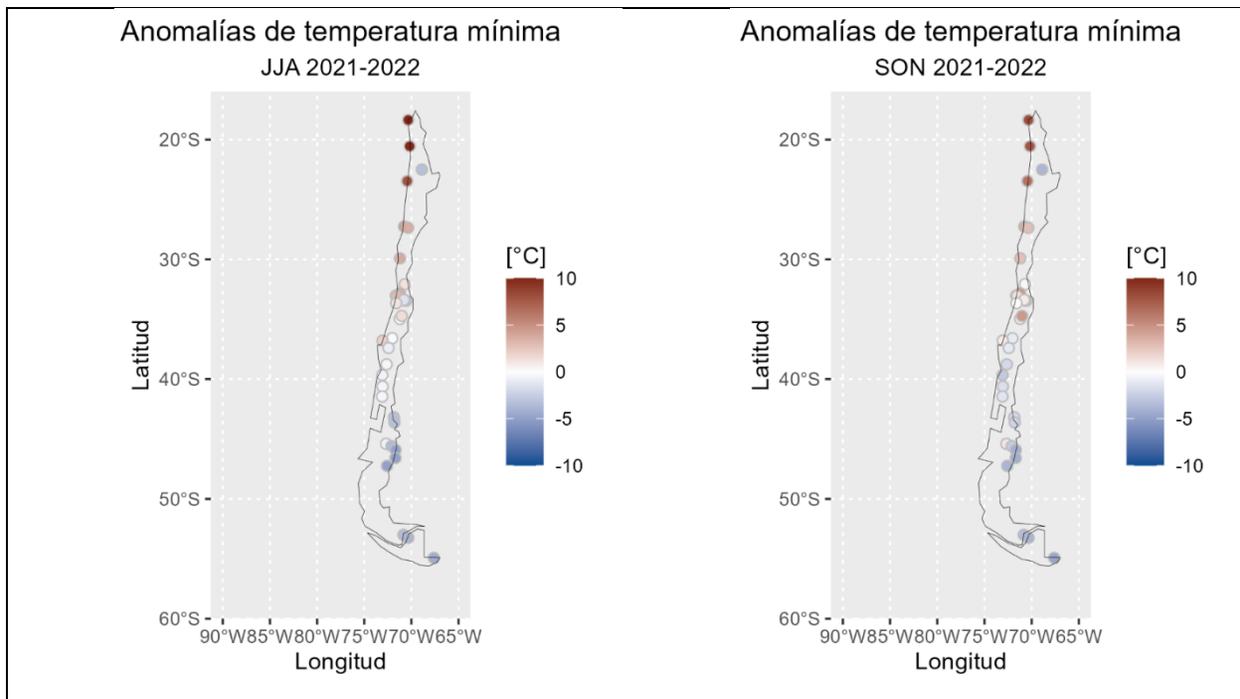
**Figura 3.5 Anomalías de temperatura máxima durante La Niña 2021-2022**

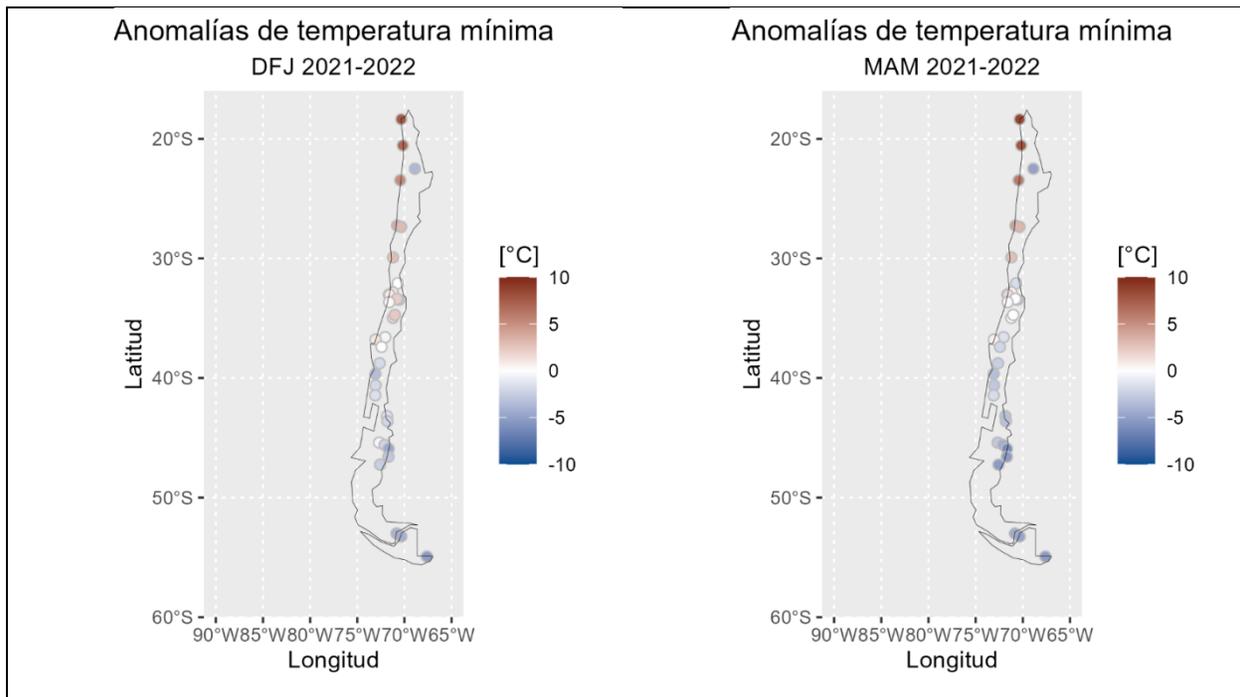
La Niña 21-22 continuo el comportamiento de 20-21, aunque las anomalías negativas incrementaron su magnitud a finales de 21-22.



**Figura 3.6 Anomalías de temperatura mínima durante La Niña 2020-2021**

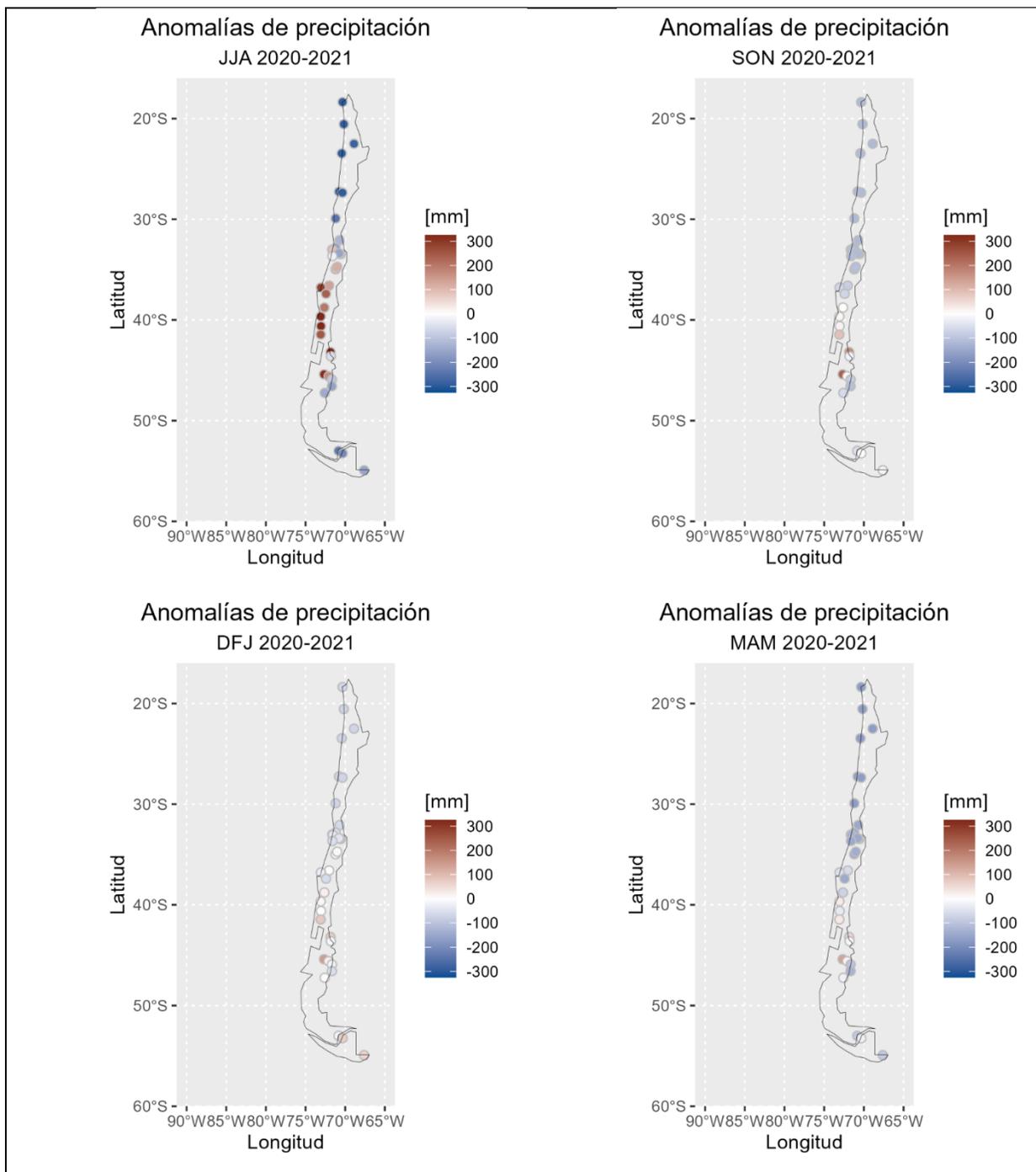
En Norte Grande las anomalías de temperatura mínima se mantuvieron positivas y altas en el transcurso del año, las anomalías en Norte Chico y algunas en la zona Central se acercaron a 0. Mientras que en la zona Sur y Austral presentaron anomalías negativas, excepto por una estación en la zona austral (Chile Chico) durante SON y DJF, con anomalías positivas.





**Figura 3.7 Anomalías de temperatura mínima durante La Niña 2021-2022**

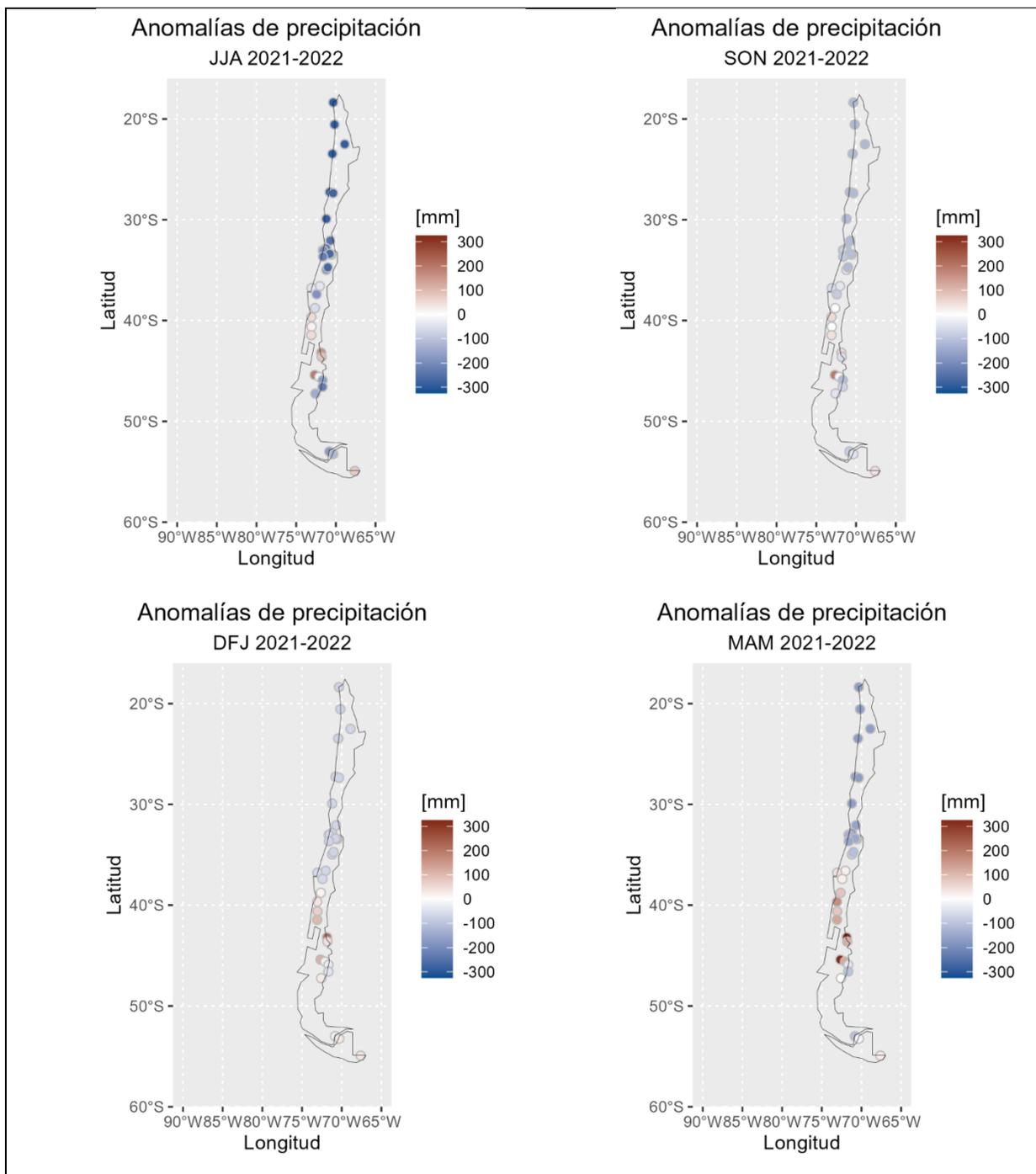
Durante La Niña 21-22 las anomalías mantuvieron valores similares a 20-21, excepto por una estación en la Zona Austral que presenta valores negativos durante 20-21 y positivos durante 21-22.



**Figura 3.8 Anomalías de precipitación durante La Niña 2020-2021**

Durante JJA las anomalías de precipitación fueron más intensas, en el resto del ciclo, el Norte Grande, Norte Chico y Central presentaron anomalías negativas,

mientras que, en la Zona Sur y Austral, se registraron valores negativos, a excepción del DJF en Austral donde los valores son ligeramente positivos.



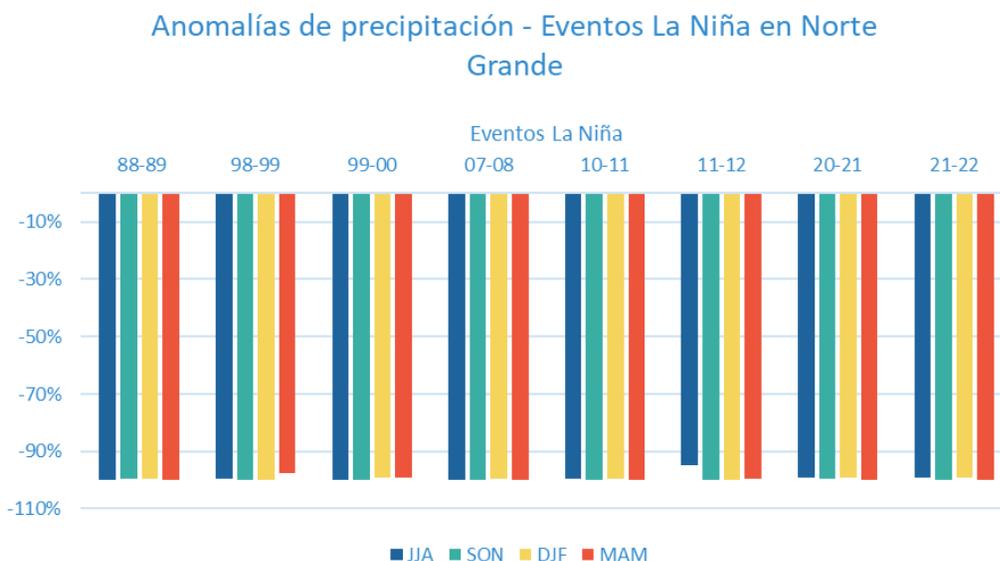
**Figura 3.9 Anomalías de precipitación durante La Niña 2021-2022**

Durante 21-22 el comportamiento de las anomalías de precipitación es similar a 20-21, excepto por de MAM, en 21-22 las anomalías positivas en el Sur incrementaron en intensidad.

### 3.6 Comparación de Las Niñas 20-21 y 21-22 con Niñas históricas por Zona.

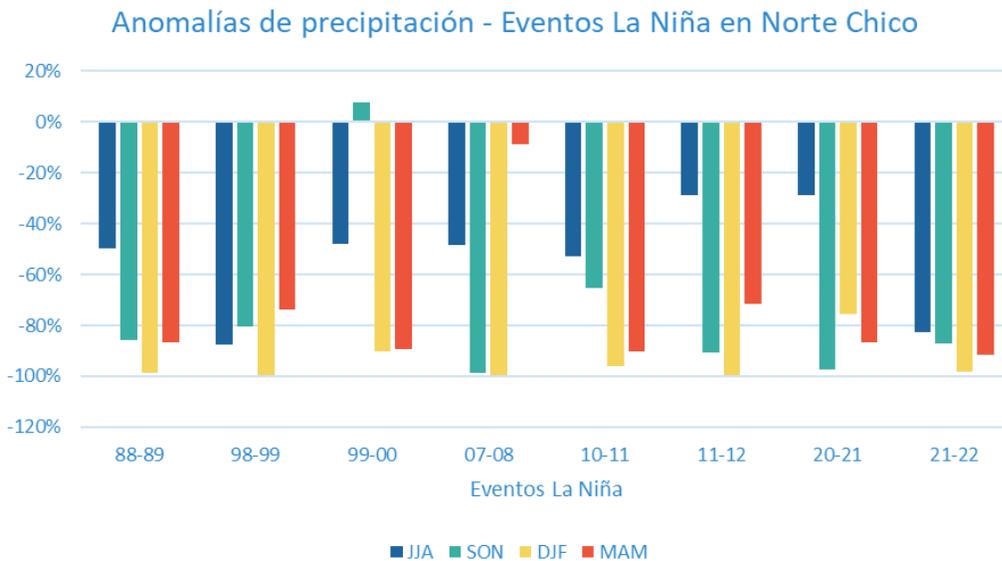
#### 3.6.1 Comparación de anomalías precipitación por Zonas

Para la precipitación, durante DJF se registran anomalías negativas mayores en todas las Zonas, mientras que durante JJA las anomalías de precipitación son menores, es decir que en verano se presentan menores precipitaciones y en invierno se presentan precipitaciones más cercanas a la normal.



**Figura 3.10 Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en Norte Grande**

Norte Grande presentó un comportamiento similar en los eventos con niveles de precipitación en todo el ciclo con anomalías cercanas al 100%.

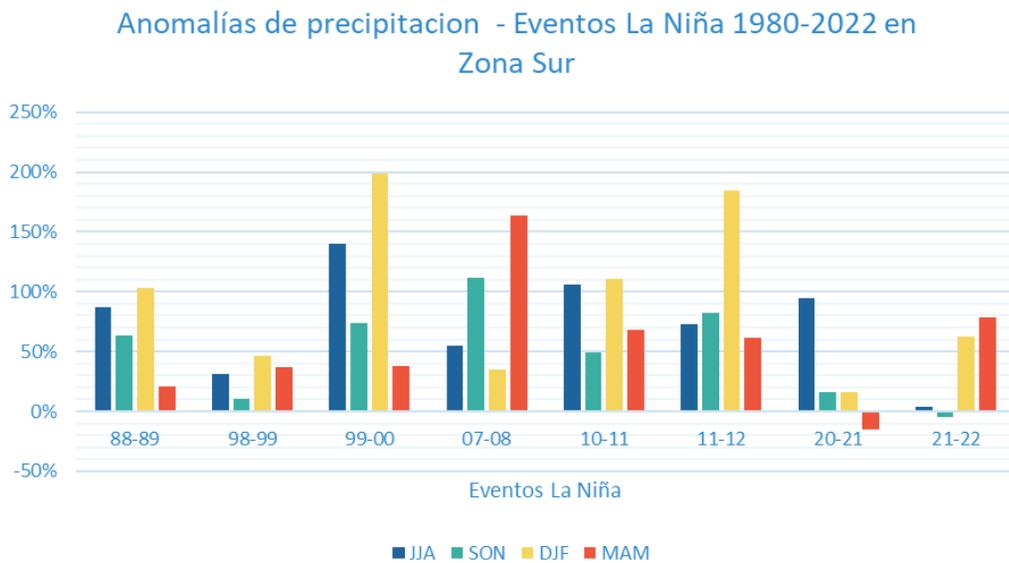
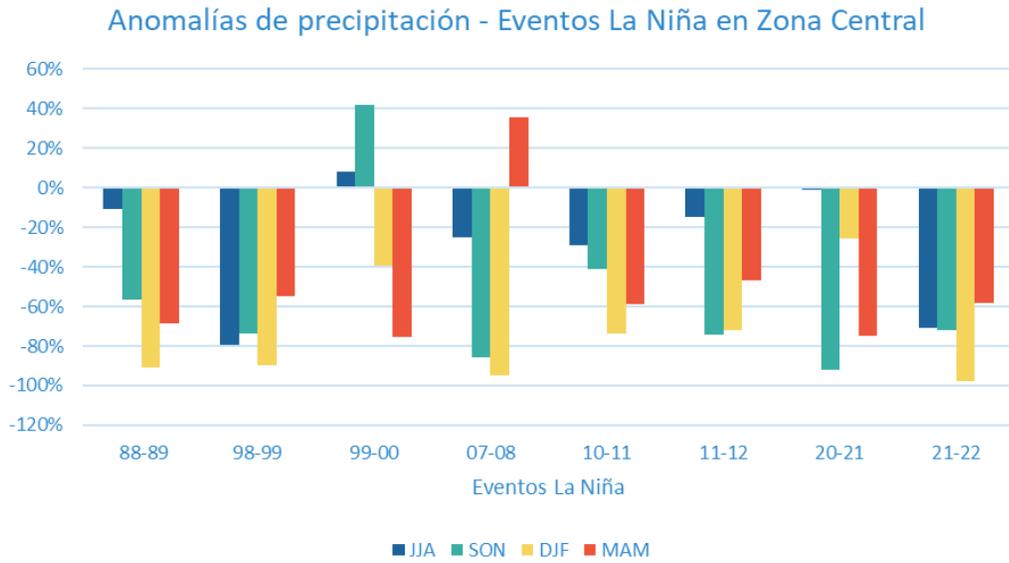


**Figura 3.11 Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en Norte Chico**

En Norte Chico, las anomalías de precipitación fueron similares entre sí, siguiendo la tendencia de eventos anteriores en DJF. La Niña 21-22 fue más intensa que La Niña 20-21 durante JJA.

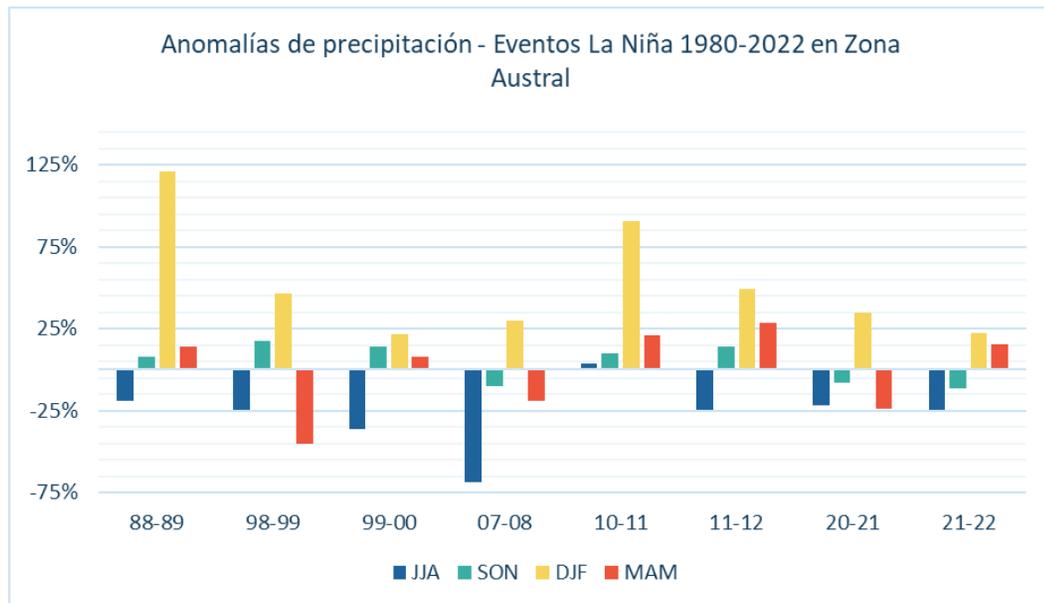
**Figura 3.12 Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en la Zona Central**

En la Zona Central se presentó un patrón de comportamiento general, excepto durante La Niña 99-00 y Niña 07-08 que registran unas anomalías positivas. La Niña 20-21 registra un patrón similar en el transcurso del ciclo a La Niña 98-99.



**Figura 3.13 Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en la Zona Sur**

Las anomalías de precipitación de la Zona Sur mostraron mayor variabilidad, La Niña 20-21 y La Niña 21-22 tiene anomalías menores a Las Niñas históricas, aunque contrasta en el ciclo JJA de La Niña 20-21, donde la intensidad de la anomalía fue cercana al 100%.

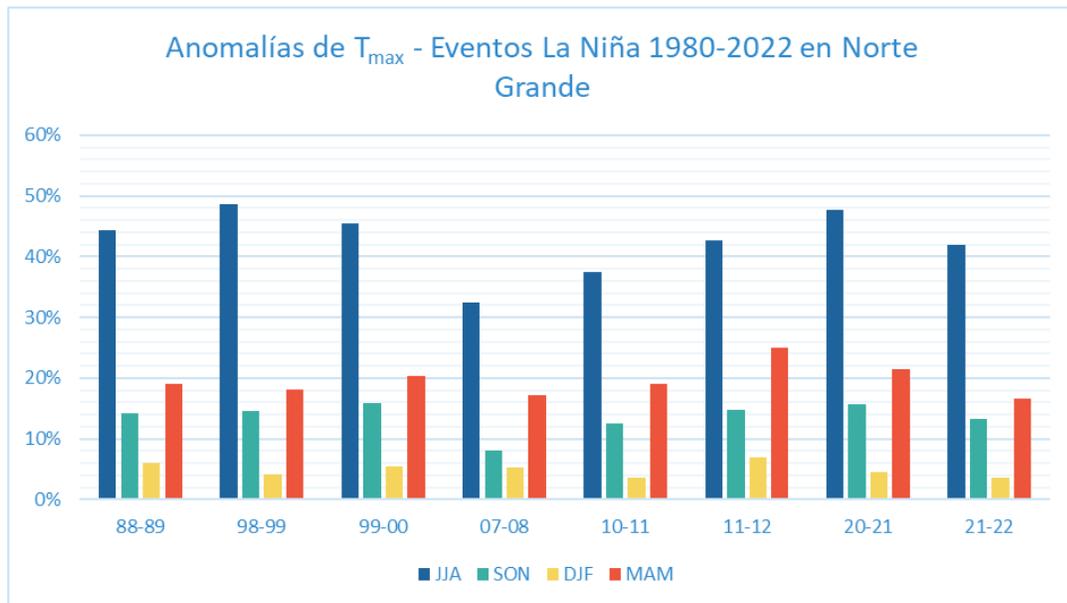


**Figura 3.14 Anomalías de precipitación durante eventos históricos La Niña en la Zona Austral**

En la Zona Austral las anomalías de precipitación fueron menos predecibles, durante JJA históricamente tienden a anomalías negativas, mientras que durante DJF tienden a anomalías positivas.

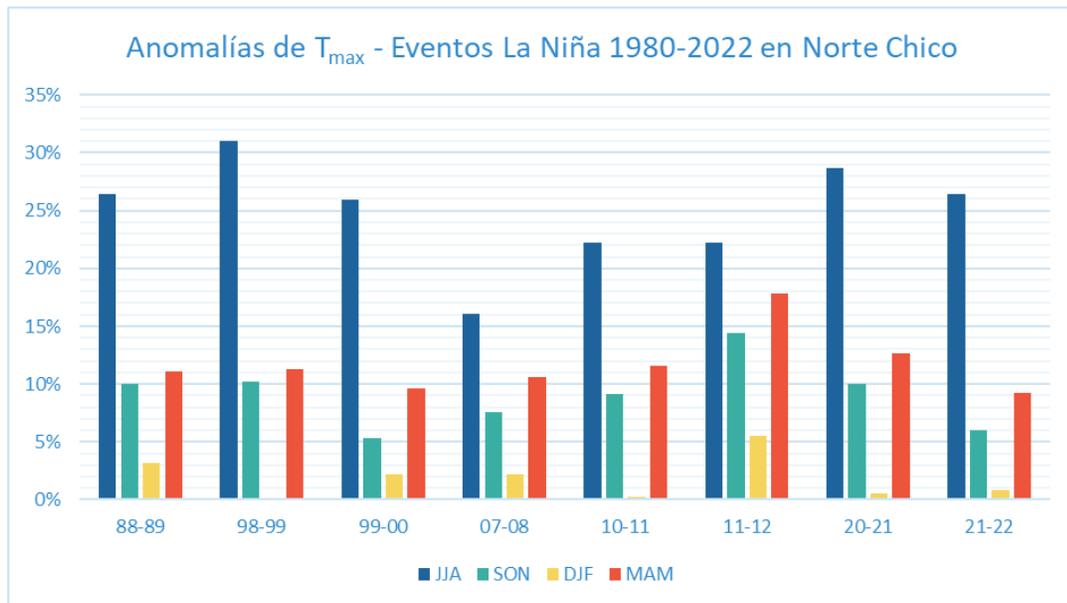
### 3.6.2 Comparación de anomalías de temperatura máxima por Zonas.

A lo largo de la serie de tiempo 1980-2022, las anomalías de temperatura máxima fueron mayores durante JJA, mientras que DJF presentó anomalías menores. En Norte Grande, Norte Chico y Zona Austral presentaron mayores de anomalías durante JJA y MAM, mientras que, la Zona Central registró el comportamiento inverso, presentando las anomalías menores durante JJA y MAM.



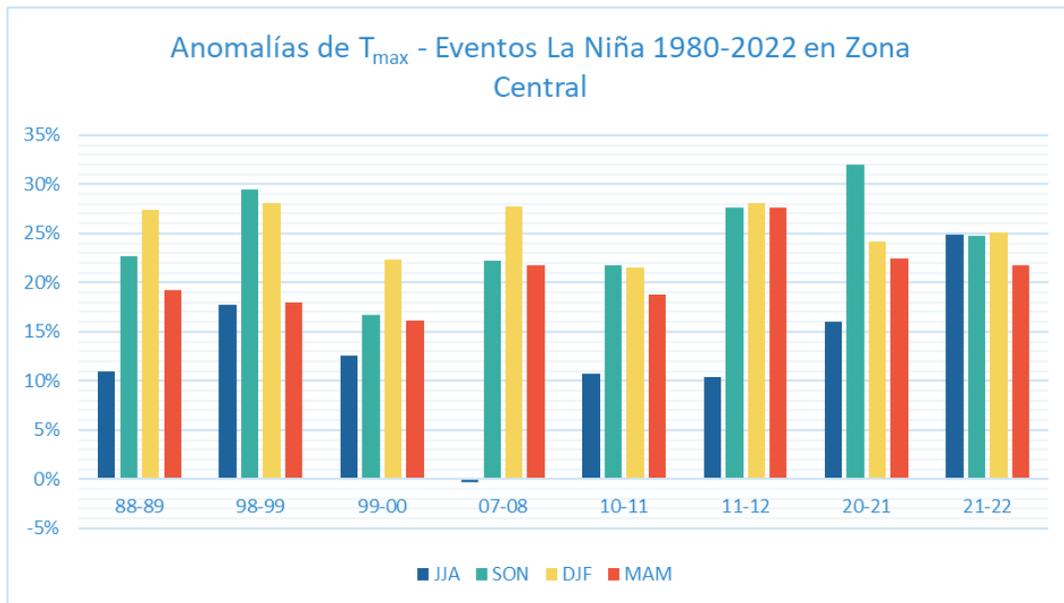
**Figura 3.15 Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña en Norte Grande**

En Norte Grande, las anomalías son similares entre sí, donde JJA inició con anomalías altas, que disminuyeron en SON y DJF, y vuelven a incrementar en MAM.



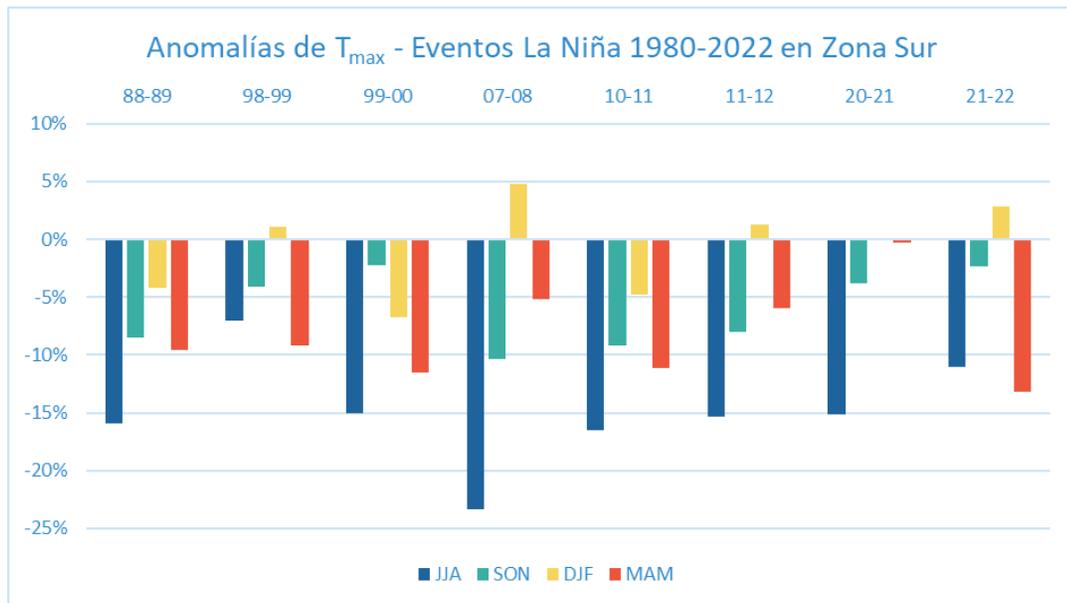
**Figura 3.16 Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña en Norte Chico**

Norte Chico sigue el mismo patrón que Norte Grande, pero con anomalías de menor magnitud. Además, en 20-21 se presentaron anomalías mayores que 21-22. La Niña 21-22 presenta magnitud y comportamiento similar a La Niña 99-00.



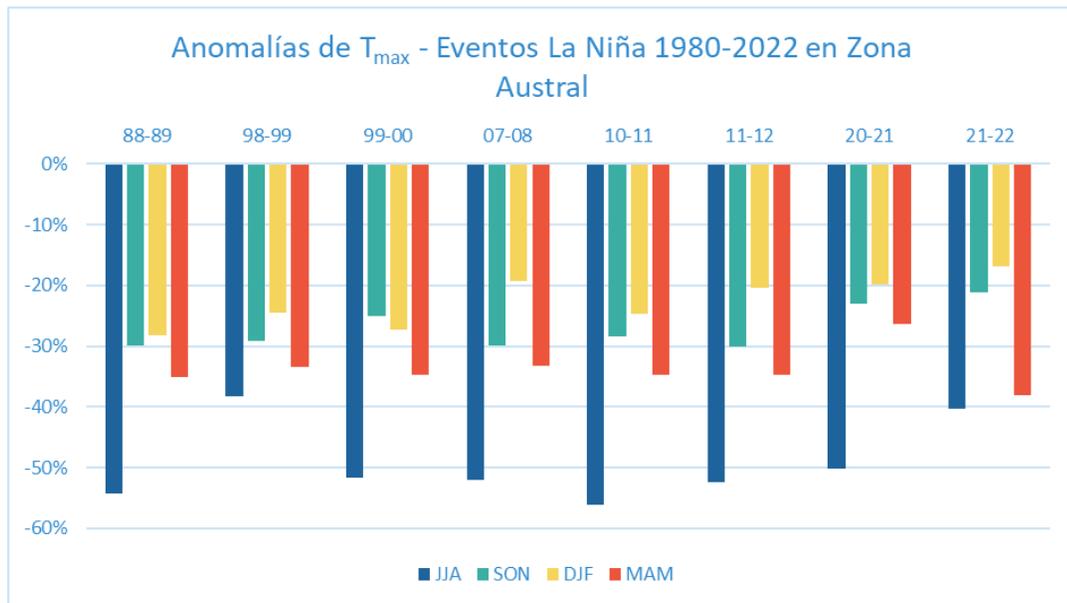
**Figura 3.17 Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña en la Zona Central**

La Zona Central se comportó de manera inversa a Norte Grande y Norte Chico, presentando magnitudes mayores durante SON y DJF. Durante La Niña 21-22 las anomalías fueron muy cercanas a 25%, excepto al final en MAM.



**Figura 3.18 Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña la Zona Sur**

En la Zona Sur, las anomalías de La Niña 20-21 fueron cercanas a cero en DJF y MAM, además, durante La Niña 20-21 y 21-22 se presentaron valores negativos, excepto por DJF de La Niña 21-22, que registró anomalías positivas menores al 5%.

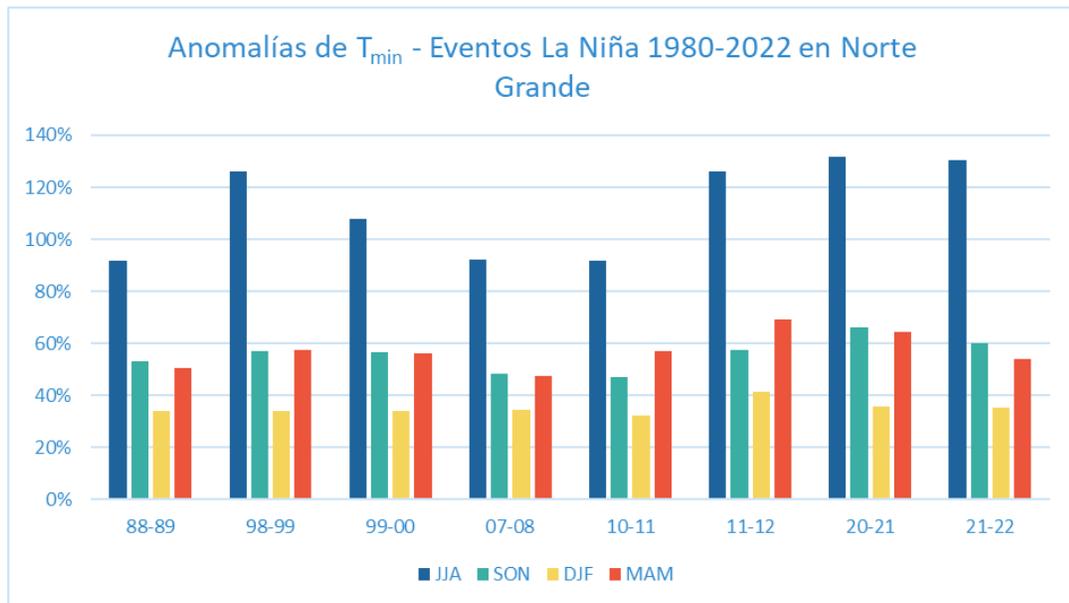


**Figura 3.19 Anomalías de temperatura máxima durante eventos históricos La Niña en la Zona Austral**

En la Zona Austral durante JJA se registraron anomalías mayores y en DJF las anomalías más bajas, en general, La Niña 20-21 fue mayor a La Niña 21-22, principalmente durante JJA, exceptuando MAM.

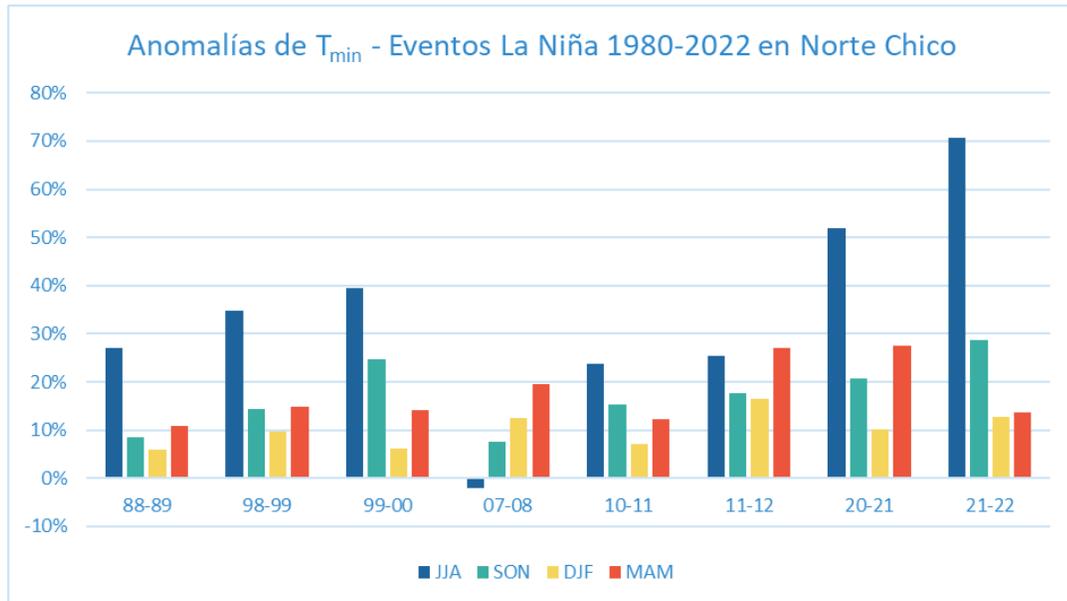
### 3.6.3 Comparación de anomalías de temperatura mínima por Zonas.

En general, las anomalías de temperatura mínima presentaron magnitudes mayores que las anomalías de temperatura máxima, indicando que existe mayor variabilidad en la temperatura mínima.



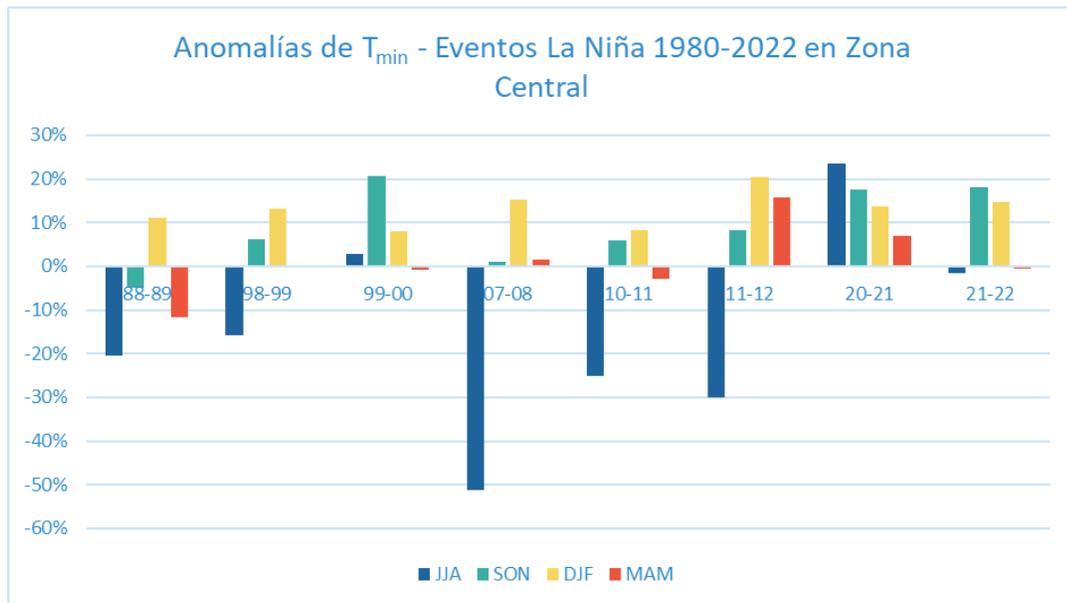
**Figura 3.20 Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en Norte Grande**

En Norte Grande el comportamiento fue similar entre la temperatura máxima y mínima, aunque la magnitud en la temperatura mínima fue mayor.



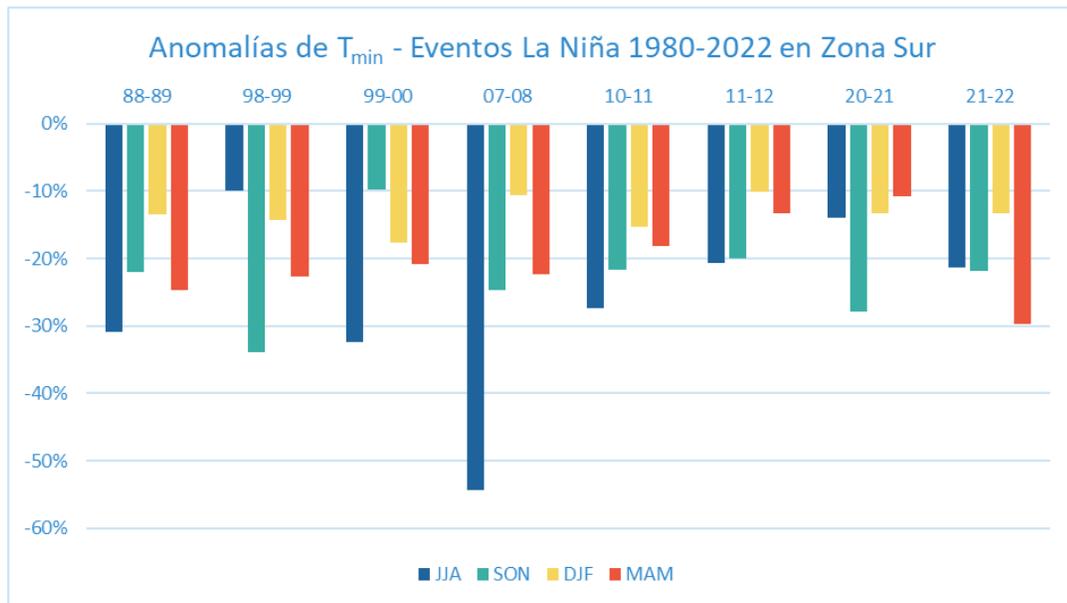
**Figura 3.21 Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en Norte Chico**

El Norte Chico presentó el mismo patrón que temperatura máxima excepto para La Niña 07-08 que registró anomalías negativas durante JJA. Además, La Niña 20-21 y 21-22 presenta anomalías mayores a Las Niñas históricas.



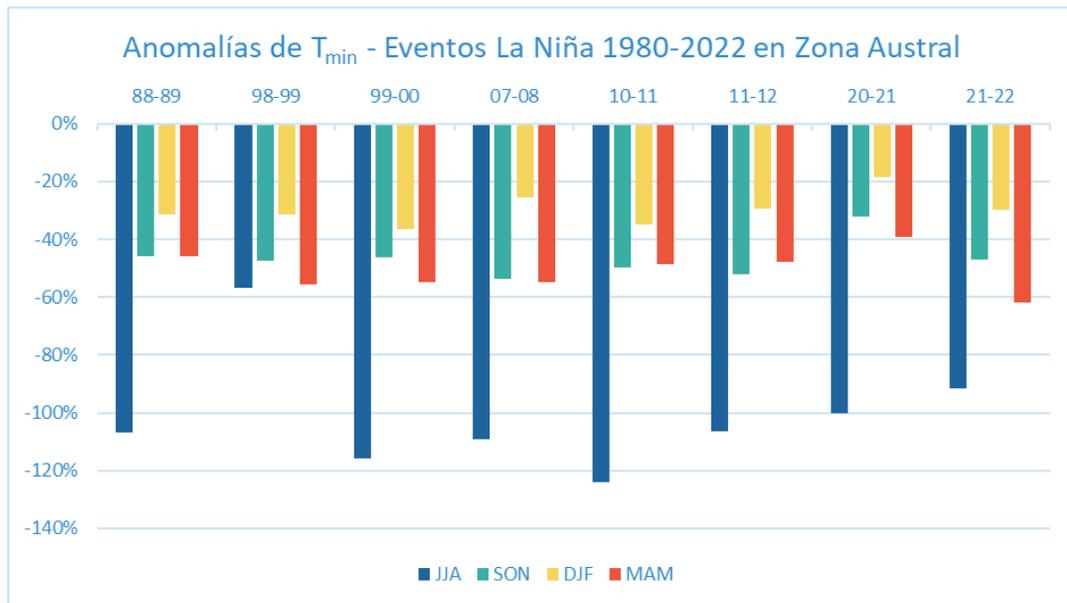
**Figura 3.22 Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en la Zona Central**

En la Zona Central la temperatura mínima presentó mayor variabilidad que la temperatura máxima, durante JJA históricamente se registraron anomalías negativas, pero en La Niña 20-21 la anomalía fue positiva. Además, La Niña 20-21 y 21-22 presentaron anomalías similares en SON y DJF.



**Figura 3.23 Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en la Zona Sur**

En la Zona Sur, las anomalías de temperatura mínima presentaron un patrón similar a temperatura máxima, pero con signo negativo. En general La Niña 21-22 fue mayor a La Niña 20-21, excepto por SON.



**Figura 3.24 Anomalías de temperatura mínima durante eventos históricos La Niña en la Zona Austral**

En la Zona Austral las temperaturas mínimas se comportaron de manera similar a la temperatura máxima, pero su intensidad fue mayor. La Niña 21-22 presentó anomalías más intensas que 20-21, excepto durante JJA.

De manera general, En Norte Grande y Norte Chico las temperaturas máximas y mínimas fueron mayores a la normal, mientras que en la Zona Sur y Austral las anomalías tienden a ser negativas. Por otro lado, la Zona Central, difiere su comportamiento de temperatura máxima y mínima, siendo en temperatura máxima todas sus anomalías positivas, mientras que en temperatura mínima presenta valores de anomalía negativos durante JJA, es decir que durante JJA la temperatura mínima es menor a la esperada, lo que implica un rango de temperatura más amplio.

### 3.7 Análisis de costos

En las tablas 12 y 13 se mencionan los costos involucrados en el desarrollo del proyecto de investigación, en las herramientas incluye un computador que satisfaga la demanda computacional y licencia del programa usado. Por otro lado, se requiere dos profesionales. Es así como se requiere en total \$7 240 para cubrir el costo del proyecto.

**Tabla 3.11 Descripción de insumos utilizados en el proyecto**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>
Computadora Core I7 Almacenamiento: 1t Memoria Ram: 16gb	1	\$1.5000
Software R Studio	1	\$0 Libre acceso
Licencia Matlab	1 año	\$940

**Tabla 3.12 Descripción de recursos humanos solicitados en el proyecto**

<b>Personal</b>	<b>Cantidad De Meses</b>	<b>Salario Por Mes</b>	<b>Costo Total</b>
Ingenieros Oceanográficos Jr.	4	\$2400	\$4800

# CAPÍTULO 4

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

#### 4.1.1 Correlaciones con los índices del El Niño.

El porcentaje de varianza explicada por el primer modo de EOF es mayor en las regiones del norte y decrece conforme se traslada al sur del país, siendo este porcentaje menor en la Zona Austral con un 52.32%. Es decir, en el Norte hay mayor homogeneidad en el comportamiento de datos y en la Zona Austral menor. Esta variabilidad en Zonas cercanas a los polos se debe a que en la Zona Sur la mayoría de las estaciones están localizadas al oeste de la cordillera mientras que las dos últimas estaciones al este, por lo que se pueden enmascarar los datos, mientras que la Zona Austral las estaciones están más alejadas entre sí y se encuentran al oeste de la cordillera.

Las correlaciones altas encontradas indican que, en las regiones norte, la relación es directamente proporcional entre la temperatura máxima, mínima y la región Niño 3.4, mientras que la temperatura máxima es inversamente proporcional al Niño 1+2.

El número de estaciones meteorológicas que presentan una correlación significativa es mayor en las Zonas del Norte y decrece en las Zonas Sur y Austral, indicando que la influencia de las regiones Niño, el ONI y el IOS decrece conforme la latitud se acerca a los polos. Lo que es congruente considerando que algunas estaciones de la Zona Sur y todas las estaciones de la Zona Austral al estar al este de la cordillera de los Andes, tiene menor influencia costera.

#### **4.1.1.1 Precipitación**

Durante La Niña Típica y durante Las Niñas 20-21 y 20-22, en Norte Grande, Norte Chico y Central las precipitaciones fueron menores a la normal. En las estaciones de Norte Grande se presentan precipitaciones hasta dos veces menores que la normal, y a medida que se acercan al Centro las estaciones tienden a presentar menores anomalías de precipitaciones.

En contraste con el Norte Grande, Chico y Zona Central, en la Zona Sur durante La Niña 20-22, el año 2020 comenzó con precipitaciones mayores a la normal, a lo largo del ciclo las anomalías de precipitación se reducen, y a finales del año 2022 se vuelven a presentar precipitaciones mayores a las esperadas.

Históricamente, durante JJA el Norte Grande, Norte Chico, Zona Central, tienen precipitaciones menores a la normal, mientras que en el resto de las estaciones del año (SON, DJF, MAM) de la Zona Austral y la Zona Sur las precipitaciones fueron mayores a las normales.

Además, en la frontera de Zona Central y Sur en los mapas se registra mayor variación entre las estaciones, a pesar de las estaciones estén cerca presentan gran variación en sus anomalías, con valores positivos y negativos, es decir en algunas estaciones llueve menos de lo esperado y otras estaciones llueve más de lo esperado, lo que se puede atribuir a la topografía del lugar, donde las llanuras orientales de la cordillera de los Andes tienen condiciones áridas y las occidentales húmedas.

#### **4.1.1.2 Temperatura del aire**

Las temperaturas máximas y mínimas fueron menores a la normal en Norte Grande, Norte Chico, Zona Sur y Austral. En la zona Central, durante JJA, las temperaturas máximas son mayores a la normal, pero las temperaturas mínimas son menores a la normal, lo que indica un mayor rango de temperaturas.

En Norte Grande, Norte Chico y Zona Austral los valores de temperatura máxima las magnitudes de la normal son mayores durante JJA y MAM, es decir, al inicio y al final del ciclo, mientras que, en la Zona Central, tienen el comportamiento inverso, presentando las anomalías menores durante JJA y MAM.

En la precipitación se registró menos patrones de comportamiento en la Zona Austral y Zona Sur, pero en la temperatura del aire es posible visualizar patrones.

#### **4.1.2 Comparación entre Las Niñas.**

De manera general La Niña 2020-2022 se comporta similar a La Niña Típica, pero en la Zona Sur y Austral la variabilidad ha sido mayor, lo cual coincide con el primer modo de variabilidad, menor al 70% en ambas Zonas.

En Norte Grande, Las Niñas en la serie de tiempo 1980-2022 presentan valores similares de anomalías entre eventos, tanto en precipitación como en temperatura del aire.

La Niña 20-21 y La Niña 21-22 presentan comportamientos similares a lo largo de Chile Continental, excepto en la Zona Sur, donde existe mayor variabilidad en la precipitación.

Las temperaturas del aire de Las Niñas 20-21 y 21-22 presentan mayor similitud de comportamiento entre Las Niñas entre 1980-2012, excepto las temperaturas mínimas en la Zona Central.

La temperatura mínima del aire en La Niña 21-22 es mayor a La Niña 20-21 en las Zonas Austral y Sur.

La temperatura máxima del aire de La Niña 20-21 es mayor a La Niña 21-22 en todo Chile Continental.

En la Zona Central las anomalías de precipitación entre La Niña 20-21 son similares a La Niña 98-99.

En la Zona Sur, Las Niñas 20-21 y 21-22, y La Niña 98-99 registran anomalías menores de precipitación comparado al resto de Niñas, y considerando la variabilidad de valores entre las estaciones, se podrían estar enmascarando entre sí.

#### **4.2 Recomendaciones**

Las correlaciones realizadas entre las variables de temperatura del aire y precipitación vs índices El Niño fueron lineales, se debe considerar implementar correlaciones no lineales en especial para datos de precipitación, el cual no tiene una distribución normal.

Se podría considerar las clasificaciones de La Niña que han realizado otros autores como La Niña CP (Centrado en el Pacífico Central) y La Niña EP (El Niño canónico del Este del Pacífico), y así profundizar en el análisis del comportamiento de La Niña Típica.

Realizar un método de clasificación geográfica que considere el clima, como las regiones de precipitación homogéneas para mejorar la descripción del comportamiento climático.

En la Zona Sur y Austral tienen menor correlación los datos entre sí mismos, por lo que se recomienda otro método de agrupación que considere si las estaciones están al este o al oeste de las cordilleras.

En la Zona Sur y Austral hay mayor variabilidad de comportamiento debido a la distancia de ubicación entre las estaciones y la topografía, por lo que los modelos deben considerar que la agrupación por estas Zonas será más impreciso, comparado a Norte Grande donde las condiciones se mantienen más constantes.

## REFERENCIAS

- Cai, W., McPhaden, M. J., Rodrigues, R. R., Grimm, A. M., Taschetto, A. S., Dewitte, B., . . . Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 215-231.
- CIIFEN. (2022). Obtenido de <https://ciifen.org/el-nino-oscilacion-del-sur/>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sapúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40, 421-439. Obtenido de <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.6219>
- Garreaud, R. D., Clem, H., & Vicencio, J. (2021). Cover Journal of Climate. *Journal of Climate*, 34. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0886.1>
- Garreaud, R., Lopez, P., & Rojas, M. (2013). Large-Scale Control on the Patagonian Climate. *Journal of Climate*, 215-230. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>
- Guevara, J. M. (2008). El ABC de los índices usados en la identificación y definición cuantitativa de El Niño-Oscilacion del Sur (ENSO). *Terra*, 84-140.
- Hannachi, A., Jolliffe, I., & Stephenson, D. (2007). Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology*, 1119-1152. doi:[doi:10.1002/joc.1499](https://doi.org/10.1002/joc.1499)
- Hanley, D. E., Bourassa, M. A., O'Brien, J., Smith, S., & Spade, E. R. (2003). A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. *Journal of Climate*, 1249-1258. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2)
- Hope, A. C. (1968). A Simplified Monte Carlo Significance Test Procedure. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 582-598.
- Lopez, H., Lee, S.-K., Kim, D., Witterberg, A., & Yeh, S.-W. (2022). Projections of faster onset and slower decay of El Niño in the 21st century. *Nature Communications*. doi:[10.1038/s41467-022-29519-7](https://doi.org/10.1038/s41467-022-29519-7)
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. En C. O. (CONA), *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile* (págs. 13-27). Valparaíso: Comité Oceanográfico Nacional (CONA).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (22 de octubre de 2022). *Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)*. Obtenido de Physical Sciences Laboratory: <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>

- NOAA. (enero de 2023). *Past Events*. Obtenido de Past Events: [https://psl.noaa.gov/enso/past\\_events.html](https://psl.noaa.gov/enso/past_events.html)
- Núñez, R. H., Richards, T. S., & O'Brien, J. J. (1998). *Statistical Analysis of Chilean Precipitation Anomalies associated with "El Niño Southern Oscillation"(1961-1994)*. The Florida State University. *International Journal of Climatology*. Obtenido de [https://www.coaps.fsu.edu/papers/statistical\\_analysis\\_southern\\_oscillation/](https://www.coaps.fsu.edu/papers/statistical_analysis_southern_oscillation/)
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2022). Obtenido de El Niño/La Niña Hoy: <https://public.wmo.int/es/el-ni%C3%B1o-la-ni%C3%B1a-hoy#:~:text=El%20Ni%C3%B1o%2FOscilaci%C3%B3n%20del%20Sur,a%20cambios%20en%20la%20atm%C3%B3sfera>.
- Organización Meteorológica Mundial. (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el calculo de las normales climáticas*. Geneve: OMM.
- Pizarro, O., & Montecinos, A. (2004). El Niño y la Oscilación del Sur. *Biología Marina y Oceanografía; conceptos y procesos*, 197-224.
- Quintana, J. (2000). The Drought in Chile and La Niña. *Drought Network News (1994-2001)*. Obtenido de <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=droughtnetnews>
- Sarricolea Espinoza, P., Araya Escobar, C., & Carrión Salazar, P. (2014). *Concentración de las precipitaciones en Chile central y su relación con patrones de variabilidad de baja frecuencia, período 1965-2010*. Obtenido de [https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/8171/1/0029\\_IX-2014-P\\_SARRICOLEA.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/8171/1/0029_IX-2014-P_SARRICOLEA.pdf)
- Sarricolea, P., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2016). Sequías en Chile central a partir de diferentes índices desde 1824. (U. d. Climatología, Ed.) doi:<http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-36>
- Schulz, N., Boiser, J., & Aceituno, P. (2012). Climate change along the arid coast of northern Chile. *32(12)*, 1803-1814. Obtenido de <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.2395>
- Takahashi, K., Mosquera, K., & Reupo, J. (2014). El Índice Costero El Niño (ICEN): historia y actualización. *Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño*, 8-9.

- Tedeschi, R. G. (2017). Diferentes tipos de El Niño y su influencia sobre América del Sur. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, 4-7.
- Turkington, T., Timbal, B., & Rahmat, R. (2019). The impact of global warming on sea surface temperature based El Niño–Southern Oscillation monitoring indices. *International Journal of Climatology*, 1092 - 1103. doi:10.1002/joc.5864
- Universidad de Chile. (s.f.). Recuperado el 2023, de *Sequía: Los desafíos para Chile de un futuro con menos agua*: <https://portaluchile.uchile.cl/noticias/168766/sequia-los-desafios-para-chile-de-un-futuro-con-menos-agua>
- WMO. (2022). *WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION*. Recuperado el 3 de noviembre de 2022, de El Niño/La Niña Southern Oscillation (ENSO): <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/el-ni%C3%B1o-la-ni%C3%B1a-update>
- World Meteorological Organization (WMO). (2022). *State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2021*. Geneva: World Meteorological Organization (WMO).
- Xue, J., Luo, J.-J., Yuan, C., & Yamagata, T. (2020). Discovery of Chile Niño/Niña. *Geophysical Research Letters*. doi:<https://doi.org/10.1029/2019GL086468>
- Zhang, X., & Yang, F. (2004). *RClimDex (1.0). Manual del usuario*. Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá, Canada.