



**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD  
HIDROCLIMÁTICA DEL LÍMITE MERIDIONAL  
DEL DESIERTO DE ATACAMA EN LOS ÚLTIMOS  
150 AÑOS**

**ANALYSIS OF THE HYDROCLIMATIC  
VARIABILITY OF THE SOUTHERN ATACAMA  
DESERT DURING THE LAST 150 YEARS**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**D<sup>a</sup> OLGA APARICIO ARTERO**

**Dirigido por:**

**Dra. D<sup>a</sup> TATIANA IZQUIERDO LABRACA**

**Dr. D. FRANCISCO CARREÑO CONDE**

**Alcalá de Henares, a 14 de Septiembre de 2021**

## ÍNDICE

Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
2. Objetivos.....	5
2.1.    Objetivo general.....	5
2.2.    Objetivos específicos.....	5
3. Zona de estudio.....	6
4. Metodología.....	10
4.1.    Bases de datos y Software.....	10
4.2.    Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).....	11
4.3.    Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)..	13
4.4.    Los fenómenos de El Niño Oscilación Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).....	14
4.5.    Eventos hidrometeorológicos extremos históricos.....	17
5. Resultados.....	19
5.1.    Series temporales de precipitación y temperatura.....	19
5.2.    Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).....	22
5.3.    Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)..	26
6. Discusión.....	29
6.1.    Variabilidad de los periodos húmedos.....	29
6.2.    Variabilidad de los periodos secos .....	30
6.3    Relación de la variabilidad climática con los fenómenos ENSO y PDO.....	34
6.4    Relación de la variabilidad climática con los eventos extremos de inundación históricos y el funcionamiento de los sistemas fluviales.....	38
7. Conclusiones.....	42
Bibliografía.....	43
Anexos	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de las cuencas hidrográficas.....	<b>6</b>
<b>Figura 2.</b> Mapa ampliado de las cuencas hidrográficas.....	<b>7</b>
<b>Figura 3.</b> Anomalías en las temperaturas del océano durante los 10 fenómenos más fuertes de El Niño y de La Niña registrados. Los patrones son opuestos, pero no coinciden perfectamente.....	<b>15</b>
<b>Figura 4.</b> Fase positiva de la Oscilación Decadal del Pacífico Norte (izquierda) y fase negativa (derecha).....	<b>16</b>
<b>Figura 5.</b> a) Precipitación anual en Copiapó para la serie temporal 1795-2020; b) Precipitación anual en Vallenar para la serie temporal 1911-2020; c) Precipitación anual en La Serena para la serie temporal 1851-2020.....	<b>20</b>
<b>Figura 6.</b> a) Temperatura media anual en Copiapó para la serie temporal 1856-2020; b) Temperatura media anual en Vallenar para la serie temporal 1916-2020; c) Temperatura media anual en La Serena para la serie temporal 1852-2020.....	<b>21</b>
<b>Figura 7.</b> a) Gráfico de SPI-3 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); b) Gráfico de SPI-6 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); c) Gráfico de SPI-12 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); d) Gráfico de SPI-24 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó).....	<b>23</b>
<b>Figura 8.</b> a) Gráfico de SPI-3 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); b) Gráfico de SPI-6 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); c) Gráfico de SPI-12 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); d) Gráfico de SPI-24 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco).....	<b>24</b>
<b>Figura 9.</b> a) Gráfico de SPI-3 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); b) Gráfico de SPI-6 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); c) Gráfico de SPI-12 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); d) Gráfico de SPI-24 de la ciudad de La Serena (Río Elqui).....	<b>25</b>
<b>Figura 10.</b> a) Gráfico de SPEI-3 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); b) Gráfico de SPEI-6 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); c) Gráfico de SPEI-12 de la ciudad de	

Copiapó (Río Copiapó); d) Gráfico de SPEI-24 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó)..... 26

**Figura 11.** a) Gráfico de SEPI-3 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); b) Gráfico de SPEI-6 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); c) Gráfico de SPEI-12 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); d) Gráfico de SPEI-24 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco)..... 27

**Figura 12.** a) Gráfico de SPEI-3 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); b) Gráfico de SPEI-6 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); c) Gráfico de SPEI-12 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); d) Gráfico de SPEI-24 de la ciudad de La Serena (Río Elqui)..... 28

**Figura 13.** Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPI-12 de Copiapó 1888-2020 y 1900-2020, respectivamente..... 34

**Figura 14.** Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPEI-12 de Copiapó 1946-2020..... 35

**Figura 15.** Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPI-12 de Vallenar 1958-2020..... 36

**Figura 16.** Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPEI-12 de Vallenar 1958-2020..... 36

**Figura 17.** Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPI-12 de La Serena 1869-2020 y 1900-2020, respectivamente..... 37

**Figura 18.** Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPEI-12 de La Serena 1922-2020..... 38

**Figura 19.** Relación de las inundaciones del río Copiapó con los periodos climáticos obtenidos para el índice SPI-12 en la estación de Copiapó. 1: Inundación ordinaria; 2: Inundación extraordinaria; 3: Inundación catastrófica..... 39

**Figura 20.** Relación de las inundaciones del río Elqui con los periodos climáticos obtenidos para el índice SPI-12 en la estación de La Serena. 1: Inundación ordinaria; 2: Inundación extraordinaria; 3: Inundación catastrófica..... **40**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características de las cuencas hidrográficas de estudio.....	<b>8</b>
<b>Tabla 2.</b> Estaciones meteorológicas y series temporales.....	<b>10</b>
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de los periodos según el valor del índice SPI.....	<b>12</b>
<b>Tabla 4.</b> Frecuencia de los periodos húmedos para el índice SPI-12 en Copiapó, Vallenar y La Serena.....	<b>29</b>
<b>Tabla 5.</b> Años extremadamente húmedos de acuerdo con los índices SPI-12 y SPEI-12 calculados.....	<b>30</b>
<b>Tabla 6.</b> Frecuencia de periodos secos para el índice SPI-12 en Copiapó, Vallenar y La Serena.....	<b>31</b>
<b>Tabla 7.</b> Años extremadamente secos de acuerdo con los índices SPI-12 y SPEI-12 calculados.....	<b>32</b>
<b>Tabla 8.</b> Relación de la frecuencia de periodos húmedos con los tres tipos de inundación para la cuenca del río Copiapó y río Elqui.....	<b>41</b>

## **TABLA DE ABREVIATURAS**

**AEMET:** Agencia Estatal de Meteorología

**DGA:** Dirección General de Aguas

**DMC:** Dirección Meteorológica de Chile

**ENSO:** *El Niño Southern Oscillation* (Oscilación Sur de El Niño)

**ETP:** Evapotranspiración Potencial

**NOAA:** *National Oceanic and Atmospheric Administration* (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica)

**PDO:** *Pacific Decadal Oscillation* (Oscilación Decadal del Pacífico)

**P<sub>mensual</sub> (mm):** Precipitación mensual en milímetros

**SPI:** *Standardized Precipitation Index* (Índice de Precipitación Estandarizado)

**SPEI:** *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado)

**T<sub>m</sub> (°C):** Temperatura media mensual en grados centígrados

**WMO:** *World Meteorological Organization*

## **RESUMEN**

El último informe del IPCC prevé el incremento de las temperaturas, la disminución de las precipitaciones y el aumento de la frecuencia de las precipitaciones intensas planteando un escenario de cambio climático caracterizado por un aumento en la frecuencia y magnitud de las sequías e inundaciones en muchas regiones del mundo. La comprensión de los patrones de estos eventos es crucial debido a sus implicaciones sociales y políticas, particularmente en zonas áridas en las que los eventos extremos son una característica intrínseca. En el presente Trabajo Fin de Máster se estudia la variabilidad hidroclimática del límite meridional del Desierto de Atacama, cuencas de los ríos Copiapó, Huasco y Elqui (Chile), utilizando el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) para evaluar si dicha variabilidad se está viendo modificada por el contexto de cambio global. Para ello, se han recopilado datos de precipitación y temperatura media mensual desde finales del siglo XVIII hasta la actualidad que muestran una clara tendencia negativa de las precipitaciones. La frecuencia de ocurrencia de periodos húmedos ha disminuido en los últimos 150 años mientras que la ocurrencia de periodos de sequía se ha incrementado. El SPI calculado para 12 meses muestra una correlación positiva con los fenómenos de El Niño Oscilación Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico que se debilita hacia el sur. Finalmente, desde mediados del siglo XX las inundaciones ocurren precedidos de meses secos o normales indicando su relación con eventos de precipitación más cortos e intensos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno de variabilidad climática cuyas causas y consecuencias son de carácter global. En la actualidad, el cambio climático se manifiesta en el aumento de la frecuencia y magnitud de las sequías y las inundaciones en muchas regiones del mundo (UNESCO, ONU-Agua, 2020). En 2021 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático publicó el Informe especial sobre los impactos de un calentamiento global de 1,5 °C, es decir, lo que supondría el aumento de temperatura de 1,5 °C en el planeta con respecto a los valores preindustriales. Si los gases de efecto invernadero siguen siendo emitidos al mismo ritmo actual, se alcanzará un calentamiento global de 1,5 °C sobre los niveles anteriores a la industrialización entre 2021 y 2040 (IPCC, 2021). Los modelos climáticos prevén cambios regionales en el clima como consecuencia de este calentamiento global, entre ellos el incremento de las temperaturas extremas, el aumento de la frecuencia, la intensidad o la cantidad de las precipitaciones intensas y una disminución de las precipitaciones (IPCC, 2021).

La comprensión de los patrones de estos eventos extraordinarios y en algunos casos extremos en el contexto del cambio climático global es crucial debido a sus implicaciones sociales (vulnerabilidad) y políticas (resiliencia y adaptación), en particular para aquellas regiones donde los extremos son una característica intrínseca de su régimen hidrológico. Esto se aplica especialmente a las regiones áridas, como el Desierto de Atacama, ya que se caracterizan por un frágil equilibrio hidrológico. Sin embargo, los cambios a largo plazo de eventos extraordinarios son difíciles de identificar debido a que los registros instrumentales apenas cubren decenas de años y presentan una distribución espacial limitada (Valdés-Pineda *et al.*, 2014).

El Desierto de Atacama, norte de Chile, es una de las regiones más áridas del planeta, donde los eventos extremos forman parte del funcionamiento habitual del sistema. Los escenarios de predicción climática indican un aumento de la temperatura mínima y máxima entre 5 y 8 °C en la zona central y norte de Chile a finales de siglo, lo que causaría un ascenso en altitud de la isoterma cero, provocando una reducción de la acumulación de nieve en la cordillera andina y, por tanto, una disminución del flujo y disponibilidad de recursos hídricos (Araya-Osses *et al.*, 2020). Además, el posible desplazamiento del anticiclón del Pacífico hacia latitudes más altas, es decir, hacia el

sur, provocaría una disminución de la precipitación en un 80% en la zona semiárida del límite meridional del Desierto de Atacama (Araya-Osses *et al.*, 2020). Por tanto, el aumento de la temperatura como la disminución de la precipitación podría causar un desplazamiento hacia el sur de las condiciones de aridez (Carrasco Cerda, 2017). Esta zona de transición denominada “Diagonal árida” y localizada a los 27°S ha sufrido varias oscilaciones climáticas durante el Holoceno tardío (Maldonado y Rozas, 2008) y supone un límite climático que se traduce en diferencias en el comportamiento de los sistemas fluviales, ya que al norte de esta latitud los ríos son efímeros mientras que al sur son perennes en condiciones naturales.

Después de los dos últimos eventos hidrometeorológicos extremos que causaron grandes inundaciones en el sector meridional del Desierto de Atacama (marzo de 2015 y mayo de 2017; Izquierdo *et al.*, 2021), el conocimiento de los patrones de estos eventos extremos y su relación con la dinámica fluvial se ha convertido en una prioridad para comprender el riesgo de desastres y fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres en esta región, dos de las prioridades del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2017). Además, en la zona central de Chile existe desde 2010 y hasta la fecha, una mega sequía evaluada como inusual en el contexto del último siglo (Garreaud *et al.*, 2017). La sequía es una de las principales causas de daños ambientales, agrícolas y económicos (Burton *et al.*, 1978). Los eventos extremos de sequía son evidentes después de un largo período sin precipitaciones, pero es muy difícil cuantificar objetivamente sus características en términos de magnitud, duración, intensidad y extensión en el espacio (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Es por ello por lo que, desde el siglo XX hasta ahora, se han ido desarrollando distintas herramientas para el análisis y el seguimiento de la sequía: Índice de Sequía de Palmer (PDSI), basado en una ecuación del balance hídrico del suelo, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) basado en un enfoque probabilístico de la precipitación y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI), una extensión del SPI, que utiliza además la evapotranspiración (Palmer, 1965; McKee *et al.*, 1995; Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Estos índices son variables estandarizadas que permiten realizar comparaciones de los mismos en el tiempo y en el espacio (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

De esta forma, su uso permite evaluar si actualmente se están produciendo alteraciones anormales en las variables climáticas, temperatura y precipitación, fuera de la

variabilidad hidroclimática natural propia de la zona meridional del Desierto de Atacama. De este modo, se puede estudiar si los periodos húmedos y secos guardan relación con la Oscilación Sur de El Niño (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y si los eventos extremos de inundación son cada vez más intensos y frecuentes consecuencia del cambio climático como han sugerido autores previos (Ortega *et al.*, 2019; Freund *et al.*, 2019).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Analizar la variabilidad hidroclimática del límite meridional del Desierto de Atacama (Chile) mediante el uso de índices hidroclimáticos que permitan la identificación de tendencias asociadas al cambio climático.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Calcular los índices SPI y SPEI para las estaciones meteorológicas de Copiapó, Vallenar y La Serena y determinar períodos húmedos y secos en las series temporales.
- Analizar tendencias temporales para cada una de las series de datos de los índices calculados.
- Evaluar la variación latitudinal entre los índices obtenidos y contrastar los resultados obtenidos con los estudios realizados en la zona central de Chile.
- Relacionar los resultados con el fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).
- Determinar si existe una relación entre los períodos encontrados y la ocurrencia de eventos extremos de inundación en la zona de estudio.

### 3. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio de este trabajo queda enmarcada en el límite meridional del Desierto de Atacama (Chile), entre las latitudes 26° S y 30,5° S (Figura 1). Se trata de una zona árida intertropical que cubre la costa del Pacífico dominada por la influencia del Anticiclón Subtropical Pacífico Sudeste y modulada por la Oscilación Sur de El Niño (*El Niño Southern Oscillation*, ENSO), con una periodicidad de 2 a 7 años, y la Oscilación Decadal del Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation*, PDO), con periodos de 20 a 30 años (Valdés-Pineda *et al.*, 2018; Cerda *et al.*, 2019).

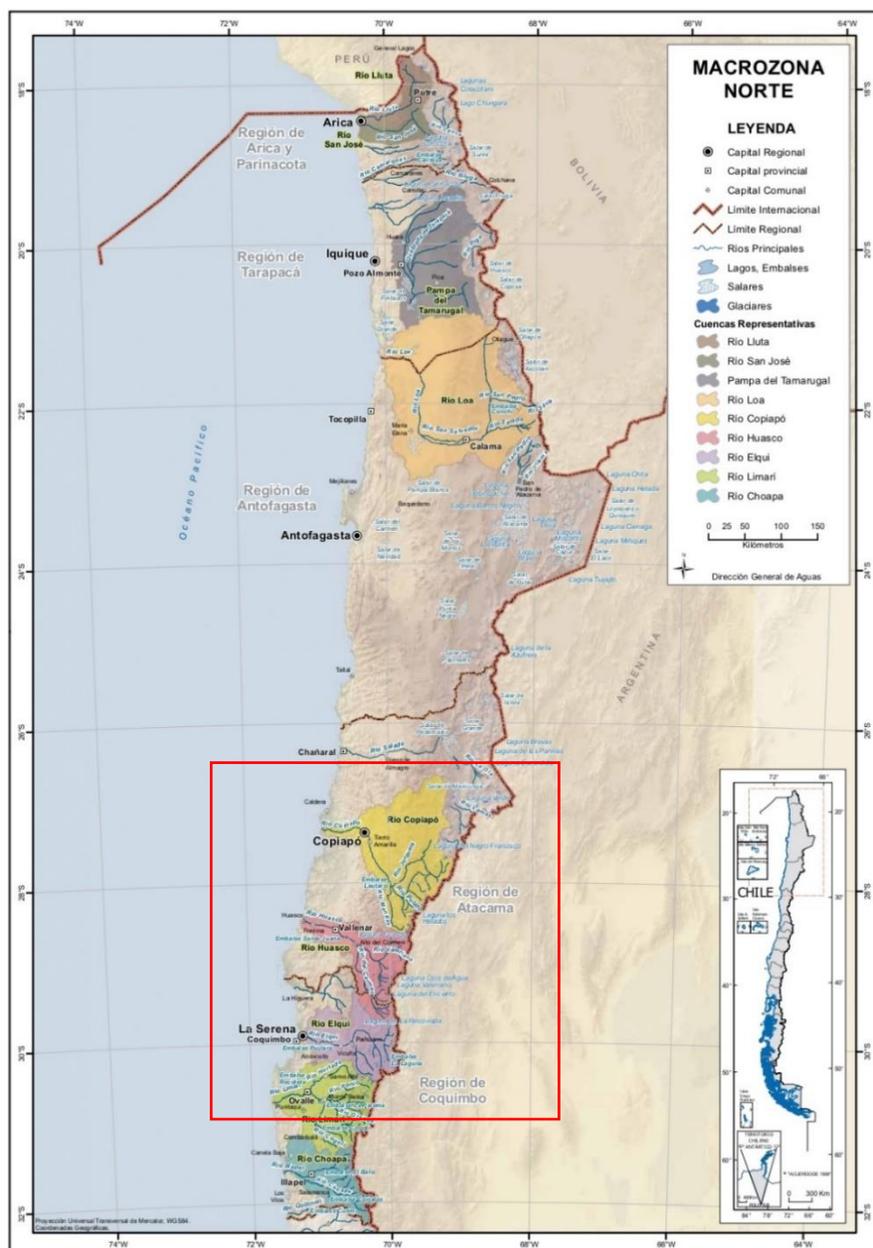


Figura 1. Localización de las cuencas hidrográficas de los ríos Copiapó, Huasco y Elqui (Tomado de DGA, 2016a). El cuadro rojo señala la zona representada en la Figura 2.

Las condiciones extremadamente áridas del Desierto de Atacama están controladas por la presencia de las cordilleras costeras y andinas (Rutllant *et al.*, 2003) y las aguas frías de la Corriente de Humboldt (Strub *et al.*, 1998). La Cordillera de los Andes genera un efecto Föhn que provoca que las masas de aire húmedo atlánticas choquen con la barrera montañosa, por lo que ascienden y se enfrían formando nubes que precipitan sobre la ladera de barlovento (Argentina). Cuando esa masa de aire pasa la barrera física, desciende muy seco y caliente por aumento de la presión atmosférica (Ancapichún y Garcés-Vargas, 2015). Por otro lado, la capa de aire en contacto con el Pacífico frío adyacente a la costa (corriente de Humboldt) es comprimido por el aire subsidente, seco y recalentado, generando una inversión térmica que produce en la costa una zona de estratocúmulos en niveles bajos localmente conocida como camanchaca.

Las precipitaciones en el área de estudio tienden a aumentar con la latitud (Valdés-Pineda *et al.*, 2014) con valores medios anuales que van desde 19,3 mm en Copiapó (27°S) a 91,2 mm en La Serena (29°S) (DGA, 2016a) (Figura 2). Por otro lado, la temperatura media tiende a disminuir con la latitud, con valores medios anuales que van desde los 18,5 °C en Copiapó a los 16 °C en La Serena (Climate-Data.org, 2021). La zona de estudio comprende tres cuencas hidrográficas, ríos Copiapó, Huasco y Elqui de norte a sur, pertenecientes a la macrozona norte (DGA, 2016a) (Figura 2).



Figura 2. Mapa ampliado de las cuencas hidrográficas (Tomado de DGA, 2016a).

En Chile los ríos nacen en la cordillera andina y fluyen en dirección este-oeste hasta desembocar en el Océano Pacífico. Los cauces son de corta longitud y, generalmente, los caudales son muy variables a lo largo del año, pudiendo llegar a quedarse secos en determinados momentos a la latitud de la zona de estudio. Esta macrozona presenta una escasa escorrentía superficial que representa tan solo el 0,13% del total del país. El caudal de los ríos disminuye al disminuir en latitud por su característica aridez (Tabla 1).

*Tabla 1. Características de las cuencas hidrográficas de estudio (Adaptado de DGA, 2004a; DGA, 2004b; DGA, 2004c y DGA, 2016b).*

	<b>Río Copiapó</b>	<b>Río Huasco</b>	<b>Río Elqui</b>
<b>Región</b>	Atacama	Atacama	Coquimbo
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	18.703	9.813	9.825
<b>Longitud cauce (km)</b>	165	84	80
<b>Caudal medio anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	2,6	7,7	11,2
<b>Cota máxima (m)</b>	5.994	5.000	6.216
<b>Cota mínima (m)</b>	0	0	0

El Río Copiapó posee una cuenca hidrográfica de más de 18.000 km<sup>2</sup> y una longitud de 165 km desde la confluencia de sus dos ríos tributarios más importantes, el Jorquera que viene del norte y el Pulido que viene del sureste. Dos kilómetros y medio aguas abajo de La Junta se agrega el río Manflas, que proviene del sur con un reducido caudal (DGA, 2004a). Su régimen es catalogado como mixto (presenta un régimen de caudales pluvial y nival). En periodos de años húmedos los aportes del deshielo son mayores, mientras que en años normales y secos los caudales no muestran variaciones importantes. El periodo de estiaje ocurre en los meses de agosto, septiembre y octubre (DGA, 2004a). El caudal medio del río Copiapó a lo largo de toda su cuenca es de 2,6 m<sup>3</sup>/s; sin embargo, se ha llegado a registrar caudales punta de hasta 220 m<sup>3</sup>/s durante el evento extremo de 2015 (Dirección de Obras Hidráulicas, 2015).

Por otro lado, el Río Huasco nace de la confluencia de los ríos El Tránsito y El Carmen. La cota más alta de la cuenca se sitúa en unos 5.000 m s.n.m.; sin embargo, la altura a la que se encuentra la confluencia de los ríos El Tránsito y El Carmen es 790 m s.n.m.,

siendo la pendiente más suave que al inicio de la cuenca (DGA, 2004b). Se aprecia un régimen nival, con los mayores caudales en diciembre y enero en años húmedos, producto de los deshielos. En años secos se observan caudales muy bajos durante todo el año, especialmente entre noviembre y abril, debido a la poca acumulación nival que se produce en este tipo de años. El período de estiaje ocurre durante los meses de agosto, septiembre y octubre (DGA, 2004b).

Por último, el Río Elqui nace a 815 m s.n.m. El primer tramo del río se caracteriza por presentar un escurrimiento de tipo recto y valles de reducida extensión. El tramo final del cauce presenta valles con mayores amplitudes (DGA, 2004c). Se observa un régimen nival, con los mayores caudales entre noviembre y febrero en años húmedos. En años secos los caudales tienden a ser más uniformes a lo largo del año, sin mostrar variaciones importantes. El período de estiaje ocurre en meses de invierno, en los meses de junio, julio y agosto (DGA, 2004c).

Los tres ríos presentan una alta variabilidad intra e interanual altamente dependiente de la alta variabilidad de las precipitaciones. Los modelos hidroclimáticos indican que habrá menos precipitaciones, mientras que las temperaturas aumentarán en la zona de estudio (Chadwick *et al.*, 2018), de hecho, Schulz *et al.* (2011) detectan una variación en la precipitación anual en la zona de estudio desde al menos el final del siglo XIX. Esta variabilidad provocará una reducción de los caudales, afectando negativamente a la disponibilidad de recursos hídricos (Vicuña *et al.*, 2011).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Bases de datos y software

Para analizar la variabilidad hidroclimática en la zona de estudio es necesario obtener series temporales lo más largas posible, es decir, desde el inicio de las medidas instrumentales en el siglo XIX a ser posible. Actualmente, tanto la Dirección General de Aguas (DGA, 2021) como la Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2021), solo ofrecen datos de precipitación y temperatura completos desde finales de la década de los años ochenta del siglo XX. Es por eso por lo que se tuvo que recurrir a los Anuarios del Servicio Meteorológico de Chile disponibles en Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2020), los cuales recogen información meteorológica desde el siglo XIX. Además, estas series temporales se completaron con fuentes históricas (Sayago, 1874; Mackenna, 1877; Bowman, 1924; Almeyda, 1948). El trabajo en esta etapa consistió en completar una serie temporal de las variables meteorológicas lo más larga posible en digital, ya que no existían datos digitalizados antes de 1990. En la Tabla 2 aparece información sobre las estaciones meteorológicas y las series temporales empleadas.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas y series temporales (A partir de datos de DMC, 2021).

	<b>Río Copiapó</b>	<b>Río Huasco</b>	<b>Río Elqui</b>
<b>Estación meteorológica</b>	Copiapó	Vallenar	La Serena
<b>Altitud (m s.n.m.)</b>	Chamonate Ad. 305	425	137
<b>Coordenadas</b>	27° 17' 58" S, 70° 24' 51" O	28° 35' 08" S, 70° 44' 19" O	29° 54' 52" S, 71° 12' 24" O
<b>Serie temporal datos <math>P_{\text{mensual}}</math> (mm)</b>	1888-2020 (132 años)	1958-2020 (62 años)	1869-2020 (151 años)
<b>Serie temporal <math>T_m</math> (°C)</b>	1946-2020 (74 años)	1958-2020 (62 años)	1922-2020 (98 años)

Para Copiapó se llegó a obtener datos de precipitación desde el año 1795 mediante la extrapolación de datos de precipitación de un gráfico extraído de Bowman (1924); sin embargo, esos datos (1795-1887) son anuales y no mensuales por lo que no pueden ser utilizados para los cálculos de los índices climáticos. La estación meteorológica de

Copiapó Chamonate, situada en el aeródromo Copiapó Chamonate, cesó su funcionamiento en 2005. A consecuencia de la falta de datos de temperatura a partir de esa fecha, se contactó con una persona de la Dirección Meteorológica de Chile, quien informó del traslado de esa estación al nuevo aeródromo Desierto de Atacama, situada más al oeste. Existen registros de temperatura mensual desde el año 1856, sin embargo, tuvo que tomarse una serie de años más corta (1946-2020) dado que había muchos años que no tenían datos y, por tanto, no podían ser procesados por los índices climáticos.

Para Vallenar existen datos tanto de precipitación como de temperatura desde el año 1911, pero hasta 1958 tuvieron que desecharse porque la serie temporal presentaba una gran cantidad de años sin datos. La cuenca del Río Huasco es la que tiene una serie de años más corta por el hecho de que apenas hay datos registrados, ya que Vallenar no era una ciudad tan importante como podían serlo Copiapó o La Serena. Finalmente, La Serena tiene la serie de años más larga (Tabla 2). Existía algún año sin dato que se sustituyó por datos de la estación de Punta Tortuga, situada a 10 kilómetros de distancia.

#### 4.2. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI en sus siglas en inglés, *Standardized Precipitation Index*) fue propuesto por primera vez por McKee *et al.* (1993). Se trata de un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar del agua precipitada en un periodo de acumulación determinado (3, 6, 12, 24 o 48 meses), respecto de la media, después de que la distribución original del agua caída ha sido transformada a una distribución normal.

La formulación del índice SPI se basa en una distribución gamma (ecuación 1), donde  $\alpha$  es el parámetro de forma ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  es el parámetro de escala ( $\beta > 0$ ) y  $x$  es la cantidad de lluvia caída, con  $x$  variando según los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  (Oliveira-Júnior *et al.*, 2018).

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad [\text{ecuación 1}]$$

El objetivo principal del índice es cuantificar el déficit de precipitación para diferentes escalas temporales y así poder evaluar el impacto de ese déficit sobre la disponibilidad

de los recursos hídricos. A escalas temporales más pequeñas, las condiciones de humedad de los suelos son sensibles a las anomalías, tanto positivas como negativas, de la precipitación; sin embargo, las masas de agua superficial, como cauces de ríos, lagos o embalses, y las masas de agua subterránea responden a anomalías pluviométricas de escalas temporales más largas (AEMET, 2020).

Para el cálculo de este índice se utiliza una serie histórica de precipitaciones mensuales. Esta serie se ajusta a una distribución teórica de probabilidad y se transforma en una distribución normal, de manera que el valor medio del SPI = 0. Los valores positivos de SPI representan precipitaciones por encima de la media y los valores negativos muestran precipitaciones inferiores a la normal (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de los periodos según el valor del índice SPI (McKee et al., 1993).

Categoría	Valores SPI
Extremadamente Húmedo	$\geq 2$
Muy Húmedo	De 1,5 a 1,99
Húmedo	De 1 a 1,49
Normal	De 0,99 a -0,99
Seco	De -1 a -1,49
Severamente Seco	De -1,5 a -1,99
Extremadamente Seco	$\leq 2$

De acuerdo a McKee *et al.* (1993), se puede determinar el carácter de un periodo dado en:

- **Normal:** Los valores del índice comprendidos entre -1 y +1 corresponden a un periodo “normal”, ya que se sitúa en torno a la media (0), en la parte central de la distribución, a una distancia menor o igual que la desviación estándar.
- **Seco:** La secuencia continua de valores del índice iguales o inferiores a -1. Se considera que el periodo cambia de naturaleza cuando el índice toma un valor positivo.
- **Húmedo:** La secuencia continua de valores del índice iguales o superiores a +1. Se considera que el periodo deja de ser húmedo cuando el índice toma un valor negativo.

A la hora de caracterizar un periodo es necesario tener en cuenta:

- Duración: Es la longitud del periodo en el que los valores del SPI cumplen con las condiciones requeridas.
- Intensidad: Es el valor máximo de dicho periodo.
- Magnitud: Se trata de la suma de los valores del SPI de dicho periodo.

Para el análisis de la frecuencia de ocurrencia de los ciclos húmedos y secos se emplea la metodología de Ayugi *et al.* (2020). Se divide la serie temporal tanto del SPI-12 como del SPEI-12 para cada estación:

- Copiapó: 1888-1900; 1901-1950; 1951-2000; 2001-2020.
- Vallenar: 1958-2000; 2001-2020
- La Serena: 1869-1900; 1901-1950; 1951-2000; 2001-2020.

Se cuenta el número de meses para cada ciclo que hay en ese periodo y se opera una frecuencia sencilla:

$$F_s = \frac{\text{número de meses}}{\text{número de meses del periodo}} \times 100 \quad [\text{ecuación 2}]$$

### 4.3. Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)

El Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI en sus siglas en inglés, *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) es una extensión del índice SPI realizada posteriormente (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). La característica que lo diferencia del SPI es que utiliza, además de la precipitación mensual, la evapotranspiración potencial mensual para la determinación de periodos de sequía, también en periodos de acumulación de 3 a 48 meses. Esto se traduce en que, a diferencia del SPI, el SPEI es capaz de capturar el impacto del aumento de la temperatura en la demanda de agua (Vicente-Serrano *et al.*, 2015).

Para obtener el índice SPEI, fue necesario calcular la evapotranspiración mediante el método de Thornthwaite (1948). Para ello, se tuvo en cuenta la temperatura media mensual y se calculó el índice de calor mensual y anual y la ETP sin corregir. Para obtener la ETP ajustada, había que tener en cuenta el número teórico de horas de sol diarias, según la latitud. Este enfoque simplificado obvia las variables que afectan a la

ETP, como la humedad de la superficie, la radiación solar y la velocidad del viento (Vicente-Serrano *et al.*, 2015). Así, la formulación del SPEI es (ecuación 3):

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[ 1 + \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2},$$

[ecuación 3]

La distribución log-logística se adapta muy bien a la serie para todas las escalas de tiempo. Esta puede dar cuenta de valores negativos y es capaz de adoptar diferentes formas para modelar las frecuencias de la serie en diferentes escalas de tiempo (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

Como el índice SPI, el SPEI puede diferenciar entre periodos húmedos y secos siguiendo las mismas pautas de clasificación (Tabla 3). El índice SPEI por lo general presenta mejores correlaciones con las variables a lo largo de los meses de verano que el SPI, justo cuando son registrados los principales impactos de la sequía (Vicente-Serrano *et al.*, 2012). Además, cumple con los requisitos de índice de sequía debido a que su carácter multiescalar puede ser utilizado por diferentes disciplinas científicas con la finalidad de detectar, monitorear y analizar los periodos de sequía en el contexto de cambio climático (Beguería *et al.*, 2021). Ambos índices se calcularon en R (R Core Team, 2013) y su cálculo se encuentra incluido dentro del paquete de R “SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index” descargable en <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/>.

#### **4.4. Los fenómenos de El Niño Oscilación Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)**

Las precipitaciones en el norte de Chile están condicionadas tanto por la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) como por el Niño Oscilación Sur (ENSO) (Valdés-Pineda *et al.*, 2018). Por ello, en este trabajo se plantea si la variabilidad hidroclimática identificada mediante los índices SPI y SPEI para la zona de estudio está relacionada con dichos fenómenos climáticos.

El ENSO se trata de un fenómeno cíclico climático que ocurre en las condiciones oceánicas y atmosféricas del Pacífico tropical y es el principal factor de predicción de las alteraciones climáticas globales. Al ser de carácter cíclico, este fenómeno puede persistir durante varios años y producir efectos regionales negativos (NOAA, 2021a).

El índice multivariado ENSO es calculado con promedios bimensuales de seis variables medidas sobre la cuenca del Pacífico tropical (30°S - 30°N y 100°E - 70°W) (NOAA, 2021a). Las componentes principales de los seis campos son: la presión a nivel del mar, la componente zonal del viento superficial, la componente meridional de viento superficial, la temperatura superficial del mar, la temperatura superficial del aire y la fracción total de nubes en el cielo (Martínez *et al.*, 2011).

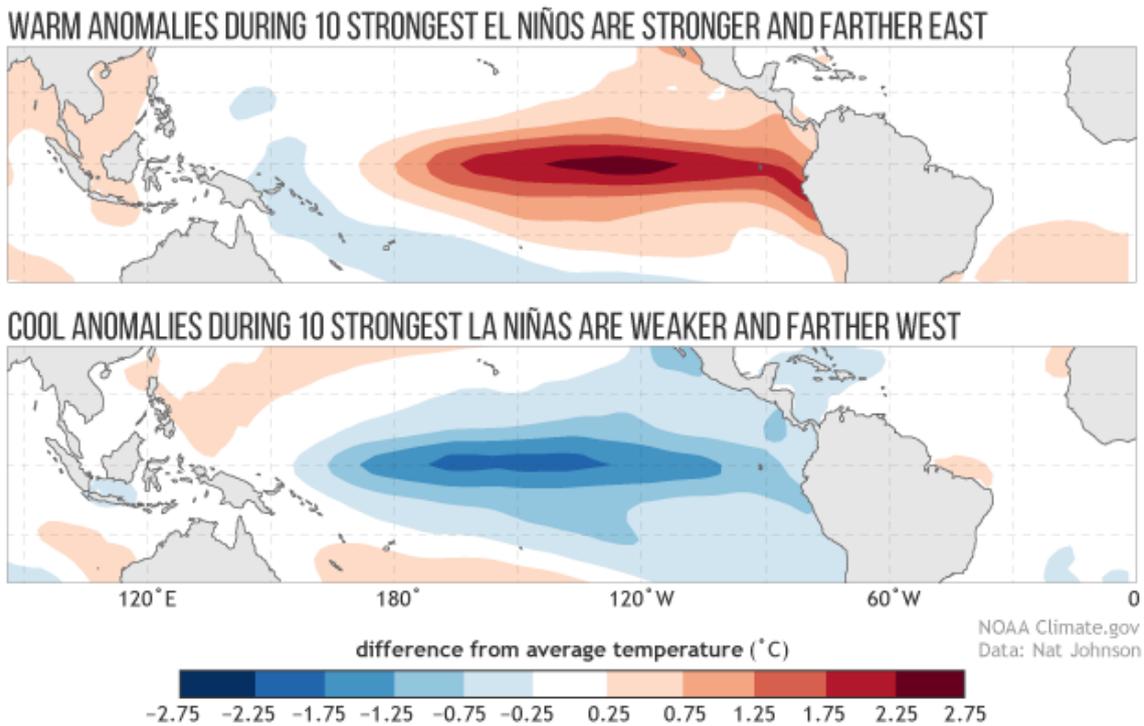


Figura 3. Anomalías en las temperaturas del océano durante los 10 fenómenos más fuertes de El Niño y de La Niña registrados. Los patrones son opuestos, pero no coinciden perfectamente (Tomado de Johnson, 2021).

Las características clave de los eventos ENSO positivos (cálido, conocido como “El Niño”) incluyen temperaturas superficiales del mar anormalmente cálidas en el Pacífico ecuatorial centro-este, la presión a nivel del mar anormalmente alta sobre Indonesia y el Pacífico tropical occidental y baja sobre el Pacífico tropical oriental, la reducción o reversión de los vientos del este del Pacífico tropical (vientos alisios), la supresión de la

convección tropical (radiación de onda larga saliente positiva) sobre Indonesia y el Pacífico occidental y la convección mejorada (radiación de onda larga saliente negativa) sobre el Pacífico central (NOAA, 2021a). Por otro lado, las características clave de los eventos ENSO negativos (frío, también conocido como “La Niña”) son generalmente de fase opuesta (Figura 3).

La Oscilación Decadal del Pacífico o PDO, por sus siglas en inglés, es una variación del clima del Pacífico que alterna fases de enfriamiento y calentamiento cada 20-30 años. Esta oscilación se detecta con los cambios en la temperatura y la presión del agua superficial del Pacífico Norte.

Se considera que la PDO tiene un valor positivo cuando la temperatura superficial del mar es anormalmente fría en el interior del Pacífico y cálida a lo largo de la costa del Pacífico Norte, y cuando las presiones del nivel del mar están por debajo del promedio en el Pacífico Norte (Mantua y Hare, 2002).

Cuando los patrones de anomalías climáticas se invierten, es decir, la temperatura del agua del mar es más caliente de lo normal en el interior del Pacífico y anormalmente fría a lo largo de la costa del Pacífico Norte, así como la presión sobre el nivel del mar se encuentra por encima de la media, los valores del PDO son negativos (Figura 4). La estructura espacial de la PDO es similar a la del ENSO, sin embargo, la diferencia más grande es la mayor amplitud de la temperatura superficial del mar y el calor almacenado en latitudes medias (Martínez *et al.*, 2011).

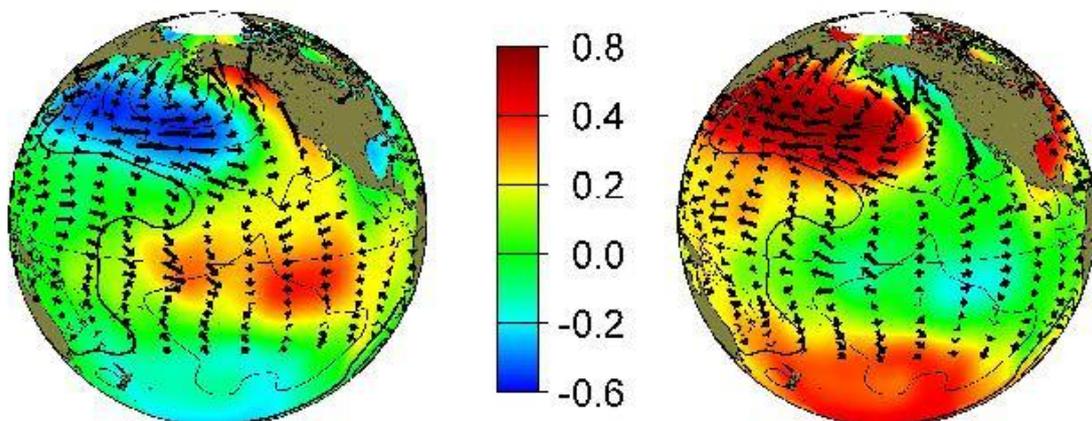


Figura 4. Fase positiva de la Oscilación Decadal del Pacífico Norte (izquierda) y fase negativa (derecha) (Tomado de NOAA, 2021b)

En este trabajo se va a evaluar la relación existente entre los índices hidroclimáticos SPI y SPEI y los índices climáticos Niño 3.4 y PDO. La región Niño 3.4 (5°S-5°N, 170°-120°W) posee el impacto más grande del ENSO en la variabilidad atmosférica global (Martínez *et al.*, 2011) y es responsable de una fracción significativa de la variabilidad de la precipitación interanual en invierno en el centro Chile (Montecinos y Aceituno, 2003). Los datos del índice Niño 3.4 se han obtenido para una serie de años de 1854-2020 (WMO, 2020a) y los datos de PDO para una serie más corta, de 1900-2020 (WMO, 2020b). Los resultados obtenidos en el cálculo de los índices SPI-12 y SPEI-12 para las 3 estaciones meteorológicas se correlacionan con los índices climáticos con el objetivo de evaluar la correlación durante diferentes meses y periodos de tiempo acumulados de 1 a 20 años (cada 5 años). Para ello, se realiza una media móvil de los índices en períodos acumulados de 1 a 20 años, siguiendo la metodología de Serrano-Notivoli *et al.*, (2020) (ecuación 4).

$$MA\_ind_{m,n,i} = \frac{1}{n} \sum_{k=i-((n-1)/2)}^{i+((n-1)/2)} ind_{m,k}, \quad [\text{ecuación 4}]$$

Finalmente, la serie resultante de los dos índices (Niño 3.4 y PDO) se correlaciona mediante una correlación de Pearson con los valores obtenidos de SPI o SPEI (Serrano-Notivoli *et al.*, 2020) (ecuación 5).

$$\rho_{X,Y_{m,n}} = \frac{\sigma_{X_{m,n}Y_n}}{\sigma_{X_{m,n}} \sigma_{Y_n}}, \quad [\text{ecuación 5}]$$

Esta correlación se ha realizado mediante la herramienta RStudio y elaborando un script que realizara la correlación, analizando y procesando los datos importados de los índices Niño 3.4 y PDO y los obtenidos de SPI y SPEI para cada estación.

#### **4.5. Eventos hidrometeorológicos extremos históricos**

Los eventos extremos de precipitación en zonas (semi)áridas conllevan la generación de escorrentía y, por tanto, aumentos bruscos de los caudales que dependiendo de la intensidad de las lluvias se traducen en inundaciones y desbordes de los sistemas fluviales (Rojas *et al.*, 2014). Con el objetivo de determinar si existe una relación entre

la variabilidad climática analizada y los eventos de inundación de las cuencas de estudio se recopilaron de la bibliografía las inundaciones históricas de las cuencas de los ríos Copiapó (estación de Copiapó) y Elqui (estación de La Serena). Para el río Huasco (estación de Vallenar) no existe un catálogo de las inundaciones históricas, por lo que este análisis solo se realizó para 2 de las 3 cuencas de estudio.

La categorización de eventos extremos del río Copiapó se obtuvo de la tesis de titulación de Carvajal (2017) y la categorización de eventos extremos en La Serena se realizó a partir de los datos de la tesis de titulación de Palma (2019). De este modo, se clasifican los eventos en: (1) ordinario, aquel en el que se percibe un pequeño aumento del caudal; (2) extraordinario, aquel en el que existe inundación de sectores localizados de la ciudad con daños en infraestructuras; y (3) evento catastrófico, aquel en el que la inundación se produce de forma generalizada por el desborde del río (Barriandos *et al.*, 2003).

Se va a estudiar si existe relación entre los eventos de inundación en Copiapó y La Serena y el índice SPI-12 para verificar la relación de la ocurrencia más frecuente y de mayor intensidad de estos fenómenos extremos y si guardan relación con el cambio climático. En este caso, solo se utiliza el índice SPI, porque las inundaciones están directamente relacionadas con la precipitación o el deshielo. El SPEI es prescindible, ya que, debido a la poca formación de los suelos en la zona de estudio, podría considerarse una humedad que realmente no hay.

En este apartado se simplifican los ciclos húmedos y secos en un gráfico, tomando como periodo húmedo a los meses con un valor de SPI-12  $> +1$  y periodo seco aquellos meses con un valor de SPI-12  $< -1$ .

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Series temporales de precipitación y temperatura

En general, las series temporales instrumentales son cortas y más concretamente en cuencas áridas donde en muchos casos hasta finales del siglo XX no se instalaron los equipamientos para medir las diferentes variables hidrometeorológicas (Zaman *et al.*, 2012). Por ese motivo, se ha recurrido a documentación histórica que permita obtener datos que complementen las series modernas disponibles en la Dirección General del Agua y la Dirección Meteorológica de Chile (Sayago, 1874; Mackenna, 1877; Bowman, 1924; Almeyda, 1948; Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, 2020).

La serie temporal más larga recopilada ha sido la de precipitación (mm) de Copiapó (1795-2020) (Figura 5a). La precipitación media anual de la serie es de 22,5 mm. La precipitación máxima registrada en esta serie de 225 años es en el año 1997 con 149,7 mm. Esta se debe al agua caída en el mes de junio (76,7 mm) y agosto (72,2 mm). Los mínimos registrados corresponden a años sin lluvia, es decir, años en los que la precipitación es de 0 mm, que forman el 18% de la serie. Además, el 34% de la serie corresponde a años en los que la precipitación es menor a 6 mm y el 53%, a años en los que la precipitación es menor de 20 mm. El mayor periodo sin precipitación corresponde a los años 1993-96, cuatro años seguidos en los que no llovió. En la serie temporal existe una clara ciclicidad que Valdés-Pineda *et al.*, (2018) atribuyen a la ciclicidad del PDO hasta mediados del siglo XX. En cuanto a las temperaturas (1856-2020) (Figura 6a), la media es de 15,9 °C en la ciudad de Copiapó. La temperatura media mensual máxima corresponde al mes de enero (20,2 °C), verano austral, y la mínima, al mes de julio (11,7 °C), invierno austral.

La serie temporal de precipitación recopilada en Vallenar es de 1911-2020 (Figura 5b). La precipitación media es de 43,6 mm/año, sin embargo, para la serie registrada en los índices climáticos (1958-2020) es de 36 mm. La precipitación máxima registrada es en el año 1997 con 217,6 mm de agua caída, 100 mm recogidos en el mes de junio y 111 mm en el mes de agosto. Los mínimos registrados corresponden a años con precipitación igual a cero mm, los cuales representan nada más que el 4,5% de los años. El periodo más seco se atribuye a cuatro años seguidos de escasas o inexistentes lluvias: 1993 (7 mm), 1994 (0mm), 1995 (0 mm) y 1996 (12 mm). Por otro lado, la serie de temperatura para Vallenar fue de 1940 a 2020 (Figura 6b), pero había años sin datos

(1950-1958). La temperatura media anual (Figura 6b) es de 15,3 °C, registrando la más elevada en febrero (19,3 °C) y la mínima en julio (11,7 °C).

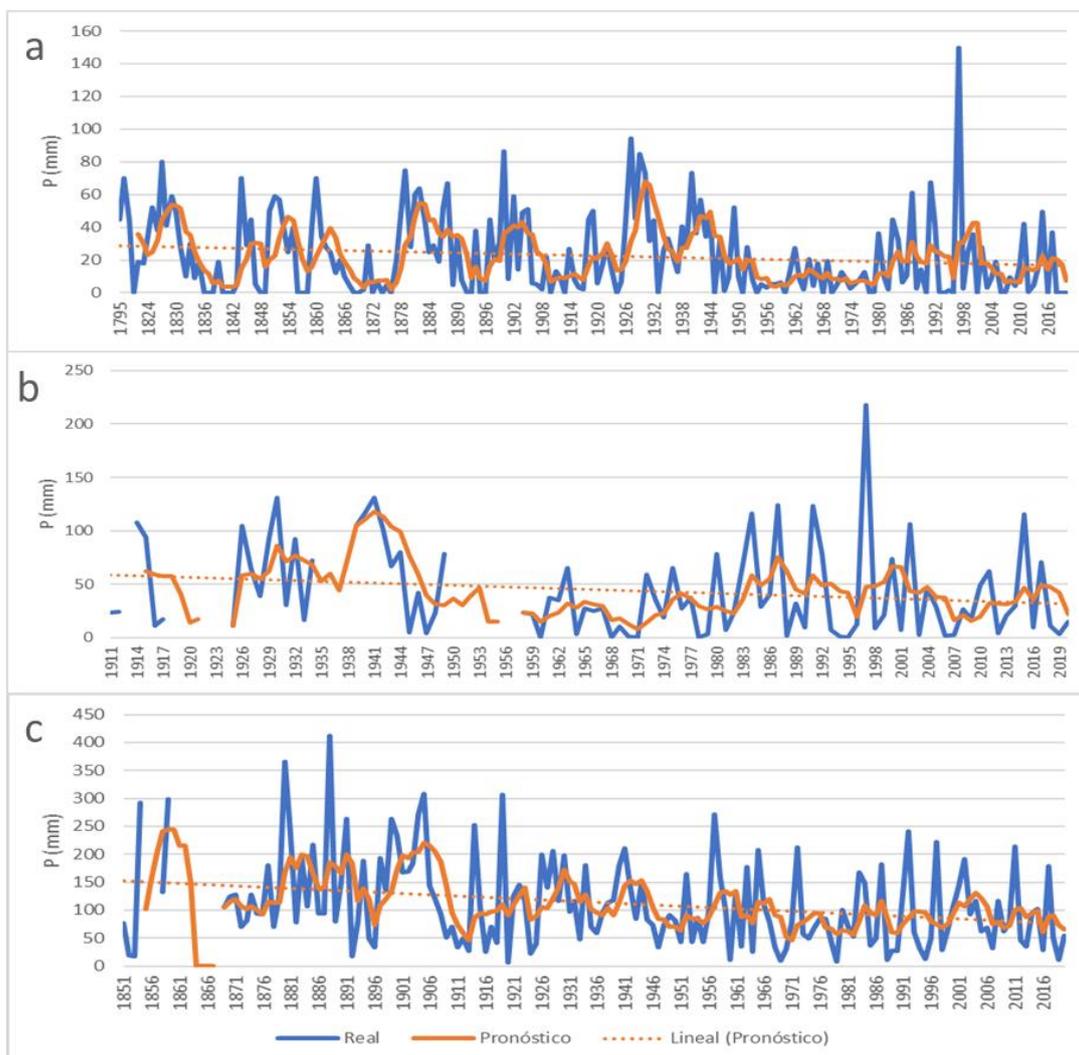


Figura 5. a) Precipitación anual en Copiapó para la serie temporal 1795-2020; b) Precipitación anual en Vallenar para la serie temporal 1911-2020; c) Precipitación anual en La Serena para la serie temporal 1851-2020. (Sayago, 1874; Mackenna, 1877; Bowman, 1924; Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, 2020; DGA, 2021; DMC, 2021).

De la estación de La Serena se ha recopilado una serie de datos de precipitación de 149 años para el periodo 1851-2020 (Figura 5c), con una precipitación media de 110 mm/año. El mes en el que se recoge más precipitación es junio y en el que menos, enero. La máxima precipitación registrada ocurrió en el año 1888 con 412 mm, recogiendo en el mes de agosto más de la mitad del agua caída en todo el año mientras que, la mínima son 7 mm en el año 1920. En cuanto a la temperatura (Figura 6c), los primeros registros datan de 1852, pero desde 1870 hasta 1922 no existen datos. La

temperatura media es de 14 °C, siendo la máxima en el mes de enero (17,6 °C) y la mínima en julio (11 °C).

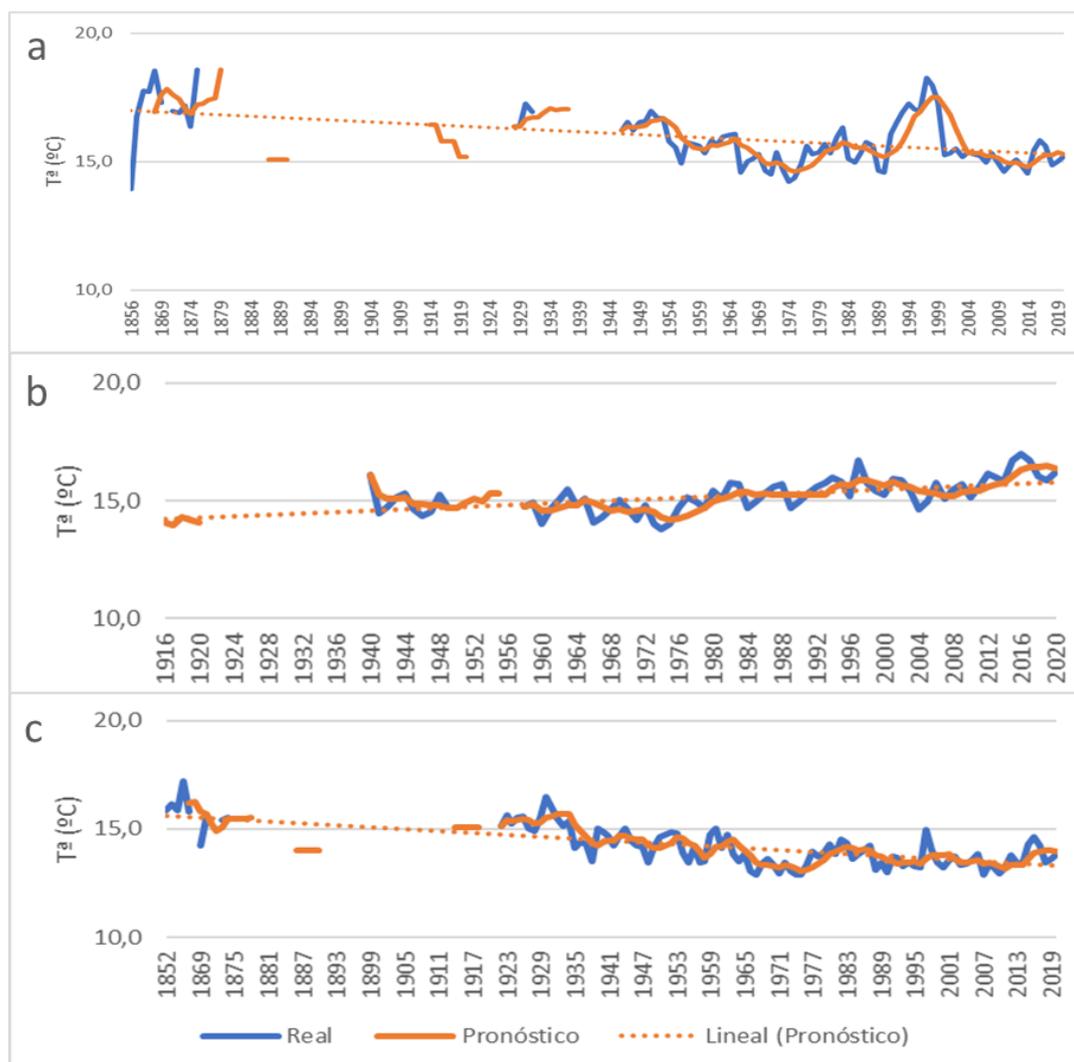


Figura 6. a) Temperatura media anual en Copiapó para la serie temporal 1856-2020; b) Temperatura media anual en Vallenar para la serie temporal 1916-2020; c) Temperatura media anual en La Serena para la serie temporal 1852-2020. (Sayago, 1874; Mackenna, 1877; Bowman, 1924; Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, 2020; DGA, 2021; DMC, 2021).

En las tres estaciones la precipitación muestra una tendencia decreciente con el paso del tiempo (Figura 5); sin embargo, la tendencia de la temperatura no es tan evidente. En Copiapó (Figura 6a) la temperatura parece estable, experimentando un aumento de la misma en la década de 1990. Este pico de temperatura está relacionado con el fenómeno de El Niño de 1997-1998 (Schulz *et al.*, 2012). Vallenar (Figura 6b) muestra una tendencia claramente creciente de la temperatura media anual con el paso de los años. Por último, La Serena (Figura 6c) muestra una tendencia de disminución de la

temperatura media anual, cuya explicación puede ser la camanchaca. Esta niebla se forma más a menudo y su efecto local corresponde con una disminución de la temperatura.

## **5.2. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)**

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) de la estación de Copiapó se obtuvo utilizando la serie de precipitación mensual 1888-2020 para periodos de acumulación de 3, 6, 12 y 24 meses (Figura 7).

La clasificación en años húmedos y secos depende del valor que tome el índice (tanto para SPI como para SPEI): valores mayores a +1, se considerarán húmedos, mientras que valores por debajo de -1 se considerarán secos (McKee *et al.* 1993). De este modo, se considera periodo húmedo a la suma de años húmedos consecutivos, es decir, aquellos años con precipitaciones superiores a la media (color azul) y es considerado periodo seco la suma de años secos consecutivos, es decir, aquellos años en los que la precipitación es inferior a la media (color rojo). En la estación de Copiapó pueden identificarse 20 periodos húmedos y 26 periodos secos para el SPI-12. El periodo húmedo de mayor duración es de 1926 a 1931, con una magnitud de 93,713 y una intensidad de 2,071. Por otro lado, el periodo seco de mayor duración es de 1993 a 1997, siendo la suma de tres periodos secos consecutivos (Anexo: Tabla 1).

De 1888 a 1953 se observan ciclos húmedos de mayor magnitud y más duraderos en el tiempo. A mediados del siglo pasado se observa una ligera tendencia hacia ciclos húmedos más estrechos en el tiempo y de menor magnitud, intercalados por más periodos secos. Además, se observa un aumento en la intensidad de fenómenos extremos húmedos (1997, 2015 y 2017).

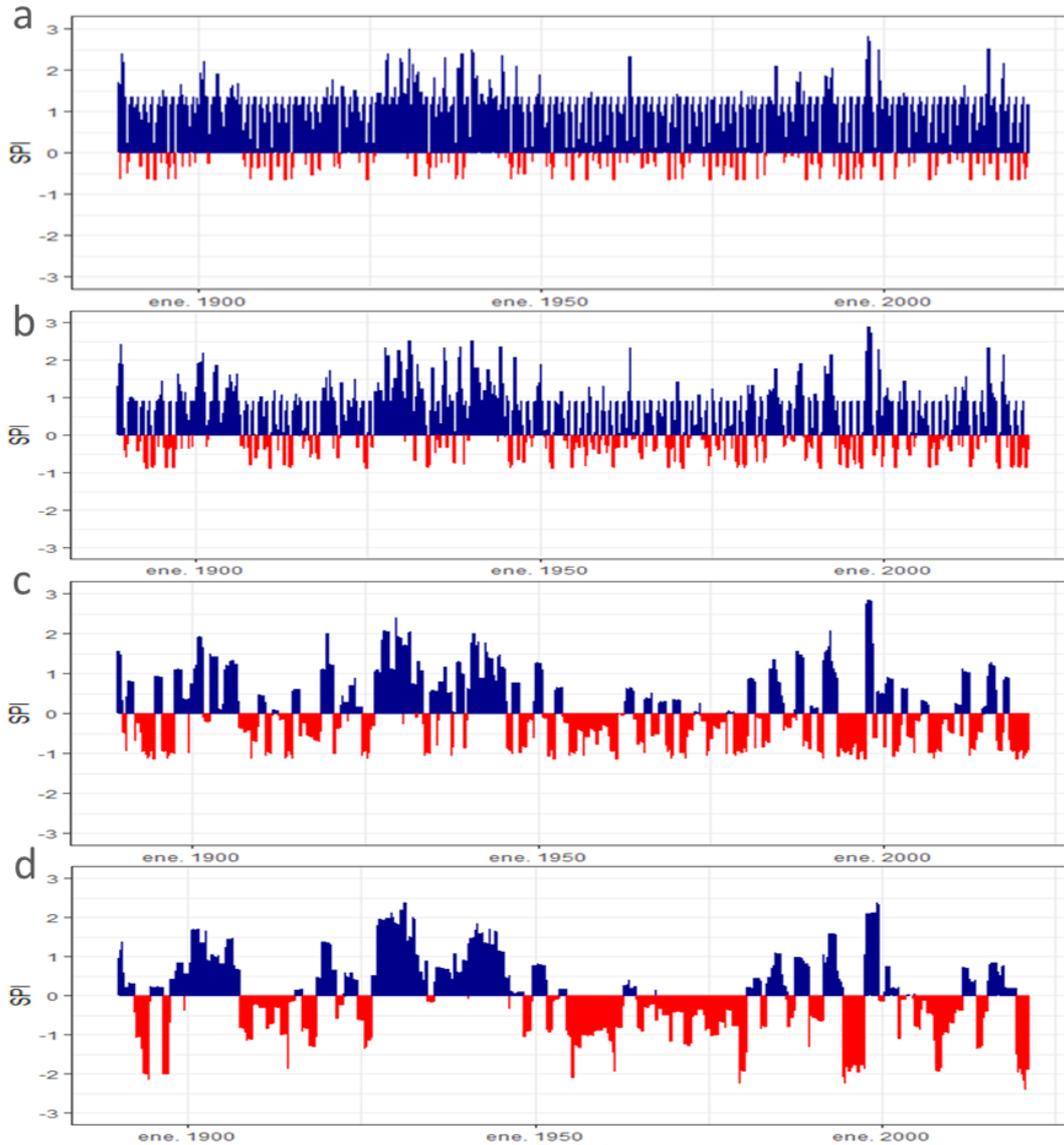


Figura 7. a) Gráfico de SPI-3 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); b) Gráfico de SPI-6 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); c) Gráfico de SPI-12 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); d) Gráfico de SPI-24 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó).

Para el cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) de la estación de Vallenar, se empleó la serie 1958-2020 para 3, 6, 12 y 24 meses (Figura 8). En la estación de Vallenar pueden identificarse 11 periodos húmedos y 12 periodos secos para el SPI-12. El periodo húmedo de mayor duración es de 1983 a 1985, con una magnitud de 30,440 y una intensidad de 1,874. Por otro lado, el periodo seco de mayor duración es de 1994 a 1996, cuya magnitud es de -31,264 y su intensidad de -1,409 (Anexo: Tabla 2).

Desde el inicio de la serie en 1958 se observa una tendencia hacia ciclos secos de mayor duración y magnitud y un aumento en la intensidad de fenómenos extremos húmedos, como en Copiapó (1997).

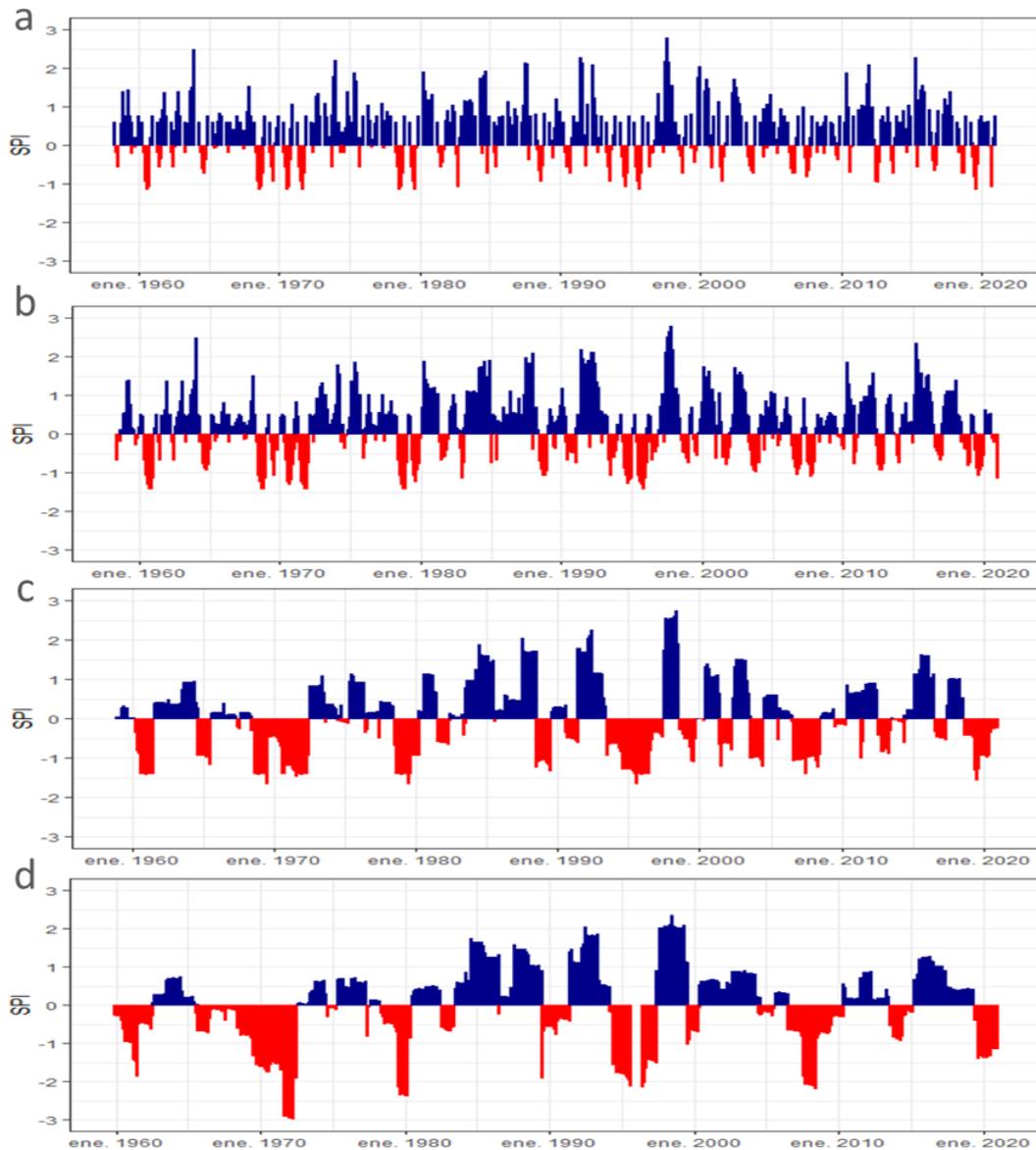


Figura 8. a) Gráfico de SPI-3 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); b) Gráfico de SPI-6 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); c) Gráfico de SPI-12 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); d) Gráfico de SPI-24 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco).

En el cálculo del índice SPI de la estación de La Serena (Figura 9), se utilizó la serie temporal de 1869-2020 para 3, 6, 12 y 24 meses. Además, para esta serie se han identificado 31 periodos húmedos y 38 periodos secos para el SPI-12. El periodo húmedo de mayor duración es de 1903 a 1906, con una magnitud de 58,572 y una

intensidad de 1,956. Por otro lado, el periodo seco de mayor duración es de 1991 a 1996, cuya magnitud es de -42,699 y su intensidad de -2,545 (Anexo: Tabla 3).

Se ve una clara tendencia del descenso de la precipitación en el límite meridional del Desierto de Atacama. En el SPI se observa cómo los periodos húmedos eran de mayor magnitud y duración a finales del siglo XIX y primera mitad del siglo XX. A partir de la segunda mitad del siglo XX, se observa una tendencia decreciente de la precipitación acumulada, siendo los periodos húmedos de menor duración y magnitud. Por el contrario, las sequías van siendo de mayor magnitud y duración con el paso del tiempo.

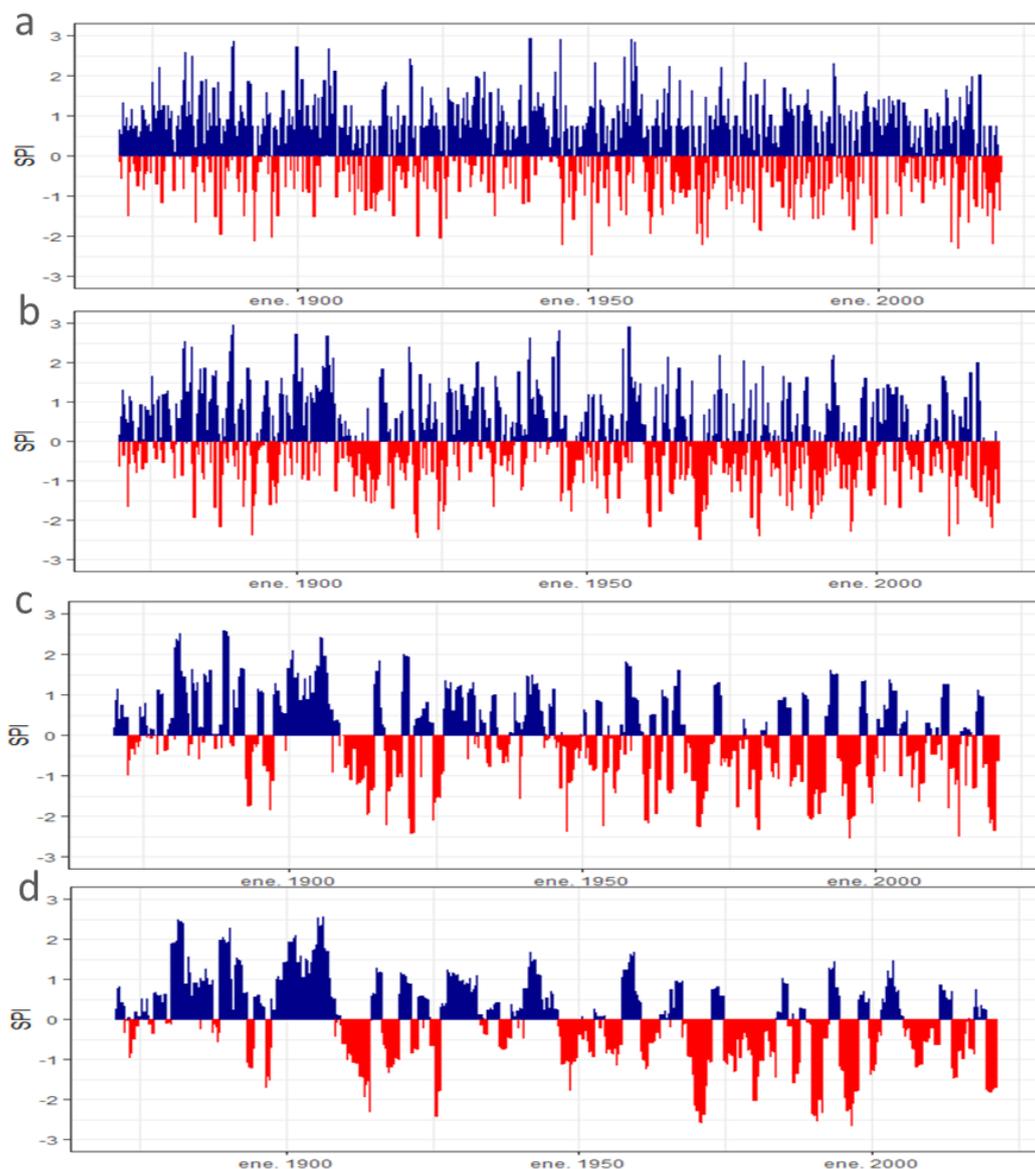


Figura 9. a) Gráfico de SPI-3 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); b) Gráfico de SPI-6 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); c) Gráfico de SPI-12 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); d) Gráfico de SPI-24 de la ciudad de La Serena (Río Elqui).

### 5.3. Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)

Para la obtención del Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) en la estación de Copiapó, se utilizó la serie 1946-2020 (Figura 10), para periodos de acumulación de 3, 6, 12 y 24 meses. Se trata de una serie más corta que la del SPI, pero este índice caracteriza mejor los periodos de sequía. El SPEI-12 de Copiapó muestra 7 periodos de sequía y 15 periodos húmedos. El periodo húmedo de mayor duración es de 1973 a 1976, con una magnitud de 48,107 y una intensidad de 1,873. Por otro lado, el periodo seco de mayor duración es de 1993 a 1997, cuya magnitud es de -83,121 y su intensidad de -2,334 (Anexo: Tabla 4).

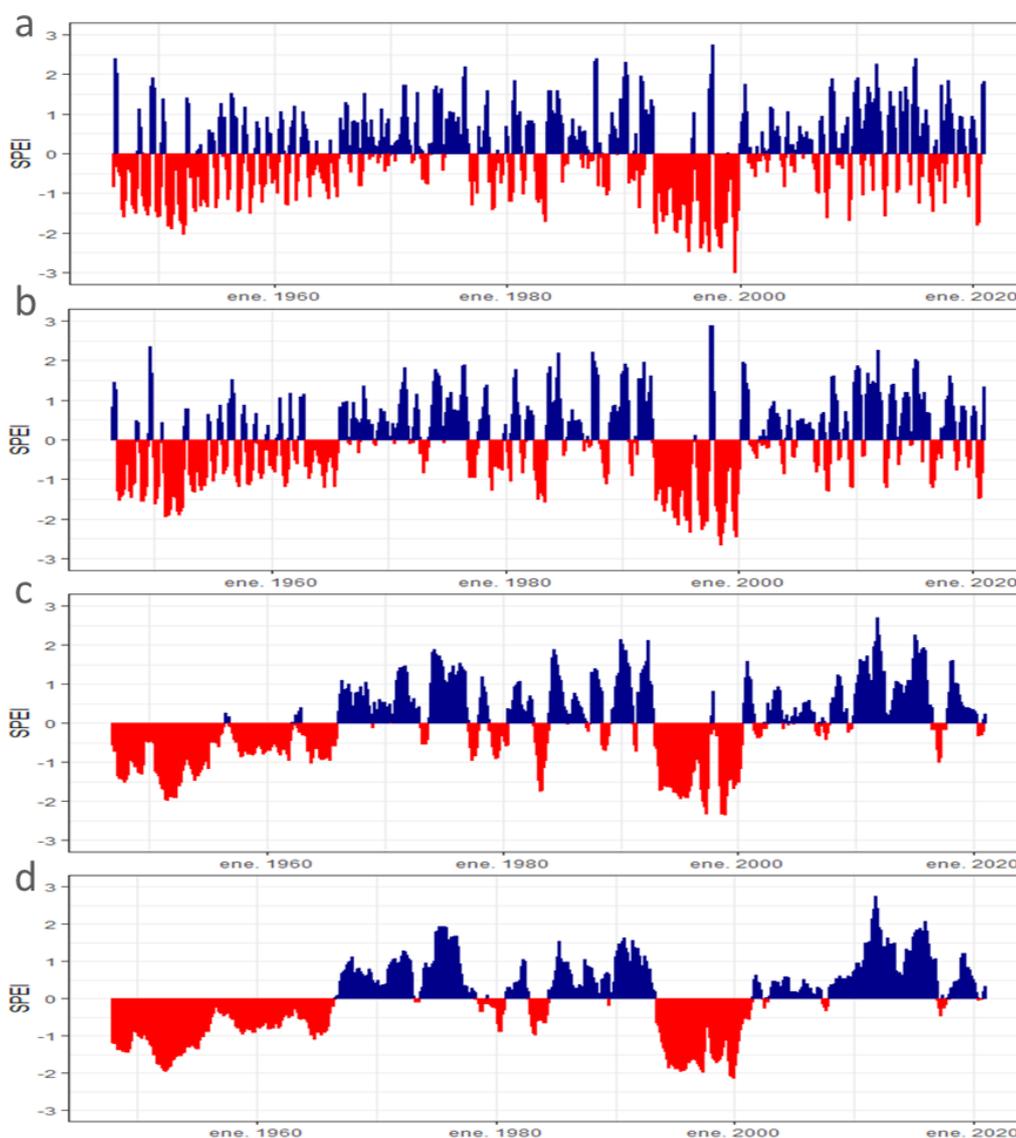


Figura 10. a) Gráfico de SPEI-3 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); b) Gráfico de SPEI-6 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); c) Gráfico de SPEI-12 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó); d) Gráfico de SPEI-24 de la ciudad de Copiapó (Río Copiapó).

Para la obtención del Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) de la estación de Vallenar, se utilizó la serie 1958-2020 para periodos de acumulación de 3, 6, 12 y 24 meses (Figura 11). Se ha identificado un total de 12 periodos húmedos y 13 periodos secos. El periodo húmedo de mayor duración es de 1973 a 1976, con una magnitud de 42,367 y una intensidad de 1,815. Por otro lado, el periodo seco de mayor duración es de 1993 a 1996, cuya magnitud es de -40,624 y su intensidad de -2,097 (Anexo: Tabla 5). El SPEI-12 y SPEI-24 muestran una clara tendencia desde la segunda mitad del siglo XX a una mayor frecuencia, duración y magnitud de los eventos de sequía, así como un incremento de la intensidad de los mismos.

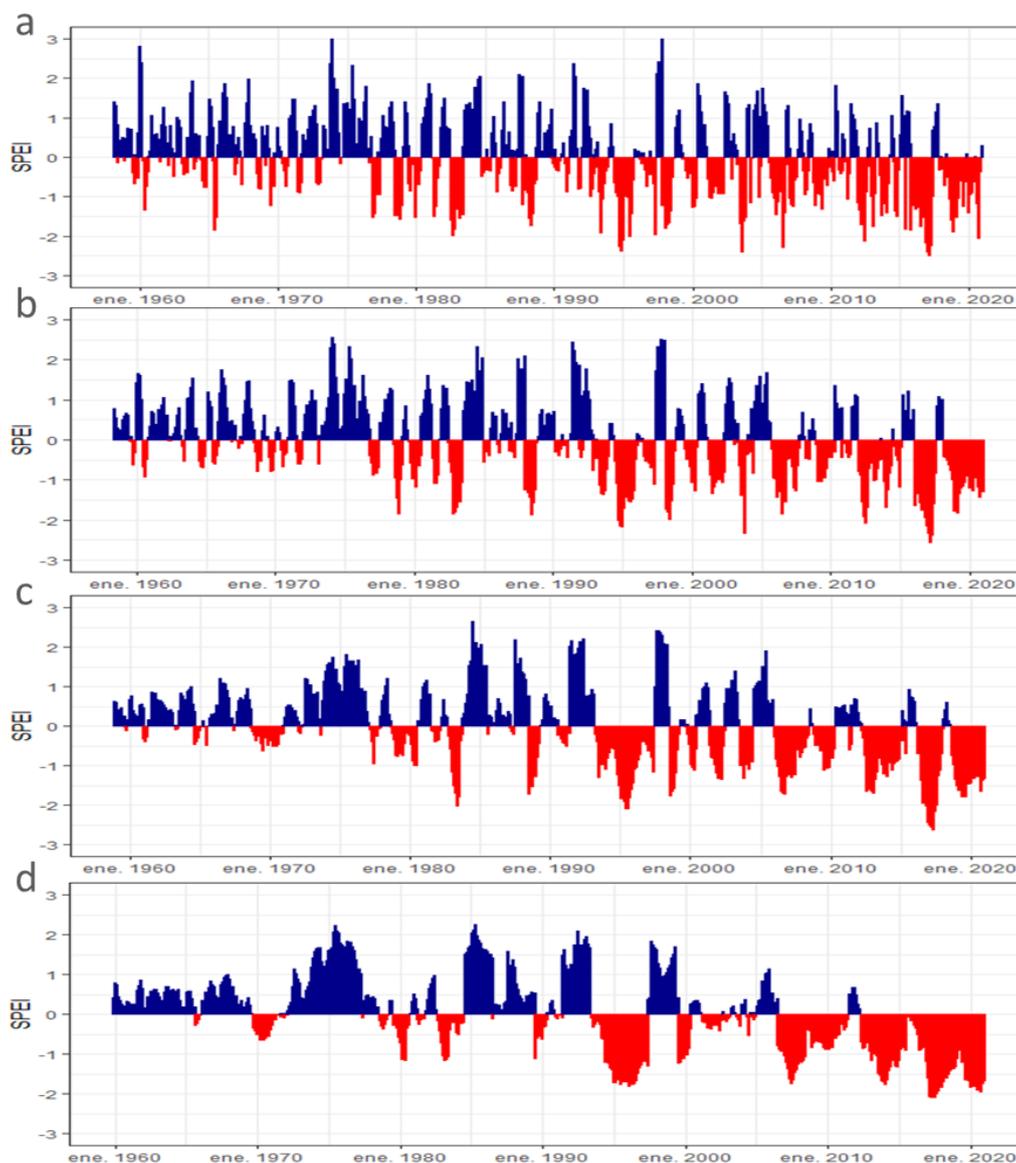


Figura 11. a) Gráfico de SPEI-3 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); b) Gráfico de SPEI-6 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); c) Gráfico de SPEI-12 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco); d) Gráfico de SPEI-24 de la ciudad de Vallenar (Río Huasco).

En el cálculo del índice SPEI de la estación de La Serena (Figura 12), se utilizó la serie temporal de 1922-2020 para 3, 6, 12 y 24 meses. Además, para esta serie se han identificado 20 periodos húmedos y 27 periodos secos para el SPEI-12. El periodo húmedo de mayor duración es de 1957 a 1959, con una magnitud de 43,162 y una intensidad de 2,385. Por otro lado, el periodo seco de mayor duración es de 1924 a 1926, cuya magnitud es de -47,630 y su intensidad de -2,394. La tendencia no se ve tan clara como con el SPI-12 (Anexo: Tabla 6).

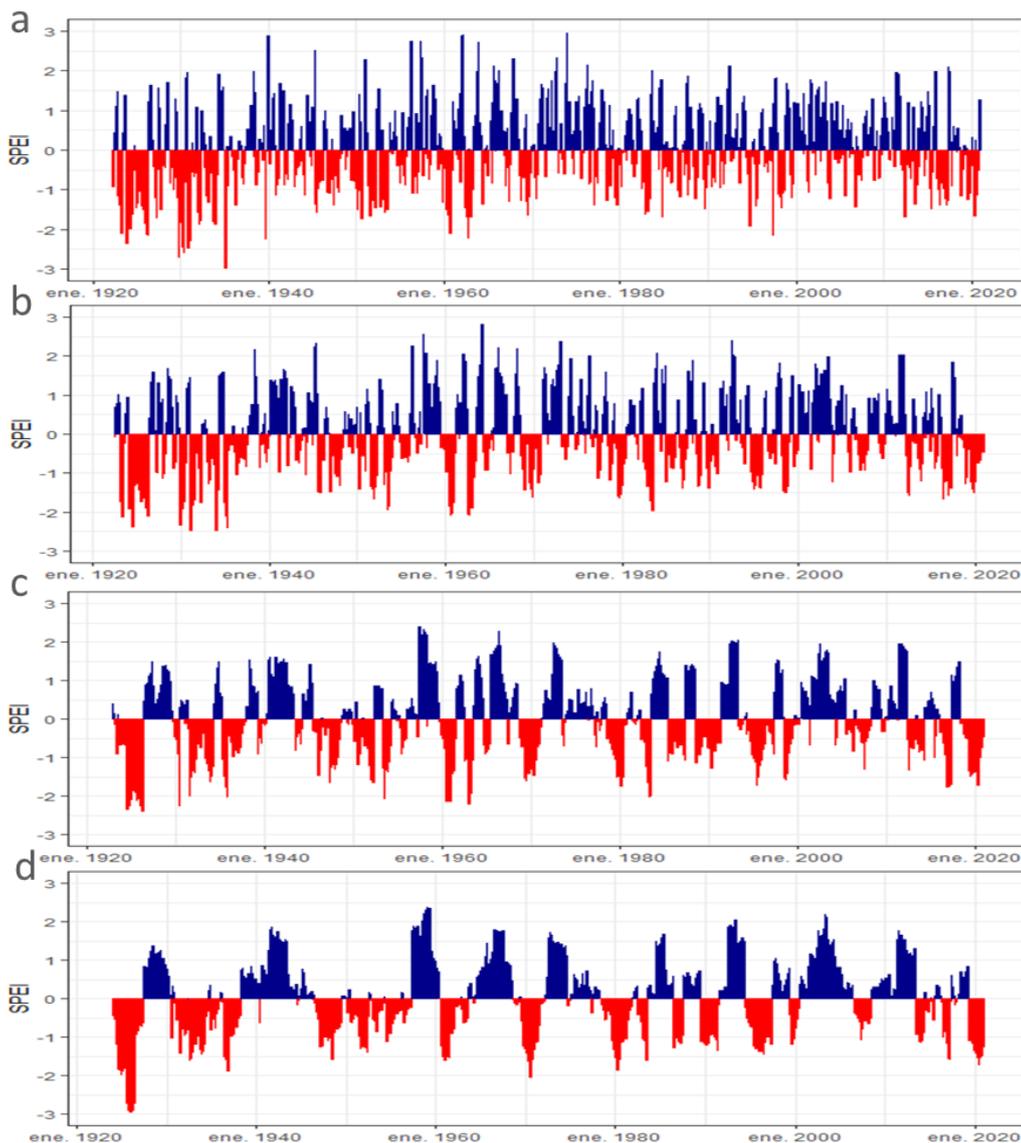


Figura 12. a) Gráfico de SPEI-3 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); b) Gráfico de SPEI-6 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); c) Gráfico de SPEI-12 de la ciudad de La Serena (Río Elqui); d) Gráfico de SPEI-24 de la ciudad de La Serena (Río Elqui).

## 6. DISCUSIÓN

### 6.1. Variabilidad de los periodos húmedos

Desde el siglo XIX hasta el año 2020, se observa una tendencia decreciente en la frecuencia de la ocurrencia de periodos húmedos (Tabla 4). En Copiapó, salvo el primer ciclo anual analizado, que es muy corto (1888-1900), se observa cómo la frecuencia de periodos húmedos para el SPI-12 en el periodo 1901-1950 es de 31,67% y en el periodo actual es de tan solo el 8,33%. En Vallenar, la frecuencia de periodos húmedos también disminuye ligeramente hasta el año 2020. Por otro lado, la ciudad de La Serena ha sufrido una disminución en la frecuencia de periodos húmedos de más de la mitad en los últimos 151 años.

Tabla 4. Frecuencia de los periodos húmedos para el índice SPI-12 en Copiapó, Vallenar y La Serena..

Copiapó		Vallenar		La Serena	
1888-1900 (156 meses)				1869-1900 (384 meses)	
Meses húmedos	29			Meses húmedos	115
Frecuencia (%)	18,59			Frecuencia (%)	29,95
1901-1950 (600 meses)				1901-1950 (600 meses)	
Meses húmedos	190			Meses húmedos	124
Frecuencia (%)	31,67			Frecuencia (%)	20,67
1951-2000 (600 meses)		1958-2000 (516 meses)		1951-2000 (600 meses)	
Meses húmedos	58	Meses húmedos	81	Meses húmedos	59
Frecuencia (%)	9,67	Frecuencia (%)	15,70	Frecuencia (%)	9,83
2001-2020 (240 meses)		2001-2020 (240 meses)		2001-2020 (240 meses)	
Meses húmedos	20	Meses húmedos	36	Meses húmedos	26
Frecuencia (%)	8,33	Frecuencia (%)	15,00	Frecuencia (%)	10,83

Para Copiapó y La Serena, con las series temporales más largas, se observa, desde 1888 una coincidencia de los periodos húmedos y secos a lo largo del tiempo. Vallenar no presenta datos hasta 1958, pero los datos muestran una similitud en los ciclos húmedos y secos y en la intensidad con Copiapó. La magnitud y la duración de la precipitación disminuye entorno a la década de 1940 en Copiapó y La Serena progresivamente (Anexo: Tablas 1 y 3). En Copiapó y Vallenar se identifican dos de los grandes temporales ocurridos en la historia de Chile en 1997 y 2015, en La Serena también aparecen esos dos eventos, pero representados con menor intensidad.

En Vallenar, como eventos extremadamente húmedos (Tabla 5) el índice SPI considera el año 1987, 1992, 1997 y 1998, mientras que el índice SPEI añade tres años más a la

lista. Debido a que se trata de una zona desértica, el desarrollo de los suelos es muy escaso o nulo, por lo que el índice SPEI puede considerar que hay una humedad en el suelo que en realidad no hay.

Vallenar y Copiapó presentan varios años en común registrados como extremadamente húmedos para el índice SPI: 1992, 1997 Y 1998, siendo el año 1997 y 1998 los más húmedos de la historia entre todos los años analizados, coincidiendo con el fenómeno de El Niño 1997-1998, cuando en el centro y norte del país la precipitación superó con creces la media durante los meses de junio y agosto, convirtiéndose en fuertes inundaciones (Cai *et al.*, 2020).

Tabla 5. Años extremadamente húmedos de acuerdo con los índices SPI-12 y SPEI-12 calculados.

	Copiapó		Vallenar		La Serena	
	SPI-12	SPEI-12	SPI-12	SPEI-12	SPI-12	SPEI-12
Siglo XIX					1880 (+2,38)	
					1881 (+2,52)	
					1888 (+2,57)	
					1889 (+2,57)	
Siglo XX			1987		1900 (+2,09)	1957 (+2,38)
	1927 (+2,07)	1990 (+2,14)	(+2,05)	1984 (+2,65)		
			1992		1905 (+2,42)	1958 (+2,32)
	1928 (+2,05)	1992 (+2,12)	(+2,26)	1985 (+2,08)		
			1997		1919 (+2,00)	1966 (+2,27)
	1929 (+2,40)		(+2,56)	1987 (+2,18)		
			1998			1992 (+2,04)
	1931 (+2,05)		(+2,75)	1991 (+2,16)		
	1940 (+2,01)			1992 (+2,20)		
	1992 (+2,06)			1997 (+2,42)		
1997 (+2,84)			1998 (+2,24)			
1998 (+2,82)						
Siglo XXI		2011 (+2,69)				
		2015 (+2,26)				

Un estudio realizado por Serrano-Notivoli *et al.* (2020), muestra el año 1905 como año extremadamente húmedo (+2,30) en el centro de Chile, coincidiendo con La Serena, situada más hacia el norte, el mismo año (+2,42) (Tabla 5).

## 6.2. Variabilidad de los periodos secos

Lo opuesto pasa con la frecuencia de los periodos secos, experimentando a lo largo de la serie temporal un aumento en su ocurrencia (Tabla 6). Desde principios del siglo XX

hasta la actualidad la frecuencia de periodos de sequía casi son el doble en Copiapó. En Vallenar, no se observa una clara tendencia en ese aumento. Sin embargo, en La Serena la frecuencia de periodos de sequía se quintuplica en la última mitad del siglo XX con respecto al periodo 1869-1900.

Tabla 6. Frecuencia de periodos secos para el índice SPI-12 en Copiapó, Vallenar y La Serena..

Copiapó		Vallenar		La Serena	
1888-1900 (156 meses)				1869-1900 (384 meses)	
Meses secos	9			Meses secos	19
Frecuencia (%)	5,77			Frecuencia (%)	4,95
1901-1950 (600 meses)				1901-1950 (600 meses)	
Meses secos	14,00			Meses secos	79
Frecuencia (%)	2,33			Frecuencia (%)	13,17
1951-2000 (600 meses)		1958-2000 (516 meses)		1951-2000 (600 meses)	
Meses secos	24	Meses secos	95	Meses secos	163
Frecuencia (%)	4,00	Frecuencia (%)	18,41	Frecuencia (%)	27,17
2001-2020 (240 meses)		2001-2020 (240 meses)		2001-2020 (240 meses)	
Meses secos	10	Meses secos	21	Meses secos	43
Frecuencia (%)	4,17	Frecuencia (%)	8,75	Frecuencia (%)	17,92

En climas áridos, como el de la zona de estudio, el análisis de los periodos secos debe centrarse en la duración, en lugar de solamente en su intensidad (Wu *et al.*, 2007). La Serena muestra una tendencia de mayor duración de las sequías (Anexo: Tabla 3), así como una intensificación de las mismas (Tabla 7). El año más seco, en el año en 1969. La Serena es la única ciudad que registra para el SPI-12 eventos extremos de sequía, ni Copiapó, ni Vallenar lo hacen. Estos datos manifiestan un desplazamiento de los periodos secos hacia el sur, lo que en último término implica el avance del límite meridional del Desierto de Atacama hacia latitudes altas.

Para Copiapó el SPEI-12 muestra unos datos que difieren de la realidad, considerando años extremadamente secos 1997 (Tabla 7), cuando tuvo lugar el mayor temporal de la historia en la zona centro y norte de Chile. Para los índices SPI-12 y SPEI-12 de la estación de Vallenar se pueden identificar en los mismos periodos de sequía y humedad. El índice SPI no considera ningún año como extraordinariamente seco, sin embargo, sí lo hace el SPEI: 1983, 1995, 2016 y 2017.

Tabla 7. Años extremadamente secos de acuerdo con los índices SPI-12 y SPEI-12 calculados.

	Copiapó		Vallenar		La Serena	
	SPI-12	SPEI-12	SPI-12	SPEI-12	SPI-12	SPEI-12
Siglo XX		1997 (-2,33)		1983 (-2,02)	1916 (-2,22)	1924 (-2,35)
		1998 (-2,34)		1995 (-2,10)	1920 (-2,42)	1925 (-2,14)
					1921 (-2,42)	1926 (-2,39)
					1924 (-2,11)	1930 (-2,28)
					1947 (-2,40)	1931 (-2,02)
					1953 (-2,24)	1935 (-2,03)
					1960 (-2,11)	1953 (-2,10)
					1961 (-2,19)	1960 (-2,15)
					1969 (-3,68)	1963 (-2,20)
					1970 (-2,24)	1983 (-2,04)
					1979 (-2,32)	
					1980 (-2,32)	
					1988 (-2,04)	
					1989 (-2,10)	
					1995 (-2,54)	
Siglo XXI				2016 (-2,32)	2014 (-2,52)	
					2019 (-2,19)	
				2017 (-2,63)	2020 (-2,34)	

El estudio realizado por Serrano-Notivoli *et al.* (2020), muestra el año 1947 como año extremadamente seco, con un SPEI-14 de -2,02 en el centro de Chile, coincidiendo con el SPI-12 de La Serena, situada más hacia el norte, el mismo año (-2,40) (Tabla 7).

La disminución de la precipitación no solo aumenta la probabilidad de sequías, sino que también representa una menor acumulación de nieve en las cumbres de las cordilleras, disminuyendo el caudal de los flujos de agua superficial y afectando negativamente sobre la disponibilidad del recurso. Esta tendencia está confirmada por Oertel *et al.* (2020) en latitudes de clima semiárido como la zona de Santiago, en el centro de Chile.

El índice SPI no es más que un producto estadístico que toma de entrada únicamente los valores de precipitación mensual, lo que limita sus capacidades a la hora de revelar la complejidad de los eventos de sequía. Las sequías quedan determinadas, principalmente, por la variabilidad temporal de la precipitación (Keyantash *et al.*, 2018).

Se ha considerado que el índice climático que mejor puede determinar los ciclos de sequía y humedad es el SPI, que, aparte de presentar una serie temporal más larga, utiliza la precipitación como parámetro en la determinación de los periodos húmedos o

secos. El índice SPEI puede verse alterado por las características de la zona de estudio, como el suelo escasamente desarrollado o nada desarrollado, la escasa vegetación o la intensa radiación solar, que afectan a la humedad de la superficie, y, por tanto, al valor del índice (Vicente-Serrano *et al.*, 2015). Además, los periodos húmedos y secos, así como los eventos extremos coinciden con los registros históricos identificados por Ortlieb (1995).

Parece que en latitudes más bajas (Copiapó y Vallenar) se observa una mayor aparición y duración de periodos secos y se registran eventos extremos húmedos de mayor intensidad, relacionados con inundaciones y en latitudes más altas (La Serena) se observa una tendencia de periodos más duraderos e intensos de sequía con disminución de la precipitación.

Un estudio similar realizó Serrano-Notivoli *et al.* (2020) sobre la variabilidad hidroclimática en Santiago de Chile. El trabajo está centrado en la zona central de Chile (30-38° S), mientras que la del presente estudio se ubica entre las latitudes 27-29,5° S. Los resultados de Serrano-Notivoli *et al.* (2020) también muestran una alta frecuencia de eventos extremos de sequía a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, así como una disminución en la frecuencia y magnitud de los periodos húmedos. Además, Serrano-Notivoli *et al.* (2020) también identifican la mitad del siglo XX como un punto de inflexión para las características hidroclimáticas en la región, incluyendo varios cambios significativos como: el aumento de la variabilidad interanual, la menor magnitud de los periodos húmedos, el aumento de la frecuencia de eventos extremos de sequía y la coincidencia de uno de los eventos secos más extremos con la denominada “Mega sequía” de 2006-2016 del centro chileno.

El estudio realizado por Serrano-Notivoli *et al.* (2020), muestra el año 1947 como año extremadamente seco, con un SPEI-14 de -2,02 en el centro de Chile, coincidiendo con el SPI-12 de La Serena, situada más hacia el norte, el mismo año (-2,40) (Tabla 7).

Los ciclos de sequía se están intensificando y durando más en el tiempo, desplazándose cada vez más hacia latitudes más elevadas, donde empieza a haber una mayor variabilidad hidroclimática.

### 6.3. Relación de la variabilidad climática con los fenómenos ENSO y PDO

Diferentes autores han señalado que las precipitaciones en el norte de Chile están condicionadas tanto por la PDO como por el ENSO (p. ej., Ortlieb, 1995; Valdés-Pineda *et al.*, 2018).

En la estación de Copiapó, el PDO (Figura 13, derecha) muestra una correlación positiva para todos los meses y todas las escalas con el índice SPI-12, especialmente en los meses de julio (0,9), a una escala temporal de 10 a 20 años, y diciembre, a la misma escala temporal. Esta relación indica la variabilidad de baja frecuencia relacionada con este índice que controla los ciclos húmedos-secos a esta latitud (Valdés-Pineda *et al.*, 2018). El índice del Niño 3.4 (Figura 13, izquierda) muestra una correlación positiva con SPI-12 en los meses de marzo, abril y mayo, siendo mayo el mes que presenta una correlación más positiva (0,5). El resto de los meses muestran correlación positiva a escalas temporales de 1 a 10 años, mientras que los meses de invierno y primavera, muestran una correlación negativa con SPI-12 a escalas temporales de 13 a 20 años.

Esta relación muestra la relación de alta frecuencia de los años húmedos con el fenómeno ENSO a esta latitud.

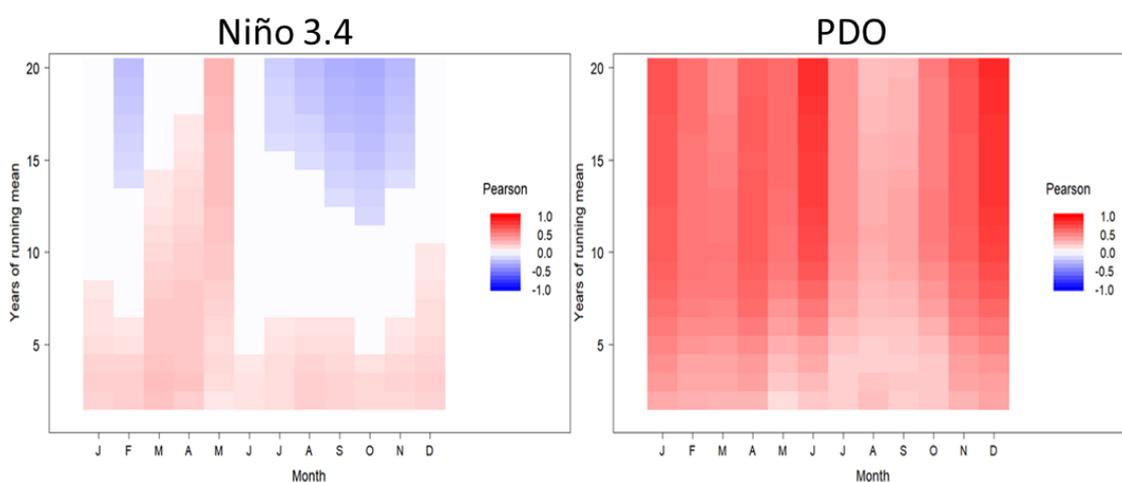


Figura 13. Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPI-12 de Copiapó 1888-2020 y 1900-2020, respectivamente.

La correlación entre el SPEI-12 de Copiapó y el índice Niño 3.4 (Figura 14, izquierda) muestra una correlación positiva de octubre a marzo, de junio a julio a escalas temporales de 1 a 20 años, en abril y mayo a escalas temporales de 1 a 6 años. En abril,

mayo y en agosto se muestra una correlación negativa entre los índices a escalas de 10 a 16 años. El índice PDO (Figura 14, derecha) muestra una correlación positiva de agosto a abril, aunque en los meses de invierno las correlaciones dejan de ser significativas.

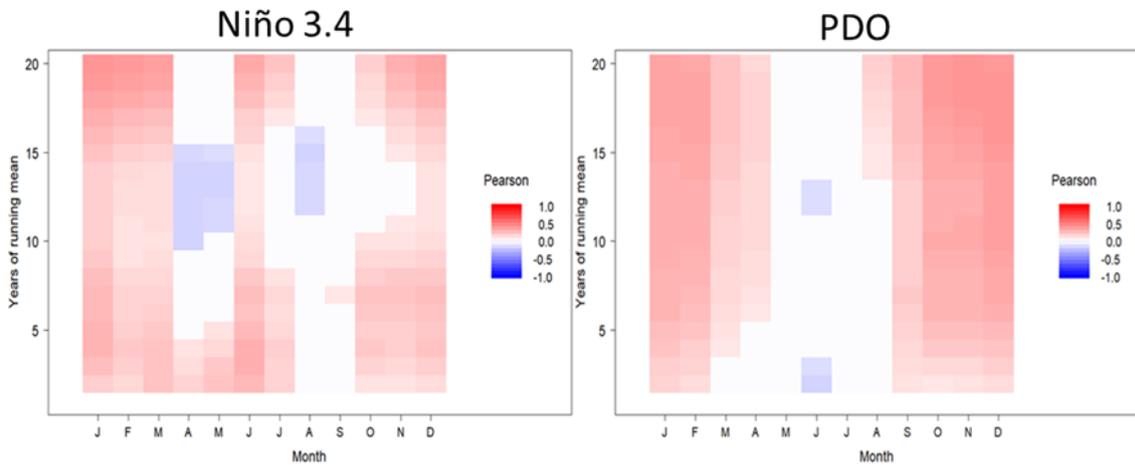


Figura 14. Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPEI-12 de Copiapó 1946-2020.

En la estación de Vallenar, el índice Niño 3.4 (Figura 15, izquierda) muestra una correlación positiva con SPI-12 en los meses de enero a mayo y en septiembre, siendo septiembre el mes que presenta una correlación más positiva a escalas temporales de 14 a 16 años. Los meses de invierno, muestran una correlación negativa con SPI-12 a escalas temporales de 3 a 13 años. Por otro lado, el índice PDO (Figura 15, derecha) muestra una correlación positiva en todos los meses y a todas las escalas temporales, siendo de diciembre a junio los meses que mayor presentan correlación con SPI-12, a escalas temporales de 10 a 20 años.

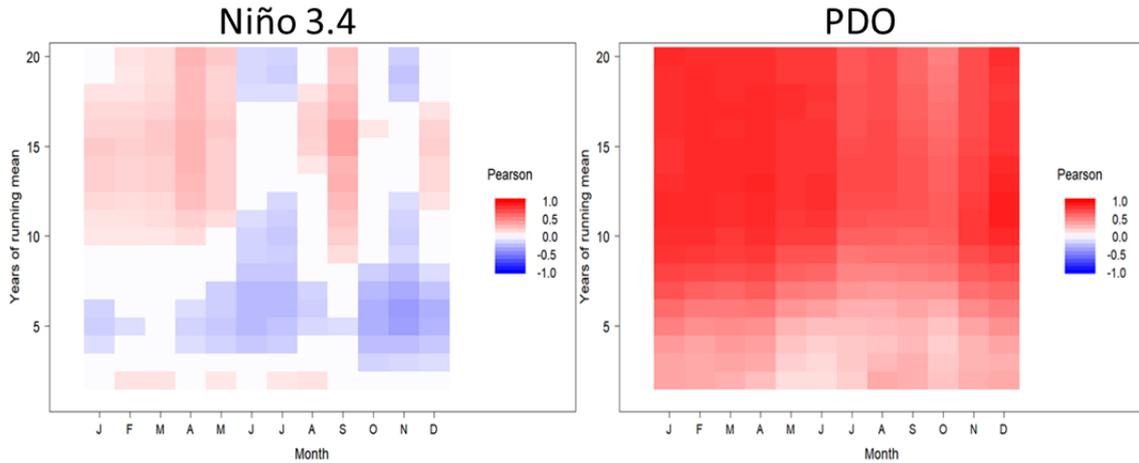


Figura 15. Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPEI-12 de Vallenar 1958-2020.

Por otro lado, el índice Niño 3.4 (Figura 16, izquierda) muestra una correlación positiva con SPEI-12 en los meses de enero febrero y marzo y de agosto a diciembre, siendo enero y febrero los meses que mantienen una mayor correlación entre SPEI-12 y Niño 3.4. En mayo y junio, a escalas temporales de 3 a 7 años, la correlación es negativa. El SPEI-12 y PDO (Figura 16, derecha) muestran correlación negativa de enero a junio y en diciembre. En los meses de verano y primavera la correlación es positiva a escalas temporales de 10 a 20 años.

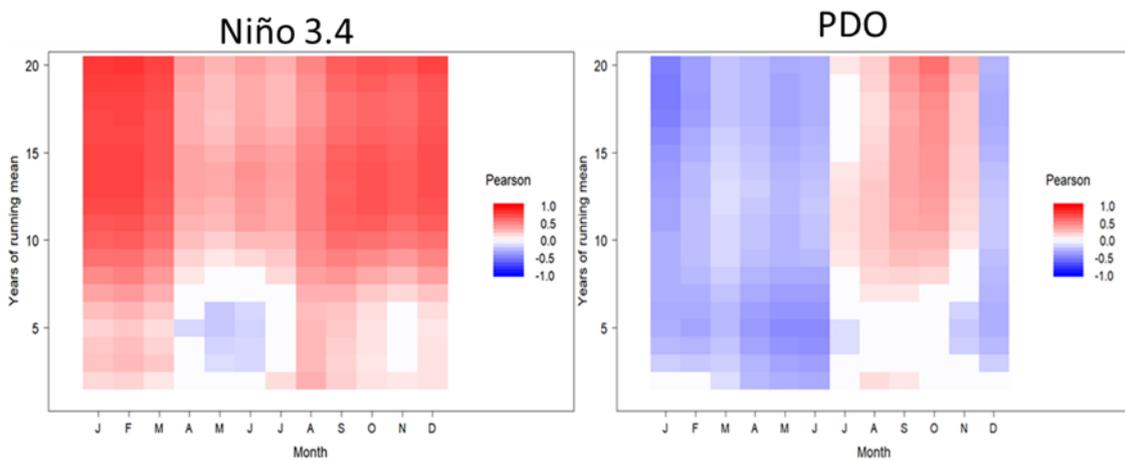


Figura 16. Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPEI-12 de Vallenar 1958-2020.

En la estación de La Serena, el PDO (Figura 17, derecha) muestra una correlación positiva para los meses de enero a junio y en noviembre y diciembre, a todas las escalas con el índice SPI-12, especialmente en los meses de enero y diciembre (0,8). A esta latitud, el PDO pierde influencia sobre las precipitaciones, mientras que, en latitudes más bajas, como Vallenar y Copiapó, la correlación con PDO es mayor. En el mes de junio no hay una correlación significativa. En agosto y septiembre se observa una correlación negativa entre los índices a escalas temporales de 14 a 20 años. El índice del Niño 3.4 (Figura 17, izquierda) muestra una correlación positiva con SPI-12 para todos los meses, siendo mayor en los meses de abril, mayo y junio. De agosto a noviembre se muestra una correlación negativa a escalas temporales de 15 a 20 años.

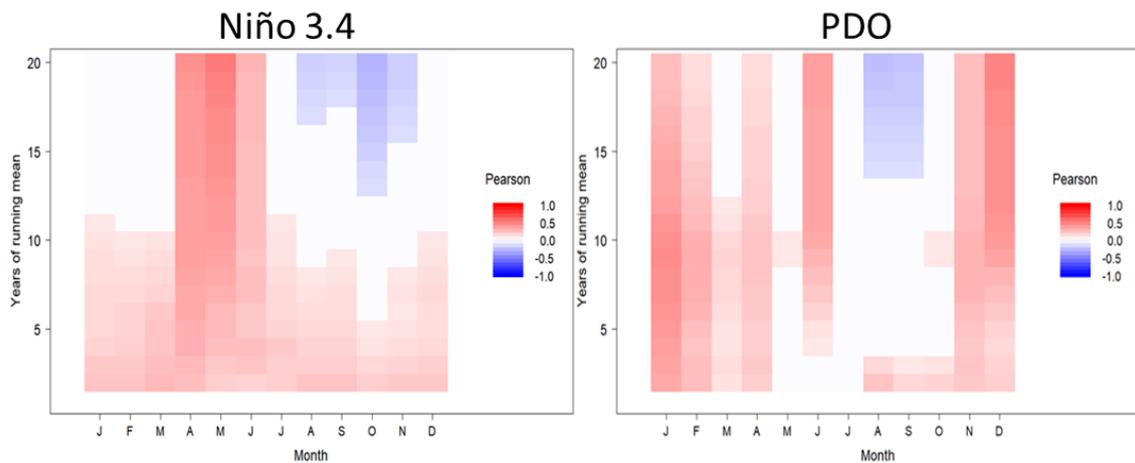


Figura 17. Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPI-12 de La Serena 1869-2020 y 1900-2020, respectivamente.

El Niño 3.4 muestra una correlación positiva con SPEI-12 en los meses de julio a noviembre (Figura 18, izquierda), mientras que en los meses de enero a junio y en diciembre, la correlación es negativa. Por otro lado, el PDO (Figura 18, derecha) muestra una correlación negativa con SPEI-12 de La Serena en enero y de marzo a diciembre. En febrero la correlación no es significativa y en agosto y septiembre parece haber correlación positiva a escalas temporales de 1 a 3 años.

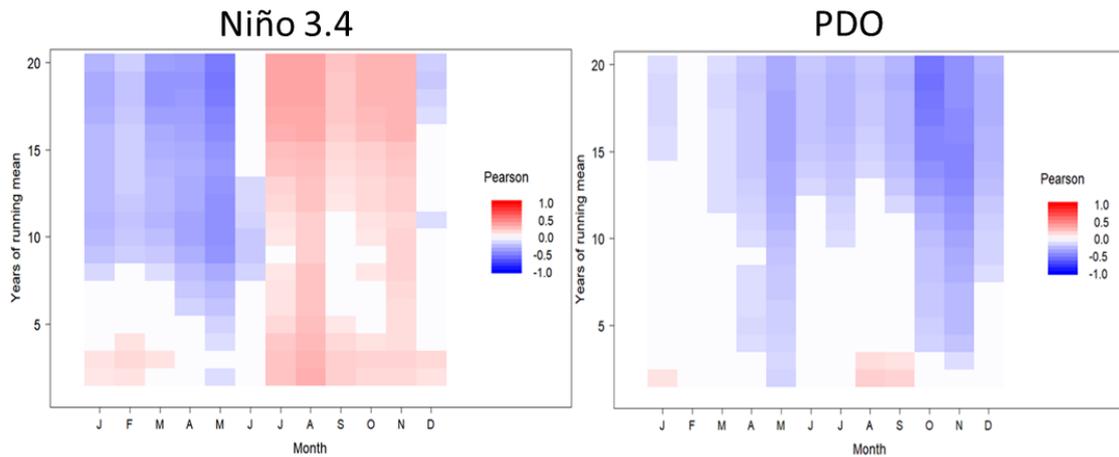


Figura 18. Correlación entre los dos índices de variabilidad climática (Niño 3.4, izquierda y PDO, derecha) y SPEI-12 de La Serena 1922-2020.

Se observa una mejor correlación entre los índices de Niño 3.4 y PDO con SPI-12, que con el SPEI-12.

#### 6.4. Relación con los eventos extremos de inundación históricos y el funcionamiento de los sistemas fluviales

Según Houston (2006) durante los años de El Niño, las precipitaciones en invierno tienden a ser más abundantes, mientras que las precipitaciones más abundantes de los meses de verano están relacionadas con el fenómeno de La Niña. Sin embargo, las precipitaciones no solo dependen del ENSO, sino que, como hemos visto en el apartado anterior, en gran medida son las condiciones regionales hacia las áreas de origen las que controlan las variaciones temporales de la precipitación. Esta variabilidad de las precipitaciones en el espacio y en el tiempo conduce a un régimen hidrológico complejo. En la zona central y septentrional del Desierto de Atacama, los ríos perennes tienden a inundarse en verano, coincidiendo con el fenómeno de La Niña. Sin embargo, la razón por la que se inundan los ríos perennes durante los meses de verano en la zona más meridional es el resultado del deshielo de las nevadas de años anteriores, especialmente durante las condiciones de El Niño. Existe una variedad de literatura relacionada con los eventos de inundaciones y fuertes precipitaciones en Chile desde el siglo XVI (Mackenna, 1877; Ortlieb, 1994; Jana *et al.*, 2019). Son especialmente

relevantes las inundaciones ocurridas en las últimas décadas en 1997, 2015 y 2017 (Carvajal Alfaro, 2017).

El ENSO está asociado con importantes impactos socioeconómicos sobre las poblaciones en las regiones de América del Sur, vinculados con las anomalías en las precipitaciones y temperaturas, provocando sequías o inundaciones (Cai *et al.*, 2020). El fenómeno de El Niño más dañino en Chile del siglo XX fue en junio del año 1997 afectando a la parte central del país, resultando en inundaciones extremas. Estas avenidas provocaron 21 muertes, daño 13.000 viviendas y generó pérdidas económicas del valor de 300 millones de dólares (Cai *et al.*, 2020). Otro evento extremo ocurrió en la zona central y norte de Chile, provocando fuertes inundaciones tras una intensa precipitación en marzo de 2015 y mayo de 2017, relacionados con el fenómeno de El Niño. Los datos muestran cómo los fenómenos extremos de inundación, relacionados con años Niño, son cada vez más frecuentes e intensos que antes.

Desde el año 1888 hasta el año 2020 en la estación meteorológica de Copiapó se han registrado un total de 19 eventos de inundación (Figura 19), de los cuales el 42% se han clasificado como ordinarios, el 47% son extraordinarios y el 2% son catastróficos (1888 y 2015) (Carvajal, 2017) (Anexo: Tabla 7).

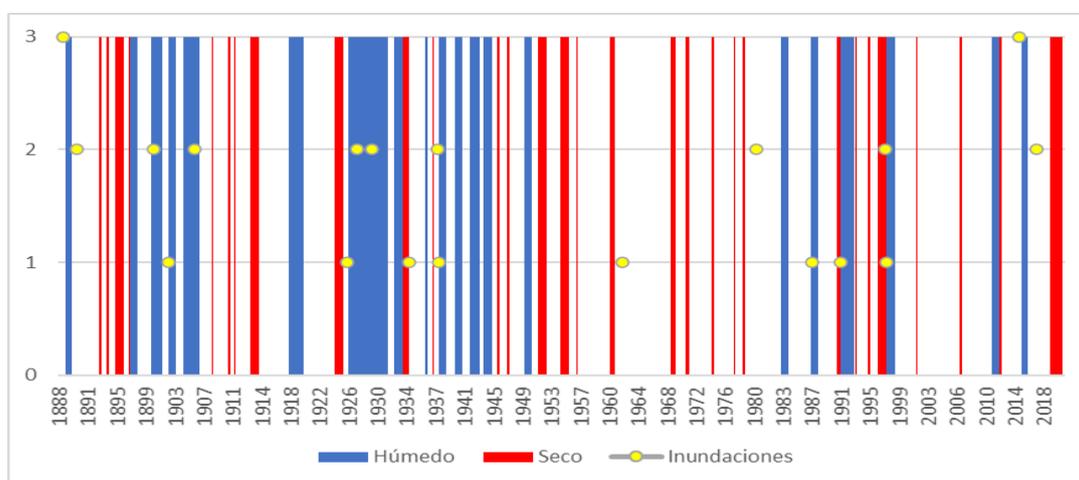


Figura 19. Relación de las inundaciones del río Copiapó con los periodos climáticos obtenidos para el índice SPI-12 en la estación de Copiapó. 1: Inundación ordinaria; 2: Inundación extraordinaria; 3: Inundación catastrófica de acuerdo con la clasificación de Barriendos *et al.* (2003).

La Figura 19 y Anexo: Tabla 7 corroboran que no hay ninguna inundación que ocurra en un mes seco; sí es bien que las inundaciones ordinarias de mayo de 1934 y junio de

1991 ocurren en meses normales precedidos por unos meses secos, así como la histórica inundación extraordinaria de junio de 1997, que sucede en un mes húmedo, pro los meses anteriores son secos. El resto de las inundaciones suceden en meses normales y/o húmedos precedidos de meses también normales y/o húmedos. Desde el año 1934 se observa un patrón en el cuál las inundaciones suceden bien en meses húmedos o normales, pero los meses anteriores a dichos eventos no son húmedos, sino que son normales o secos.

Por otro lado, para la estación de La Serena, desde el año 1869 hasta el año 2020 se han registrado un total de 55 eventos de inundación (Figura 20), de los cuales el 60% se han clasificado como ordinarios, el 33% son extraordinarios y el 7% son catastróficos (Anexo: Tabla 8).

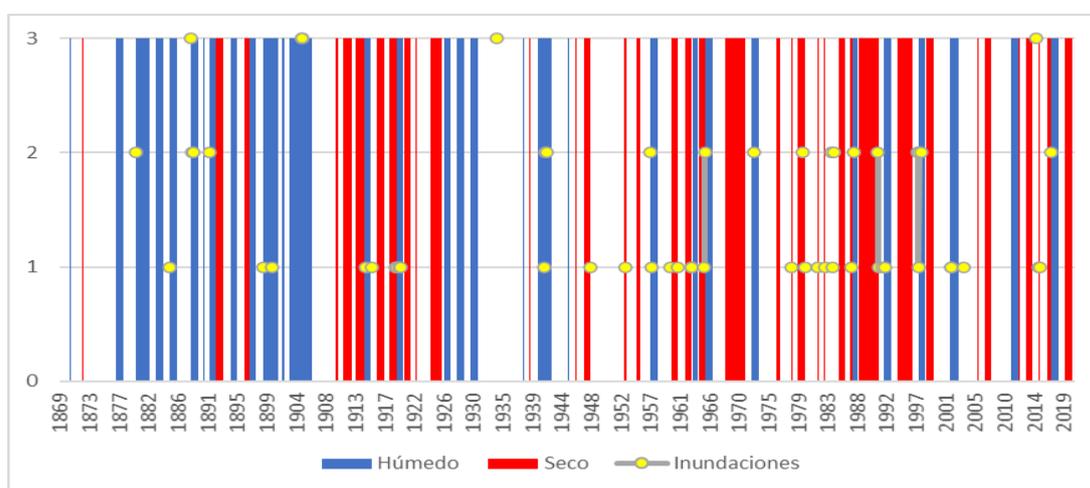


Figura 20. Relación de las inundaciones del río Elqui con los periodos climáticos obtenidos para el índice SPI-12 en la estación de La Serena. 1: Inundación ordinaria; 2: Inundación extraordinaria; 3: Inundación catastrófica de acuerdo con la clasificación de Barriandos et al. (2003).

La Figura 20 y Anexo: Tabla 8 muestran julio de 1978 como el único mes de toda la serie en el que se produce un evento de inundación ordinario en un mes seco. El resto de las inundaciones suceden en meses tanto húmedos como secos y estas van precedidas de meses húmedos y normales, aunque desde la segunda mitad del siglo pasado se observa un ligero patrón donde hay eventos extremos de inundación que ocurren precedidos de meses secos, hecho que no ocurre al principio de la serie.

En la cuenca del río Copiapó se observa que las inundaciones ordinarias se distribuyen durante todo el siglo XX, mientras que el mayor número de inundaciones

extraordinarias suceden en la primera mitad del siglo XX, ya que recoge la mayor frecuencia de meses húmedos (Tabla 8). Por otro lado, la cuenca del río Elqui registra un aumento notable de las inundaciones ordinarias y extraordinarias durante la segunda mitad del siglo XX, a pesar de verse reducida la frecuencia de periodos húmedos hasta por diez veces desde finales del siglo XIX.

Tabla 8. Relación de la frecuencia de periodos húmedos con los tres tipos de inundación para la cuenca del río Copiapó y río Elqui.

Cuenca	Período	Frecuencia meses húmedos	Inundación ordinaria	Inundación extraordinaria	Inundación catastrófica
Copiapó (río Copiapó)	1888-1900	29 (18,59%)	0	2	1
	1901-1950	190 (31,67%)	4	4	0
	1951-2000	58 (9,67%)	4	2	0
	2001-2020	20 (8,33%)	0	1	1
La Serena (río Elqui)	1869-1900	115 (29,95%)	3	4	1
	1901-1950	124 (20,67%)	8	2	2
	1951-2000	59 (9,83%)	17	11	0
	2001-2020	26 (10,83%)	5	1	1

Un estudio reciente de Brunner *et al.* (2021) afirma que un aumento de la precipitación moderada no se traduce en un aumento en la cantidad ni magnitud de las inundaciones; sin embargo, un aumento en la magnitud y la intensidad de la precipitación, resultaría en inundaciones de mayor magnitud e intensidad. Los datos obtenidos muestran cómo una gran parte de los eventos de inundación extraordinarios y catastróficos suceden en meses cuyo índice SPI-12 supera el valor de 1 para meses húmedos y el valor de 2 para meses extremadamente húmedos (Anexo: Tablas 7 y 8). Además, Brunner *et al.* (2021) sugiere que el cambio climático puede estar disminuyendo la magnitud de eventos moderados de inundación, al mismo tiempo que aumenta la magnitud de los eventos más extremos de inundación.

## 6. CONCLUSIONES

Para la obtención de los resultados se ha empleado una serie larga, recopilando datos de precipitación y temperatura media mensual desde finales del siglo XVIII, con el objetivo de estudiar la variabilidad hidroclimática y la tendencia del clima desde inicio de la serie temporal hasta el tiempo presente.

Los datos de precipitación en las tres cuencas hidrográficas muestran una tendencia decreciente desde el inicio de la serie temporal hasta el año 2020; por el contrario, el aumento de la temperatura media a lo largo de la serie temporal solo se observa en la cuenca del río Huasco, en la del Copiapó y el Elqui la tendencia es más dudosa, pudiendo ser la causa la camanchaca. Además, para las tres estaciones meteorológicas estudiadas se observa que la frecuencia de ocurrencia de ciclos húmedos ha disminuido desde principio de la serie temporal hasta día de hoy; por el contrario, la ocurrencia de ciclos de sequía se ha incrementado en las tres cuencas hidrográficas para el mismo periodo. Los ciclos de sequía se están intensificando y durando más en el tiempo, desplazándose cada vez más hacia latitudes más elevadas, donde empieza a haber una mayor variabilidad hidroclimática.

Los resultados obtenidos en este trabajo guardan relación con otros estudios realizados sobre la variabilidad hidroclimática en el centro de Chile. De esta forma, se confirma una tendencia de variabilidad hidroclimática, aumento de la duración de los ciclos secos y disminución de la magnitud de los ciclos húmedos, que no es resultado de un caso aislado, sino que responde a un cambio en el patrón de todo un sistema., consecuencia del cambio climático.

El índice de variabilidad hidroclimática SPI-12 es el que mejor se relaciona con los fenómenos ENSO y PDO. Esta correlación muestra una relación de alta frecuencia de los años húmedos con el fenómeno ENSO a las latitudes comprendidas entre 27 y 30° S. La relación también existe entre el SPI-12 Y el PDO, sin embargo, para la latitud de La Serena el PDO pierde influencia sobre las precipitaciones.

Por último, existe una relación entre los periodos encontrados y la ocurrencia de fenómenos extremos de inundación en la zona de estudio. Las inundaciones suceden en meses húmedos y/o normales, precedidos de meses húmedos y/o normales; sin embargo, desde mediados del siglo XX se observa una tendencia donde los fenómenos

extremos de inundación ocurren precedidos de meses secos o normales solamente. Esto último guarda relación con la tendencia mencionada anteriormente hacia periodos de sequía de mayor duración y ciclos húmedos de menor magnitud y frecuencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- AEMET (2020). Interpretación del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). Disponible en: [http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/vigilancia\\_sequia/](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/vigilancia_sequia/) [27 de Diciembre de 2020].
- Almeyda, E. (1948). Pluviometría de las zonas del desierto y las estepas cálidas de Chile.
- Ancapichún, S., Garcés-Vargas, J. (2015). Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre la temperatura superficial del mar frente a la costa centro-norte de Chile. *Ciencias marinas*, 41(1), 1-20.
- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Roman-Figueroa, C., Uribe, J. M., Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9), 4309-4330.
- Ayugi, B., Tan, G., Niu, R., Dong, Z., Ojara, M., Mumo, L., Babaousmail, H., Ongoma, V. (2020). Evaluation of meteorological drought and flood scenarios over Kenya, East Africa. *Atmosphere*, 11(3), 307.
- Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M.C., Naulet, R., Lemaitre, F., Barrera, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 583–592.
- Beguiría, S., Latorre, B., Reig, F., Vicente-Serrano, S. M. (2021). SPEI, The Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. Disponible en: <https://spei.csic.es/home.html> [5 de mayo de 2021].
- Bowman, I. (1924). Desert trails of Atacama (No. 5). *American Geographical Society*.
- Brunner, M.I., Swain, D.L., Wood, R.R., Willkofer, F., Done, J.M., Guilleland, E., Ludwig, R. (2021). An extremeness threshold determines the regional response of floods to changes in rainfall extremes. *Commun Earth Environ* 2, 173. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00248-x>
- Burton, I., Kates, R. W., White, G. (1978). The Environment as Hazard. *Oxford University Press: New York*.

- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 215-231.
- Carrasco Cerda, J. (2017). Evidencia de cambio climático en Chile: sus proyecciones y consecuencias. *Tesis Doctoral*, Universidad de Magallanes. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/> [1 de Junio de 2021].
- Carvajal, H.A. (2017). Análisis y cartografía multievento de peligrosidad del núcleo urbano de Copiapó ante inundaciones y aluviones.
- Cerda, M., Evangelista, H., Valdes, J., Siffedine, A., Boucher, H., Nogueira, J., Nepomuceno, A., Ortlieb, L. (2019). A new 20th century lake sedimentary record from the Atacama Desert/Chile reveals persistent PDO (Pacific Decadal Oscillation) impact. *Journal of South American Earth Sciences*, 95, 102302.
- Chadwick, C., Gironás, J., Vicuña, S., Meza, F., McPhee, J. (2018). Using a statistical preanalysis approach as an ensemble technique for the unbiased mapping of GCM changes to local stations. *Journal of Hydrometeorology*, 19(9), 1447-1465.
- Climate-Data.org (2021). Disponible en: <https://es.climate-data.org/americadel-sur/chile/iv-region-de-coquimbo/la-serena-939/> [4 de Junio de 2021].
- Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2020). Anuarios meteorológicos chilenos. Disponible en: <http://biblioteca.dgf.uchile.cl/anuarios/anuariosmeteorologicoschilenos.html> [27 de Diciembre de 2020].
- DGA (2004a). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Copiapó.
- DGA (2004b). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Huasco.
- DGA (2004c). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Elqui.
- DGA (2016a). Atlas del agua Chile 2016. *Capítulo 1: Chile en el mundo*. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf> .

- DGA (2016b). Atlas del agua Chile 2016. *Capítulo 2: Nuestra agua*. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/sad/Atlas2016parte2.pdf> .
- DGA (2021). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes> [20 de enero de 2021].
- Dirección de Obras Hidráulicas (2015). Caracterización y levantamiento de información debido a las crecidas aluvionales en la cuenca del Río Copiapó, Región de Atacama, para el temporal del 25 y 26 de marzo de 2015.
- DMC (2021). Catastro Nacional de Estaciones Meteorológicas. Disponible en: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/informacion/catastroEstaciones/> [3 de Enero de 2021].
- Freund, M. B., Henley, B. J., Karoly, D. J., McGregor, H. V., Abram, N. J., Dommenges, D. (2019). Higher frequency of Central Pacific El Niño events in recent decades relative to past centuries. *Nature Geoscience*, 12(6), 450-455.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.
- Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(15), 2181-2198.
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Izquierdo, T., Abad, M., Gómez, Y., Gallardo, D., Rodríguez-Vidal, J. (2021). The March 2015 catastrophic flood event and its impacts in the city of Copiapó (southern Atacama Desert). An integrated analysis to mitigate future mudflow derived damages. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102975.

- Jana, P., Torrejón, F., Araneda, A., Stehr, A. (2019). Drought periods during 18th century in central Chile (33° S): A historical reconstruction perspective revisiting Vicuña Mackenna's work. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1748-1755.
- Johnson, N. (2021). Double-dipping: Why does La Niña often occur in consecutive winters?. Disponible en: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/double-dipping-why-does-la-ni%C3%B1a-often-occur-consecutive-winters> [1 de Junio de 2021].
- Keyantash, J., National Center for Atmospheric Research Staff (2018). The Climate Data Guide: Standardized Precipitation Index (SPI). Disponible en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi> [27 de Diciembre de 2021].
- Mackenna, B. V. (1877). Ensayo histórico sobre el clima de Chile:(desde los tiempos prehistóricos hasta el gran temporal de julio de 1877). Imprenta del Mercurio.
- Maldonado, A., Rozas, E. (2008). Clima y paleoambientes durante el Cuaternario tardío en la Región de Atacama. In: *Squeo, F.A., Arancio, G., Gutiérrez, J.R. (eds.) Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile. 16, 293-304.*
- Mantua, N. J., Hare, S. R. (2002). The Pacific decadal oscillation". *Journal of oceanography*, 58(1), 35-44.
- Martínez, R., Rivadeneira, A., Nieto, J. (2011). Guía de buenas prácticas para la predicción estacional en Latinoamérica. *CIIFEN, 2011 (1) 1-55pp. ISBN-978-9978-9934-3-9.*
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).*
- Montecinos, A., Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of climate*, 16(2), 281-296.
- NOAA (2021a). Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2). Disponible en: <https://psl.noaa.gov/enso/mei/> [1 de Mayo de 2021].
- NOAA (2021b). Pacific Decadal Oscillation (PDO). Disponible en: <https://psl.noaa.gov/pdo/> [1 de Mayo de 2021].

- Oertel, M., Meza, F. J., Gironás, J. (2020). Observed trends and relationships between ENSO and standardized hydrometeorological drought indices in central Chile. *Hydrological Processes*, 34(2), 159-174.
- Oliveira-Júnior, J. F., de Gois, G., de Bodas Terassi, P. M., da Silva Junior, C. A., Blanco, C. J. C., Sobral, B. S., Gasparini, K. A. C. (2018). Drought severity based on the SPI index and its relation to the ENSO and PDO climatic variability modes in the regions North and Northwest of the State of Rio de Janeiro-Brazil. *Atmospheric Research*, 212, 91-105.
- Ortega, C., Vargas, G., Rojas, M., Rutllant, J. A., Muñoz, P., Lange, C. B., Pantoja, S., Dezileau, L., Ortlieb, L. (2019). Extreme ENSO-driven torrential rainfalls at the southern edge of the Atacama Desert during the Late Holocene and their projection into the 21th century. *Global and planetary change*, 175, 226-237.
- Ortlieb, L. (1994). Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. *Revista Chilena de Historia Natural*, 67(3), 117-139.
- Ortlieb, L. (1995). Eventos El Niño y episodios lluviosos en el desierto de Atacama: el registro de los últimos dos siglos. *Bull. Inst. fr. études andines*, 24(3), 519-537.
- Palma, G.G. (2019). Análisis y cartografía de procesos geológicos peligrosos en Vicuña, Región de Coquimbo, Chile.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought (Vol. 30). *US Department of Commerce, Weather Bureau*.
- R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. Disponible en: <http://www.R-project.org/>.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, (57), 177-192.
- Rutllant, J. A., Fuenzalida, H., Aceituno, P. (2003). Climate dynamics along the arid northern coast of Chile: The 1997–1998 Dinámica del Clima de la Región de Antofagasta (DICLIMA) experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D17).

- Sayago, C.M. (1874). Historia de Copiapó. *Imprenta El Atacama*, 450 pp.
- Schulz, N., Boisier, J. P., Aceituno, P. (2011). Climate change along the arid coast of northern Chile. *International Journal of Climatology*, 32(12), 1803-1814.
- Serrano-Notivoli, R., Tejedor, E., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., Vuille, M., Fuentealba, M., de Luis, M. (2020). Hydroclimatic variability in Santiago (Chile) since the 16th century. *International Journal of Climatology*, 41, E2015-E2030.
- Strub, P. T. (1998). Coastal ocean circulation off western South America. The global coastal ocean. *Regional studies and syntheses*, 273-315.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38 (1), 55-94.
- UNESCO, ONU-Agua (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático. París, UNESCO. *Diseño original de la portada por Phoenix Design Ai*
- UNISDR (2017). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction – UNISDR. Disponible en: <http://www.unisdr.org/we/coordinate/sendai-framework>
- Valdés-Pineda, R., Cañón, J., Valdés, J. B. (2018). Multi-decadal 40-to 60-year cycles of precipitation variability in Chile (South America) and their relationship to the AMO and PDO signals. *Journal of Hydrology*, 556, 1153-1170.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, V., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538-2567.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vicente Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López Moreno, J. I., Azorín Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejada, E., Sánchez Lorenzo, A. (2012). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas,

agrícolas e hidrológicas. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8.

Vicente-Serrano, S. M., National Center for Atmospheric Research Staff (2015). The Climate Data Guide: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei> [27 de Diciembre de 2021].

Vicuña, S., Garreaud, R. D., McPhee, J. (2011). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105(3), 469-488.

WMO (2020a). Time series: monthly NINO3.4 rel. Disponible en: [https://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?WMO=NCDCData/ersst\\_nino3.4a\\_rel&STATION=NINO3.4\\_rel&TYPE=i&id=someone@somewhere](https://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?WMO=NCDCData/ersst_nino3.4a_rel&STATION=NINO3.4_rel&TYPE=i&id=someone@somewhere) [1 de Junio de 2021].

WMO (2020b). Time series: monthly PDO. Disponible en: <https://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?WMO=UWData/pdo&STATION=PDO&TYPE=i&id=someone@somewhere> [1 de Junio de 2021].

Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., Wen, F. (2007). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(1), 65-79.

Zaman, M. A., Rahman, A., Haddad, K. (2012). Regional flood frequency analysis in arid regions: A case study for Australia. *Journal of Hydrology*, 475, 74-83.

## ANEXOS

*Tabla 1. Clasificación en periodos húmedos y secos de SPI-12 Copiapó.*

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
1888-1889	húmedo	11,985	1,565	1889
1891-1894	seco	-25,998	-1,132	1893
1896-1897	seco	-12,731	-1,132	1896
1897-1898	húmedo	13,087	1,11	1897
1900-1901	húmedo	26,052	1,938	1900
1902-1903	húmedo	16,950	1,481	1902
1904-1906	húmedo	28,908	1,335	1905
1908	seco	-1,132	-1,132	1908
1910-1911	seco	-9,571	-1,063	1910
1913-1914	seco	-12,833	-1,132	1913
1918-1920	húmedo	26,448	1,99	1919
1924-1925	seco	-10,703	-1,132	1925
1926-1931	húmedo	93,713	2,071	1927
1932-1933	húmedo	13,830	1,313	1932
1933-1934	seco	-9,571	-1,063	1933
1936	húmedo	3,150	1,175	1936
1937	seco	-1,063	-1,063	1937
1938-1939	húmedo	11,060	1,295	1938
1940-1941	húmedo	21,382	2,005	1940
1942-1943	húmedo	16,861	1,778	1942
1944-1945	húmedo	14,200	1,469	1944
1946	seco	-3,872	-1,030	1946
1947	seco	-2,003	-1,004	1947
1949-1950	húmedo	14,769	1,273	1949
1951-1952	seco	-11,701	-1,132	1952
1954-1955	seco	-11,573	-1,063	1954
1956	seco	-2,000	-1,063	1956
1961	seco	-4,128	-1,132	1961
1969	seco	-5,191	-1,132	1969
1971	seco	-3,130	-1,132	1971
1974	seco	-2,061	-1,063	1974
1977	seco	-1,029	-1,029	1977
1978	seco	-1,063	-1,063	1978
1983-1984	húmedo	13,535	1,342	1984
1987-1988	húmedo	17,302	1,558	1987
1991	seco	-3,130	-1,132	1991
1991-1993	húmedo	28,989	2,061	1992
1993	seco	-2,061	-1,063	1993
1995	seco	-1,997	-1,030	1995
1996-1997	seco	-12,833	-1,132	1996
1997-1998	húmedo	34,958	2,841	1997

Tabla 1 (continuación). Clasificación en periodos húmedos y secos de SPI-12 Copiapó.

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
2001	seco	-1,063	-1,063	2001
2007	seco	-3,130	-1,132	2007
2011-2012	húmedo	12,451	1,124	2011
2012	seco	-1,063	-1,063	2012
2015-2016	húmedo	9,748	1,273	2015
2019-2020	seco	-18,797	-1,132	2019

Tabla 2. Clasificación en periodos húmedos y secos de SPI-12 Vallenar.

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
1960-1961	seco	-16,393	-1,409	1960
1965	seco	-1,163	-1,163	1965
1968-1969	seco	-15,677	-1,661	1969
1970-1972	seco	-28,729	-1,459	1971
1973	húmedo	1,084	1,084	1973
1975	húmedo	4,284	1,139	1975
1978-1979	seco	-18,478	-1,661	1979
1980-1981	húmedo	10,073	1,137	1980
1983-1985	húmedo	30,440	1,874	1984
1987-1988	húmedo	20,696	2,047	1987
1988-1989	seco	-13,280	-1,314	1989
1991-1993	húmedo	32,435	2,107	1992
1994-1996	seco	-31,264	-1,409	1995
1997-1998	húmedo	32,781	2,755	1998
1999	seco	-2,151	-1,091	1999
2000-2001	húmedo	12,795	1,386	2000
2001	seco	-1,214	-1,214	2001
2002-2003	húmedo	15,735	1,508	2002
2003-2004	seco	-11,160	-1,204	2004
2006-2008	seco	-22,993	-1,393	2007
2015-2016	húmedo	20,722	1,634	2015
2017-2018	húmedo	9,140	1,022	2017
2019-2020	seco	-12,542	-1,553	2019

Tabla 3. Clasificación en periodos húmedos y secos de SPI-12 La Serena.

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
1870	húmedo	1,142	1,142	1870
1872	seco	-1,002	-1,002	1872
1877-1878	húmedo	11,912	1,107	1877
1880-1882	húmedo	42,950	1,577	1981
1883-1884	húmedo	14,470	1,636	1883
1885-1886	húmedo	16,194	1,614	1886
1888-1889	húmedo	30,581	2,575	1888
1890	húmedo	1,124	1,124	1890
1891-1892	húmedo	18,820	1,648	1891
1892-1893	seco	-16,333	-1,754	1893
1894-1895	húmedo	10,757	1,150	1894
1896-1897	seco	-10,911	-1,869	1896
1897-1898	húmedo	12,245	1,280	1897
1899-1901	húmedo	37,073	2,096	1900
1902	húmedo	3,301	1,387	1902
1903-1906	húmedo	58,572	1,956	1905
1910	seco	-1,996	-1,083	1910
1911-1912	seco	-13,924	-1,230	1911
1913-1914	seco	-18,520	-1,977	1913
1914-1915	húmedo	18,894	1,831	1915
1916-1917	seco	-17,658	-2,225	1916
1918-1919	seco	-10,012	-1,055	1919
1919-1920	húmedo	22,019	2,010	1919
1920-1921	seco	-23,224	-2,422	1921
1922	seco	-1,042	-1,042	1922
1924-1926	seco	-26,679	-2,112	1924
1926-1927	húmedo	14,213	1,350	1926
1928-1929	húmedo	12,827	1,222	1929
1930-1931	húmedo	13,604	1,297	1931
1938	húmedo	1,054	1,054	1938
1939	seco	-1,572	-1,572	1939
1940-1942	húmedo	29,015	1,491	1941
1945	húmedo	2,283	1,147	1945
1946	seco	-3,869	-1,308	1946
1947-1948	seco	-13,780	-2,390	1947
1953	seco	-3,169	-2,243	1953
1955	seco	-5,175	-1,439	1955
1957-1958	húmedo	20,184	1,809	1957
1960-1961	seco	-21,925	-2,186	1961
1962-1963	seco	-12,370	-1,924	1962
1963-1964	húmedo	8,702	1,127	1963
1964-1965	seco	-12,969	-1,421	1965
1965-1966	húmedo	14,539	1,607	1966
1968-1971	seco	-55,623	-3,686	1969

Tabla 3 (continuación). Clasificación en periodos húmedos y secos de SPI-12 La Serena.

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
1972-1973	húmedo	14,821	1,297	1973
1976	seco	-4,966	-1,769	1976
1978	seco	-2,338	-1,327	1978
1979-1980	seco	-19,660	-2,329	1980
1982	seco	-1,041	-1,041	1982
1983	seco	-2,035	-1,102	1983
1985-1986	seco	-10,869	-1,280	1985
1987	seco	-2,088	-1,145	1987
1987-1988	húmedo	9,893	1,046	1987
1988-1991	seco	-55,451	-2,083	1989
1992-1993	húmedo	17,495	1,616	1992
1991-1996	seco	-42,699	-2,545	1995
1997-1998	húmedo	13,173	1,348	1998
1998-1999	seco	-15,076	-1,690	1999
2002-2003	húmedo	15,957	1,368	2002
2004	seco	-2,015	-1,007	2004
2006	seco	-1,308	-1,308	2006
2007-2008	seco	-12,104	-1,660	2007
2011-2012	húmedo	14,479	1,266	2011
2012	seco	-1,803	-1,803	2012
2013-2014	seco	-11,492	-2,519	2014
2015	seco	-1,243	-1,243	2015
2016-2017	seco	-9,072	-1,304	2017
2017-2018	húmedo	10,718	1,121	2017
2019-2020	seco	-24,839	-2,341	2020

Tabla 4. Clasificación en periodos húmedos y secos de SPEI-12 Copiapó.

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
1947-1949	seco	-32,761	-1,501	1947
1950-1955	seco	-74,483	-1,914	1952
1963	seco	-1,019	-1,019	1963
1966-1967	húmedo	7,071	1,083	1966
1968	húmedo	1,978	1,036	1968
1971	húmedo	14,552	1,468	1971
1973-1976	húmedo	48,107	1,873	1974
1978	húmedo	3,150	1,182	1978
1981	húmedo	4,963	1,074	1981
1983	seco	-11,183	-1,752	1983
1984-1985	húmedo	15,779	1,893	1984
1987-1988	húmedo	11,526	1,386	1987
1989-1990	húmedo	21,035	2,143	1990
1991-1992	húmedo	14,117	2,124	1992
1993-1997	seco	-83,121	-2,334	1997
1998-2000	seco	-37,683	-2,323	1998
2000-2001	húmedo	6,304	1,580	2000
2008	húmedo	5,738	1,243	2008
2010-2012	húmedo	45,821	2,691	2011
2013-2016	húmedo	41,002	2,259	2015
2017	seco	-1,915	-1,009	2017
2018	húmedo	10,909	1,604	2018

Tabla 5. Clasificación en periodos húmedos y secos de SPEI-12 Vallenar.

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
1966	húmedo	6,487	1,209	1966
1972	húmedo	5,542	1,212	1972
1973-1976	húmedo	42,367	1,815	1975
1978	húmedo	3,355	1,206	1978
1980-1981	húmedo	4,274	1,154	1981
1983	seco	-9,630	-2,022	1983
1984-1985	húmedo	29,216	2,106	1984
1987-1988	húmedo	14,990	2,177	1987
1988-1989	seco	-9,481	-1,715	1988
1991-1992	húmedo	24,766	2,157	1991
1993-1996	seco	-40,624	-2,097	1995
1997	seco	-1,157	-1,157	1997
1997-1998	húmedo	22,213	2,417	1997
1998	seco	-7,595	-1,756	1998
2000	seco	-3,159	-1,118	2000
2000-2001	húmedo	5,138	1,101	2001
2001-2002	seco	-8,430	-1,358	2002
2002-2002	húmedo	7,151	1,407	2003
2003-2004	seco	-7,995	-1,327	2003
2004-2005	húmedo	13,685	1,912	2005
2006-2007	seco	-21,223	-1,722	2006
2009	seco	-5,349	-1,120	2009
2012-2014	seco	-27,360	-1,693	2013
2016-2017	seco	-32,597	-2,626	2017
2018-2020	seco	-38,359	-1,791	2019

Tabla 6. Clasificación en periodos húmedos y secos de SPEI-12 La Serena.

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
1924-1926	seco	-47,630	-2,394	1926
1927	húmedo	7,190	1,482	1927
1928-1929	húmedo	15,177	1,382	1928
1930	seco	-4,036	-2,281	1930
1931-1932	seco	-13,397	-2,023	1931
1933-1934	seco	-13,694	-1,650	1933
1934	húmedo	3,883	1,488	1934
1935	seco	-10,237	-2,034	1935
1938	húmedo	3,968	1,527	1938
1940-1942	húmedo	32,568	1,601	1940
1945	húmedo	4,918	1,419	1945
1946	seco	-4,375	-1,493	1946
1947	seco	-13,277	-1,676	1947
1950	seco	-2,168	-1,196	1950
1951-1952	seco	-10,095	-1,641	1952
1953-1954	seco	-11,062	-1,403	1953
1957-1959	húmedo	43,162	2,385	1957
1960-1961	seco	-21,277	-2,148	1960
1962	húmedo	5,233	1,152	1962
1962-1963	seco	-16,141	-2,204	1963
1963-1964	húmedo	13,781	1,630	1964
1965-1966	húmedo	28,257	2,269	1966
1969-1970	seco	-20,889	-1,633	1969
1972-1973	húmedo	21,538	1,967	1972
1979-1980	seco	-16,864	-1,753	1980
1983	seco	-9,935	-2,043	1983
1983-1985	húmedo	25,899	1,733	1984
1985	seco	-2,032	-1,120	1985
1987	seco	-3,136	-1,102	1987
1987-1988	húmedo	15,712	1,386	1987
1988	seco	-3,346	-1,166	1988
1990	seco	-2,436	-1,268	1990
1992-1993	húmedo	24,585	2,047	1993
1995-1996	seco	-15,788	-1,736	1995
1997-1998	húmedo	13,581	1,542	1997
1998	seco	-7,225	-1,592	1998
2001-2003	húmedo	33,855	1,947	2002
2005	húmedo	1,047	1,047	2005
2007	seco	-1,329	-1,329	2007
2008	húmedo	1,947	1,012	2008
2011-2012	húmedo	21,815	1,959	2011
2012	seco	-1,346	-1,346	2012
2014	seco	-1,103	-1,103	2014
2015	seco	-1,024	-1,024	2015

Tabla 6 (continuación). Clasificación en periodos húmedos y secos de SPEI-12 La Serena.

<b>Periodo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Año</b>
2016-2017	seco	-11,682	-1,768	2016
2017-2018	húmedo	13,176	1,500	2018
2019-2020	seco	-18,734	-1,708	2020

Tabla 7. Valores del SPI-12 de la inundación y sus seis meses previos para la estación de Copiapó.

Copiapó							
Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12
<b>8-1888</b>	<b>0,000 (3)</b>						
12-1889	-0,457	dic-26	1,033	ene-62	-0,034	feb-97	-0,938
01-1890	-0,471	ene-27	1,028	feb-62	-0,034	mar-97	-0,967
02-1891	-0,471	feb-27	1,028	mar-62	-0,039	abr-97	-1,030
03-1892	-0,483	mar-27	1,031	abr-62	-0,023	may-97	-1,132
04-1893	-0,502	abr-27	1,035	may-62	-0,002	jun-97	1,747
05-1894	-0,960	may-27	1,035	jun-62	-0,032	jul-97	1,768
<b>06-1890</b>	<b>0,425 (2)</b>	<b>jun-27</b>	<b>1,840 (2)</b>	<b>jul-62</b>	<b>0,293 (1)</b>	<b>ago-97</b>	<b>2,747 (1)</b>
feb-00	0,720	dic-28	1,094	oct-79	-0,836	sep-14	0,163
mar-00	0,721	ene-29	1,089	nov-79	-0,837	oct-14	0,178
abr-00	1,113	feb-29	1,089	dic-79	-0,843	nov-14	0,176
may-00	1,111	mar-29	1,093	ene-80	-0,865	dic-14	0,164
jun-00	1,114	abr-29	1,096	feb-80	-0,865	ene-15	0,156
jul-00	1,215	may-29	1,363	mar-80	-0,967	feb-15	0,160
<b>ago-00</b>	<b>1,870 (2)</b>	<b>jun-29</b>	<b>2,397 (2)</b>	<b>abr-80</b>	<b>-0,565 (2)</b>	<b>mar-15</b>	<b>0,938 (3)</b>
ene-02	-0,217	nov-33	-0,908	abr-87	0,096	nov-16	-0,908
feb-02	-0,218	dic-33	-0,914	may-87	-0,160	dic-16	-0,914
mar-02	-0,225	ene-34	-0,938	jun-87	-0,189	ene-17	-0,938
abr-02	-0,211	feb-34	-0,938	jul-87	1,558	feb-17	-0,938
may-02	-0,192	mar-34	-0,967	ago-87	1,441	mar-17	-0,476
jun-02	-0,006	abr-34	-1,030	sep-87	1,450	abr-17	-0,468
<b>jul-02</b>	<b>1,481 (1)</b>	<b>may-34</b>	<b>0,526 (1)</b>	<b>oct-87</b>	<b>1,466 (1)</b>	<b>may-17</b>	<b>0,821 (2)</b>
jul-05	1,124	sep-37	0,047	dic-90	-0,914		
ago-05	1,328	oct-37	0,035	ene-91	-0,938		
sep-05	1,335	nov-37	0,032	feb-91	-0,938		
oct-05	1,256	dic-37	0,020	mar-91	-0,967		
nov-05	1,258	ene-38	0,012	abr-91	-1,030		
dic-05	1,239	feb-38	0,011	may-91	-1,132		
<b>ene-06</b>	<b>1,234 (2)</b>	<b>mar-38</b>	<b>0,410 (2)</b>	<b>jun-91</b>	<b>1,325 (1)</b>		
ago-25	-0,383	nov-37	0,032	dic-96	-0,914		
sep-25	-0,400	dic-37	0,020	ene-97	-0,938		
oct-25	-0,268	ene-38	0,012	feb-97	-0,938		
nov-25	-0,271	feb-38	0,011	mar-97	-0,967		
dic-25	-0,281	mar-38	0,410	abr-97	-1,030		
ene-26	-0,293	abr-38	0,424	may-97	-1,132		
<b>feb-26</b>	<b>-0,293 (1)</b>	<b>may-38</b>	<b>1,271 (1)</b>	<b>jun-97</b>	<b>1,747 (2)</b>		

Nota: Inundaciones ordinarias (1); inundaciones extraordinarias (2); inundaciones catastróficas (3). Mes seco en rojo (<-1), mes húmedo en azul (<+1) y mes normal en blanco (-1<X<+1).

Tabla 8. Valores del SPI-12 de la inundación y sus seis meses previos para la estación de La Serena.

La Serena							
Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12
01-1880	0,424	mar-15	1,564	feb-61	-2,072	jun-87	-1,145
02-1881	0,425	abr-15	1,555	mar-61	-2,083	<b>jul-87</b>	<b>1,046 (1)</b>
03-1882	0,424	may-15	1,831	abr-61	-2,063	ago-87	0,990
04-1883	0,425	jun-15	1,102	may-61	-2,186	sep-87	0,985
05-1884	-0,126	jul-15	0,668	jun-61	-0,830	oct-87	0,980
06-1885	1,390	ago-15	0,637	jul-61	-0,642	nov-87	0,992
<b>07-1886</b>	<b>2,160 (2)</b>	<b>sep-15</b>	<b>0,261 (1)</b>	<b>ago-61</b>	<b>0,496 (1)</b>	<b>dic-87</b>	<b>0,994 (2)</b>
12-1884	0,198	dic-18	-0,915	feb-63	-1,089	ene-91	-1,368
01-1885	0,193	ene-19	-0,920	mar-63	-1,095	feb-91	-1,350
02-1885	0,196	feb-19	-0,906	abr-63	-1,083	mar-91	-1,393
03-1885	0,195	mar-19	-0,912	may-63	-0,938	abr-91	-1,396
04-1885	-0,163	abr-19	-1,055	jun-63	-0,405	may-91	-1,380
05-1885	0,471	<b>may-19</b>	<b>1,062 (1)</b>	<b>jul-63</b>	<b>0,236 (1)</b>	<b>jun-91</b>	<b>0,346 (2)</b>
<b>06-1885</b>	<b>0,313 (1)</b>	<b>jun-19</b>	<b>1,485 (1)</b>	<b>ago-63</b>	<b>0,562 (1)</b>	<b>jul-91</b>	<b>0,466 (1)</b>
05-1888	0,263	jul-19	2,010	feb-65	-1,403	dic-91	0,461
06-1888	-0,335	ago-19	1,964	mar-65	-1,411	ene-92	0,456
07-1888	0,019	sep-19	1,925	abr-65	-1,327	feb-92	0,456
<b>08-1888</b>	<b>2,074 (3)</b>	oct-19	1,946	may-65	-0,865	<b>mar-92</b>	<b>0,750 (1)</b>
09-1888	2,250	nov-19	1,943	jun-65	-1,028	abr-92	0,781
10-1888	2,571	<b>dic-19</b>	<b>1,949 (1)</b>	<b>jul-65</b>	<b>0,614 (1)</b>	may-92	0,800
<b>11-1888</b>	<b>2,567 (2)</b>	<b>ene-20</b>	<b>1,944 (1)</b>	<b>ago-65</b>	<b>1,219 (2)</b>	<b>jun-92</b>	<b>1,616 (1)</b>
<b>06-1888</b>	-0,335	<b>nov-33</b>	-0,684	<b>jun-72</b>	-0,006	<b>jun-97</b>	<b>0,705 (2)</b>
<b>07-1888</b>	0,019	<b>dic-33</b>	-0,774	<b>jul-72</b>	0,409	<b>jul-97</b>	<b>0,643 (1)</b>
<b>08-1888</b>	<b>2,074 (3)</b>	<b>ene-34</b>	-0,779	<b>ago-72</b>	1,235	<b>ago-97</b>	<b>1,219 (2)</b>
<b>09-1888</b>	2,250	<b>feb-34</b>	-0,767	<b>sep-72</b>	1,212	<b>sep-97</b>	1,258
<b>10-1888</b>	2,571	<b>mar-34</b>	-0,772	<b>oct-72</b>	1,263	<b>oct-97</b>	1,334
<b>11-1888</b>	<b>2,567 (2)</b>	<b>abr-34</b>	-0,762	<b>nov-72</b>	1,261	<b>nov-97</b>	1,332
<b>12-1888</b>	<b>2,575 (2)</b>	<b>may-34</b>	<b>0,311 (3)</b>	<b>dic-72</b>	<b>1,265 (2)</b>	<b>dic-97</b>	<b>1,336 (2)</b>
<b>01-1891</b>	0,664	<b>jun-41</b>	1,066	<b>ene-78</b>	-0,111	<b>dic-01</b>	0,629
<b>02-1892</b>	0,662	<b>jul-41</b>	0,939	<b>feb-78</b>	-0,105	<b>ene-02</b>	0,624
<b>03-1893</b>	0,642	<b>ago-41</b>	<b>1,235 (1)</b>	<b>mar-78</b>	-0,108	<b>feb-02</b>	0,623
<b>04-1894</b>	0,641	<b>sep-41</b>	1,229	<b>abr-78</b>	-0,103	<b>mar-02</b>	0,623
<b>05-1895</b>	0,569	<b>oct-41</b>	<b>1,246 (2)</b>	<b>may-78</b>	-0,126	<b>abr-02</b>	0,649
<b>06-1891</b>	1,445	<b>nov-41</b>	1,245	<b>jun-78</b>	-0,335	<b>may-02</b>	1,213
<b>07-1891</b>	<b>1,395 (2)</b>	<b>dic-41</b>	<b>1,248 (2)</b>	<b>jul-78</b>	<b>-1,012 (1)</b>	<b>jun-02</b>	<b>1,301 (1)</b>
<b>12-1898</b>	0,541	<b>ene-48</b>	-1,132	<b>ene-80</b>	-2,329	<b>oct-03</b>	0,012
<b>01-1899</b>	0,536	<b>feb-48</b>	-1,117	<b>feb-80</b>	-2,219	<b>nov-03</b>	0,013
<b>02-1899</b>	0,536	<b>mar-48</b>	-1,124	<b>mar-80</b>	-2,230	<b>dic-03</b>	0,012
<b>03-1899</b>	0,536	<b>abr-48</b>	-1,111	<b>abr-80</b>	-1,140	<b>ene-04</b>	0,007
<b>04-1899</b>	0,525	<b>may-48</b>	-0,841	<b>may-80</b>	-1,097	<b>feb-04</b>	0,011
<b>05-1899</b>	0,347	<b>jun-48</b>	-0,634	<b>jun-80</b>	-0,807	<b>mar-04</b>	0,015
<b>06-1899</b>	<b>-0,405 (1)</b>	<b>jul-48</b>	<b>-0,411 (1)</b>	<b>jul-80</b>	<b>0,005 (1)</b>	<b>abr-04</b>	<b>0,165 (1)</b>
<b>may-00</b>	1,863	<b>feb-53</b>	0,811	<b>ene-82</b>	-0,312	<b>feb-15</b>	0,036

Tabla 8 (continuación). Valores del SPI-12 de la inundación y sus seis meses previos para la estación de La Serena.

La Serena							
Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12	Mes y Año	SPI-12
jun-00	1,666	mar-53	0,813	feb-82	-0,304	mar-15	<b>0,176 (3)</b>
jul-00	2,096	abr-53	0,819	mar-82	-0,308	abr-15	0,178
ago-00	1,460	may-53	0,404	abr-82	-0,301	may-15	0,182
sep-00	1,421	jun-53	-0,697	may-82	-0,841	jun-15	-1,243
oct-00	1,422	jul-53	-2,243	jun-82	-0,885	jul-15	<b>-0,540 (1)</b>
nov-00	<b>1,420 (1)</b>	ago-53	<b>-0,926 (1)</b>	jul-82	<b>-1,041 (1)</b>	ago-15	<b>-0,128 (1)</b>
nov-04	1,700	ene-57	0,061	ene-83	-0,665	nov-16	-1,293
dic-04	1,705	feb-57	0,051	feb-83	-0,654	dic-16	-1,299
ene-05	1,700	mar-57	-0,470	mar-83	-0,659	ene-17	-1,304
feb-05	1,688	abr-57	-0,463	abr-83	-0,650	feb-17	-1,287
mar-05	1,844	may-57	<b>1,697 (2)</b>	may-83	-0,933	mar-17	-1,294
abr-05	1,833	jun-57	1,809	jun-83	-1,102	abr-17	-1,297
may-05	<b>2,430 (3)</b>	jul-57	<b>1,761 (1)</b>	1983	<b>0,842 (1)</b>	may-17	<b>0,576 (2)</b>
may-14	-1,311	dic-59	0,093	jun-84	0,846		
jun-14	1,011	ene-60	0,075	jul-84	<b>0,920 (2)</b>		
jul-14	1,263	feb-60	0,078	ago-84	0,685		
ago-14	1,252	mar-60	0,077	sep-84	0,672		
sep-14	1,520	abr-60	-0,148	oct-84	<b>0,672 (1)</b>		
oct-14	1,521	may-60	-0,112	nov-84	0,672		
nov-14	<b>1,571 (1)</b>	jun-60	<b>-0,830 (1)</b>	dic-84	<b>0,677 (2)</b>		

Nota: Inundaciones ordinarias (1); inundaciones extraordinarias (2); inundaciones catastróficas (3). Mes seco en rojo ( $<-1$ ), mes húmedo en azul ( $<+1$ ) y mes normal en blanco ( $-1 < X < +1$ ).