


# ANÁLISIS DE TENDENCIA DE LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO Y SU EFECTO EN LOS DERECHOS DE AGUA: CASO DE ESTUDIO CUENCA DEL RÍO MAULE



Habilitación presentada para optar al título de

**Ingeniera Ambiental**

**LISBET SOLANGE DELGADO MORENO**

Profesor Guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

Concepción, Chile

2022



**“Análisis de tendencia de la disponibilidad del recurso hídrico y su efecto en los derechos de agua: caso de estudio cuenca del río Maule”**

**PROFESOR GUÍA: Dr. PEDRO ARRIAGADA SANHUEZA**

**PROFESOR COMISIÓN: Dr. RICARDO FIGUEROA JARA**

**PROFESOR COMISIÓN: Dr. ROBERTO URRUTIA PÉREZ**

**CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA**

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima ( En Escala de 5,7 a 7,0)

**Concepción, mayo 2022**

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE de TABLAS</b> .....	iii
<b>ÍNDICE de FIGURAS</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	v
<b>RESUMEN</b> .....	vii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	2
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	3
3.1. Objetivo general .....	3
3.2. Objetivos específicos .....	3
<b>4. ANTECEDENTES</b> .....	4
4.1. Disponibilidad del recurso hídrico en Chile .....	4
4.2. Tendencia observada en la disponibilidad del recurso hídrico .....	7
4.3. Proyección del recurso hídrico .....	9
4.4. Importancia de la cuenca del río Maule en la gestión del recurso hídrico nacional .....	10
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	13
5.1. Área de estudio .....	13
5.2. Identificar las estaciones consistentes del registro fluviométrico de la cuenca del Río Maule. ....	14
5.3. Estimar las tendencias históricas anual y mensual de las estaciones consistentes en la cuenca del Río Maule. ....	15
5.4. Analizar el efecto de la variabilidad temporal de las tendencias sobre la disponibilidad de agua otorgada en la cuenca del Río Maule .....	16
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	17
6.1. Identificar las estaciones consistentes del registro fluviométrico de la cuenca del Río Maule .....	17
6.2. Estimar las tendencias históricas anual y mensual de las estaciones consistentes en la cuenca del Río Maule. ....	25
6.2.1. Tendencias históricas significativas anual. ....	25
6.2.2. Tendencias históricas significativas mensual. ....	29
6.3. Analizar el efecto de la variabilidad temporal de las tendencias sobre la disponibilidad de agua otorgada en la cuenca del Río Maule .....	33
6.3.1. Caudal proyectado .....	33

6.3.2. Demanda hídrica de la cuenca. ....	38
6.3.3. Balance volumétrico.....	41
6.3.4. Escenario proyectado.....	45
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	<b>47</b>
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>48</b>

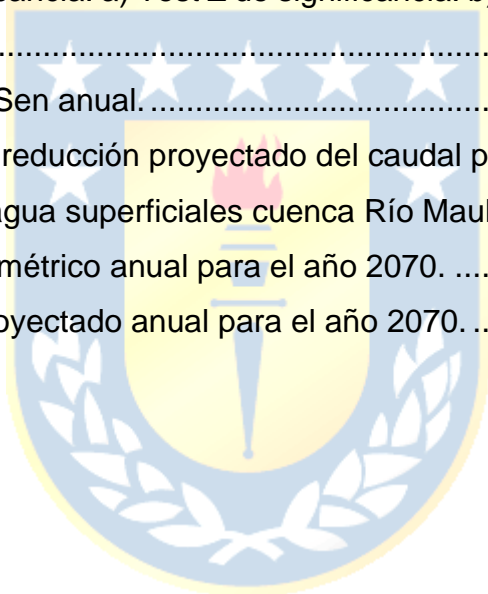
## ÍNDICE de TABLAS

Tabla 1: Disponibilidad hídrica regional de Chile.....	5
Tabla 2: Proyección de caudal para cuencas de Chile.....	9
Tabla 3: Demanda hídrica derechos consuntivos en la región del Maule. ....	11
Tabla 4: Demanda hídrica derechos no consuntivos en la región del Maule. ....	12
Tabla 5: Análisis de Consistencia.....	20
Tabla 6: Análisis de tendencia anual.....	28
Tabla 7: Pendiente de Sen enero - junio.....	31
Tabla 8: Pendiente de Sen julio – diciembre.....	32
Tabla 9: Caudal histórico y proyectado para 2030, 2050 y 2070.....	33
Tabla 10: Porcentaje de reducción proyectado para 2030, 2050 y 2070. ....	35
Tabla 11: Derechos de agua superficiales consuntivos cuenca Río Maule.....	40
Tabla 12: Balance volumétrico actual.....	42
Tabla 13: Balance volumétrico proyectado.....	43

## ÍNDICE de FIGURAS

Figura 1: Disponibilidad hídrica Chile. a) Caudal superficial medio anual y demanda de agua a nivel regional. b) Zonas declaradas con escases hídrica y zonas protegidas.....	7
Figura 2: Promedio de déficit/superávit de precipitaciones para los períodos 1966-1969 y 2010-2014. ....	8

Figura 3: Cuenca del río Maule junto a sus estaciones fluviométricas y pluviométricas. ....	14
Figura 4: Análisis de Consistencia. A): Estaciones fluviométricas clasificadas según el tipo de cauce de medición. B): Estaciones fluviométricas clasificadas según porcentaje de información periodo 1970-2019. C): Estaciones fluviométricas clasificadas según porcentaje de información periodo de observación. D): Estaciones fluviométricas consistentes. ....	19
Figura 5: Información fluviométrica cuenca. a) Información fluviométrica estaciones cauce natural. b) Información fluviométrica estaciones consistentes. ....	25
Figura 6: Test de Significancia. a) Test Z de significancia. b) Valor p de significancia. ....	26
Figura 7: Pendiente de Sen anual. ....	27
Figura 8: Porcentaje de reducción proyectado del caudal para el año 2070. ....	37
Figura 9: Derechos de agua superficiales cuenca Río Maule. ....	39
Figura 10: Balance volumétrico anual para el año 2070. ....	45
Figura 11: Escenario proyectado anual para el año 2070. ....	46

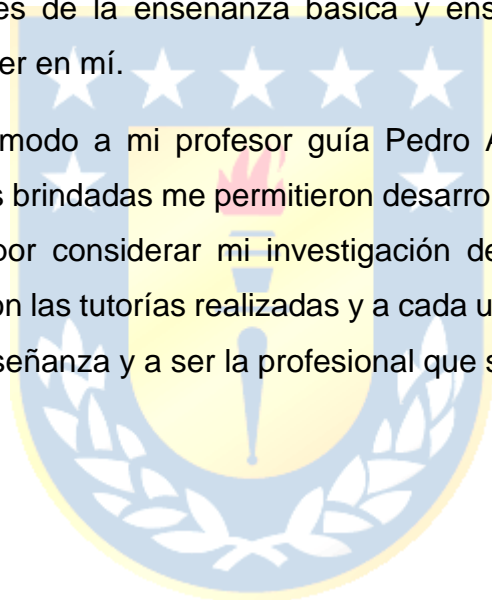


## AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos son principalmente a mi familia, quienes me han acompañado y brindado su apoyo en cada una de las etapas de mi vida, en los buenos momentos y guiándome en los difíciles, dando todo de sí y entregándome todas las herramientas para cumplir mis metas.

Igualmente agradezco a cada una de las personas que a lo largo de mi vida me han brindado un consejo y motivado a cumplir mis sueños, quienes me mostraron que las dificultades se pueden superar y siempre existe una salida, entre las cuales destacan mis profesores de la enseñanza básica y enseñanza media, muchas gracias por siempre creer en mí.

Agradezco del mismo modo a mi profesor guía Pedro Arriagada, quien con su paciencia y enseñanzas brindadas me permitieron desarrollar la presente tesis, a la fundación Tesis País por considerar mi investigación dentro de su programa y enriquecer mi trabajo con las tutorías realizadas y a cada uno de los profesores que contribuyeron en mi enseñanza y a ser la profesional que soy.



## RESUMEN

Chile cuenta con una disponibilidad hídrica superior al promedio mundial; pero que se encuentra distribuida de forma heterogénea a lo largo del territorio nacional, recurso que es otorgado a privados bajo un sistema de derechos de aprovechamiento de agua, clasificados entre consuntivos y no consuntivos, de los cuales los destinados a agua superficial se concentran en la zona centro del país.

Además del problema atribuible a la sobredemanda, se presenta una tendencia negativa tanto para las precipitaciones como el caudal, generando proyecciones con resultados críticos, de los cuales se infiere una disminución significativa de los caudales en las cuencas ubicadas entre las regiones de coquimbo y la Araucanía.

En cuanto a la cuenca del río Maule, esta tiene una gran demanda en relación a los derechos de agua otorgados, la que es requerida principalmente por el sector agricultura y de generación eléctrica, se encuentra ubicada en la zona centro del país, donde se concentra la mayor parte de la población y posee proyecciones futuras de disminución de las precipitaciones junto con el aumento de la isoterma cero, lo que generará una disminución en la disponibilidad hídrica afectando directamente a los derechos de agua otorgados.

El procedimiento a realizar incluyó la recopilación de datos fluviométricos y la aplicación de un análisis de consistencia, análisis de tendencias significativas y la estimación de la magnitud de las tendencias, cálculo de los porcentajes de reducción, la recopilación de datos de derechos de agua superficiales, su georreferenciación y un balance volumétrico por estación con tendencias significativas.

Los resultados principales consisten en un escenario para el año 2070 donde 6 cuencas atribuibles a 6 estaciones consistentes con tendencias significativas, no contarán con disponibilidad hídrica en sus caudales, debido principalmente a sus tendencias negativas que generan un gran porcentaje de reducción y a la forzante de derechos de agua eventuales entregados para la cuenca.

## 1. INTRODUCCIÓN

El clima es un conjunto de fluctuaciones de las condiciones atmosféricas, que se obtiene del promedio del estado diario que presenta la atmosfera durante periodos extensos de tiempo, de 30 o más años (Poleo, 2016), el cual ha cambiado constantemente a través de la historia geológica de la Tierra debido a distintos factores naturales, como la deriva continental, emisiones volcánicas, cambios astronómicos cíclicos, entre otros. (Oyarzún, 2014).

Estos cambios se pueden medir a distintas escalas climáticas, entre las cuales destaca la variabilidad climática, que corresponde a las variaciones del clima a una escala temporal de décadas, siendo las más importantes para el país la oscilación del sur, la oscilación decadal del pacifico y el modo anular del sur u oscilación antártica. (Valdés-Pineda et al., 2014). Por otro lado, se entiende por cambio climático, a una importante variación del clima durante periodos prolongados de tiempo, vale decir siglos o superior.

En este sentido, el actual cambio natural en el sistema climático ha sido acelerado por el incremento de la concentración de gases con efecto invernadero, generados como consecuencia directa de la quema de combustibles fósiles y de otras actividades antropogénicas, afectando a todo el planeta. (Oyarzún, 2014).

Chile se ha visto fuertemente afectado por el cambio en las condiciones climáticas, enfrentando desde el 2010 una fuerte sequía, denominada como “Mega Sequía de Chile Central”, caracterizada por una secuencia larga e ininterrumpida de años de lluvia por debajo del promedio, lo que ha generado una importante reducción de la escorrentía superficial que, junto al aumento de la isoterma cero, han provocado importantes repercusiones ecológicas y socioeconómicas (Garreaud et al., 2017), afectando a la zona con mayor población del país, donde se concentra la actividad agrícola he hidroeléctrica.

Por otra parte, el sistema chileno de asignación de agua se basa en un mercado de derechos de aprovechamiento del agua establecido por el Código de Aguas de



1981, bajo el cual la asignación de los recursos hídricos disponibles es determinada por el mercado, con mecanismos regulatorios y de supervisión limitados que han prestado poca atención a los impactos generados en áreas como la protección ambiental, la gestión de cuencas hidrográficas y la generación y resolución de conflictos sociales por el agua. (Hearne y Donoso, 2014). Esto, ha agudizado el actual escenario de sequía, contribuyendo a la escasez hídrica a través de la sobredemanda del recurso, lo que afecta en gran medida al medio ambiente y a la población más vulnerable.

## **2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

La cuenca del río Maule se encuentra ubicada en la zona centro del país, donde se concentra la mayor parte de la población, contando con una gran demanda hídrica en relación a los derechos de agua otorgados, la que es requerida principalmente por el sector agrícola y de generación eléctrica. Además, en esta zona se proyecta una disminución de las precipitaciones junto a un aumento en la elevación de la isoterma cero, lo que generará una disminución en la disponibilidad hídrica, afectando directamente los derechos de agua otorgados. Dichos antecedentes, junto a una deficiente gestión del agua, que no considera en sus políticas las variaciones hidrológicas naturales sobre la disponibilidad hídrica de la cuenca, dando lugar a la pregunta ¿Cuál será el efecto que tendrá la disminución del recurso hídrico sobre la disponibilidad de agua otorgada mediante derechos de agua en la cuenca del río Maule?

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo general

- Analizar el efecto de la disminución del recurso hídrico sobre la disponibilidad de agua otorgada mediante derechos de agua en la cuenca del río Maule.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Analizar la consistencia del registro fluviométrico de la cuenca del río Maule.
- Estimar las tendencias históricas presentes en el registro fluviométrico de la cuenca del río Maule.
- Analizar el efecto de las tendencias sobre la disponibilidad de agua otorgada en la cuenca del río Maule.



## 4. ANTECEDENTES

### 4.1 Disponibilidad del recurso hídrico en Chile

Chile cuenta con una disponibilidad hídrica media de  $51.218 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$  repartida en 101 cuencas a nivel nacional (Dirección General de Aguas, 2015), valor que se encuentra por sobre la media mundial de  $6.600 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$  y superior al umbral definido internacionalmente de  $2.000 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$  para un desarrollo sostenible (Banco Mundial, 2010), razón por la cual es considerado un país privilegiado en materia de recursos hídricos; pero esta disponibilidad posee una distribución heterogénea a lo largo del territorio nacional, variando tanto espacial como temporalmente. (Valdés-Pineda et al., 2014).

Al analizar la disponibilidad hídrica por región, es posible apreciar en el Tabla 1 que la zona comprendida entre las regiones de Arica y Parinacota y la Metropolitana, es la que presenta los valores más bajos a nivel nacional. En ellas, destacan la región de Coquimbo, con  $908 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$ , la cual corresponde a la región con mayor disponibilidad hídrica de la zona señalada y, por contraparte, la región de Antofagasta, que cuenta con solo  $47 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$ , el valor más bajo de la zona, considerablemente inferior al umbral recomendado de  $2.000 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Desde la región de O'Higgins hacia el sur la disponibilidad hídrica aumenta, presentándose el mayor valor a nivel nacional en la región de Aysén con  $2.993.036 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$ , el cual excede significativamente el umbral propuesto por el Banco Mundial. (Dirección General de Aguas, 2015).

**Tabla 1:** Disponibilidad hídrica regional de Chile.

<b>Región</b>	<b>Escorrentía m<sup>3</sup>hab<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup></b>
Arica y Parinacota	725
Tarapacá	599
Antofagasta	47
Atacama	190
Coquimbo	908
Valparaíso	703
Metropolitana	444
O'Higgins	7.037
Maule	23.191
Biobío	24.432
Araucanía	33.167
Los Ríos	81.563
Los Lagos	154.058
Aysén	2.993.036
Magallanes	1.938.956

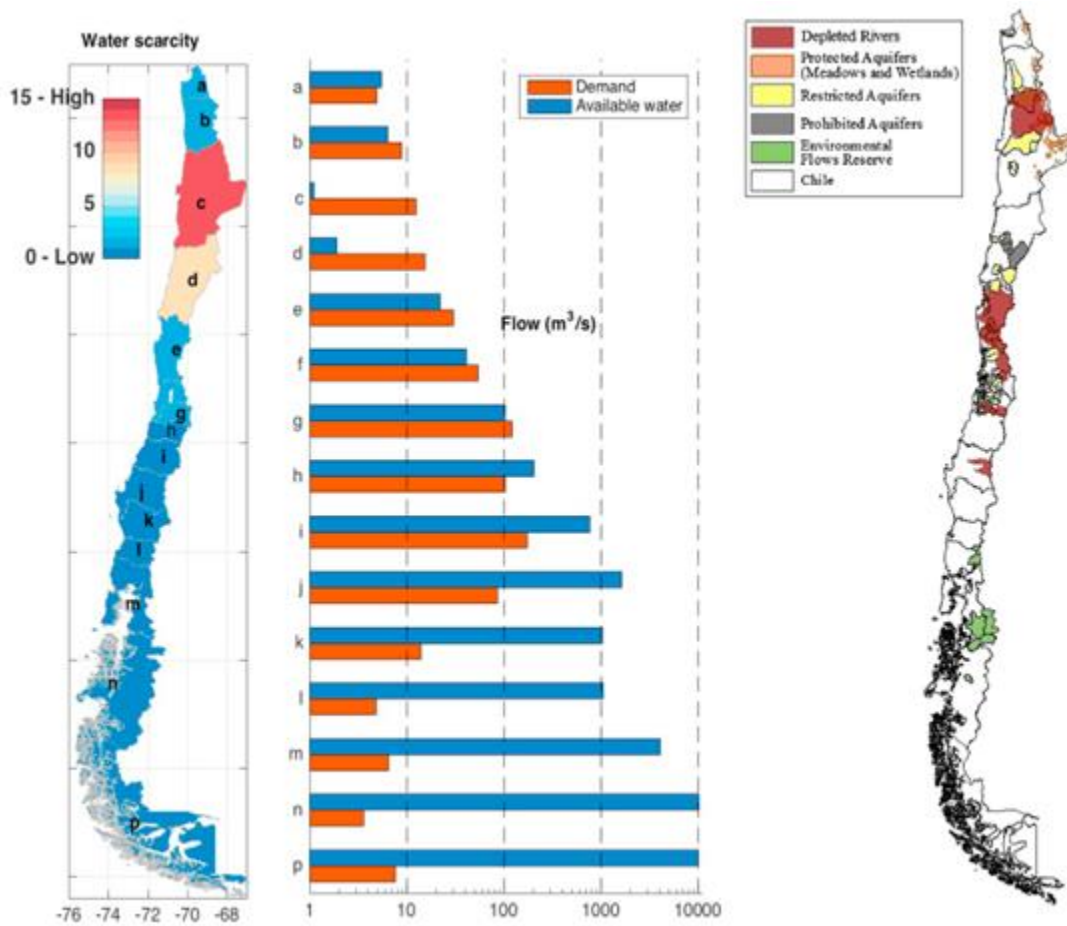
Fuente: Dirección General de Aguas, 2015.

El recurso hídrico en Chile es considerado un bien de uso público; pero que es otorgado a privados bajo un sistema de derechos de aprovechamiento de agua, establecido por el código de aguas del año 1981, mediante el cual la asignación del recurso hídrico termina siendo determinada por los mercados de agua (Hearne, Donoso, 2014). En cuanto al agua superficial, hasta agosto del año 2015 se había otorgado 52.581 derechos de agua, los que se concentran principalmente en la zona centro sur del país, de los cuales 42.946 corresponden a derechos consuntivos, pedidos principalmente desde la planicie litoral hasta la depresión intermedia, siendo utilizados para suplir, en primer lugar, la demanda en el sector agrícola, con un 73,1%, seguida muy por debajo por la demanda de agua potable con 10,8%,

industrial con 6,7%, y minera con 3,2%, mientras que 9.635 corresponden a derechos no consuntivos, ubicados principalmente en la zona cordillerana y utilizados mayormente para la generación eléctrica. (Dirección General de Aguas, 2015, 2017).

Al analizar la relación entre el caudal superficial medio anual y la demanda hídrica a nivel regional, se puede observar, en la Figura 1.a), que la zona norte del país posee una demanda mayor a la disponibilidad existente, causado por la creciente actividad minera en la región de Antofagasta, junto con la actividad agrícola de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Atacama y Coquimbo. Dicha relación negativa se extiende a la zona central en las regiones de Valparaíso y Metropolitana; pero con una diferencia cada vez menor, correspondiente a la actividad agropecuaria que se lleva a cabo en esta zona. Desde la región de O'Higgins se comienza a observar una relación positiva entre la disponibilidad hídrica y la demanda, la cual aumenta considerablemente desde la región de la Araucanía al sur, evidenciándose la mayor diferencia entre disponibilidad y demanda en la región de Aysén. (Dirección General de Aguas, 2015).

La relación negativa entre la disponibilidad del recurso hídrico y la demanda, que se ve principalmente en el norte del país, sumado al sobre otorgamiento de derechos de agua para las zonas norte y centro, han generado una disminución en la disponibilidad hídrica, lo que se expresa en zonas del país declaradas como agotadas, las cuales se pueden visualizar de color rojo en la Figura 1.b), donde ya no es posible conceder derechos de agua permanentes. Al año 2015, se habían dictado 11 declaraciones de agotamiento, llegando a un total de 76.131 km<sup>2</sup>, del cual el 82% pertenece a la macrozona norte, siendo la cuenca del río Loa la más afectada. Además, se puede visualizar los acuíferos protegidos, restringidos y prohibidos, en color naranja, amarillo y plomo respectivamente, y los ríos de reserva en color verde, ubicados en la zona sur de Chile. (Valdés-Pineda et al., 2014, Dirección General de Aguas, 2015).



**Figura 1:** Disponibilidad hídrica Chile. a) Caudal superficial medio anual y demanda de agua a nivel regional. b) Zonas declaradas con escasas hídrica y zonas protegidas.

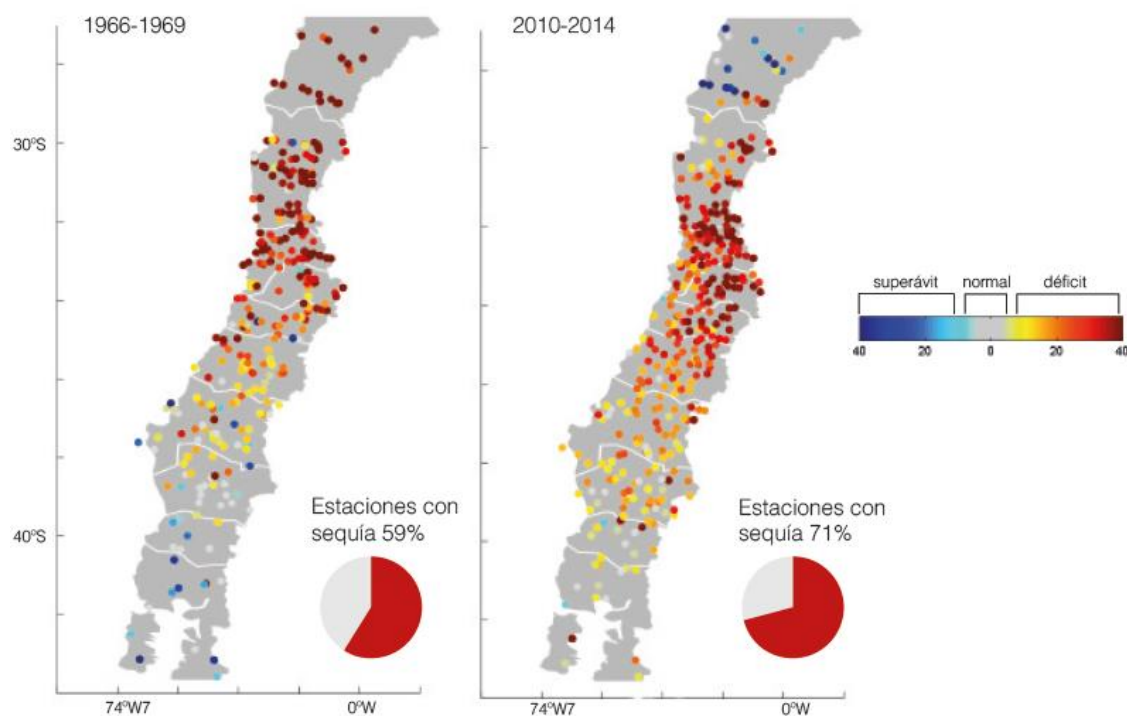
Fuente: a) Alvez et al., 2020. b) Valdés-Pineda et al., 2014.

#### 4.2 Tendencia observada en la disponibilidad del recurso hídrico

Al analizar la variabilidad del recurso hídrico es de vital importancia el estudio de las precipitaciones, ya que se considera como el principal aporte de agua a las cuencas (Quintana, 2004). En el ámbito nacional las precipitaciones tienden a aumentar con la latitud y altitud, además de presentar cambios influenciados por la variabilidad climática correspondiente a nuestro país, siendo las principales: el niño u oscilación del sur (ENSO), la oscilación decadal del pacifico (PDO) y el modo anular del sur u oscilación antártica (SAM), los cuales generan secuencias de años lluviosos y

secos. (Garreaud et al., 2017). Pese a esta variabilidad natural, la zona central de Chile ha presentado una disminución en las precipitaciones desde mediados de los años 1970. (Universidad de Chile, 2006).

La tendencia decreciente en el régimen pluviométrico, como se muestra en la Figura 2, para el periodo comprendido entre 2010 y 2015 dejó un déficit del 71% de precipitaciones registrado en las estaciones meteorológicas ubicadas entre la región de Coquimbo y Los Ríos. En este mismo periodo entre las regiones de Coquimbo y Valparaíso se presentó una disminución de los caudales medios mensuales de hasta un 70%, mientras que, hacia el sur, las reducciones alcanzaron un 25% (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015), evidenciando la sequía más larga y severa que se ha registrado en nuestro país, asociada al cambio climático.



**Figura 2:** Promedio de déficit/superávit de precipitaciones para los períodos 1966-1969 y 2010-2014.

Fuente: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015.

### 4.3 Proyección del recurso hídrico

Se han registrado alteraciones en el régimen pluvial y fluvial de la zona norte y centro del país, proyectándose hacia fines de este siglo una reducción en las precipitaciones anual de hasta un 30% respecto al promedio actual sobre Chile (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015), lo que junto a la elevación de la isoterma cero, han conllevado que se genere una tendencia negativa significativa de caudal entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos, asociada directamente con el cambio en las condiciones climáticas que se sufre a nivel mundial. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

En el Tabla 2 se presenta una serie de estudios desarrollados en base a las proyecciones de los caudales medios mensuales para el centro sur de Chile, en los cuales se considera como escenario crítico una disminución de las precipitaciones de hasta un 60%, mediante la cual se infiere una disminución significativa de los caudales en las cuencas ubicadas entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía. Estos estudios utilizan en su ejecución modelos de circulación global, que son adaptados a escalas de cuencas, considerando diferentes trayectorias de concentración representativas de gases de efecto invernadero (RCP), destacando los RCP 4,5, 6,0 y 8,5. (Valdes-Pineda et al, 2014).

**Tabla 2:** Proyección de caudal para cuencas de Chile.

<b>Cuenca</b>	<b>Fuente</b>	<b>Escenario Crítico</b>
Limarí	Vicuña et al., 2010	-45,5%
Illapel	RHMA, 2010	-36,1 a -51,8%
Aconcagua	RHMA, 2010	-20,1 a -43,5%
Juncal	Rafetli et al., 2016	-60%
Maipo Alto	Migliavacca et al., 2015	-10%
Maule Alto	CEPAL, 2012	-36,6%
Laja	CEPAL, 2012	-36,6%



Malleco – Vergara	Stehr, 2008	-80,96%
Lonquimay	Stehr, 2008	-65%
Cautín	RHMA, 2010	-12,8 a -29,6%

---

Fuente: Riquelme et al., 2018.

#### 4.4 Importancia de la cuenca del río Maule en la gestión del recurso hídrico nacional

La cuenca del Río Maule, ubicada en la región del Maule, es la cuarta con mayor extensión a nivel nacional, comprendiendo las provincias de Curicó, Talca, Linares y Cauquenes, con una población aproximada de 628.960 habitantes. (Escenarios Hídricos 2030 Chile, 2020).

En cuanto a la situación socioeconómica de su población, la región del Maule cuenta con una incidencia de pobreza y pobreza extrema del 12,3% y 4,5% respectivamente al 2020, lo que se encuentra por sobre la media a nivel nacional que alcanza el 10,8% de los hogares en situación de pobreza y el 4,3% de los hogares en situación de pobreza extrema. (CASEN, 2020). Además, el índice de pobreza multidimensional de la región llega a un 22,5%, valor que está por sobre la media nacional de 20,7%, con un 7,1% de los hogares en situación de pobreza multidimensional a nivel nacional, datos que indican una situación de pobreza considerable en relación con otras regiones del país. (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2019).

Entre las comunas presentes en la cuenca destaca Talca, con una población de 156.868 habitantes que conforman 59.397 hogares, la cual posee un 14,0% de su población en situación de pobreza y un 16,7% de su población en situación de pobreza multidimensional; y la comuna de Curicó con una población de 118.275 habitantes que conforman 44.793 hogares, la cual posee un 15,4% de su población en situación de pobreza y un 15,4% de su población en situación de pobreza multidimensional. (Subsecretaría de Servicios Sociales, 2017).

La región del Maule para el año 2017 contribuyó en un 3,5% al producto interno bruto nacional, siendo las principales actividades productivas la industria silvoagropecuaria, el turismo y la producción bruta de energía principalmente a través de hidroeléctricas. La industria silvoagropecuaria concentra el 27% del empleo de la región, la mayor fuente de trabajo en la zona, que se ve en peligro a causa de la disminución del recurso hídrico y el cambio climático, siendo el grupo de personas más afectado, los agricultores de la zona. (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2019).

La cuenca se encuentra entre las de mayor oferta hídrica de la zona centro del país. Como se aprecia en el Tabla 3, la demanda de agua para el año 2015, en relación con los derechos de agua consuntivos, recaen principalmente en la actividad agrícola, lo que se espera permanezca estable hasta el año 2040. Por su parte, como se observa en el Tabla 4, los derechos de agua no consuntivos tienen como primera y principal demanda la generación eléctrica, la cual, a pesar de su disminución, se proyecta mantendrá el primer lugar en el transcurso de los años. (Dirección General de Aguas, 2017). En este sentido cabe destacar que la cuenca del río Maule es una de las cuencas con mayor cantidad de derechos de agua otorgados tanto en forma volumétrica, con  $257 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , como en forma de acciones, con 43.487 acciones otorgadas, lo que ha generado que sea considerada como una cuenca sobre asignada. (Escenarios Hídricos 2030 Chile, 2018).

**Tabla 3:** Demanda hídrica derechos consuntivos en la región del Maule.

	<b>Demanda (<math>\text{Mm}^3\text{año}^{-1}</math>)</b>		
	<b>2015</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>
Agua Potable Urbano	41.848	43.741	46.223
Agua Potable Rural	17.389	19.914	20.905
Agrícola	2.822.598	2.503.605	2.437.756
Pecuario	4.342	4.495	4.609
Minero	1	0	0

Industrial	33.304	50.660	62.628
Generación Eléctrica	7.709	9.069	8.974
<b>Total Consuntivo</b>	<b>2.927.192</b>	<b>2.631.484</b>	<b>2.581.096</b>

Fuente: Dirección General de Aguas, 2017.

**Tabla 4:** Demanda hídrica derechos no consuntivos en la región del Maule.

	<b>Demanda (Mm<sup>3</sup>año<sup>-1</sup>)</b>		
	<b>2015</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>
Acuícola	389.865	3.090.439	869.194
Generación Eléctrica	18.959.984	11.464.061	6.972.880
<b>Total No Consuntivo</b>	<b>19.349.849</b>	<b>14.554.500</b>	<b>7.842.074</b>

Fuente: Dirección General de Aguas, 2017.

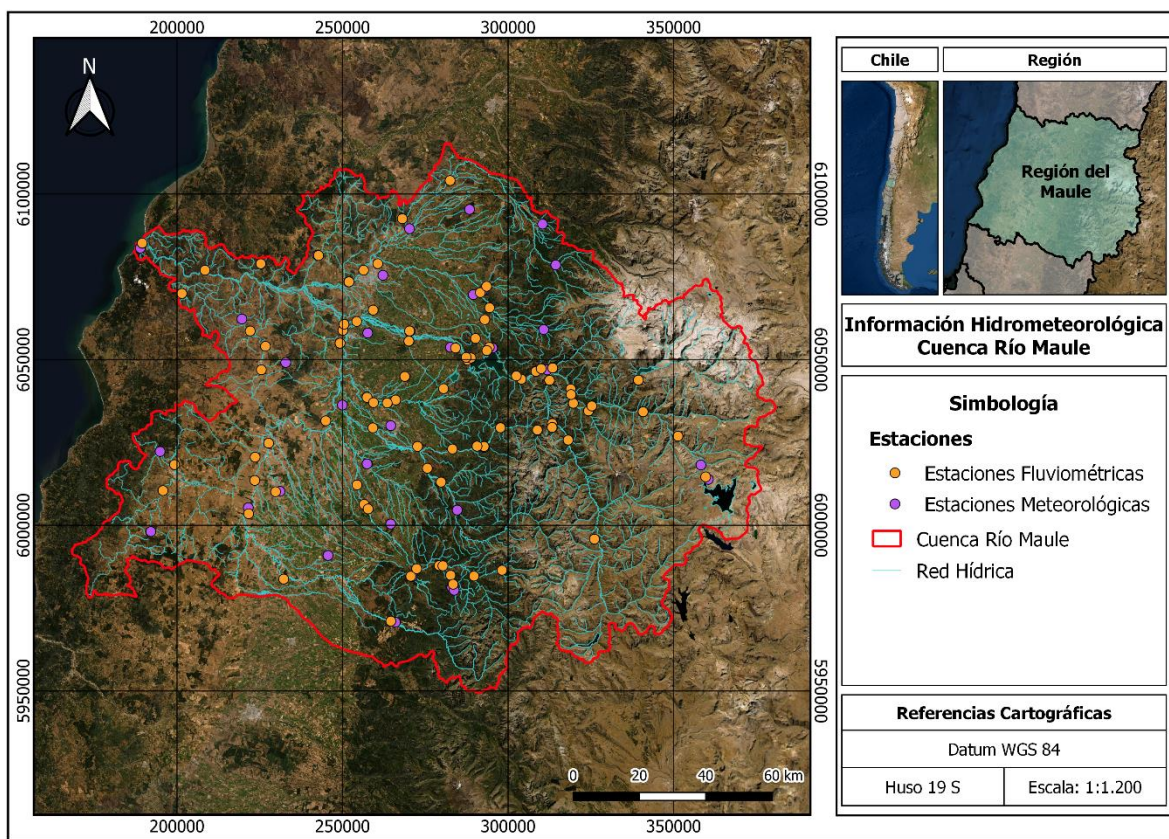


## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Área de estudio

La cuenca del Río Maule se encuentra ubicada principalmente en la Región del Maule. Posee una superficie de 20.865 Km<sup>2</sup> y un cauce principal de 240 km correspondiente al río Maule, el cual nace en la laguna del Maule y desemboca en el océano Pacífico. En cuanto a su régimen hidrológico, este es de tipo mixto o también dicho nivo-pluvial, cuyas zonas alta y media de la cuenca son nival, presentando el mayor aumento de caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos, mientras que, en la zona baja, el río Maule posee un régimen pluvial, por lo cual presenta crecidas asociadas directamente con las precipitaciones. Con respecto al clima de la cuenca, este es de tipo mediterráneo con periodos marcados de lluvia y veranos secos con altas temperaturas. (Dirección General de Aguas, 2005).

La cuenca se divide en 9 subcuencas y 64 sub-subcuencas y cuenta con 59 estaciones meteorológicas y 90 estaciones fluviométricas que se pueden observar en la Figura 3, las que entregan la información hidrometeorológica de la zona. (Dirección General de Aguas, 2016).



**Figura 3:** Cuenca del río Maule junto a sus estaciones fluviométricas y pluviométricas.

Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección General de Aguas.

## 5.2 Identificar las estaciones consistentes del registro fluviométrico de la cuenca del Río Maule.

Se procedió a realizar la recopilación de datos de las estaciones fluviométricas, disponible en la dirección general de aguas y el explorador climático del centro de ciencia del clima y la resiliencia, para el periodo comprendido entre 1970 y 2019.

Una vez obtenidos los datos, se consideró las estaciones fluviométricas ubicadas en un cauce natural, para realizar un análisis de consistencia, siendo seleccionadas las estaciones que tenían mayor o igual al 25% de datos de caudal diario para el periodo entre 1970 y 2019, un 50% de datos para el periodo de medición de cada estación y que poseían vacíos de información inferiores a 3 años. (Arriagada et al.,

2019). A las estaciones que cumplieron con los criterios, se les realizó el relleno de los datos faltantes por medio de relleno automático, utilizando para ello el algoritmo de aprendizaje automático estocástico no paramétrico MissForest, el cual permite completar series de tiempo de flujo diario en regiones con escasez de datos y una fuerte variabilidad climática. (Arriagada et al., 2021).

### 5.3 Estimar las tendencias históricas anual y mensual de las estaciones consistentes en la cuenca del Río Maule.

Se estimó la tendencia significativa anual mediante la prueba de Mann-Kendall, en el software R, en cada una de las estaciones que resultaron consistentes, el cual corresponde a un test estadístico no paramétrico del que se pueden obtener tendencias tanto positivas como negativas, cuya significancia fue evaluada utilizando el test z con valores mayores o igual a  $|1,96|$ , y el valor-P de significancia, con valores entre 1% y 5% para verificar tendencia y un valor menor o igual a 1% para tendencias fuertes. (Miró Pérez et al., 2009).

Seguido, se obtuvo la magnitud de las tendencias significativas anual, aplicando la pendiente de Sen en el software R, el cual es un test no paramétrico que estima la pendiente o tasa lineal de cambio en una serie de tiempo. (Sen,1968).

Luego, se estimó la tendencia significativa mensual a través de la prueba de Mann-Kendall, a todas las estaciones con tendencia significativa anual, aplicando la metodología ya descrita para su evaluación y se obtuvo la magnitud de las tendencias significativas mensual mediante la pendiente de Sen, utilizando de igual forma el software R.



5.4 Analizar el efecto de la variabilidad temporal de las tendencias sobre la disponibilidad de agua otorgada en la cuenca del Río Maule.

Se procedió a realizar la búsqueda de información de los derechos de aprovechamiento de agua superficial otorgados para la cuenca, disponible en la página de la Dirección General de Aguas, desde donde se obtuvo la localización y los volúmenes de agua otorgados, los cuales fueron georreferenciados mediante la aplicación ArcMap.

Luego se le calculó el porcentaje de reducción de caudal a cada estación fluviométrica con tendencia significativa para los años 2030, 2050 y 2070, en base a la tendencia encontrada para dicha estación, aplicando la siguiente fórmula.

$$\text{Caudal Reducido} = \text{Caudal Historico} + (P * t)$$

Donde:

P = Pendiente de Sen ( $m^3s^{-1}$ )

t = Años

Es así que, el caudal reducido, en  $m^3s^{-1}$ , corresponde al caudal histórico, en  $m^3s^{-1}$ , sumado al producto entre el valor de la pendiente de sen obtenido para cada estación, en  $m^3s^{-1}$ , y los años para llegar a los tres escenarios de estudio, vale decir, 11, 31 y 51 años.

Finalmente, se realizó un balance volumétrico de agua para cada estación fluviométrica con tendencia significativa, de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$\text{Caudal Final} = \text{Caudal Reducido} - \sum \text{Derechos de Agua}$$

En la cual, el caudal final de la estación, en  $m^3s^{-1}$ , estuvo dado por el caudal, en  $m^3s^{-1}$ , aplicando el porcentaje de reducción, restando la suma de los derechos de agua, en  $m^3s^{-1}$ , en el tramo anterior a la estación fluviométrica. El resultado identificó si aplicada la reducción, la fuente de agua superficial puede sostener en el tiempo la demanda de agua existente, o se verá comprometido su cumplimiento.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Identificar las estaciones consistentes del registro fluviométrico de la cuenca del Río Maule.

La cuenca del río Maule cuenta con 90 estaciones fluviométricas ubicadas a lo largo de sus caudales. Dada la gran intervención humana existente en el cauce natural de los distintos ríos de la cuenca, principalmente por las actividades agrícolas y de generación eléctrica, se obtuvo que una cantidad considerable de 26 estaciones fluviométricas se encontraban midiendo caudal en canales de regadíos agrícolas, cauces de captación de hidroeléctricas, desagües de hidroeléctricas, entre otros, todos cauces controlados por el ser humano. Dado esto, se consideró no trabajar con dichas estaciones, debido a que la variación de caudal medida no es atribuible solamente a las variaciones climáticas, poseyendo un porcentaje de error mayor.

Como se observa en la figura 4.A) en color verde, las estaciones presentes en canales artificiales se ubican principalmente en la zona media alta, y media de la cuenca, donde las actividades de generación eléctrica y agrícola es mayor.

A las 64 estaciones restantes se les realizó un análisis de consistencia, midiendo en primer lugar, el porcentaje de datos de cada estación en el periodo 1970-2019, siendo seleccionadas las estaciones que contaran con un porcentaje de información del 100% al 25%.

Como se visualiza en la figura 4.B), en color azul se presentan las estaciones con un porcentaje de información de 100% a 75%, contando 15 estaciones que se ubican en la zona media baja de la cuenca. En color rosado se muestran las estaciones con un porcentaje de información del 75% al 50% sumando 7 estaciones, igualmente ubicadas principalmente en la zona media baja de la cuenca y en color naranja las estaciones con un porcentaje de información de 50% al 25%, con 14 estaciones ubicadas principalmente en la zona alta y media de la cuenca, mientras que en color amarillo se presentan las estaciones con un rango de información de



25% al 0%, dando un total de 28 estaciones descartadas, las cuales tienen por ubicación, principalmente la zona central, aunque presentes en toda la cuenca.

En segundo lugar, a las 36 estaciones fluviométricas se les calculó el porcentaje de información en el periodo de observación, vale decir, desde que inicia la medición de datos de caudal, hasta que se mide el último dato, dentro del periodo 1970-2019, seleccionando las estaciones que tuvieran de 100% al 50% de información.

Es así, que como se visualiza en la figura 4.C) en color naranja, solo una estación no cumple con el criterio, la cual, a pesar de contar con datos en los 50 años del periodo de trabajo, solo poseía un 40% de información.

En tercer lugar y como último criterio, se identificó los vacíos de información, siendo seleccionadas las estaciones que poseían no más de tres años seguidos sin datos, bajo el cual se eliminó una estación, correspondiente a la única que poseía entre un 75% y 50% de información en el periodo de observación, visible en color rosado en la figura 4.C).

De este modo, en la figura 4.D) se presentan las estaciones ubicadas en un cauce natural, con un porcentaje de información en el periodo 1970-2019 de 100% a 25%, un porcentaje de información observada de 100%-75% y con no más de tres años consecutivos de vacíos de información, dando un total de 34 estaciones seleccionadas, que abarcan la mayor parte del territorio de la cuenca.

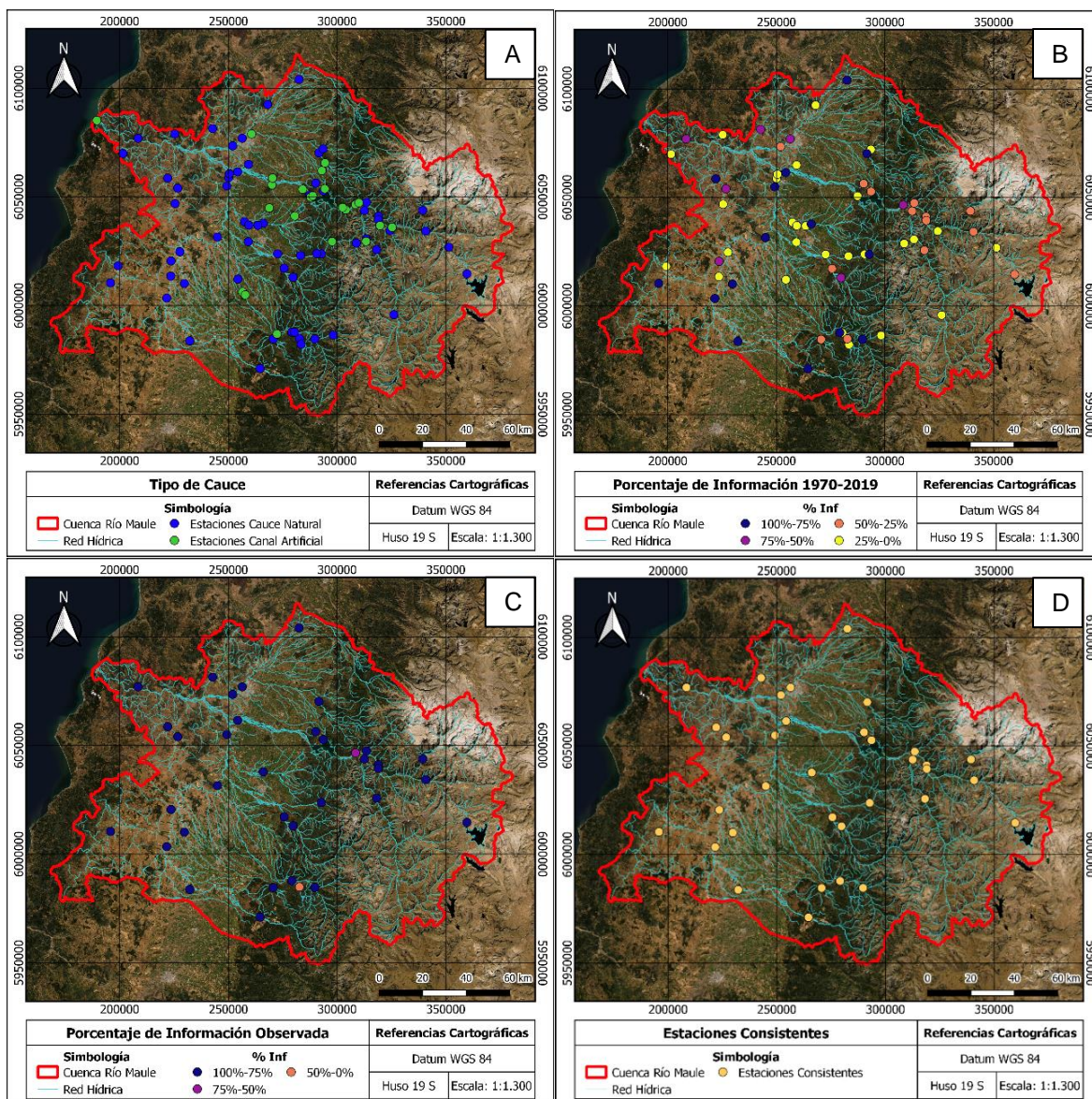


Figura 4: Análisis de Consistencia. A): Estaciones fluviométricas clasificadas según el tipo de cauce de medición. B): Estaciones fluviométricas clasificadas según porcentaje de información periodo 1970-2019. C): Estaciones fluviométricas clasificadas según porcentaje de información periodo de observación. D): Estaciones fluviométricas consistentes.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la DGA y CR2.

En el Tabla 5 se presentan las 90 estaciones del registro fluviométrico de la cuenca del Río Maule, junto a los cuatro criterios de selección utilizados para considerar las estaciones consistentes, donde es posible apreciar el criterio mediante el cual fueron descartadas las 54 estaciones no consistentes, y los porcentajes de información específicos para cada estación consistente.

**Tabla 5:** Análisis de Consistencia.

Código Estación	Nombre Estación	Tipo de Cauce	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
			Porcentaje Periodo 1970-2019	Porcentaje Periodo de Registro	Vacíos de Información > 3 años	
7300001	Río Maule En Desagüe Laguna Del Maule	Cauce Natural	27%	85%	No	
7301003	Río Maule Bajo Campanario	Cauce Natural	0%	-	-	
7303000	Río Maule En Los Baños	Cauce Natural	31%	91%	No	
7306001	Río Cipreses En Desagüe Laguna La Invernada	Cauce Natural	29%	84%	No	
7307000	Río Colorado En Curillinque	Cauce Natural	4%	-	-	
7308000	Canal AD. Maule C. Pehuenche	Canal Artificial	-	-	-	
7308001	Estero Las Garzas	Cauce Natural	32%	94%	No	
7308002	Río Maule Bajo Boca Toma Maule Central Pehuenche	Cauce Natural	29%	86%	No	
7308003	Canal Las Garzas	Canal Artificial	-	-	-	
7314001	Río Huaiquivilo En Huaiquivilo	Cauce Natural	10%	-	-	
7317001	Río Melado En La Lancha DGA	Cauce Natural	1%	-	-	
7317002	Canal Melado En Los Hierros	Canal Artificial	-	-	-	
7317003	Río Melado En Zona De Presa	Cauce Natural	34%	99%	No	
7317005	Río Melado En El Salto	Cauce Natural	33%	98%	No	

7317006	Canal Melado En C. Hidroeléctrica Los Hierros I	Canal Artificial	-	-	-
7320003	Rio Claro En San Carlos	Cauce Natural	33%	96%	No
7321002	Rio Maule En Armerillo	Cauce Natural	56%	56%	Si
7321003	Canal Maule Norte En Aforador	Canal Artificial	-	-	-
7321004	Canal Maule En Bocatoma	Canal Artificial	-	-	-
7321005	Canal De Evacuación C. Pehuenche	Canal Artificial	-	-	-
7321007	Canal Maule Norte Alto En Paso Nevado	Canal Artificial	-	-	-
7321008	Vertedero Embalse Colbun	Canal Artificial	-	-	-
7322001	Rio Maule En Longitudinal	Cauce Natural	89%	89%	No
7322002	Canal Maule Sur En Aforador	Canal Artificial	-	-	-
7322003	Canal Maule Sur En Los Lirios	Canal Artificial	-	-	-
7322004	Rio Maule En Colbun	Cauce Natural	14%	-	-
7322005	Canal De Restitución Sur 2	Canal Artificial	-	-	-
7322006	Canal De Restitución Sur 3	Canal Artificial	-	-	-
7322007	Canal San Clemente	Canal Artificial	-	-	-
7322008	Canal Duao Zapata	Canal Artificial	-	-	-
7330001	Rio Perquilauquen En San Manuel	Cauce Natural	92%	92%	No
7331001	Rio Cato En Digua	Cauce Natural	27%	88%	No
7331004	Canal Alimentador Digua	Canal Artificial	-	-	-
7332001	Rio Perquilauquen En Gniquen	Cauce Natural	88%	91%	No
7335001	Rio Perquilauquen En Quella	Cauce Natural	90%	93%	No
7335002	Esterio Curipeumo En Lo Hernández	Cauce Natural	91%	92%	No



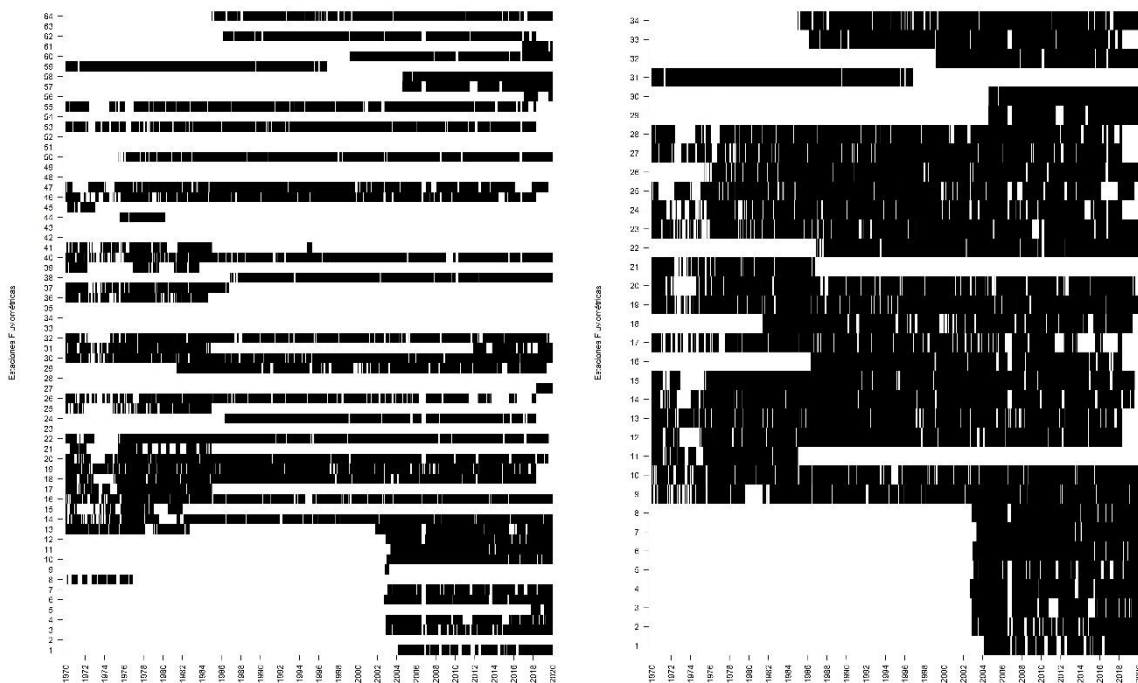
7335003	Rio Perquilauquen En Santa Ema	Cauce Natural	15%	-	-
7336001	Rio Cauquenes En El Arrayan	Cauce Natural	90%	91%	No
7337001	Rio Tutuven En El Roble	Cauce Natural	0%	-	-
7339001	Rio Cauquenes En Desembocadura	Cauce Natural	60%	94%	No
7340001	Estero Cardo Verde En Lo Ubaldo	Cauce Natural	19%	-	-
7341001	Rio Purapel En Nirivilo	Cauce Natural	76%	79%	No
7341003	Quebrada Pasitos En Santa Olga	Cauce Natural	3%	-	-
7342001	Rio Purapel En Purapel	Cauce Natural	0%	-	-
7343001	Rio Purapel En Sauzal	Cauce Natural	68%	90%	No
7350001	Rio Longavi En La Quiriquina	Cauce Natural	94%	94%	No
7350002	Rio Bullileo En Santa Filomena	Cauce Natural	40%	40%	-
7350003	Rio Longavi En El Castillo	Cauce Natural	86%	86%	No
7350004	Rio Bullileo En Portal Tunel	Cauce Natural	0%	-	-
7350005	Rio Longavi Antes Junta Bullileo	Cauce Natural	0%	-	-
7350009	Rio Achibueno En Punta Tricahue	Cauce Natural	0%	-	-
7351001	Rio Longavi En Longitudinal	Cauce Natural	24%	-	-
7351002	Canal Primera Abajo	Canal Artificial	-	-	-
7352004	Canal Maitenes En Bocatoma	Canal Artificial	-	-	-
7354001	Rio Achibueno En Los Pagnascos	Cauce Natural	30%	89%	No
7354002	Rio Achibueno En La Recova	Cauce Natural	64%	97%	No
7355001	Rio Ancoa En El Llepo	Cauce Natural	14%	-	-
7355002	Rio Ancoa En El Morro	Cauce Natural	89%	89%	No
7355003	Rio Ancoa Antes Tunel Canal Melado	Cauce Natural	23%	-	-

7355004	Rio Ancoa En Las Minas	Cauce Natural	0%	-	-
7355005	Rio Ancoa En Las Vegas	Cauce Natural	0%	-	-
7355008	Canal Robleria Ante Bocatoma Ancoa	Canal Artificial	-	-	-
7356001	Rio Achibueno En San Francisco	Cauce Natural	9%	-	-
7357001	Rio Loncomilla En En Emboque	Cauce Natural	5%	-	-
7357002	Rio Loncomilla En Bodega	Cauce Natural	84%	87%	No
7358001	Rio Putagan En Yervas Buenas	Cauce Natural	84%	84%	No
7358002	Rio Putagan En Putagan	Cauce Natural	0%	-	-
7358003	Rio Putagan En Santa Rosa	Cauce Natural	0%	-	-
7358010	Canal De Restitución Sur 1	Canal Artificial	-	-	-
7359001	Rio Loncomilla En Las Brisas	Cauce Natural	84%	95%	No
7359003	Rio Loncomilla En San Javier	Cauce Natural	0%	-	-
7361001	Rio Maule En Loncomilla	Cauce Natural	0%	-	-
7372001	Rio Claro En Camarico	Cauce Natural	88%	91%	No
7372002	Rio Claro En Puente Cimbra	Cauce Natural	0%	-	-
7374001	Rio Lircay En Puente Las Rastras	Cauce Natural	84%	87%	No
7374002	Canal Maule Norte Bajo Sección 1	Canal Artificial	-	-	-
7374003	Canal Maule Norte Bajo Sección 2	Canal Artificial	-	-	-
7375000	Estero Picazo En Huapi	Cauce Natural	4%	-	-
7376003	Canal Pencahue En Bocatoma Rio Lircay	Canal Artificial	-	-	-
7378011	Canal Maule Norte Bajo En Puente Centinela	Canal Artificial	-	-	-
7378012	Quebrada Colorado En Desagüe Laguna Los Temos	Cauce Natural	28%	90%	No

7378013	Quebrada Colorado Bajo Sistema Maitenes	Cauce Natural	31%	99%	No
7378014	Prueba GPRS 6	Canal Artificial	-	-	-
7379001	Rio Claro En Talca	Cauce Natural	53%	98%	No
7379002	Rio Claro En Rauquen	Cauce Natural	40%	97%	No
7379005	Rio Lircay En Carretones	Cauce Natural	6%	-	-
7381001	Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	Cauce Natural	61%	95%	No
7382001	Rio Maule En Cuesta Culenar	Cauce Natural	0%	-	-
7383001	Rio Maule En Forel	Cauce Natural	65%	93%	No
7384003	Prueba GPRS7	Canal Artificial	-	-	-

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la DGA y CR2.

La figura 5.a) muestra el registro de información de caudal de las 64 estaciones fluviométricas ubicadas en un cauce natural, en contraste con el registro de información de las 34 estaciones fluviométricas consistentes de la figura 5.b), donde se aprecian los vacíos de información en el registro original y ampara la selección de las estaciones con el mayor porcentaje de información para realizar el análisis de tendencia.



**Figura 5:** Información fluviométrica cuenca. a) Información fluviométrica estaciones cauce natural. b) Información fluviométrica estaciones consistentes. Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la DGA y CR2.

## 6.2 Estimar las tendencias históricas anual y mensual de las estaciones consistentes en la cuenca del Río Maule

### 6.2.1 Tendencias históricas significativas anual

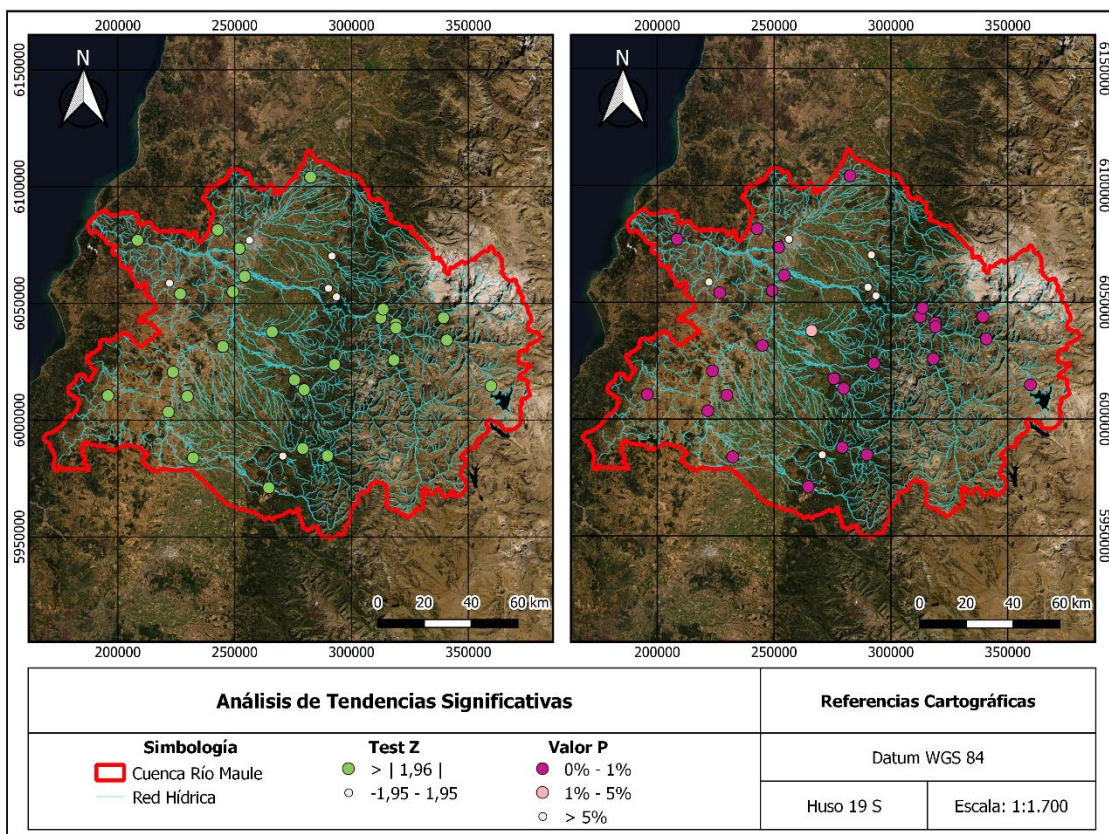
A las 34 estaciones seleccionadas se les realizó el relleno de los datos en el periodo 1970-2019, para luego ser aplicado el test de Mann-Kendall. Las tendencias encontradas se analizaron según el Test Z, el cual entrega valores positivos y negativos, considerando como tendencia significativa un valor absoluto de Z mayor a 1,96; y valor-P de significancia, donde se considera una tendencia significativa, un valor P de 0% a 5%, con un intervalo de confianza del 95%.

En la figura 6.a) se presenta el análisis mediante el test Z con los datos anuales, donde se aprecia que 28 de las 34 estaciones obtuvieron una tendencia significativa.



En cuanto al valor- P de significancia presentado en la figura 6.b), se observa que, las mismas 28 estaciones presentan tendencia significativa, igualando los resultados del test anterior.

Es así, que dada la concordancia en los resultados del test Z y valor-P de significancia, 6 estaciones fueron descartadas al presentas tendencias no significativas, marcadas de color amarillo en el Tabla 6, trabajando con las 28 estaciones fluviométricas que presentan tendencias significativas.



**Figura 6:** Test de Significancia. a) Test Z de significancia. b) Valor p de significancia.

Fuente: Elaboración propia.

A las 28 estaciones con tendencias significativas, se le aplicó la pendiente de sen para así obtener la cantidad que representa las tendencias obtenidas anteriormente.

Como se observa en la figura 7, las 28 estaciones presentaron tendencias significativas decrecientes, en mayor o menor cantidad, dando en general un panorama de disminución del caudal de la cuenca en periodos anuales.

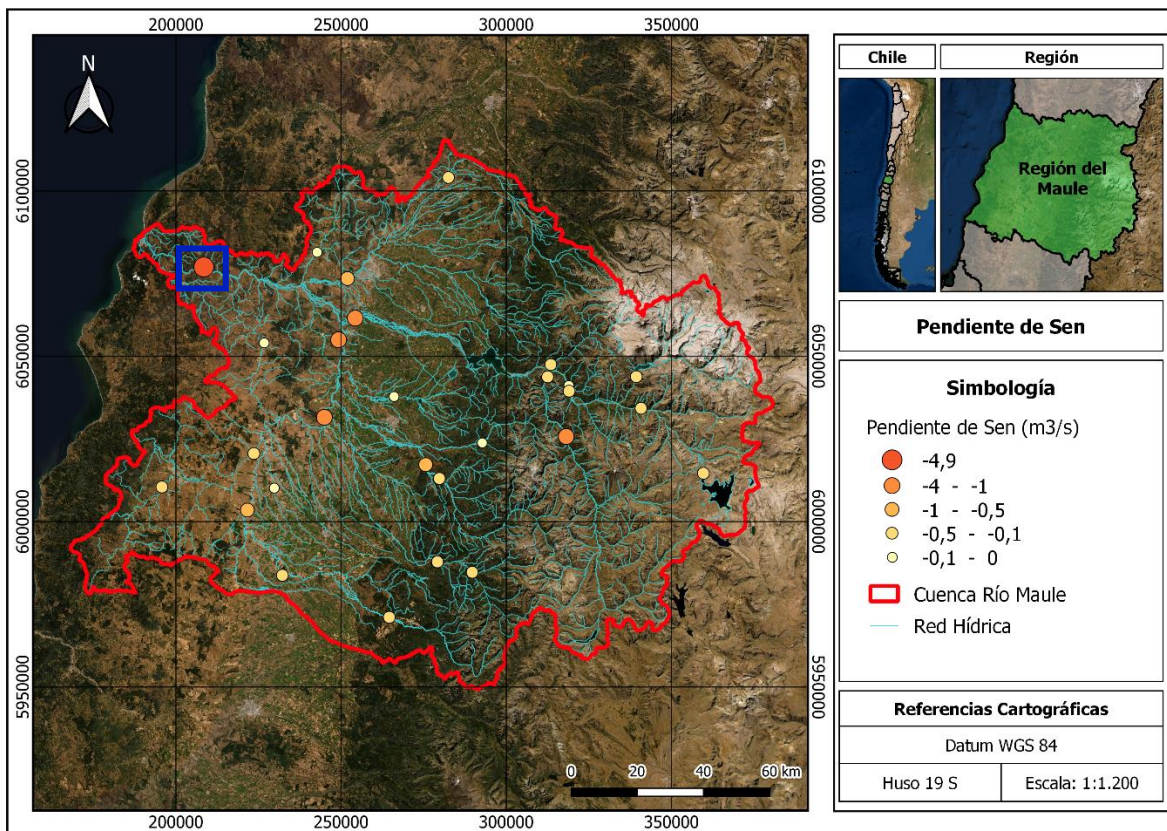


Figura 7: Pendiente de Sen anual.

Fuente: Elaboración propia.

Las mayores tendencias de disminución del caudal se presentan en el cauce del río Maule, en la zona central y baja de la cuenca, siendo como se aprecia en el Tabla 6, la estación fluviométrica “río Maule en Forel” la que presenta la mayor magnitud de disminución, con  $-4,94 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  anual, la cual se ubica en la zona baja de la cuenca, marcada con un cuadro azul en la figura 7, lo cual se puede explicar debido al efecto en escala, donde la disminución en las zonas más altas y medias de la cuenca se suman para dar una tendencia a la disminución mucho mayor en la zona baja de la cuenca.

**Tabla 6:** Análisis de tendencia anual.

<b>Código Estación</b>	<b>Nombre Estación</b>	<b>Test Z</b>	<b>Valor P</b>	<b>Pendiente de Sen (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>
7300001	Rio Maule En Desagüe Laguna Del Maule	-3,618	< 0,001%	-0,190
7303000	Rio Maule En Los Baños	-4,184	< 0,001%	-0,489
7306001	Rio Cipreses En Desagüe Laguna La Invernada	-4,518	< 0,001%	-0,100
7308001	Estero Las Garzas Rio Maule Bajo Boca	-7,469	< 0,001%	-0,043
7308002	Toma Maule Central Pehuenche	-6,315	< 0,001%	-0,459
7317003	Rio Melado En Zona De Presa	-7,892	< 0,001%	-0,242
7317005	Rio Melado En El Salto	-6,232	< 0,001%	-1,196
7320003	Rio Claro En San Carlos	-5,005	< 0,001%	-0,176
7322001	Rio Maule En Longitudinal	-6,423	< 0,001%	-2,748
7330001	Rio Perquilauquen En San Manuel	-7,207	< 0,001%	-0,299
7331001	Rio Cato En Digua	-0,999	0,318%	-0,008
7332001	Rio Perquilauquen En Gniquen	-4,929	< 0,001%	-0,259
7335001	Rio Perquilauquen En Quella	-6,198	< 0,001%	-0,517
7335002	Estero Curipeumo En Lo Hernández	-3,728	< 0,001%	-0,030
7336001	Rio Cauquenes En El Arrayan	-7,501	< 0,001%	-0,115
7339001	Rio Cauquenes En Desembocadura	-10,499	< 0,001%	-0,347
7341001	Rio Purapel En Nirivilo	-0,387	0,699%	-0,002
7343001	Rio Purapel En Sauzal	-7,511	< 0,001%	-0,074
7350001	Rio Longavi En La Quiriquina	-4,559	< 0,001%	-0,339
7350003	Rio Longavi En El Castillo	-7,113	< 0,001%	-0,301



7354001	Rio Achibueno En Los Pagnascos	-6,917	< 0,001%	-0,501
7354002	Rio Achibueno En La Recova	-6,163	< 0,001%	-0,459
7355002	Rio Ancoa En El Morro	-3,453	< 0,001%	-0,089
7357002	Rio Loncomilla En Bodega	-5,973	< 0,001%	-1,656
7358001	Rio Putagan En Yervas Buenas	-3,123	0,002%	-0,063
7359001	Rio Loncomilla En Las Brisas	-8,971	< 0,001%	-3,503
7372001	Rio Claro En Camarico	-4,636	< 0,001%	-0,129
7374001	Rio Lircay En Puente Las Rastras	-0,723	0,470%	-0,017
7378012	Quebrada Colorado En Desagüe Laguna Los Temos	-1,348	0,178%	-0,011
7378013	Quebrada Colorado Bajo Sistema Maitenes	-1,710	0,087%	-0,006
7379001	Rio Claro En Talca	-0,247	0,805%	-0,036
7379002	Rio Claro En Rauquen	-8,632	< 0,001%	-0,700
7381001	Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	-3,897	< 0,001%	-0,030
7383001	Rio Maule En Forel	-6,541	< 0,001%	-4,942

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2 Tendencias históricas significativas mensual

Del mismo modo que se analizó la tendencia anual, se aplicó el test de Mann-Kendall en escala mensual, a las 28 estaciones resultantes significativas, analizando así con el test Z y valor-P, las tendencias en los 12 meses del año.

En el Tabla 7 y Tabla 8, se presenta la magnitud de las tendencias resultante significativas, donde es posible apreciar el número de estaciones con tendencia significativa para cada mes del año, siendo abril, agosto y septiembre los que

presentaron menos estaciones significativas, dando a entender que en dichos meses las estaciones no significativas no marcaron una gran diferencia en el caudal durante el periodo de estudio 1970-2019, dando alusión a ser los meses con menos cambios en el caudal.

Al contrario, los meses de mayo, junio, julio, noviembre y diciembre, son los que poseen casi todas las estaciones con tendencia significativa, pudiendo interpretarse que corresponde a meses con mayor cambio en el caudal, en todo el territorio que contempla la cuenca.

Analizando la magnitud de las tendencias mensualmente, se puede observar claramente la predominancia de las tendencias negativas, destacando los meses de mayo a septiembre por poseer todas sus tendencias negativas, lo cual puede estar ligado a la disminución considerable de las precipitaciones, mientras que en los meses de octubre a abril se presentan tendencias positivas, que pueden estar ligadas al deshielo cordillerano en los meses de altas temperaturas, junto a lluvias tempranas.

En cuanto a la mayor magnitud de disminución para cada mes del año, se destaca que 7 de los 12 meses presenta a la estación “Rio Maule En Forel” como la que posee la magnitud mayor, siendo julio el mes con mayor disminución del caudal, seguido de junio y agosto, meses donde la principal fuente de agua de la cuenca son las precipitaciones, en la zona baja de la cuenca que posee régimen pluvial, demostrando el fuerte impacto que tiene la disminución de las precipitaciones en el caudal de la cuenca.

En los meses de octubre, noviembre y diciembre también es posible apreciar una magnitud de disminución significativa correspondiente a  $-4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , en las estaciones “Rio Maule En Longitudinal” y “Rio Maule En Forel”, ubicadas en la zona central y baja de la cuenca, demostrando veranos más secos, siendo los meses de marzo y abril, los que presentan el menor orden de magnitud de disminución en el año, con  $0,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en la estación “Rio Maule En Los Baños” ubicada en la zona alta de la

cuenca, dando a entender que en estos meses la variabilidad hídrica en la cuenca es menor.

**Tabla 7:** Pendiente de Sen enero – junio.

<b>Código Estación</b>	<b>Enero (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Febrero (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Marzo (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Abril (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mayo (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Junio (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>
7300001		0,067	-0,221	-0,280	-0,280	-0,339
7303000		-0,314	-0,375	-0,325	-0,759	-0,768
7306001	-0,194	-0,123	-0,004	-0,001	-0,017	-0,011
7308001	-0,018	-0,012	-0,005	-0,008	-0,050	-0,071
7308002	-0,450	-0,372	-0,080	-0,053	-0,198	-0,254
7317003	-0,004	-0,002	-0,002	-0,005	-0,073	-0,177
7317005	-1,381	-0,523	-0,197	-0,210	-1,373	-1,317
7320003	-0,150	-0,076	-0,026	-0,022	-0,205	-0,215
7322001	-1,165	-0,386		2,319	-1,219	-3,511
7330001	-0,050	-0,026	-0,016		-0,495	-0,529
7332001	-0,043	-0,016	-0,018		-0,557	
7335001	-0,052		-0,053	0,158	-0,888	-1,018
7335002	-0,031	-0,024	-0,039	-0,023	-0,031	
7336001	-0,004	-0,003			-0,067	-0,132
7339001	-0,011	-0,007		-0,016	-0,298	-0,623
7343001	-0,006	-0,004	-0,004	-0,009	-0,048	-0,112
7350001	-0,057	-0,100	-0,094		-0,544	-0,450
7350003	-0,163	-0,104	-0,043		-0,548	-0,414
7354001	-0,231	-0,077		0,036	-0,532	-0,740
7354002	-0,254	-0,115	-0,049		-0,564	-0,652
7355002	0,191	0,160	0,064	-0,018	-0,282	-0,318
7357002	-0,326	-0,260	-0,219		-2,040	-2,823
7358001			0,074		-0,207	-0,168
7359001	-0,484			-0,283	-3,869	-4,625
7372001	-0,040	-0,025	-0,035		-0,100	-0,225
7379002	-0,371	-0,278	-0,165		-0,590	-0,896
7381001			0,038	0,051		-0,080
7383001	-1,692	-1,082		1,212	-3,630	-5,934

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 8:** Pendiente de Sen julio – diciembre.

<b>Código Estación</b>	<b>Julio (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Agosto (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Septiembre (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Octubre (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Noviembre (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Diciembre (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>
7300001	-0,278	-0,405	-0,431	-0,282	-0,133	-0,233
7303000	-0,641	-0,476	-0,524	-0,421	-0,641	-1,326
7306001	-0,005	-0,004	-0,003	-0,025	-0,227	-0,313
7308001	-0,102	-0,034		-0,025	-0,063	-0,058
7308002	-0,143	-0,071	-0,064	-0,313	-1,192	-1,232
7317003	-0,238	-0,034	-0,021	-0,104	-0,273	-0,118
7317005	-1,583	-1,047		-0,718	-1,748	-2,537
7320003	-0,285	-0,195		-0,174	-0,263	-0,290
7322001	-3,983	-3,435	-3,313	-4,228	-4,972	-3,944
7330001	-0,921			-0,269	-0,229	-0,157
7332001	-1,013			-0,369	-0,323	-0,142
7335001	-1,971			-0,378	-0,354	-0,133
7335002			-0,034	-0,014	-0,028	-0,032
7336001	-0,509		-0,050	-0,048	-0,022	-0,009
7339001	-1,112	-0,374	-0,215	-0,139	-0,050	-0,026
7343001	-0,273	-0,065	-0,036	-0,032	-0,023	-0,013
7350001	-0,738			-0,276	-0,482	-0,391
7350003	-0,490			-0,296	-0,454	-0,377
7354001	-1,138	-0,379		-0,331	-0,609	-0,595
7354002	-0,994			-0,318	-0,480	-0,533
7355002	-0,509	-0,173				0,101
7357002	-4,628	-1,34		-1,145	-0,993	-0,592
7358001	-0,473		-0,138		-0,050	
7359001	-9,133	-2,250		-2,582	-2,211	-1,719
7372001	-0,440	-0,157			-0,088	-0,058
7379002	-2,365	-0,515				-0,304
7381001	-0,231	-0,076	-0,028	0,035	0,037	0,026
7383001	-13,496	-5,888	-3,691	-4,091	-4,912	-4,341

Fuente: Elaboración propia.



6.3 Analizar el efecto de la variabilidad temporal de las tendencias sobre la disponibilidad de agua otorgada en la cuenca del Río Maule.

### 6.3.1 Caudal proyectado

Obtenido el caudal histórico, correspondiente al promedio de caudal en el periodo 1970-2019 y la magnitud de las tendencias a nivel anual, se calculó las proyecciones de caudal para los años 2030, 2050 y 2070. Es así, como en el Tabla 9 se presentan las 28 estaciones consistentes significativas y su respectivo caudal histórico y caudales proyectados. Dado el hecho que todas las estaciones poseen tendencia negativa, es posible apreciar que a medida que pasan los años el caudal de todas las estaciones es menor, llegando al punto que las estaciones “Río Cipreses En desagüe Laguna La Invernada”, “Río Maule Bajo Boca Toma Maule Central Pehuenche”, “Río Melado En Zona De Presa” y “Río Cauquenes En Desembocadura”, para el año 2070 ya no contarían con caudal.

**Tabla 9:** Caudal histórico y proyectado para 2030, 2050 y 2070.

Código Estación	Nombre Estación	Caudal Histórico (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Caudal 2030 (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Caudal 2050 (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Caudal 2070 (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
7300001	Río Maule En Desagüe Laguna Del Maule	19,90	17,81	14,00	10,20
7303000	Río Maule En Los Baños	60,55	55,17	45,39	35,60
7306001	Río Cipreses En Desagüe Laguna La Invernada	4,70	3,59	1,59	-0,42
7308001	Estero Las Garzas Río Maule Bajo	3,73	3,25	2,38	1,52
7308002	Boca Toma Maule Central Pehuenche	19,67	14,63	5,46	-3,71

7317003	Rio Melado En Zona De Presa	9,98	7,32	2,49	-2,35
7317005	Rio Melado En El Salto	90,95	77,80	53,89	29,97
7320003	Rio Claro En San Carlos	21,32	19,38	15,87	12,35
7322001	Rio Maule En Longitudinal	180,50	150,27	95,31	40,35
7330001	Rio Perquilauquen En San Manuel	31,57	28,28	22,30	16,31
7332001	Rio Perquilauquen En Gniquen	40,21	37,36	32,17	26,99
7335001	Rio Perquilauquen En Quella	56,17	50,48	40,14	29,80
7335002	Estero Curipeumo En Lo Hernández	3,31	2,98	2,39	1,79
7336001	Rio Cauquenes En El Arrayan	8,56	7,30	5,01	2,71
7339001	Rio Cauquenes En Desembocadura	16,16	12,34	5,41	-1,53
7343001	Rio Purapel En Sauzal	4,32	3,51	2,04	0,56
7350001	Rio Longavi En La Quiriquina	45,02	41,30	34,53	27,76
7350003	Rio Longavi En El Castillo	35,86	32,55	26,54	20,52
7354001	Rio Achibueno En Los Pagnascos	42,99	37,48	27,46	17,45
7354002	Rio Achibueno En La Recova	44,04	38,99	29,82	20,65
7355002	Rio Ancoa En El Morro	21,75	20,76	18,98	17,20
7357002	Rio Loncomilla En Bodega	141,01	122,80	89,67	56,55
7358001	Rio Putagan En Yervas Buenas	22,83	22,14	20,89	19,64

7359001	Rio Loncomilla En Las Brisas	260,33	221,79	151,72	81,66
7372001	Rio Claro En Camarico	18,25	16,83	14,26	11,68
7379002	Rio Claro En Rauquen	86,85	79,15	65,15	51,16
7381001	Estero Los Puercos En Puento Los Puercos	4,59	4,26	3,66	3,05
7383001	Rio Maule En Forel	510,26	455,90	357,07	258,23

Fuente: Elaboración propia.

En el Tabla 10 se observan los porcentajes de reducción de las estaciones en relación a los tres periodos de estudio, donde se destaca que, de las 4 estaciones mencionadas, ninguna poseía la mayor magnitud de disminución; pero si contaban con el mayor porcentaje de disminución en relación a su caudal histórico, razón por la cual corresponden a los casos más críticos en la cuenca. En contraste, las estaciones “Rio Putagan En Yervas Buenas” y “Rio Ancoa En El Morro” corresponden a las estaciones que poseen los menores porcentajes de reducción de la cuenca para el año 2070, con 14% y 21% respectivamente.

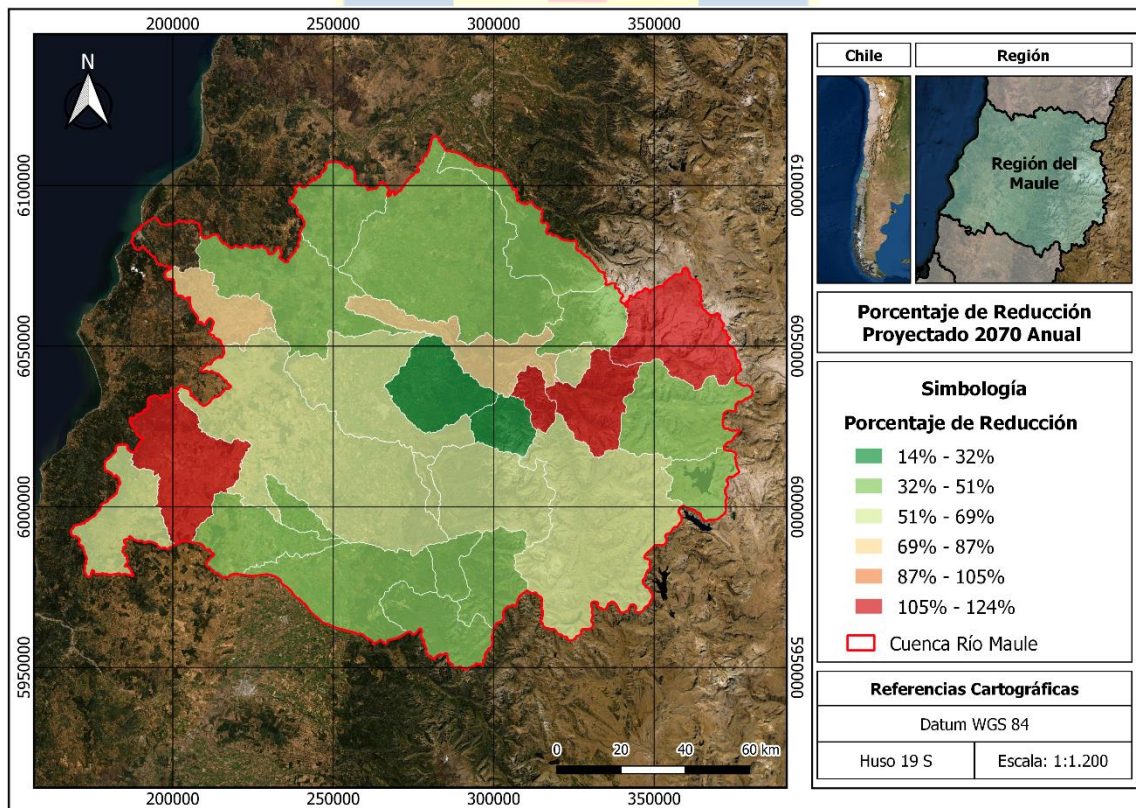
**Tabla 10:** Porcentaje de reducción proyectado para 2030, 2050 y 2070.

Código Estación	Nombre Estación	Porcentaje Reducción	Porcentaje Reducción	Porcentaje Reducción
		Caudal 2030 (%)	Caudal 2050 (%)	Caudal 2070 (%)
7300001	Rio Maule En Desagüe Laguna Del Maule	11%	30%	49%
7303000	Rio Maule En Los Baños	9%	25%	41%
7306001	Rio Cipreses En Desagüe Laguna La Invernada	23%	66%	109%
7308001	Estero Las Garzas	13%	36%	59%
7308002	Rio Maule Bajo Boca Toma Maule Central Pehuenche	26%	72%	119%

7317003	Rio Melado En Zona De Presa	27%	75%	124%
7317005	Rio Melado En El Salto	14%	41%	67%
7320003	Rio Claro En San Carlos	9%	26%	42%
7322001	Rio Maule En Longitudinal	17%	47%	78%
7330001	Rio Perquillauquen En San Manuel	10%	29%	48%
7332001	Rio Perquillauquen En Gniquen	7%	20%	33%
7335001	Rio Perquillauquen En Quella	10%	29%	47%
7335002	Estero Curipeumo En Lo Hernández	10%	28%	46%
7336001	Rio Cauquenes En El Arrayan	15%	42%	68%
7339001	Rio Cauquenes En Desembocadura	24%	67%	109%
7343001	Rio Purapel En Sauzal	19%	53%	87%
7350001	Rio Longavi En La Quiriquina	8%	23%	38%
7350003	Rio Longavi En El Castillo	9%	26%	43%
7354001	Rio Achibueno En Los Pegnascos	13%	36%	59%
7354002	Rio Achibueno En La Recova	11%	32%	53%
7355002	Rio Ancoa En El Morro	5%	13%	21%
7357002	Rio Loncomilla En Bodega	13%	36%	60%
7358001	Rio Putagan En Yervas Buenas	3%	9%	14%
7359001	Rio Loncomilla En Las Brisas	15%	42%	69%
7372001	Rio Claro En Camarico	8%	22%	36%
7379002	Rio Claro En Rauquen	9%	25%	41%
7381001	Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	7%	20%	34%

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8 se presentan las 28 cuencas respectivas a las 28 estaciones significativas y es posible apreciar el escenario proyectado para el año 2070, donde de color “verde oscuro” se aprecian las estaciones con el menor porcentaje de reducción, concentrándose en el centro de la cuenca, mientras que en color “rojo” se encuentran las estaciones con el mayor porcentaje de disminución, ubicadas tanto en la zona norte alta como sur baja de la cuenca, siendo la estación con mayor porcentaje de reducción, “Río Melado En Zona De Presa”, seguida de las tres estaciones que presentan un caudal negativo. Además, se aprecia la magnitud del porcentaje de reducción, el cual varía de un 14% en “Río Putagan En Yervas Buenas”, a un 124% de reducción de caudal en “Río Melado En Zona De Presa”.



**Figura 8:** Porcentaje de reducción proyectado del caudal para el año 2070.

Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.2 Demanda hídrica de la cuenca

De acuerdo a la base de datos de la Dirección General de Aguas, que posee los derechos de aprovechamiento de agua del país, la cuenca del Río Maule posee hasta el 31 de diciembre del año 2021, 8.342 derechos de agua, de los cuales 4.586 corresponden a derechos de agua superficiales y 3.756 a derechos de agua subterráneos.

Para el análisis a realizado en el presente trabajo se consideraron los 4.586 derechos de agua superficiales, en los cuales fue necesario identificar los derechos de agua que contaban con unidades de medida de caudal ( $\text{ls}^{-1}$ ,  $\text{m}^3\text{año}^{-1}$ ,  $\text{m}^3\text{mes}^{-1}$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , entre otros), los cuales resultaron ser 2.031 derechos de agua. Los 2.555 derechos de agua restantes, o contaban con unidad de medida de acciones de agua, o simplemente no entregaban dicha información, dificultando el trabajo con ellos.

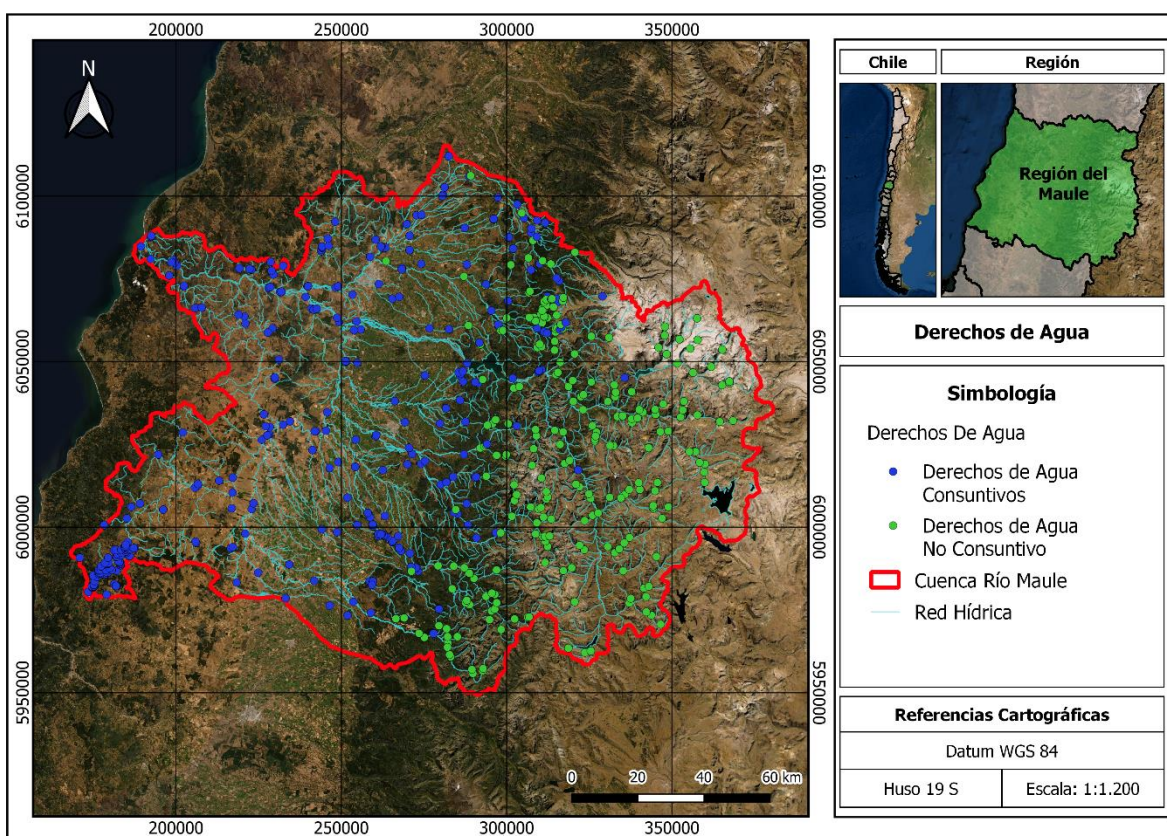
Además, a los 2.031 derechos de agua con los cuales era posible trabajar, se les debió filtrar para identificar aquellos que poseían coordenadas que hicieran posible georreferenciar los derechos de agua en la cuenca, siendo solo 1.193 derechos de agua los seleccionados, de los cuales 1.164 fueron georreferenciados satisfactoriamente dentro de la cuenca.

Es así que, debido a la falta de información presentada en la base de datos, o la no veracidad de la información presentada, solo es posible trabajar con un cuarto de los derechos de agua superficiales en la cuenca del Río Maule, lo que afecta directamente el resultado final del trabajo, siendo considerado así, como el resultado más favorable posible, dado el hecho de no poder contrastar al caudal, la verdadera cantidad de derechos de agua otorgados.

En la figura 9 se pueden observar los 1.164 derechos de agua georreferenciados correctamente, los cuales se encuentran repartidos por todo el territorio de la cuenca. En color azul se aprecian los derechos de agua consuntivos, que suman 665 derechos de agua, los cuales se ubican principalmente en la zona central y baja



de la cuenca, utilizados para la actividad agrícola principalmente, seguido por el consumo humano. En color verde se presentan los 499 derechos de agua no consuntivos, ubicados principalmente en la zona alta y media alta de la cuenca, teniendo por uso el de la generación eléctrica.



**Figura 9:** Derechos de agua superficiales cuenca Río Maule.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la DGA.

Para el balance de volúmenes de agua realizado, se consideraron los derechos de agua consuntivos, al tratarse de aquellos que no son devueltos al caudal de la cuenca, cuya demanda por cuenca estudiada se aprecia en el Tabla 11. De las 28 estaciones fluviométricas consistentes significativas, 2 estaciones no presentaron derechos de agua y 7 solo poseían derechos de agua no consuntivos, ubicadas en la zona alta y media de la cuenca, dando 9 estaciones a las cuales no fue posible aplicar dicho balance.



Además, del Tabla 11 se destacan las estaciones “Rio Claro En Rauquen” y “Rio Loncomilla En Bodega” al poseer la mayor demanda de la cuenca, con  $26,72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y  $25,79 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  respectivamente, en contraste a las estaciones “Rio Melado En El Salto” y “Rio Longavi En El Castillo” que poseen la menor demanda de derechos de agua consuntivos con  $0,0015 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y  $0,0019 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  respectivamente, esto ya que contaban principalmente con derechos de agua no consuntivos.

**Tabla 11:** Derechos de agua superficiales consuntivos cuenca Río Maule.

<b>Código Estación</b>	<b>Nombre Estación</b>	<b>Derechos de Agua (<math>\text{m}^3\text{s}^{-1}</math>)</b>
7300001	Rio Maule En Desagüe	0
7303000	Laguna Del Maule	0
7306001	Rio Cipreses En Desagüe	0
7308001	Laguna La Invernada	0
7308001	Estero Las Garzas	0
7308002	Rio Maule Bajo Boca Toma	0,03
	Maule Central Pehuenche	
7317003	Rio Melado En Zona De Presa	0
7317005	Rio Melado En El Salto	0,0015
7320003	Rio Claro En San Carlos	0
7322001	Rio Maule En Longitudinal	3,78
7330001	Rio Perquillauquen En San Manuel	6,81
7332001	Rio Perquillauquen En Gniquen	11,71
7335001	Rio Perquillauquen En Quella	0,22
7335002	Estero Curipeumo En Lo Hernández	0
7336001	Rio Cauquenes En El Arrayan	11,49
7339001	Rio Cauquenes En Desembocadura	0,59

7343001	Rio Purapel En Sauzal	0,58
7350001	Rio Longavi En La Quiriquina	0
7350003	Rio Longavi En El Castillo	0,0019
7354001	Rio Achibueno En Los Pegnascos	0
7354002	Rio Achibueno En La Recova	16,36
7355002	Rio Ancoa En El Morro	11,28
7357002	Rio Loncomilla En Bodega	25,79
7358001	Rio Putagan En Yervas Buenas	1,23
7359001	Rio Loncomilla En Las Brisas	4,22
7372001	Rio Claro En Camarico	0,95
7379002	Rio Claro En Rauquen	26,72
7381001	Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	0,20
7383001	Rio Maule En Forel	7,45

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la DGA.

### 6.3.3 Balance volumétrico

Se calculó el balance volumétrico, restando al caudal histórico y a las proyecciones, la suma de los derechos de agua consuntivos de cada cuenca. De esta forma, en el Tabla 12 se presentan las 28 estaciones significativas y el resultado del balance volumétrico para el caudal actual, de las cuales 9 estaciones fueron descartadas al no contar con derechos de agua consuntivos para calcular el balance.

De las 19 estaciones a las que fue posible calcular el balance, solo la cuenca perteneciente a la estación “Rio Cauquenes En El Arrayan” posee balance negativo, lo que se debe al gran volumen de agua concedido con la categoría de “derechos de agua eventuales”, los cuales no deberían ejercerse al poseer una magnitud mayor al caudal propio que presenta la cuenca. Al no considerar estos derechos de agua eventuales, la cuenca “Rio Cauquenes En El Arrayan” obtendría un balance positivo del caudal.

**Tabla 12:** Balance volumétrico actual.

<b>Código Estación</b>	<b>Nombre Estación</b>	<b>Balance Actual (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>
7300001	Rio Maule En Desagüe Laguna Del Maule	-
7303000	Rio Maule En Los Baños	-
7306001	Rio Cipreses En Desagüe Laguna La Invernada	-
7308001	Estero Las Garzas	-
7308002	Rio Maule Bajo Boca Toma Maule Central Pehuenche	19,65
7317003	Rio Melado En Zona De Presa	-
7317005	Rio Melado En El Salto	90,95
7320003	Rio Claro En San Carlos	-
7322001	Rio Maule En Longitudinal	176,72
7330001	Rio Perquilauquen En San Manuel	24,77
7332001	Rio Perquilauquen En Gniquen	28,50
7335001	Rio Perquilauquen En Quella	55,94
7335002	Estero Curipeumo En Lo Hernández	-
7336001	Rio Cauquenes En El Arrayan	-2,92
7339001	Rio Cauquenes En Desembocadura	15,57
7343001	Rio Purapel En Sauzal	3,74
7350001	Rio Longavi En La Quiriquina	-
7350003	Rio Longavi En El Castillo	35,86
7354001	Rio Achibueno En Los Pagnascos	-
7354002	Rio Achibueno En La Recova	27,68
7355002	Rio Ancoa En El Morro	10,46
7357002	Rio Loncomilla En Bodega	115,22
7358001	Rio Putagan En Yervas Buenas	21,60
7359001	Rio Loncomilla En Las Brisas	256,11
7372001	Rio Claro En Camarico	17,29
7379002	Rio Claro En Rauquen	60,12

7381001	Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	4,39
7383001	Rio Maule En Forel	502,81

Fuente: Elaboración propia.

En el Tabla 13 se presenta el balance volumétrico proyectado, donde es posible apreciar que las cuencas atribuidas a las estaciones “Rio Cauquenes En El Arrayan” y “Rio Purapel En Sauzal” presentan un balance negativo considerando el caudal proyectado para el año 2070. En ambos casos, dichas estaciones poseen un balance negativo debido al volumen de agua concedido en forma de derechos de agua eventuales, los cuales no será posible abastecer al año 2070, al contrario de los derechos de agua permanentes, los cuales podrán ser abastecidos en toda la cuenca para todos los periodos de estudio, considerando los 665 derechos de agua utilizados para realizar el balance.

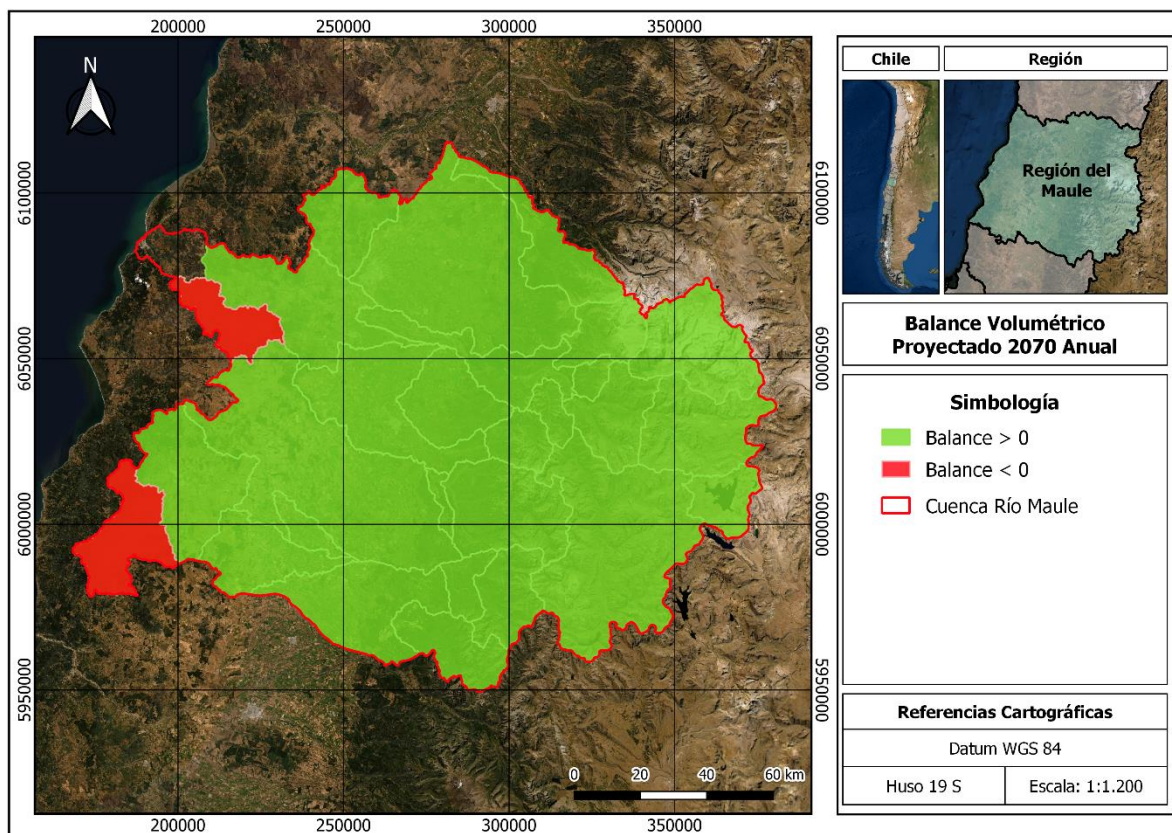
**Tabla 13:** Balance volumétrico proyectado.

Código Estación	Nombre Estación	Balance 2030 (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Balance 2050 (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Balance 2070 (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
7300001	Rio Maule En Desagüe Laguna Del Maule	-	-	-
7303000	Rio Maule En Los Baños	-	-	-
7306001	Rio Cipreses En Desagüe Laguna La Invernada	-	-	-
7308001	Estero Las Garzas Rio Maule Bajo Boca	-	-	-
7308002	Toma Maule Central Pehuenche	14,60	5,43	-
7317003	Rio Melado En Zona De Presa	-	-	-
7317005	Rio Melado En El Salto	77,80	53,89	29,97
7320003	Rio Claro En San Carlos	-	-	-
7322001	Rio Maule En Longitudinal	146,49	91,53	36,57

7330001	Rio Perquillauquen En San Manuel	21,47	15,49	9,50
7332001	Rio Perquillauquen En Gniquen	25,65	20,47	15,28
7335001	Rio Perquillauquen En Quella	50,26	39,92	29,57
7335002	Estero Curipeumo En Lo Hernández	-	-	-
7336001	Rio Cauquenes En El Arrayan	-4,19	-6,48	-8,77
7339001	Rio Cauquenes En Desembocadura	11,75	4,82	-
7343001	Rio Purapel En Sauzal	2,93	1,46	-0,015
7350001	Rio Longavi En La Quiriquina	-	-	-
7350003	Rio Longavi En El Castillo	32,55	26,53	20,52
7354001	Rio Achibueno En Los Pagnascos	-	-	-
7354002	Rio Achibueno En La Recova	22,63	13,46	4,29
7355002	Rio Ancoa En El Morro	9,48	7,70	5,91
7357002	Rio Loncomilla En Bodega	97,00	63,88	30,76
7358001	Rio Putagan En Yerbas Buenas	20,91	19,66	18,40
7359001	Rio Loncomilla En Las Brisas	217,57	147,50	77,44
7372001	Rio Claro En Camarico	15,88	13,31	10,73
7379002	Rio Claro En Rauquen	52,42	38,43	24,43
7381001	Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	4,06	3,45	2,85
7383001	Rio Maule En Forel	448,45	349,62	250,78

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10 se observa el balance volumétrico para las 28 cuencas significativas en el año 2070, registrándose en verde las cuencas con balance positivo, las cuales podrán seguir abasteciendo de agua, mientras que en rojo se presentan aquellas estaciones con balance negativo por el efecto de los derechos de agua, principalmente eventuales.



**Figura 10:** Balance volumétrico anual para el año 2070.

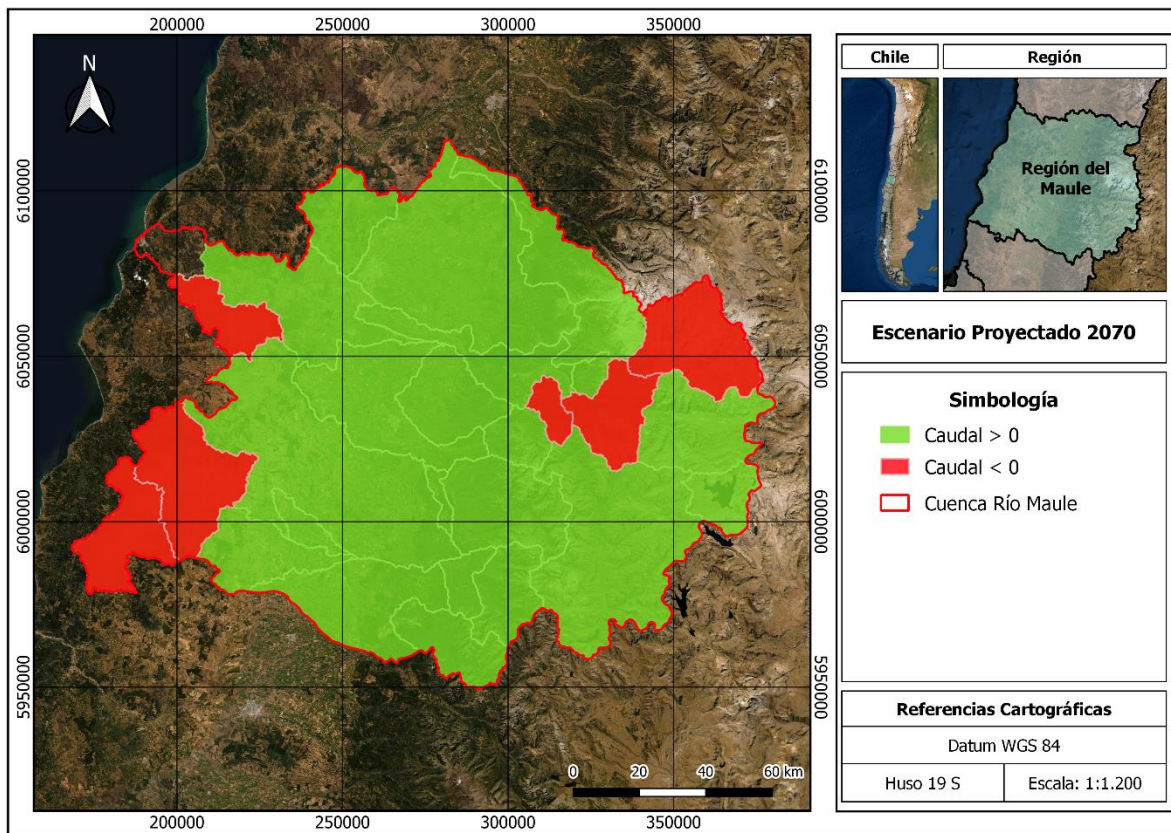
Fuente: Elaboración propia.

#### 6.3.4 Escenario proyectado

En la figura 11 se presenta el escenario proyectado final para el año 2070, considerando las proyecciones de caudal y el balance para el año 2070, donde se observa un escenario favorable para la mayor parte de la cuenca, con 22 cuencas donde el caudal a pesar de su disminución podrá seguir abasteciendo los derechos



de agua otorgados, mientras que 6 cuencas, color rojo, no podrán suplir la demanda de agua existente.



**Figura 11:** Escenario proyectado anual para el año 2070.

Fuente: Elaboración propia.

## 7. CONCLUSIONES

De las 90 estaciones fluviométricas presentes en la cuenca, solo 34 estaciones resultaron ser consistentes, lo que indica que casi dos tercios de ellas fueron instaladas; pero no cumplieron su objetivo de medición de caudal a largo plazo, incluso habiendo estaciones que no llegaban al año de medición, mediante lo cual se identifica la existencia de un problema en el sistema de monitoreo que requiere solución.

De las 28 estaciones de monitoreo significativas, las 28 presentan tendencias negativas a nivel anual y a pesar que a nivel mensual algunas estaciones posean tendencia positiva, esto no llega a ser suficiente a largo plazo, existiendo una marcada disminución de caudal, afectando todo el territorio de la cuenca.

Al proyectar las tendencias negativas a los años 2030, 2050 y 2070, hasta el año 2050 existe una disminución sostenida del caudal siendo aún posible contar con el recurso hídrico en toda la extensión de la cuenca; pero para el año 2070, 4 estaciones cuentan con una disminución crítica del caudal, donde no será posible contar con el recurso hídrico superficial, esto al contar con un porcentaje de reducción muy alto.

En cuanto al balance volumétrico, se obtuvieron 2 estaciones con un balance negativo, debido a la forzante que ejercen principalmente los derechos de agua eventuales concedidos para ambas cuencas.

El escenario final para el año 2070 expone a 6 cuencas como las más afectadas, donde debido a la disminución del caudal ya sea por acción climática o forzante de los derechos de agua, no contarán con un caudal superficial.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvez, A., Aitken, D.; Rivera, D.; Vergara, M.; McIntyre, N.; Concha, F. (2020). At the crossroads: can desalination be a suitable public policy solution to address water scarcity in Chile's mining zones?. *Journal of Environmental Management*, 258, 110039.

Arriagada, P., Dieppois, B., Sidibe, M., & Link, O. (2019). Impacts of Climate Change and Climate Variability on Hydropower Potential in Data-Scarce Regions Subjected to Multi-Decadal Variability. *Energies*, 12(14), 2747.

Arriagada, P., Karelovic, B., Link, O. (2021). Automatic gap-filling of daily streamflow time series in data-scarce regions using a machine learning algorithm. *Journal of Hydrology*, 598, 126454.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2015). Informe a la Nación. La Megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Chile.

Dirección General de Aguas. (2005). Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales de la Cuenca del Río Maule. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas. (2015). Atlas del Agua - Chile 2016. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas. (2016). Cuenca Maule. Chile.

Dirección General de Aguas. (2017). Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. Santiago, Chile.

Escenario Hídrico 2030 Chile. (2018). Radiografía del Agua - Brecha y Riesgo Hídrico en Chile. Chile.

Escenario Hídrico 2030 Chile. (2020). Cuenca Del Río Maule. Recuperado de: <https://escenarioshidricos.cl/nuestro-trabajo/cuenca-del-rio-maule/#>

Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1-37.

Hearne, R., Donoso, G. (2014). Water Markets in Chile: Are They Meeting Needs? In: *Water Markets For the 21st Century*. Springer, 103–126.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2019). Informe Desarrollo Social 2019. Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022. Santiago, Chile.

Miró Pérez, J., Estrela Navarro, M. J., Pastor Guzman, F., & Millán, M. (2009). Análisis comparativo de tendencias en la precipitación, por distintos inputs, entre los dominios hidrológicos del Segura y del Júcar (1958-2008). *Investigaciones Geográficas*, 49(49), 129–157.

Oyarzún, J. (2014). Cambio Climático Global, Ascenso del Nivel de los Mares y otras Consecuencias: Una Revisión y Síntesis del Conocimiento Actual. *Ciencia y Sociedad*.

Poleo, D. (2016). ¿Cambio climático o variabilidad climática? Historia, ciencia y política en el clima mesoamericano. *Tropical Journal of Environmental Sciences.*, 50(1), 24-39.

Quintana, J. (2004). Estudio De Los Factores Que Explican La Variabilidad De La Precipitación En Chile En Las Escalas De Tiempo Interdecadal Y Secular. Chile. Universidad de Chile.

Riquelme, K. A., Arriagada, P. J., Stehr, A. (2018). Evaluación del efecto del cambio climático en los caudales futuros de la cuenca del río Duqueco. Chile. Universidad de Concepción.

Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. J. Am. Stat. Assoc. 63, 1379-1389.

Subsecretaria de Servicios Sociales. (2017). Atlas De Acción Social. Áreas Prioritarias Para 75 Comunas en Chile. Chile. Ministerio de Desarrollo Social.

Universidad de Chile. (2006). Estudio de la Variabilidad Climática en Chile Para el Siglo XXI. Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente.

Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., 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.

