



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CAMBIOS HIDROCLIMÁTICOS Y PROCESOS DE RECARGA EN LOS
ACUÍFEROS FRACTURADOS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA
(MACROZONA CENTRAL SUR); CUENCA DE PUANGUE (33.1°S),
NILAHUE (34.5°S) Y PURAPEL (35.5°S)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

FERNANDA DE LOS ANGELES ANDRADE ACEVEDO

PROFESOR GUÍA:
BENOÎT VIGUIER

PROFESORA CO-GUÍA:
LINDA DANIELE

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
MATÍAS TAUCARE TORO

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE GEÓLOGO
POR: FERNANDA DE LOS ANGELES ANDRADE ACEVEDO
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: BENOÎT VIGUIER

**CAMBIOS HIDROCLIMÁTICOS Y PROCESOS DE RECARGA EN LOS
ACUÍFEROS FRACTURADOS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA
(MACROZONA CENTRAL SUR); CUENCA DE PUANGUE (33.1°S),
NILAHUE (34.5°S) Y PURAPEL (35.5°S)**

Este estudio se realizó sobre 3 cuencas situadas en la Cordillera de la Costa de la macrozona centro-sur de Chile; Puangue, Nilahue y Purapel. Las cuencas se distribuyen en las regiones de Valparaíso, del Libertador Bernardo O'Higgins y Maule, zona caracterizada por poseer un clima mediterráneo con influencia oceánica y suelos graníticos.

A cada cuenca se le realizó un balance hídrico a escala diaria para el periodo comprendido entre 1979-2019, con el objetivo de estimar la recarga potencial de los acuíferos y cuantificar el potencial de los recursos hídricos subterráneos. El modelo utilizado correspondió a una modificación del balance de Thornthwaite. Para realizar el balance hidrológico se obtuvieron los datos de precipitaciones, caudales y evapotranspiración potencial de la página del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², la cual cuenta con la información integrada por cuenca.

Los resultados mostraron que la recarga ocurre preferentemente en temporada invernal, en respuesta a la distribución de las precipitaciones. Algunos de los factores que influyen en el proceso de recarga, es la magnitud de las precipitaciones, la forma en que estas se distribuyen en el tiempo y el estado de saturación del suelo en el momento en que ocurre la precipitación. Durante el periodo de megasequía (2010-2019), la cuenca Puangue presentó una disminución en la precipitación de un 31 %, en Nilahue la disminución fue de un 27 % y en Purapel de un 22 %. Esto implicó que la recarga disminuyera en un 61 %, 42 % y 41 % respectivamente. Por lo que la variación de la recarga fue considerablemente mayor que la variabilidad de la precipitación que la generó.

Adicionalmente, se obtuvieron las tasas de recarga. En la cuenca Puangue la recarga tuvo un valor del orden del 18 % de la precipitación media anual para el periodo histórico (1979-2009), y de un 10 % durante la megasequía (2010-2019). En Nilahue, el periodo histórico presentó una tasa de recarga correspondiente a un 25 % de la precipitación anual y un 20 % para el periodo de megasequía. Para Purapel la tasa de recarga en el periodo histórico fue de un 29 % de la precipitación anual y 22 % para el periodo de megasequía.

Por último, se realizaron estimaciones sobre los valores futuros que tendría la recarga en función de las proyecciones que plantea el IPCC sobre el cambio climático. Se contempla que el déficit de precipitaciones en un futuro cercano podría ser del orden del 30 %, muy similar a la situación que se ha experimentado desde el 2010, por lo que los déficit en la recarga serían similares a los obtenidos para el periodo de megasequía, siendo esta una ventana al futuro.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi profesor guía Benoît Viguier, su apoyo desde el primer momento fue fundamental para la realización de este trabajo. Gracias por todo el tiempo, la dedicación, por lograr que nunca me sintiera perdida, y por los consejos.

Agradezco a mis padres Pamela y Victor, quienes me han dado las alas para volar tan lejos como quisiera. Su apoyo incondicional me ha permitido estar donde estoy y convertirme en quien soy. Gracias por el dulce cobijo que me dan, por permitirme volar de regreso al nido y que se sienta tan seguro y con tanto amor.

A mi hermana Loreto y mi hermano Juan Pablo, ellos siempre van un paso adelante, son mi ejemplo a seguir. Gracias por haber participado activamente en mi crianza, por los infinitos consejos, las tardes musicales, junto con mis padres son la red de apoyo más genial que se puede tener. Obviamente agradezco a mi sobrina María Paz y mi sobrino Mateo, por permitirme sentir lo que es el amor a primera vista, verlos crecer es de lo más bello de la vida.

A los amigos que me dió plan común, Jorge y Juan Pedro, por los bailes y los almuerzos conversados. A los amigos de Geo Juanma, Pili, Paula, Kim, abuelo, queno, Ale, Carlos, Javi, Rodri. Sin ustedes esta labor era imposible, gracias por darle vida a los días universitarios, por tantos terrenos y viajes. Definitivamente seguir a sus lados recorriendo el mundo será asombroso.

A mis amigas de la vida, Jesu, toli, Maca, Javi y Chriss. Son tremendas mujeres de quienes me siento muy orgullosa. Gracias por las conversaciones infinitas y tan enriquecedoras que tenemos, gracias por el vinito y las tardes de cerro.

Por último agradecer al monito. Te amo tanto que, no puedo despertarme sin amar, gracias por eso y por todo el cariño, contención y risas que me das día a día hace muuuchos años.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Formulación del estudio propuesto	1
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivo específicos	5
1.2.3. Hipótesis de trabajo	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Importancia del agua subterránea	6
2.2. Definición recarga difusa	7
2.3. Método Balance Hídrico	8
2.4. Separación del caudal base	9
2.5. Filtro digital Eckhardt 2005	11
3. Antecedentes Generales	13
3.1. Ubicación y vías de accesos	13
3.1.1. Cuenca Puangue	13
3.1.2. Cuenca Nilahue	14
3.1.3. Cuenca Purapel	15
3.2. Descripción zona de estudio	15
3.2.1. Cuenca Puangue	16
3.2.2. Cuenca Nilahue	18
3.2.3. Cuenca Purapel	20
4. Geomorfología	22
4.1. Relieve	23
5. Clima	28
5.1. Temperatura	29
5.2. Precipitaciones	31
5.3. Índice estandarizado de precipitaciones (SPI)	35
5.4. Influencia del ENOS en las anomalía de precipitaciones	41
6. Marco Geológico e Hidrogeológico	44
6.1. Geología Cuenca Puangue	45
6.1.1. Rocas Estratificadas	45
6.1.1.1. Jh. Formación Horqueta (Batoniano-Titoniano) (Piracés, 1976)	45

6.1.1.2.	Klp. Formación Lo Prado (Berriasiano - Hauteriviano) (Thomas, 1958; Piracés, 1976)	46
6.1.1.3.	Kvn. Formación Veta Negra (Barremiano? – Aptiano?) (Thomas, 1958)	46
6.1.2.	Rocas intrusivas	46
6.1.2.1.	Kdga	46
6.1.2.2.	Kmd	47
6.1.2.3.	Kp	47
6.1.3.	Unidades no consolidadas	47
6.1.3.1.	Qc. Depósitos coluviales (Holoceno)	47
6.1.3.2.	Qa. Depósitos aluviales (Holoceno)	47
6.1.3.3.	Qf. Depósitos fluviales (Holoceno)	47
6.2.	Geología Cuenca Nilahue	48
6.2.1.	Rocas Estratificadas	48
6.2.1.1.	Tr1m. Secuencias sedimentarias marinas y transicionales (Triásico Superior)	48
6.2.1.2.	Ji1m. Secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma (Jurásico Inferior-Medio)	49
6.2.1.3.	J3i. Secuencias volcánicas continentales y marinas (Jurásico)	49
6.2.1.4.	Ki2m. Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas (Cretácico Inferior, Neocomiano)	49
6.2.1.5.	Ki2c. Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas (Cretácico Inferior-Cretácico Superior).	49
6.2.1.6.	Kia2. Secuencias sedimentarias y volcánicas (Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo)	49
6.2.2.	Rocas Intrusivas	49
6.2.2.1.	CPg. Batolito de la Costa (Carbonífero-Pérmico) (González-Bonorino, 1970; Hervé, 1976)	49
6.2.2.2.	Jig. Jurásico Inferior (202-178 Ma)	50
6.2.2.3.	Kiag. Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (123-85 Ma)	50
6.2.3.	Unidades no consolidadas	50
6.2.3.1.	PPl1c Depósitos aluviales, lacustres y eólicos (Plioceno-Pleistoceno)	50
6.2.3.2.	Q1. (Pleistoceno-Holoceno)	50
6.3.	Geología Cuenca Purapel	51
6.3.1.	Rocas Intrusivas	51
6.3.1.1.	CPg Batolito de la Costa (Carbonífero-Pérmico) (González-Bonorino, 1970; Hervé, 1976)	51
6.3.2.	Rocas metamórficas	51
6.3.2.1.	Pz4a Silúrico?- Carbonífero	51
6.3.2.2.	Pz4b Silúrico? - Carbonífero.	52
6.3.3.	Unidades no consolidadas	52
6.3.3.1.	Q1 Pleistoceno-Holoceno	52
6.4.	Hidrogeología	52
6.4.1.	Acuífero	52
6.4.1.1.	Cuenca Puangue	52

6.4.1.2.	Cuenca Nilahue	53
6.4.1.3.	Cuenca Purapel	54
6.4.2.	Red Hidrométrica	55
7.	Metodología	59
7.1.	Selección periodos de estudios	59
7.2.	Relleno de series de caudales	60
7.3.	Curvas de duración de caudales	61
7.3.1.	Estimación del índice $BFI_{máx}$	62
7.4.	Análisis de curvas de recesión	63
7.4.1.	Selección de curvas de recesión	63
7.4.2.	Curva de recesión maestra	65
7.4.2.1.	Metodología 1	65
7.4.2.2.	Metodología 2	67
7.4.2.3.	Metodología 3	67
7.5.	Estimación constante de recesión α	67
7.6.	Aplicación Filtro Eckhardt.	68
7.7.	Cuantificación de la recarga	69
7.7.1.	1) Obtención de la infiltración	70
7.7.2.	2) Contenido de humedad	71
7.7.3.	3) Obtención Evapotranspiración real (ETR)	71
7.7.4.	4) Estimación de la recarga	71
8.	Resultados	72
8.1.	Curvas de duración de Caudales	72
8.1.1.	Obtención $BFI_{máx}$	74
8.2.	Curvas maestras de recesión y obtención constante de recesión α	75
8.2.1.	Métodología 1	75
8.2.2.	Métodología 2	77
8.2.3.	Métodología 3	79
8.3.	Separación del caudal base	81
8.4.	Valor umbral	85
8.5.	Resultados finales de la separación del flujo base	87
8.6.	Tendencia de Niveles estáticos en pozos	91
8.7.	Componentes del Balance Hídrico	100
8.7.1.	Precipitación	100
8.7.2.	Evapotranspiración Potencial (ETP)	100
8.7.3.	Escorrentía directa (Qd)	101
8.8.	Recarga	108
9.	Discusión	119
9.1.	Proyecciones de la recarga bajo efectos del cambio climático	126
10.	Conclusión	129
11.	Recomendaciones	130
	Bibliografía	131

Índice de Tablas

3.1.	Clasificación del Índice de Aridez (UNEP, 1997).	17
3.2.	Áreas y porcentajes calculados para los usos de suelo de la Cuenca Puangue. (Elaborado a partir de los datos del Ministerio de bienes nacionales actualizado al 2013).	18
3.3.	Áreas y porcentajes calculados para los usos de suelo de la Cuenca Nilahue. (Elaborado a partir de los datos del Ministerio de bienes nacionales actualizado al 2013).	20
3.4.	Áreas y porcentajes calculados para los usos de suelo de la Cuenca Purapel. (Elaborado a partir de los datos del Ministerio de bienes nacionales actualizado al 2016).	21
5.1.	Temperaturas medias mensuales, máxima, mínima y promedio (1979-2019). 36table.caption.48	29
5.3.	Recopilación de los valores de SPI durante el período (1979 – 2019) de las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel. Los colores corresponden a la clasificación que aparece en la tabla 5.2. (Elaboración propia).	40
6.1.	Caudales medios mensuales de las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel. Elaborado a partir de los datos del CR ²	56
7.1.	Selección periodos de estudio para las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel.	60
8.1.	Valor del índice $BFI_{máx}$ y $BFI_{máx}$ corregido.	74
8.2.	Recopilación de los parámetros obtenidos con la aplicación de la metodología 1.	77
8.3.	Recopilación de los parámetros obtenidos con la metodología 2	79
8.4.	Recopilación de los parámetros obtenidos con la aplicación la metodología 3	81
8.5.	Recopilación de los valores de α y R^2 , obtenidos aplicando las 3 metodologías.	81
8.6.	Valor umbral junto con la probabilidad de excedencia respectiva, para cada cuenca.	85
8.7.	Ecuaciones para estimar la recarga de Puangue, Nilahue y Purapel, junto con su respectivo coeficiente de determinación (R^2). R corresponde a la recarga y Pp a la precipitación	109
8.8.	Valores anuales de los componentes del balance hídrico, Pp = precipitación, ETR = evapotranspiración real, Qd = escorrentía directa y R=recarga. También se incorpora los valores de ETP = evapotranspiración potencial y Qb = caudal base. Cuenca Puangue.	113
8.9.	Valores anuales de los componentes del balance hídrico, Pp = precipitación, ETR = evapotranspiración real, Qd = escorrentía directa y R=recarga. También se incorpora los valores de ETP = evapotranspiración potencial y Qb = caudal base. Cuenca Nilahue.	114

8.10.	Valores anuales de los componentes del balance hídrico, P_p = precipitación, ETR = evapotranspiración real, Q_d = escorrentía directa y R =recarga. También se incorpora los valores de ETP = evapotranspiración potencial y Q_b = caudal base. Cuenca Purapel.	115
9.1.	Promedio de precipitaciones y recarga para el periodo histórico de 1979-2009 y periodo de la megasequía 2010-2019. Cuenca Puangue.	120
9.2.	Promedio de precipitaciones y recarga para el periodo histórico de 1979-2009 y periodo de la megasequía 2010-2019. Cuenca Nilahue.	121
9.3.	Promedio de precipitaciones y recarga para el periodo histórico de 1979-2009 y periodo de la megasequía 2010-2019. Cuenca Purapel.	122
9.4.	Disminución de la recarga en función de déficit de precipitación, Cuenca Puangue , Nilahue y Purapel. Sin R = Sin recarga. Elaboración propia.	128
11.1.	Selección periodos de estudio Puangue	136
11.2.	Selección periodo de estudio Cuenca Nilahue	137
11.3.	Selección periodo de estudio Cuenca Purapel	138
11.4.	Estaciones de niveles estáticos situadas en la Cordillera de la Costa de la Región de Valparaíso.	148
11.5.	Estaciones de niveles estáticos situadas en la Cordillera de la Costa de la Región Metropolitana.	155
11.6.	Estaciones de niveles estáticos situadas en la Cordillera de la Costa de la Región del Libertador Bernardo O´Higgins.	161
11.7.	Estaciones de niveles estáticos situadas en la Cordillera de la Costa de la Región del Maule.	161
11.8.	Promedios Mensuales de precipitación por década, Cuenca Puangue.	162
11.9.	Promedios Mensuales de precipitación por década, Cuenca Nilahue.	163
11.10.	Promedios Mensuales de precipitación por década, Cuenca Purapel.	164
11.11.	Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Puangue para los meses de enero a junio.	166
11.12.	Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Puangue para los meses de julio a diciembre	167
11.13.	Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Nilahue para los meses de enero a junio.	168
11.14.	Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Nilahue para los meses de julio a diciembre	169
11.15.	Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Purapel para los meses de enero a junio.	170
11.16.	Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Purapel para los meses de julio a diciembre.	171
11.17.	Probabilidad de excedencia de las cuencas de Puangue, Nilahue y Purapel, para el Periodo 1979 - 2019.	172
11.18.	Periodo de retorno de las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel para los años 1979 - 2019.	173

Índice de Ilustraciones

1.1.	Caudal acumulado de Derechos de agua subterránea, Región de Valparaíso. Elaboración propia a partir de los datos disponibles de la dga	1
1.2.	Caudal acumulado de Derechos de agua subterránea, Región Metropolitana. Elaboración propia a partir de los datos disponibles de la dga	2
1.3.	Caudal acumulado de Derechos de agua subterránea, Región del Libertador Bernardo O´Higgins. Elaboración propia a partir de los datos disponibles de la dga	2
1.4.	Caudal acumulado de Derechos de agua subterránea, Región del Maule. Elaboración propia a partir de los datos disponibles de la dga	2
1.5.	Nivel estático del agua subterránea para 4 pozos situados en la Cordillera de la Costa, distribuidos entre las Regiones de Valparaíso y O´Higgins.	4
2.1.	Representación Ciclo Hidrológico. (Elaboración propia)	9
2.2.	Componentes de un hidrograma. La línea roja corresponde al caudal total (Streamflow), el área negra al flujo base (Baseflow) y la escorrentía directa (direct runoff) se representa por el área entre las curvas de caudal total y flujo base. (Elaboración propia).	11
3.1.	Mapa de ubicación y accesos de la Cuenca Puangue en contexto regional. (elaboración propia).	13
3.2.	Mapa de ubicación y accesos de la Cuenca Nilahue en contexto regional. (elaboración propia).	14
3.3.	Mapa de ubicación y accesos de la Cuenca Purapel en contexto regional. (elaboración propia).	15
3.4.	Mapa de uso de suelos, Cuenca Puangue. Elaboración propia con datos obtenidos del Ministerio de bienes nacionales; Infraestructura de datos geoespaciales. Datos actualizados el 2013.	17
3.5.	Mapa de uso de suelos, Cuenca Nilahue. Elaboración propia con datos obtenidos del Ministerio de bienes nacionales; Infraestructura de datos geoespaciales. Datos actualizados el 2013.	19
3.6.	Mapa de uso de suelos, Cuenca Purapel. Elaboración propia con datos obtenidos del Ministerio de bienes nacionales; Infraestructura de datos geoespaciales. Datos actualizados el 2013.	21
4.1.	Dominios morfoestructurales de la zona central de Chile. Modificado de SERNAGEOMIN (2003).	22
4.2.	Unidades geomorfológicas de las cuencas en estudio. (Elaboración propia, datos se obtenido del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, actualizados al 2015).	23
4.3.	Mapa de elevación de la Cuenca Puangue con curvas de nivel.DEM ALOS PAL-SAR de resolución 12,5 m con fecha 18 de junio del 2015.	24
4.4.	Mapa de pendiente, Cuenca Puangue.	25

4.5.	Mapa de elevación de la Cuenca Nilahue con curvas de nivel. DEM ALOS PAL-SAR de resolución 12,5 m con fecha 23 de agosto del 2010.	25
4.6.	Mapa de pendiente, Cuenca Nilahue	26
4.7.	Mapa de elevación de la Cuenca Purapel con curvas de nivel. DEM ALOS PAL-SAR de resolución 12,5 m con fecha 11 de mayo del 2010.	26
4.8.	Mapa de pendiente, Cuenca Purapel.	27
5.1.	Zonas climáticas en Chile. Elaboración propia con datos del Centro de desarrollo urbano sustentable, (CEDEUS, 2015).	29
5.2.	Temperaturas medias mensuales para el periodo 1979 – 2019. Cuenca Puangue, Nilahue y Purapel. (Elaboración propia).	30
5.3.	Temperatura media mensual de la Cuenca Puangue para el periodo 1979-2009 y 2010-2019. a) meses de verano y b) meses de invierno. Elaboración propia.	30
5.4.	Temperatura media mensual de la Cuenca Nilahue para el periodo 1979-2009 y 2010-2019. a) meses de verano y b) meses de invierno. Elaboración propia.	31
5.5.	Temperatura media mensual de la Cuenca Purapel para el periodo 1979-2009 y 2010-2019. a) meses de verano y b) meses de invierno. Elaboración propia.	31
5.6.	Precipitaciones anuales y anomalía de la Cuenca Puangue durante el periodo 1979 – 2019. Elaboración propia.	32
5.7.	Precipitaciones anuales y anomalía de la Cuenca Nilahue durante el periodo 1979 – 2019. Elaboración propia.	33
5.8.	Precipitaciones anuales y anomalía de la Cuenca Purapel durante el periodo 1979 – 2019. Elaboración propia.	33
5.9.	Climograma Cuenca Puangue. Precipitaciones medias mensuales, temperatura media, máxima y mínima mensuales. Elaboración propia con datos del CR ²	34
5.10.	Climograma Cuenca Nilahue. Precipitaciones medias mensuales, temperatura media, máxima y mínima mensuales. Elaboración propia con datos del CR ²	34
5.11.	Climograma Cuenca Purapel. Precipitaciones medias mensuales, temperatura media, máxima y mínima mensuales. Elaboración propia con datos del CR ²	35
5.12.	Ejemplo de transformación de una distribución gamma ajustada a una distribución normal estandarizada. Fuente: Edwards (1997).	36
5.13.	Distribución gamma de precipitaciones para la Cuenca Puangue, transformada en una distribución normal estandarizada. Valores de SPI. Elaboración propia.	37
5.14.	Transcurso del SPI anual para el periodo (1979-2019) en la Cuenca Puangue. Elaboración propia.	37
5.15.	Distribución gamma de precipitaciones para la Cuenca Nilahue, transformada en una distribución normal estandarizada. Valores de SPI. Elaboración propia.	38
5.16.	Transcurso del SPI anual para el periodo (1979-2019) en la Cuenca Nilahue. Elaboración propia.	38
5.17.	Distribución gamma de precipitaciones para la Cuenca Purapel, transformada en una distribución normal estandarizada. Valores de SPI. Elaboración propia.	39
5.18.	Transcurso del SPI anual para el periodo (1979-2019) en la Cuenca Purapel. Elaboración propia.	39
5.19.	Gráfico de dispersión entre el promedio invernal (MJJAS) del índice de Niño Oceánico 3.4 (ONI) y el índice estandarizado de precipitaciones (SPI). Datos 1979 – 2019, Cuenca Puangue. Elaboración propia, inspirado en Garreaud et al. (2020).	42

5.20.	Gráfico de dispersión entre el promedio invernal (MJJAS) del índice de Niño Oceánico 3.4 (ONI) y el índice estandarizado de precipitaciones (SPI). Datos 1979 – 2019, Cuenca Nilahue. Elaboración propia, inspirado en Garreaud et al. (2020).	42
5.21.	Gráfico de dispersión entre el promedio invernal (MJJAS) del índice de Niño Oceánico 3.4 (ONI) y el índice estandarizado de precipitaciones (SPI). Datos 1979 – 2019, Cuenca Purapel. Elaboración propia, inspirado en Garreaud et al. (2020).	43
6.1.	Mapa geológico correspondiente a la cuenca Puangue. Elaboración propia, construido a partir de las cartas geológicas escala 1:100.000 del área de Valparaíso-Curacaví (Gana, Wall, y Gutiérrez, 1996) y área Til Til – Santiago (Wall, Sellés, y Gana, 1999).	45
6.2.	Mapa geológico correspondiente a la Cuenca Nilahue. Elaboración propia a partir del Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 del Sernageomin.	48
6.3.	Mapa geológico correspondiente a la Cuenca Purapel. Elaboración propia a partir del Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 del Sernageomin.	51
6.4.	Delimitación del acuífero de la Cuenca Puangue. Elaboración propia, realizada a partir de la información recopilada de los informes de la DGA, año 2002 y 2006.	53
6.5.	Delimitación del acuífero de la Cuenca Nilahue. Elaboración propia, realizada a partir de la información recopilada de los informes de la DGA, año 2011 y 2013.	54
6.6.	Delimitación del acuífero de la Cuenca Purapel. Modificado del informe “Modelación Hidrogeológica de la Cuenca Río Cauquenes, Región del Maule”, realizado por la DGA el año 2013.	55
6.7.	Caudales medios mensuales de las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel.	56
6.8.	Caudales anuales de la cuenca Puangue.	57
6.9.	Caudales anuales de la cuenca Nilahue.	57
6.10.	Caudales anuales de la cuenca Purapel.	58
7.1.	Relleno serie de caudales	61
7.2.	Selección curvas de recesión	64
7.3.	Trigonometría utilizada para el procedimiento de superposición de curvas de recesión. Extraída de Posavec et al. (2017).	66
7.4.	Diagrama flujo de agua. P corresponde a la precipitación, ETP a la evapotranspiración potencial, ETR a la evapotranspiración real, Θ a la humedad del suelo, $\Theta_{\text{máx}}$ a la humedad máxima del suelo, Q_t al caudal total, Q_d a la escorrentía directa (superficial, rápida), Q_b al caudal base (subterráneo, lento), R recarga del acuífero.	70
8.1.	Curvas de duración de caudales en escala logarítmica. Cuenca de Puangue, Nilahue y Purapel.	72
8.2.	Curvas de duración de caudales (Puangue, Nilahue y Purapel).	73
8.3.	Curvas típicas de duración de caudales. Imagen obtenida de Medina (1987).	74
8.4.	Construcción CMR para la Cuenca Puangue con la metodología 1	75
8.5.	Construcción CMR para la Cuenca Nilahue con la metodología 1	76
8.6.	Construcción CMR para la Cuenca Purapel con la metodología 1	76
8.7.	Construcción CMR para la Cuenca Puangue con la metodología 2	77
8.8.	Construcción CMR para la Cuenca Nilahue con la metodología 2	78
8.9.	Construcción CMR para la Cuenca Purapel con la metodología 2	78
8.10.	Construcción CMR para la Cuenca Puangue con la metodología 3	79

8.11.	Construcción CMR para la Cuenca Nilahue con la metodología 3	80
8.12.	Construcción CMR para la Cuenca Purapel con la metodología 3	80
8.13.	Separación de flujo base diario de un año típico en la Cuenca Puangue (1983). $\alpha = 0.27$, en negro el caudal base que utiliza el $BFI_{m\acute{a}x}$ establecido por Al-Faraj y Scholz (2014) y Gordon et al. (2004) (ec. 7.2). En gris el caudal base que utiliza la corrección del $BFI_{m\acute{a}x}$ sugerida por Collishonn y Fan, 2013 (ec. 7.3).	82
8.14.	Separación de flujo base diario de un año típico en la Cuenca Puangue (1983). $\alpha = 0.35$, en negro el caudal base que utiliza el $BFI_{m\acute{a}x}$ establecido por Al-Faraj y Scholz (2014) y Gordon et al. (2004) (ec. 7.2). En gris el caudal base que utiliza la corrección del $BFI_{m\acute{a}x}$ sugerida por Collishonn y Fan, 2013 (ec. 7.3).	83
8.15.	Separación de flujo base diario de un año típico en la Cuenca Puangue (1983). $\alpha = 0.75$, en negro el caudal base que utiliza el $BFI_{m\acute{a}x}$ establecido por Al-Faraj y Scholz (2014) y Gordon et al. (2004) (ec. 7.2). En gris el caudal base que utiliza la corrección del $BFI_{m\acute{a}x}$ sugerida por Collishonn y Fan, 2013 (ec. 7.3).	84
8.16.	Obtención del valor umbral para la cuenca Puangue.	86
8.17.	Obtención del valor umbral para la cuenca Nilahue.	86
8.18.	Obtención del valor umbral para la cuenca Purapel.	87
8.19.	Componentes de caudal para la cuenca Puangue durante 1979-2019. La curva negra representa el caudal total, el área azul el caudal base, y la escorrentía directa está representada por el área entre las curvas de caudal total y caudal base.	88
8.20.	Componentes de caudal para la cuenca Nilahue durante 1979-2019. La curva negra representa el caudal total, el área azul el caudal base, y la escorrentía directa está representada por el área entre las curvas de caudal total y caudal base.	89
8.21.	Componentes de caudal para la cuenca Purapel durante 1979-2019. La curva negra representa el caudal total, el área azul el caudal base, y la escorrentía directa está representada por el área entre las curvas de caudal total y caudal base.	90
8.22.	Ubicación de pozos de medición de niveles estáticos monitoreados por la DGA. Región de Valparaíso. En amarillo los pozos utilizados en este trabajo. Elaboración propia.	92
8.23.	Niveles estáticos en pozo Asentamiento el cajon. Región de Valparaíso	92
8.24.	Niveles estáticos en pozo Asentamiento Paihuen. Región de Valparaíso.	93
8.25.	Niveles estáticos en pozo Fundo La Playa. Región de Valparaíso.	93
8.26.	Niveles estáticos en pozo Asentamiento V.Aconcagua. Región de Valparaíso.	93
8.27.	Ubicación de pozos de medición de niveles estáticos monitoreados por la DGA. En amarillo los pozos seleccionados para el monitoreo. Región de Metropolitana	94
8.28.	Niveles estáticos en pozo Asentamiento Popeta las Mariposas. Región Metropolitana.	94
8.29.	Niveles estáticos en pozo Fundo Baracaldo. Región Metropolitana.	95
8.30.	Niveles estáticos en pozo Fundo San Alfonso. Región Metropolitana.	95
8.31.	Niveles estáticos en pozo Fundo San Patricio. Región Metropolitana.	95
8.32.	Ubicación de pozos de medición de niveles estáticos monitoreados por la DGA. En amarillo los pozos seleccionados para el monitoreo. Región del Libertador Bernardo O'Higgins	96
8.33.	Niveles estáticos en pozo A.P CHEPICA. Región del Libertador Bernardo O'Higgins.	96

8.34.	Niveles estáticos en pozo A.P Las Cabras. Región del Libertador Bernardo O'Higgins	97
8.35.	Niveles estáticos en pozo Casa Silva (1). Región del Libertador Bernardo O'Higgins	97
8.36.	Niveles estáticos en pozo Criadero de Aves. Región del Libertador Bernardo O'Higgins	97
8.37.	Ubicación de pozos de medición de niveles estáticos monitoreados por la DGA. En amarillo los pozos seleccionados para el monitoreo. Región del Maule . . .	98
8.38.	Niveles estáticos en pozo Estadio de Huaquén	98
8.39.	Potencial de evapotranspiración anual para las cuencas de Puangue Nilahue y Purapel. Elaboración propia.	100
8.40.	Promedio mensual de evapotranspiración potencial para las cuencas de Puangue Nilahue y Purapel. Elaboración propia.	101
8.41.	Promedio mensual de Escorrentía directa (Qd), Flujo base (Qb) y Precipitación (Pp) de la cuenca Puangue, para los años a los que se aplicó el filtro de Eckhardt. (Elaboración propia)	102
8.42.	Promedio mensual de Escorrentía directa (Qd), Flujo base (Qb) y Precipitación (Pp) de la cuenca Nilahue, para los años a los que se aplicó el filtro de Eckhardt. (Elaboración propia)	102
8.43.	Promedio mensual de Escorrentía directa (Qd), Flujo base (Qb) y Precipitación (Pp) de la cuenca Purapel, para los años a los que se aplicó el filtro de Eckhardt. (Elaboración propia)	103
8.44.	Porcentaje mensual que representa Qd y Qb respecto al valor del caudal total, cuenca Puangue. (Elaboración propia).	103
8.45.	Porcentaje mensual que representa Qd y Qb respecto al valor del caudal total, cuenca Nilahue. (Elaboración propia).	104
8.46.	Porcentaje mensual que representa Qd y Qb respecto al valor del caudal total, cuenca Purapel. (Elaboración propia).	104
8.47.	Valores anuales de la Precipitación y escorrentía de la cuenca Puangue. (Elaboración propia).	105
8.48.	Relación entre la Precipitación y la escorrentía anual de la cuenca Puangue. (Elaboración propia).	106
8.49.	Valores anuales de la Precipitación y escorrentía de la cuenca Nilahue. (Elaboración propia).	106
8.50.	Relación entre la Precipitación y la escorrentía anual de la cuenca Nilahue. (Elaboración propia).	107
8.51.	Valores anuales de la Precipitación y escorrentía de la cuenca Purapel. (Elaboración propia).	107
8.52.	Relación entre la Precipitación y la escorrentía anual de la cuenca Purapel. (Elaboración propia).	108
8.53.	Curva que relaciona las precipitaciones con la recargas calculada, cuenca Puangue.	108
8.54.	Curva que relaciona las precipitaciones con la recargas calculada, cuenca Nilahue.	109
8.55.	Curva que relaciona las precipitaciones con la recargas calculada, cuenca Purapel.	109
8.56.	Valores anuales de Precipitación y Recarga de la cuenca Puangue. Elaboración propia.	110

8.57.	Valores anuales de Precipitación y Recarga de la cuenca Nilahue. Elaboración propia.	110
8.58.	Valores anuales de Precipitación y Recarga de la cuenca Purapel. Elaboración propia.	111
8.59.	Anomalía de Precipitación y Recarga, Cuenca Puangue. Elaboración propia. . .	111
8.60.	Anomalía de Precipitación y Recarga, Cuenca Nilahue. Elaboración propia. . .	111
8.61.	Anomalía de Precipitación y Recarga, Cuenca Purapel. Elaboración propia. . .	112
8.62.	Promedio mensual de la Recargas en Puangue, Nilahue y Purapel. Elaboración propia.	112
8.63.	Componentes del balance hídrico. Cuenca Puangue, periodo 1979-2019. Elaboración propia.	116
8.64.	Componentes del balance hídrico. Cuenca Nilahue, periodo 1979-2019. Elaboración propia.	117
8.65.	Componentes del balance hídrico. Cuenca Purapel, periodo 1979-2019. Elaboración propia.	118
9.1.	Precipitación versus Recarga anual de la cuenca Puangue, para el periodo 1979-2019.	120
9.2.	Diagrama de cajas y bigotes de los parámetros de recarga y precipitación, para el periodo histórico (1979 - 2009) y el evento de megasequía (2010 - 2019) de la cuenca Puangue.	120
9.3.	Precipitación versus Recarga anual de la cuenca Nilahue, para el periodo 1979-2019.	121
9.4.	Diagrama de cajas y bigotes de los parámetros de recarga y precipitación, para el periodo histórico (1979 - 2009) y el evento de megasequía (2010 - 2019) de la cuenca Nilahue	121
9.5.	Precipitación anual versus Recarga anual de la cuenca Purapel, para el periodo 1979-2019.	122
9.6.	Diagrama de cajas y bigotes de los parámetros de recarga y precipitación, para el periodo histórico (1979 - 2009) y el evento de megasequía (2010 - 2019) de la cuenca Purapel	122
9.7.	Valores mensuales de las variables que integran el balance hídrico. Cuenca Puangue, año 2004. Elaboración propia.	124
9.8.	Valores mensuales de las variables que integran el balance hídrico. Cuenca Puangue, año 2015. Elaboración propia.	125
9.9.	Valores mensuales de las variables que integran el balance hídrico. Cuenca Puangue, año 1997. Elaboración propia.	125
9.10.	Cambios simulados de la precipitación en función de cambios de temperatura. Obtenido de Zhongming et al. (2021).	126
9.11.	Trayectorias de emisiones de distintos escenarios de cambio climático y su comparación en relación a las emisiones observadas históricas.	127
9.12.	Cambios simulados de la precipitación. Configurado para un aumento de 3°C, bajo el escenario RCP8.5 y considerando el periodo 1981-2010 como la línea base. Elaboración propia a partir del Atlas interactivo del GTI del IPCC. . . .	127
11.1.	Pozo Fundo San Antonio.	139
11.2.	Pozo Fundo Santa Rosa.	139
11.3.	Pozo Fundo A.P. LLAY LLAY (1).	140
11.4.	Pozo Fundo A.P.Valle Hermoso (1).	140

11.5.	Pozo Agua Potable Hierro Viejo.	140
11.6.	Pozo Agua Potable La Canela.	141
11.7.	Pozo Agua Potable Polcura.	141
11.8.	Pozo San Carlos Pelumpen.	141
11.9.	Pozo Rabuco (1).	142
11.10.	Pozo Mina del agua.	142
11.11.	Pozo Hijuela Principal.	142
11.12.	Pozo Asentamiento Nogales.	143
11.13.	Pozo A.P. El Trapiche.	143
11.14.	Pozo A.P. Olmue.	143
11.15.	Pozo Conchali.	144
11.16.	Pozo Tabolango (1).	144
11.17.	Pozo Fundo El Rocio.	144
11.18.	Pozo Agroindustria Casablanca.	145
11.19.	Pozo Agua Potable Pedegua.	145
11.20.	Pozo Agua Potable Pullancon.	145
11.21.	Pozo Agua Potable Valle Los Olmos.	146
11.22.	Pozo A.P. Las Dichas.	146
11.23.	Pozo Fundo El Tapihue.	146
11.24.	Pozo Fundo Esmeralda (3).	147
11.25.	Pozo Parcela 12 La Cruz.	147
11.26.	Pozo Asentamiento San Lorenzo.	147
11.27.	Pozo A.P. Bollenal.	149
11.28.	pozo As. San Carlos Cholqui (1)	149
11.29.	Pozo AS. San Miguel Popeta (1)	150
11.30.	Pozo AS. San Miguel Popeta (2)	150
11.31.	Pozo Asentamiento San Carlos Cholqui (2)	150
11.32.	Pozo Asentamiento San Ignacio Serrano	151
11.33.	Pozo Asentamiento Santa Emilia	151
11.34.	Pozo Asentamiento Tantehue	151
11.35.	Pozo Fundo El Parron	152
11.36.	Pozo Fundo Lolenco	152
11.37.	Pozo Fundo Santa Rita	152
11.38.	Pozo Industria Bata	153
11.39.	Pozo Parcela 7 Chiñihue	153
11.40.	Pozo Parcela 62 Noviciado	153
11.41.	Pozo Rincon de los Molinos	154
11.42.	Pozo San Fco. Aculeo	154
11.43.	Pozo A.P. Nancagua.	156
11.44.	Pozo Asentamiento Las Garzas.	156
11.45.	Pozo Asentamiento San Corazon.	157
11.46.	Pozo Culenco.	157
11.47.	Pozo Estadio Peumo	157
11.48.	Pozo Fundo Las Juntas	158
11.49.	Pozo Fundo Santa Lucia	158
11.50.	Pozo Hacienda Lolol A.P.R	158
11.51.	Pozo La Estrella A.P.R	159

11.52. Pozo Litueche	159
11.53. Pozo Matadero Marchigue	159
11.54. Pozo Pueblo Chico A.P.R	160
11.55. Pozo Pueblo Toquihua	160
11.56. Pozo San Vicente AP 2	160
11.57. Promedios mensuales de Precipitación por década Puangue. Elaboración propia	162
11.58. Promedios mensuales de Precipitación por década Nilahue	163
11.59. Promedios mensuales de Precipitación por década Purapel.	164
11.60. Promedios anuales de Precipitación por década Puangue	165
11.61. Promedios anuales de Precipitación por década Nilahue	165
11.62. Promedios anuales de Precipitación por década Purapel	165
11.63. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1983 y 1985	174
11.64. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1986 y 1989	174
11.65. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1990 y 1991	175
11.66. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1992 y 1993	175
11.67. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1994 y 1995	175
11.68. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1996 y 1999	176
11.69. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 1986 y 2003	176
11.70. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 2005 y 2010	176
11.71. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 2016.	177
11.72. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 1986 y 1987.	178
11.73. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 1988 y 1990.	178
11.74. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 1993 y 1996.	179
11.75. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2001 y 2002.	179
11.76. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2003 y 2006.	179
11.77. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2007 y 2008.	180
11.78. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2009 y 2011.	180
11.79. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2012 y 2017.	180
11.80. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2018.	181

11.81. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1979 y 1980.	182
11.82. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1981 y 1982.	182
11.83. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1983 y 1984.	183
11.84. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1985 y 1986.	183
11.85. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1988 y 1989.	183
11.86. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1990 y 1992.	184
11.87. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1993 y 1994.	184
11.88. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1995 y 1996.	184
11.89. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1997 y 1999.	185
11.90. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 2000 y 2001.	185
11.91. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 2004 y 2007.	185
11.92. Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 2009 y 2010.	186

Capítulo 1

Introducción

1.1. Formulación del estudio propuesto

El agua subterránea representa cerca del 97 % del agua dulce en estado líquido de la Tierra, y cuya demanda está en constante aumento en respuesta al crecimiento de la población mundial, junto con una agricultura más intensiva y un uso industrial cada vez mayor.

En Chile, el aumento del consumo de agua subterránea se ha intensificado durante la última década, esto se puede apreciar a partir de las figuras 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4, que muestran el caudal acumulado de los derechos de agua subterránea que fueron otorgados durante el periodo 1979-2019 en las comunas situadas en la Cordillera de la Costa de las Regiones de Valparaíso, Metropolitana, del Libertador Bernardo O'Higgins y el Maule. Es posible apreciar que a través de los años han aumentado los derechos otorgados, extrayendo un caudal cada vez mayor. Los datos indican que en la última década del periodo estudiado, el aumento del caudal otorgado fue de un 52 % en Valparaíso, de un 68 % para la región Metropolitana, de un 64 % para la región de O'Higgins y de 317 % para la región del Maule.

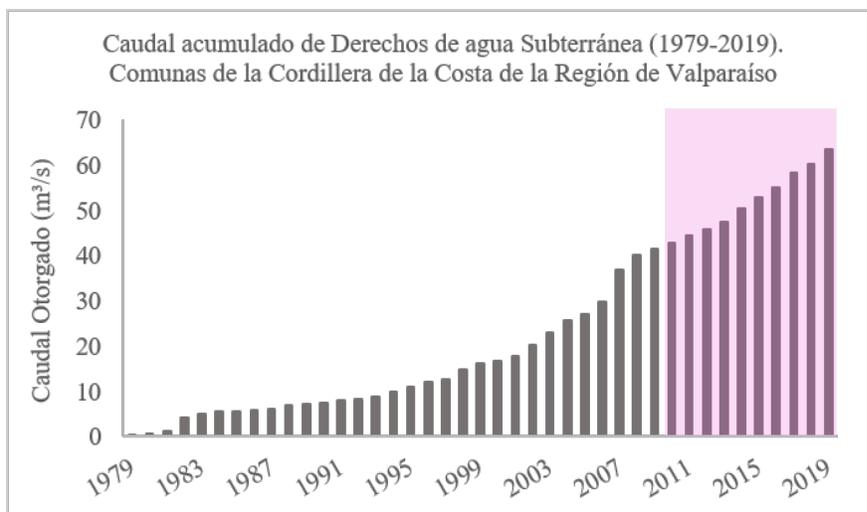


Figura 1.1: Caudal acumulado de Derechos de agua subterránea, Región de Valparaíso. Elaboración propia a partir de los datos disponibles de la dga .

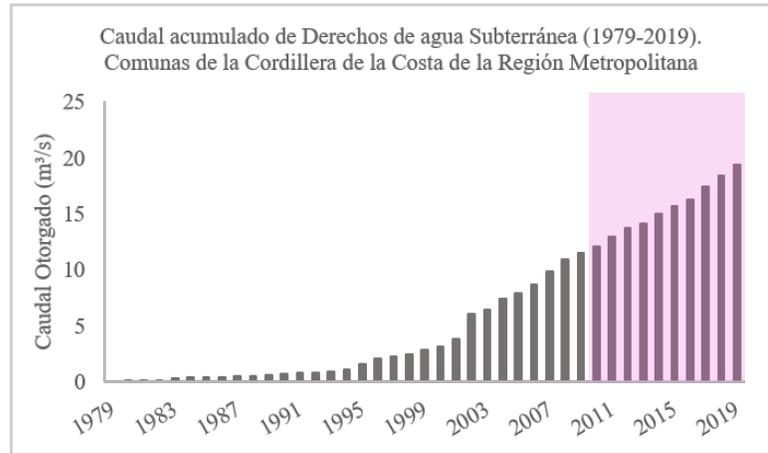


Figura 1.2: Caudal acumulado de Derechos de agua subterránea, Región Metropolitana. Elaboración propia a partir de los datos disponibles de la dga .

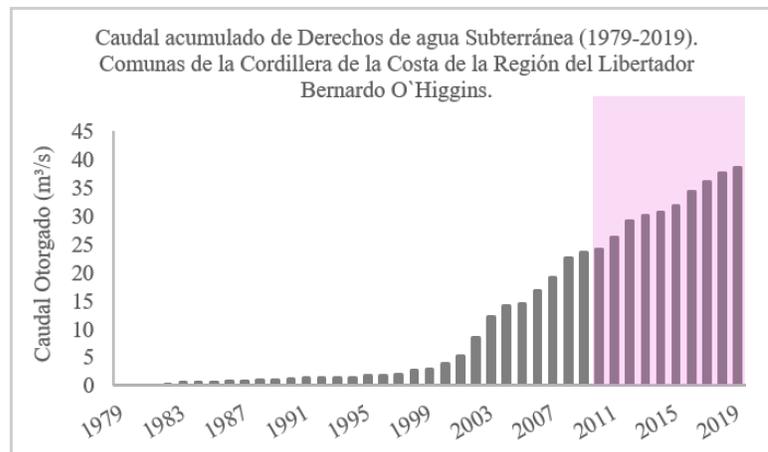


Figura 1.3: Caudal acumulado de Derechos de agua subterránea, Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Elaboración propia a partir de los datos disponibles de la dga .

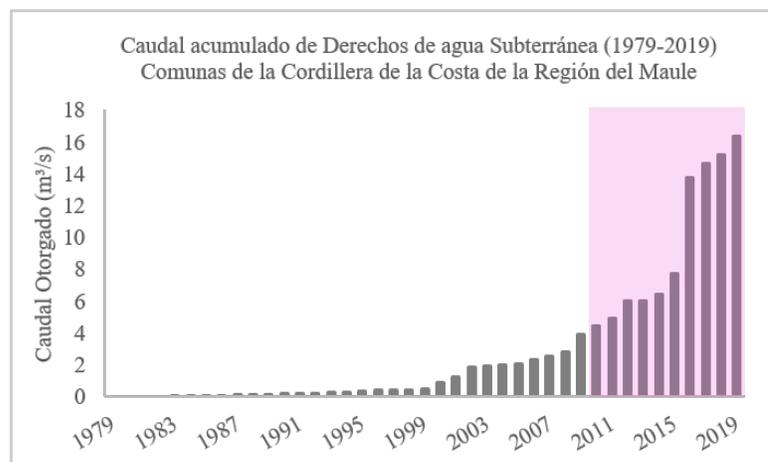


Figura 1.4: Caudal acumulado de Derechos de agua subterránea, Región del Maule. Elaboración propia a partir de los datos disponibles de la dga .

Adicionalmente, desde el año 2010 hasta la actualidad la zona centro-sur de Chile, específicamente el territorio comprendido entre la región de Coquimbo y La Araucanía, ha experimentado una secuencia ininterrumpida de años secos que se ha extendido espacial y temporalmente de forma extraordinaria, la cual no cuenta con precedentes en el registro histórico. A este evento se le ha denominado “megasequía”, la cual se ha caracterizado por una disminución de las precipitaciones que varía entre un 20 % y 40 %, donde más de la mitad de este déficit pluviométrico es producto de anomalías climáticas de origen natural y que varían en el tiempo. Sin embargo, cerca de un 25 % es atribuible al cambio climático antrópico (a la Nación, 2015).

Los efectos climáticos tales como el déficit de precipitaciones, así como los efectos antrópicos a raíz del aumento del consumo del agua, han generado un impacto directo sobre los recursos hídricos, provocando una disminución del agua en ríos, lagos, embalses, y en el almacenamiento subterráneo, que incluso ha generado la escasez del suministro potable y agrícola en algunos sectores.

En este trabajo, se ha constatado la disminución del agua subterránea a partir del análisis de los niveles piezométricos de 70 pozos monitoreados por la DGA, situados en la Cordillera de la Costa entre las regiones de Valparaíso y el Maule. Estos han evidenciado una clara tendencia de un aumento en el descenso del nivel estático a partir del año 2010, siendo más clara y notoria en los pozos situados más al norte. Dicho descenso puede ser originado por la acción combinada de los efectos climáticos y antrópicos. En la figura 1.5 se presenta los niveles estáticos de agua subterránea para 4 pozos ubicados en diferentes regiones de la zona central. En azul aparecen los datos correspondientes al periodo 1979-2009 y en naranja las mediciones realizadas posterior al 2010, es decir, correspondiente al periodo de megasequía.

Se prevé que en las próximas décadas estos eventos de megasequía se vuelvan cada vez más comunes, generando una progresiva aridificación de la zona centro y sur de Chile (a la Nación, 2015), por lo que se vuelve una necesidad conocer el potencial de las aguas subterráneas para ser explotadas. Esto último conlleva a estimar la recarga de los acuíferos, la cual se puede dar de forma natural gracias al aporte que generan las precipitaciones.

Dicho esto, en este trabajo se presenta el procedimiento para evaluar los recursos hídricos y realizar el balance hidrogeológico de 3 cuencas ubicadas en la Cordillera de la Costa de la Macrozona centro-sur de Chile. Estas cuencas son Puangue, Nilahue y Purapel y se encuentran distribuidas en la Región de Valparaíso, O’Higgins y el Maule.

Por medio del Balance hídrico a nivel de suelo se calculará la recarga difusa a escala diaria, y luego se obtendrán valores mensuales y anuales para cada una de las cuencas en estudio. Para esto se utilizarán datos de precipitaciones, caudales y potencial de evapotranspiración correspondientes al periodo 1979-2019. Estos datos son provistos por el (CR)² (Centro del Clima y la Resiliencia), el cual cuenta con la información integrada por cuenca.

Adicionalmente se analizará la sensibilidad de la recarga bajo influencias hidroclimáticas como variaciones en la precipitación, obteniendo proyecciones sobre los efectos que provocaría el cambio climático en el proceso de recarga. Esta información es de gran utilidad para realizar un manejo sustentable del recurso hídrico.

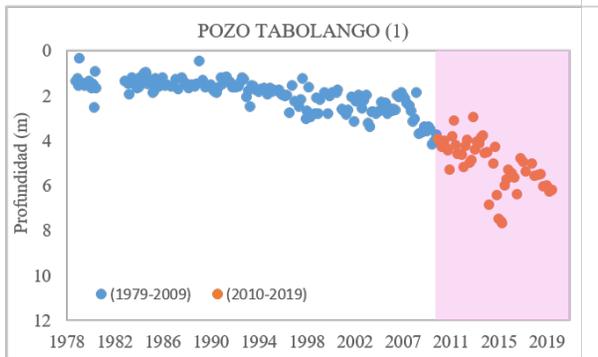


Fig. 6. Niveles estáticos en pozo Tabolango (1). Elaboración propia a partir de los datos de la DGA.

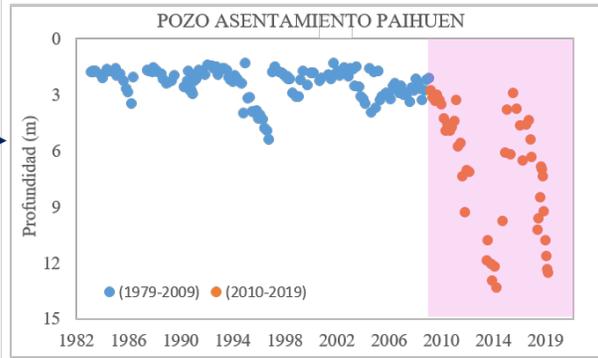


Fig 7. Niveles estáticos en pozo Asentamiento Paihuen.. Elaboración propia a partir de los datos de la DGA.

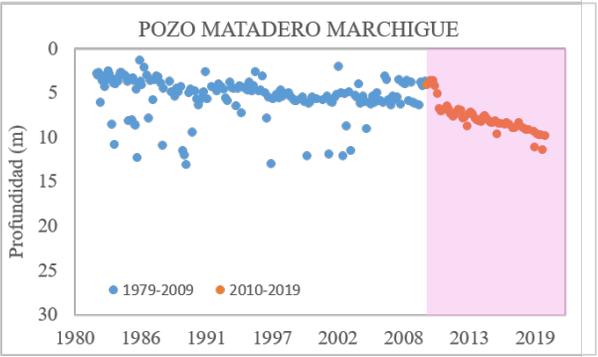


Fig 8. Niveles estáticos en pozo Matadero Marchigue.. Elaboración propia a partir de los datos de la DGA.

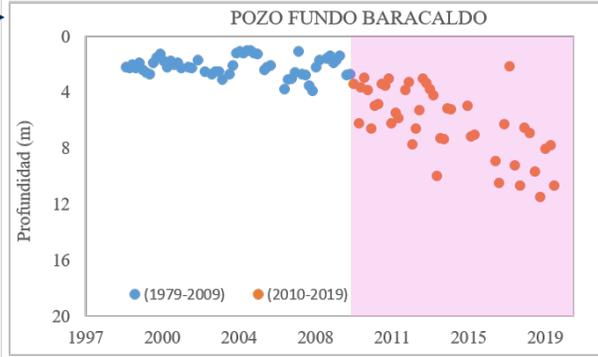
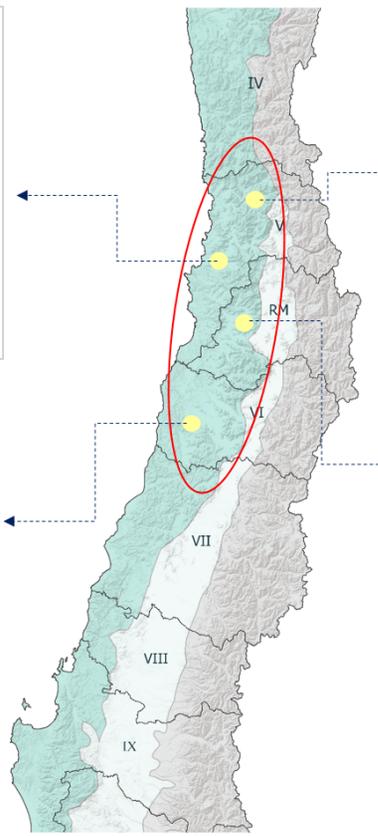


Fig 9. Niveles estáticos en pozo Fundo Barcaldo.. Elaboración propia a partir de los datos de la DGA.

Figura 1.5: Nivel estático del agua subterránea para 4 pozos situados en la Cordillera de la Costa, distribuidos entre las Regiones de Valparaíso y O'Higgins.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es evaluar la dinámica de la recarga difusa en 3 cuencas situadas en la Cordillera de la Costa de la Macrozona centro-sur: Puangue (33.1°S), Nilahue (34.5°S) y Purapel (35.5°S), y estimar el impacto de las presiones hidroclimáticas como megasequías y eventos futuros.

Esta información podría ser de gran ayuda para la gestión del recurso hídrico en la zona costera del centro-sur del país, la cual se ha visto afectada por eventos de sequía durante los últimos años. A su vez, permitirá visualizar el efecto que tendría sobre el suministro de agua, los diferentes escenarios futuros de eventos de megasequía.

1.2.2. Objetivo específicos

- Recopilar y analizar de los datos con los que se trabajará. Esto incluye la selección de periodos de estudio junto al relleno de datos en series de caudales cuando no exista registro de estos.
- Separar el caudal base mediante la aplicación del filtro propuesto por Eckhardt (2005). Calibrar dicho filtro a partir de las características propias de cada cuenca mediante el cálculo de $(BFI)_{\text{máx}}$ y α .
- Obtener la recarga de cada cuenca a partir del balance hídrico a nivel del suelo, evaluando las condiciones actuales y compararlas con el registro histórico
- Estimar la influencia de los cambios de presión hidroclimáticos sobre la recarga de acuíferos fracturados de la Cordillera de la Costa.

1.2.3. Hipótesis de trabajo

Las precipitaciones tienen una implicancia directa en los procesos de recarga de agua subterránea almacenada en acuíferos. Menores precipitaciones provocadas por eventos de megasequía tales como el que se evidencia desde el año 2010 en Chile, provocarían una disminución en la recarga de agua subterránea, que podría ser aún mayor que el déficit de la precipitación que la genera. Definir la influencia de la precipitación en la recarga de acuíferos permitirá tener una mejor gestión del recurso hídrico tanto para el suministro potable como agrícola, lo cual beneficiará a las comunidades que utilizan dichos recursos.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se presentan los temas principales que se trabajarán en este estudio, junto con una revisión de los conceptos hidrogeológicos básicos. Dichos conceptos son esenciales para lograr una mayor comprensión del procedimiento que se propone en esta tesis y de los resultados obtenidos.

2.1. Importancia del agua subterránea

El agua subterránea es un recurso natural renovable que representa cerca del 30 % de agua dulce en la Tierra. Del 70 % restante un 69 % corresponde al agua retenida en casquetes de hielo, nieve y glaciares y solo un 1 % se encuentra en lagos y ríos. Por lo tanto, el agua subterránea constituye cerca de un 97 % del agua accesible para nuestro consumo. El agua subterránea es un recurso vital, el cual es aprovechado por la sociedad; su uso contribuye a satisfacer sus demandas y generar un bienestar social y económico.

A lo largo de los años se ha evidenciado un fuerte crecimiento en el consumo de agua subterránea a escala mundial, esto debido principalmente a tres causas: 1) el aumento de la población, que pasó de 3.000 millones en la mitad del siglo XX a más de 7.000 millones en la actualidad (Gaitán, 2012), 2) un aumento de la agricultura y 3) el desarrollo industrial.

El agua subterránea tiene un trascendental rol en términos medioambientales, ya que mantiene el flujo y el nivel del agua superficial como ríos, lagos y humedales, especialmente durante periodos secos en los que se registran bajas y nulas precipitaciones. En regiones áridas o semiáridas el agua subterránea incluso corresponde al recurso principal disponible.

Chile no se queda al margen de esta tendencia, la demanda de agua subterránea también ha sufrido un aumento constante durante los últimos años, siendo incluso el principal recurso en muchos sectores. Por ejemplo, las regiones del norte del país hasta la región de Ñuble tiene un predominio del uso de aguas subterráneas sobre las superficiales (Mundial, 2020).

Las cuencas en estudio cumplen con las particularidades mencionadas anteriormente, convirtiéndose al agua subterránea en un recurso primordial. De acuerdo al estudio “Situación de los recursos hídricos en Chile” (Salazar, 2003), en Chile un 49 % del agua subterránea se utiliza para la agricultura, 35 % para abastecimiento poblacional y 16 % para industria.

2.2. Definición recarga difusa

La recarga constituye parte de lo que es el ciclo hidrológico. Podría definirse como el volumen de agua que infiltra los primeros metros de cobertura vegetal y suelo, para luego seguir su flujo descendente el cual percola la zona no saturada y alcanza el nivel freático, aumentando así las reservas de agua (Fitts, 2002). La procedencia de la recarga es múltiple y variada: la más común es la infiltración por precipitaciones, siendo también la más importante a nivel regional. Además de ésta, la recarga puede provenir de aguas superficiales tales como ríos o lagos, o por la transferencia entre acuíferos. Todas estas procedencias constituyen la forma natural en la que se puede generar la recarga. Adicionalmente, la recarga puede ser artificial como la generada por regadío o pozos de inyección. En este estudio se estimará la recarga difusa producida principalmente por la precipitación.

A grandes rasgos se definen dos tipos de recarga. La que se evaluará en este estudio corresponde a la recarga difusa o directa, ésta se produce de forma relativamente uniforme en áreas extensas en respuesta a la precipitación que infiltra desde la superficie. El otro tipo de recarga se denomina localizada o indirecta, la cual se genera en un área restringida por vías preferenciales como grietas o conductos verticales que permiten que el agua penetre a través de las mismas (Lerner, Issar, y Simmers, 1990).

Estimar la recarga de un acuífero es fundamental para cuantificar los recursos de agua subterránea, lo cual tiene mayor relevancia en lugares con características climáticas áridas o semiáridas, sin disminuir la importancia de la evaluación de este recurso en otros ambientes. Existen diferentes técnicas para calcular el valor de la recarga, algunos autores como (Lerner, Issar, y Simmers, 1990) han clasificado los diferentes métodos de la siguiente forma:

- Medidas directas: la estimación de la recarga se realiza a partir de medidas in situ mediante el uso de lisímetros, estos otorgan una medida puntual que posteriormente se interpola.
- Trazadores: son métodos que cuantifican la recarga a través de un balance de masa del trazador.
- Aproximaciones de Darcy: se hallan valores de cabezas hidráulicas a partir de las ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq y luego se determina la velocidad de filtración. Si se asumen condiciones estables, la recarga se determina directamente de la ecuación de Darcy.
- Empíricos: se desarrollan ecuaciones empíricas que relacionan la recarga con alguna variable como la precipitación.
- Balance hídrico: se determinan los flujos de entrada y de salida del sistema. La recarga del acuífero corresponde a la diferencia entre éstas recargas y salidas. Esta es la técnica utilizada en este estudio.

2.3. Método Balance Hídrico

El método de balance hídrico aplica el principio de conservación de masa de que "nada se crea, nada se destruye, todo se transforma". La diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua.

Este método se puede aplicar a una región o unidad de estudio cualquiera. Una cuenca es una buena unidad de estudio ya que es un sistema que drena toda el agua caída dentro de ella, de manera que toda la escorrentía que se genera se descarga en una salida única e identificable. (Stehr, 2019)

Los balances hídricos suelen realizarse de forma periódica, una escala diaria muestra resultados más precisos que una escala mensual, esto se vuelve más evidente en zonas áridas o semiáridas donde la recarga se concentra durante pocos eventos individuales y de corta duración (Touhami, 2014). En este estudio, se calculará la recarga a una escala diaria, para luego hacer análisis a escala mensual y anual.

Las ventajas del método son que por lo general existe una buena disponibilidad de datos pluviométricos, niveles de caudales, etc. Se podría decir que es de rápida aplicación y sus costos son bajos en comparación con otros métodos. Puede ser aplicado en diversos tipos de recarga y a múltiples escalas espacio-temporales. Por otro lado, presenta algunas limitaciones como la dificultad que existe para estimar ciertos componentes del balance, por ejemplo, separar del caudal total medido la escorrentía superficial u obtener un valor de la evapotranspiración real.

La ecuación más sencilla para realizar un balance hídrico es la que se presenta en la ec. 2.1. Hay que tener en consideración que esta ecuación se resuelve evaluando de forma secuencial y de forma individual cada término. Esto se explica con mayor detalle en el capítulo 7.7.

$$\Delta S = P - E_s - ETR - R \quad (2.1)$$

- ΔS = cambio en el almacenamiento
- P = precipitación
- E_s = escorrentía
- ETR = evapotranspiración real
- R = recarga

En la figura 2.1 se muestra una representación del ciclo hidrológico con las diversas etapas que experimenta el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera. Este es un modelo que representa a gran escala las etapas involucradas en la recarga de las cuencas de estudio. La topografía de la figura corresponde a la cuenca Puangué, sin embargo, la ubicación, distribución y el tipo de acuíferos son netamente esquemáticos.

La figura 2.1 presenta dos tipos de acuíferos uno detrítico y otro fracturado. Por el contexto regional, los acuíferos de las cuencas son principalmente fracturados, ya que se ubican en la

Cordillera de las Costa con una alta presencia de rocas intrusivas que han sido fracturadas debido al contexto estructural que caracteriza la zona. Los acuíferos detríticos se asocian a los cursos fluviales de las cuencas.

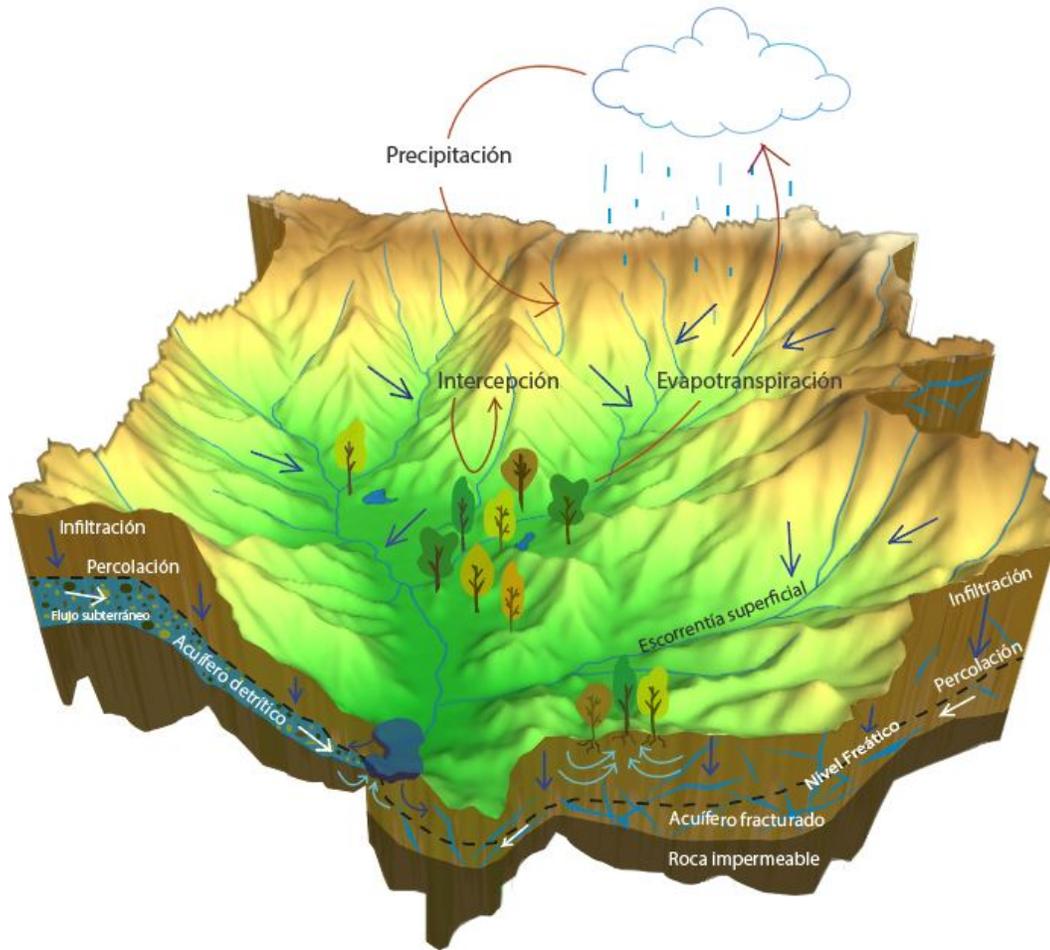


Figura 2.1: Representación Ciclo Hidrológico. (Elaboración propia)

2.4. Separación del caudal base

El caudal es la cantidad de agua que circula por el cauce de un río y cuenta con 2 componentes principales: el flujo superficial rápido y el flujo base. El primero, también llamado escorrentía directa, ocurre en respuesta a eventos de precipitación o deshielo y a menudo cae a 0 entre eventos. Por otro lado, el flujo base o caudal base corresponde a la contribución del agua subterránea la cual representa las reservas de una cuenca. Esta contribución ocurre en temporadas de bajas o nulas precipitaciones, cuando los niveles freáticos son más altos que los niveles del río y por tanto el río es ganador (Gómez. S y Gómez. V, 2016).

En base a esto, se tiene que el caudal total en cualquier momento (Q_t) se compone de la suma de la escorrentía directa (Q_d) y el caudal base (Q_b). Donde el caudal base nunca es mayor al caudal total.

$$Q_t = Q_d + Q_b \quad (2.2)$$

La separación del caudal base tiene como objetivo separar del caudal total la componente de agua subterránea, obteniendo en consecuencia la componente de escorrentía superficial. Esta separación no es trivial; se han sugerido diferentes métodos para lograrlo, según Gómez. S y Gómez. V (2016) y otros autores, estos métodos se clasifican en 3 grupos principalmente: métodos gráficos, que se caracterizan por ser expeditos y a su vez por tener un alto grado de subjetividad, ya que el caudal base se define intersectando puntos de inflexión dentro de un hidrograma lo cual queda a criterio de quién lo defina. Por otro lado, están los métodos químicos que son algo complejos y necesitan de más recursos para realizarlos debido a que utilizan trazadores hidroquímicos e isótopos estables de agua. Por último, se encuentran los métodos de algoritmos numéricos o filtrado digital con base física.

Este último método permite caracterizar el comportamiento del caudal base en una cuenca a largo plazo, y se basa en el filtrado de los datos de series de caudales. Usualmente estos datos son diarios. Se considera una técnica fácil de automatizar y que por lo general tiene resultados reproducibles (Collischonn y Fan, 2013), donde la representatividad hidrológica depende del algoritmo y de los parámetros que éste usa. Ejemplos de estos métodos son los “filtros recursivos” de Nathan y McMahon (1990) y Eckhardt (2005).

Varios filtros digitales han sido propuestos en los últimos años, uno de los aportes más significativos lo ha generado Eckhardt el 2005, quien propuso una forma general de filtro de flujo base digital, mostrando que algunos de los filtros más utilizados son casos especiales de esta forma general (Collischonn y Fan, 2013). En este trabajo se utilizará la metodología propuesta por Eckhardt (2005).

Por lo general, cualquier método de separación de caudal base, incluido el filtro de Eckhardt, requiere del estudio de las curvas de recesión. La forma de las curvas de recesión depende principalmente de las características geológicas de la cuenca. El análisis de los periodos de recesión permite observar la relación almacenamiento-descarga de los reservorios subterráneos y modelar la disminución del caudal durante los periodos sin precipitación para extraer parámetros descriptivos del almacenamiento de agua en la cuenca (Mohammed y Scholz, 2018). Estos parámetros entregan información sobre las características físicas e hidrodinámicas del acuífero, tales como su porosidad, conductividad hidráulica y capacidad específica (Gómez. S y Gómez. V, 2016).

La figura 2.2 se presenta a modo de ejemplo para mostrar esquemáticamente las dos componentes del caudal y los diferentes periodos de recesión que se dan en un año. La figura utiliza los datos hidrológicos pertenecientes a la Cuenca Purapel del año 2010. Es posible notar que en la parte final de las curvas de recesión, donde los eventos de precipitación son bajos o nulos, el caudal base domina el caudal total, es decir, la escorrentía directa se vuelve muy pequeña e incluso nula. Esto es común en los tramos finales de las curvas de recesión. El zoom inserto en el gráfico muestra la forma típica de una curva de recesión.

La fracción del caudal base respecto al caudal total del río ha sido utilizada con diferentes fines, por ejemplo, para calcular la proporción de agua subterránea en relación a los recursos hidrológicos o para estimar el valor de la recarga. Como el caudal base presenta un com-

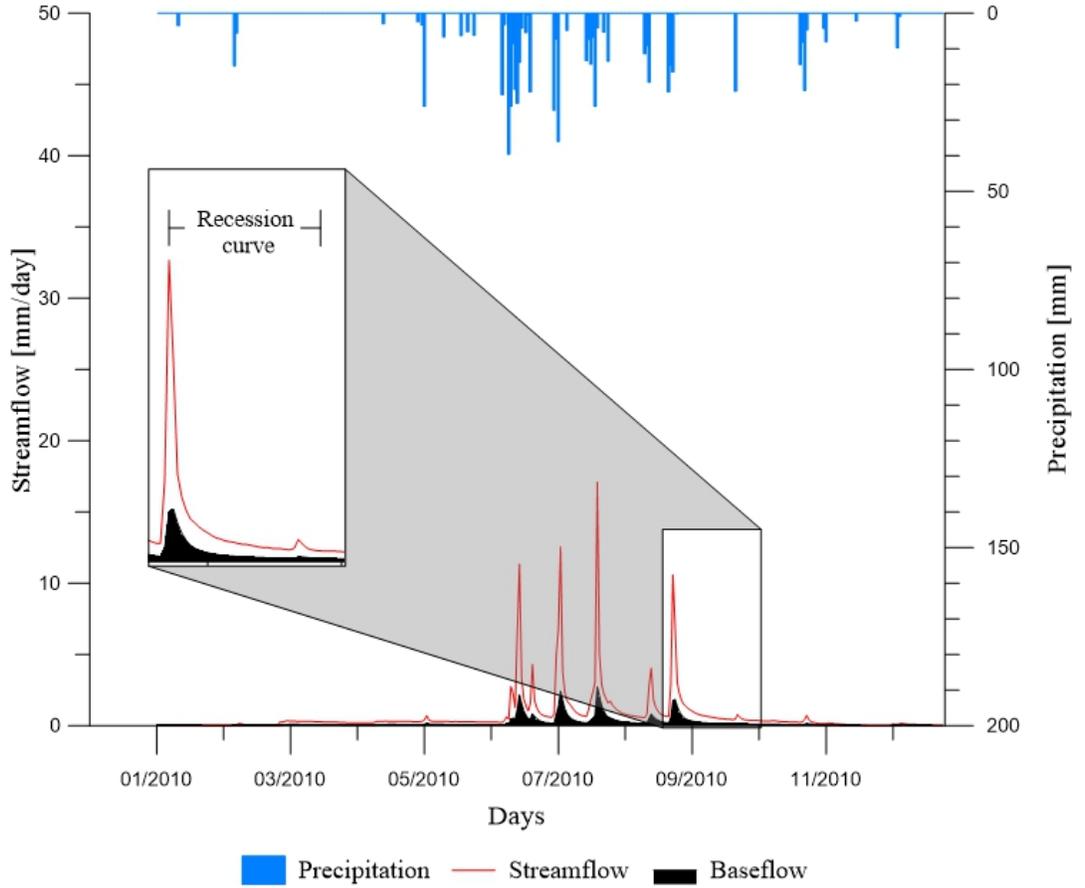


Figura 2.2: Componentes de un hidrograma. La línea roja corresponde al caudal total (Streamflow), el área negra al flujo base (Baseflow) y la escorrentía directa (direct runoff) se representa por el área entre las curvas de caudal total y flujo base. (Elaboración propia).

portamiento continuo en comparación con la dinámica del flujo superficial, (Stewart, 2015), y se relaciona directamente con el almacenamiento subterráneo, ha sido utilizado como un indicador de la sostenibilidad de la reserva hídrica en cuencas (Mohammed y Scholz, 2018). Esto último contribuye a la gestión de los recursos hídricos y a la toma de decisiones en relación a la extracción de agua de los depósitos de agua subterránea.

2.5. Filtro digital Eckhardt 2005

Eckhardt propuso un filtro recursivo para la separación del caudal base, el cual es fácilmente automatizado y genera resultados reproducibles. El principio básico del método es separar la señal de baja frecuencia correspondiente al flujo base, del registro del caudal total.

El algoritmo numérico que propone Eckhardt consta de 2 parámetros y es el siguiente:

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{m\acute{a}x})\alpha b_{t-1} + (1 - \alpha)BFI_{m\acute{a}x}Q_t}{1 - \alpha BFI_{m\acute{a}x}} \quad (2.3)$$

b_t representa el caudal base en el tiempo t , Q_t el caudal en el tiempo t , α la constante de recesión y $BFI_{m\acute{a}x}$ representa el valor máximo del índice de flujo base, el cual refleja la relación entre el flujo base y el flujo total a largo plazo (Singh, Pahlow, Booker, Shankar, y Chamorro, 2019). En todo momento $b_t \leq Q_t$.

Este filtro fue construido bajo la suposición de que el flujo de salida de un acuífero es linealmente proporcional a su almacenamiento (Eckhardt, 2005). Lo cual se expresa de la siguiente manera

$$S = \alpha Q \quad (2.4)$$

Donde S es el volumen del almacenamiento que es descargado en la corriente, Q el caudal de descarga y α la constante de recesión.

La constante de recesión es un término que se ha utilizado para describir la pendiente de la disminución del caudal después de un evento de recarga (Arnold, Allen, Muttiah, y Bernhardt, 1995). Su valor deriva de las propiedades del acuífero como la transmisividad y almacenamiento.

Esta suposición de linealidad entre el almacenamiento y el flujo de salida del acuífero, conduce a un modelo exponencial de la recesión del flujo base para aquellos periodos que no presentan recarga de agua subterránea. Lo cual se formula de la siguiente manera:

$$Q_t = Q_0 \exp^{-\alpha t} \quad (2.5)$$

Con Q_t igual al caudal en el tiempo t , Q_0 el caudal inicial de la curva de recesión y α la constante de recesión.

Una de las complicaciones que tiene este filtro es la obtención de los parámetros contenidos en el algoritmo. Si bien la literatura propone valores del $BFI_{m\acute{a}x}$, los cuales están en función de las características hidrológicas e hidrogeológicas de las cuencas, estas se deben considerar como primeras aproximaciones ya que podran ser no representativas del sistema particular que se estudia.

Sin embargo, existen algunos métodos para obtener α y $BFI_{m\acute{a}x}$ en función de las características específicas de la cuenca que se quiera estudiar. Por ejemplo, α se puede obtener directamente del análisis de recesión, y según Smakhtin (2001) el $BFI_{m\acute{a}x}$ se puede conseguir a partir de la relación de 2 valores característicos obtenidos de las curvas de duración del caudal.

Algunos estudios como Gómez. S y Gómez. V (2016), Stewart (2015) y algunos otros, han demostrado que la relación entre almacenamiento y descarga no es lineal. No obstante, la suposición de linealidad sigue utilizándose en los diferentes modelos que interpretan los sistemas hidrológicos debido a su fácil aplicación matemática (Wittenberg y Sivapalan, 1999).

Capítulo 3

Antecedentes Generales

3.1. Ubicación y vías de accesos

3.1.1. Cuenca Puangue

La Cuenca Puangue drena una superficie de 144[km²], se sitúa en la parte alta de la sub-subcuenca Estero Puangue Antes Estero Caren, definida por la DGA con código 05741, formando parte de la Cuenca Río Maipo. Se ubica en la Cordillera de la Costa de la Región de Valparaíso, en la Provincia de Marga Marga, más específicamente en el sector oriental de la comuna de Quilpué, entre los 33° 14' - 33° 4' S y 71° 10' - 70° 59' W. El borde oriental y sur de la cuenca corresponde al límite entre la Región Metropolitana y la Región de Valparaíso.

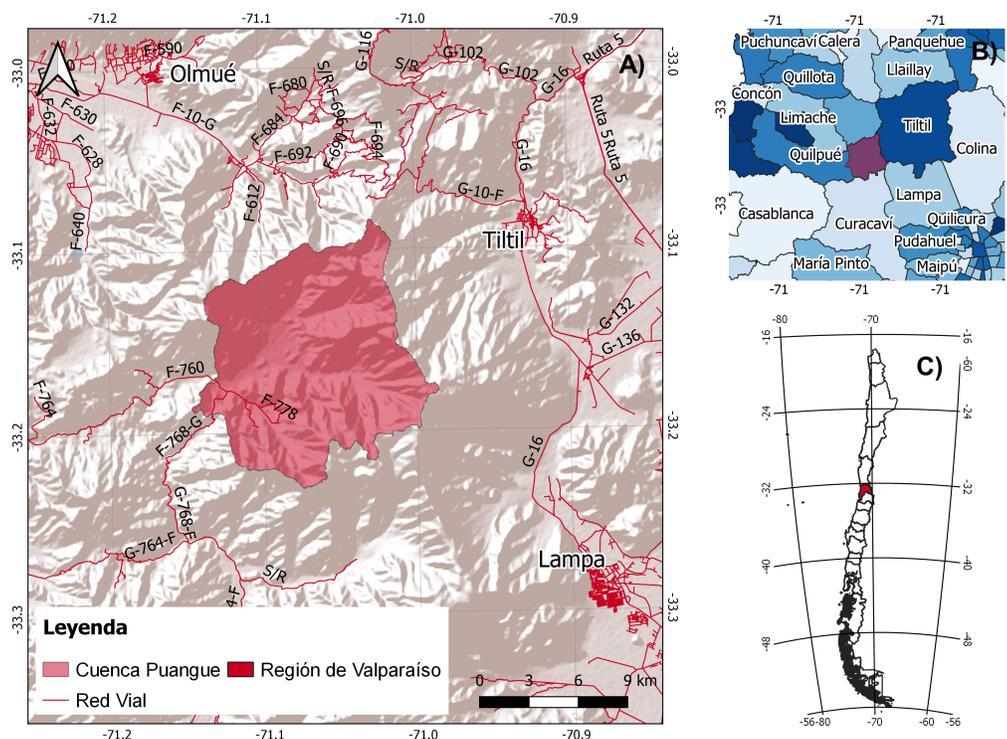


Figura 3.1: Mapa de ubicación y accesos de la Cuenca Puangue en contexto regional. (elaboración propia).

La principal vía de acceso desde la ciudad de Santiago corresponde a la ruta 68, la cual se toma en dirección a Casablanca hasta la salida hacia Curacaví. Luego se ingresa a la ruta local G-864-F en dirección a Quilpué, seguido de la ruta F-768-G la cual intersectará a la cuenca por el borde occidental, al sur de la localidad de Colliguay. También se puede llegar desde el norte a través de la ruta 60, ingresando a las rutas locales F-50 y F-760, lo cual da acceso a la cuenca por la localidad de Colliguay.

3.1.2. Cuenca Nilahue

La Cuenca Nilahue drena una superficie de 1453[km²], forma parte de la subcuenca Estero Nilahue definida por la DGA con código 0613, la cual está incluida en la cuenca que lleva por nombre Costeras Rapel-E.Nilahue. Se sitúa en la Cordillera de la Costa de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y de la Región del Maule, en las Provincias de Colchagua y Curicó, abarcando las comunas de Pumanque y Lolol principalmente, y en menor medida, las comunas de Santa Cruz, Chépica, Rauco y Hualañé. La cuenca se sitúa entre los 35° 6' – 34° 30' S y 71° 10' - 70° 59' W.

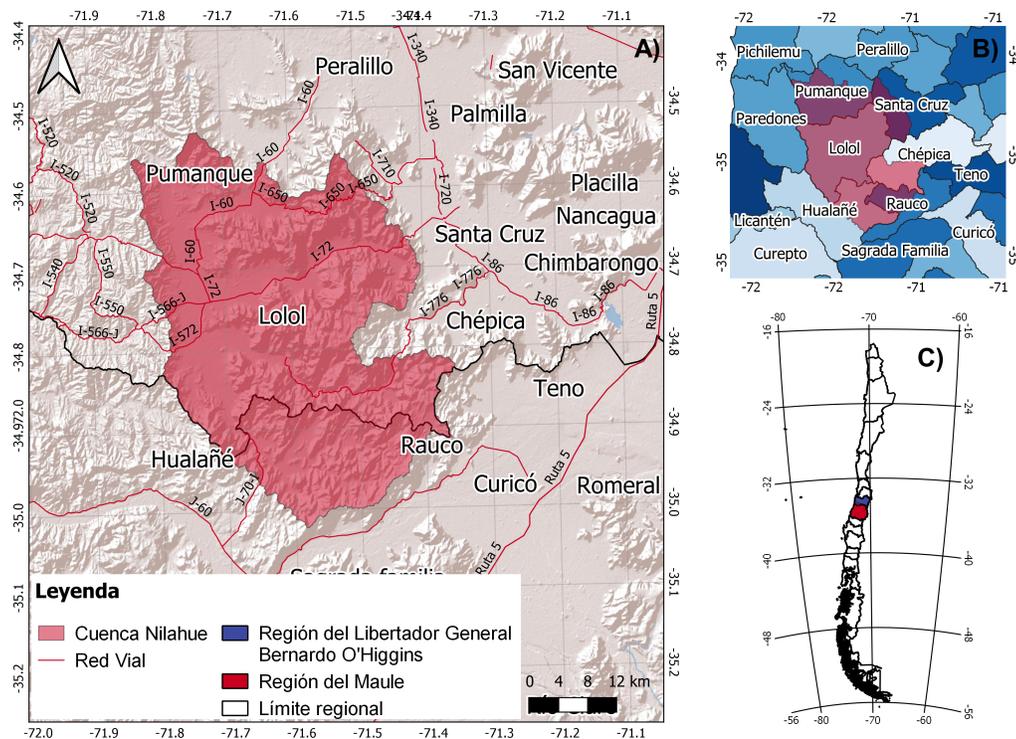


Figura 3.2: Mapa de ubicación y accesos de la Cuenca Nilahue en contexto regional. (elaboración propia).

Existen varias vías que permiten el acceso a la cuenca. Desde el norte se accede utilizando la ruta 5 sur, ingresando a las rutas locales I-72, I-60 e I-776, desde el sur por la ruta J-70-I, J-680 y J-76-I. y desde la costa por Paredones utilizando la ruta I-72.

3.1.3. Cuenca Purapel

La Cuenca Purapel drena una superficie de 262[km²], fue definida por la DGA con código 07341 y corresponde a una subsubcuenca de la Cuenca Río Maule. Se sitúa en la Cordillera de la Costa de la Región del Maule, en las Provincias De Talca y Linares, en las comunas de Constitución, San Javier y Empedrado. La cuenca se sitúa entre los 35° 42' – 35° 24' S y 72° 18' - 72° 0' W.

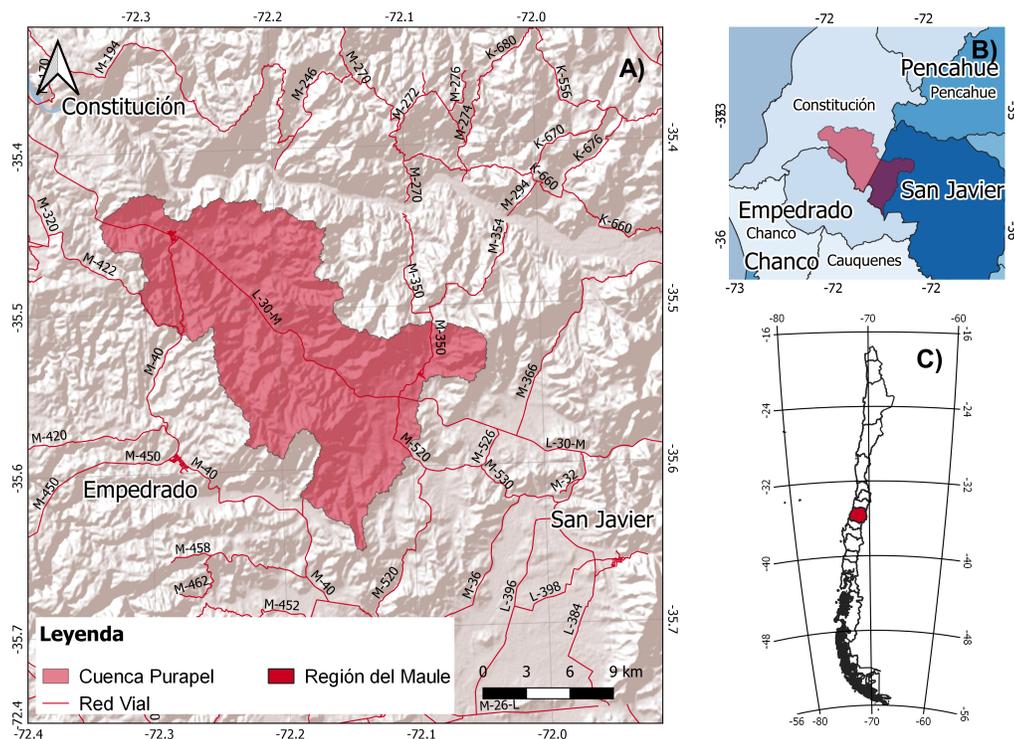


Figura 3.3: Mapa de ubicación y accesos de la Cuenca Purapel en contexto regional. (elaboración propia).

Desde el norte se puede acceder a la cuenca utilizando la ruta 5 sur e ingresando por el camino local L-30-M. Desde el sur se puede acceder por la ruta 128, ingresando a la ruta M-26-L y luego al camino local M-40. También se puede acceder desde la costa por San Ramón utilizando la ruta M-30-L.

3.2. Descripción zona de estudio

La información sobre la Cuenca Puangue presentada en este capítulo fue recopilada de 3 informes, estos fueron realizados por la DGA, y son los siguientes: Diagnóstico, Disponibilidad y Requerimientos de agua en la Región Metropolitana, I. I. y. P. Dirección General de Aguas (1993), Zonificación Hidrogeológica para las Regiones Metropolitana y D. d. A. d. R. H. Dirección General de Aguas (2002) y Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Valle del Estero Puangue: Diagnóstico situación actual D. D. E. Y. P. Dirección General de Aguas (2006).

Para la Cuenca Nilahue también se utilizaron 3 fuente bibliográficas correspondientes a informes realizados por la DGA, estos son: Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero de Nilahue D. D. A. D. R. H. Dirección General de Aguas (2007), Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la región del libertador General Bernardo O´Higgins y región de Bío-Bío A. M. C. S. Dirección General de Aguas (2013) y Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la región del libertador General Bernardo O´Higgins, del Maule y Bío-Bío, Etapa 2 A. M. C. S. Dirección General de Aguas (2014b).

En el caso de la Cuenca Purapel se utilizaron 2 fuente bibliográficas, ambas corresponden a informes realizados por la DGA, estos son: Modelación Hidrogeológica de la Cuenca Río Cauquenes, Región del Maule. G. I. S. N. . Dirección General de Aguas (2013) y Diagnóstico de Zonas de Recarga en Cuencas de Secano Maule, VII Región del Maule. A. M. C. S. Dirección General de Aguas (2014a).

Adicionalmente se utilizaron los datos de usos de suelos entregados por el Ministerio de bienes nacionales, actualizados el año 2013 en las cuencas Puangue y Nilahue, y el 2016 en la cuenca Purapel. Se complementó esta información con la obtenida a partir del Centro de Clima y Resiliencia (CR)².

3.2.1. Cuenca Puangue

La cuenca del Estero Puangue se extiende en dirección Norte-Sur. Las aguas avanzan encajonadas entre cordones montañosos pertenecientes a la Cordillera de la Costa. La orientación del sistema de drenaje principal, así como la de los flujos superficiales y subterráneos ocurren desde la parte norte, más alta (2.000 m.), hacia la parte sur, más baja (600 m.). El principal curso de agua superficial es el Estero Puangue, el cual tiene una longitud cercana a los 7km dentro de la zona de estudio, y constituye uno de los tributarios del Río Maipo, sin embargo, esta confluencia queda fuera de la zona de estudio.

El régimen hídrico es pluvial, por lo que su aporte de aguas se produce en invierno. La escorrentía de los esteros en el período de estiaje es casi nula, esto ha hecho aumentar la superficie de riego con aguas subterráneas debido a la seguridad de oportunidad de riego que estas tienen (D. d. A. d. R. H. Dirección General de Aguas, 2002).

Durante el periodo de estudio la Cuenca Puangue presenta una precipitación media anual de 498 mm y una evapotranspiración potencial anual de 1170 mm. Utilizando estos valores se calculó el índice de aridez (IA) planteado por la UNEP en 1997. Este índice es utilizado para establecer zonas de riesgo a la desertificación, lo cual da una idea del equilibrio del régimen hídrico. El índice se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$\frac{Pp}{ETP} \quad (3.1)$$

Donde Pp es la precipitación anual en mm y ETP es la evapotranspiración potencial anual en mm.

Tabla 3.1: Clasificación del Índice de Aridez (UNEP, 1997).

IA	Zonas
>0.65	Húmedo
0.65 - 0.5	Sub húmedo - seco
0.5 - 0.2	Semiárido
0.2 - 0.05	Árido
<0.05	Hiperárido

El valor del IA calculado para la Cuenca Puangue es de 0.42, esto clasifica a la cuenca como una zona semiárida.

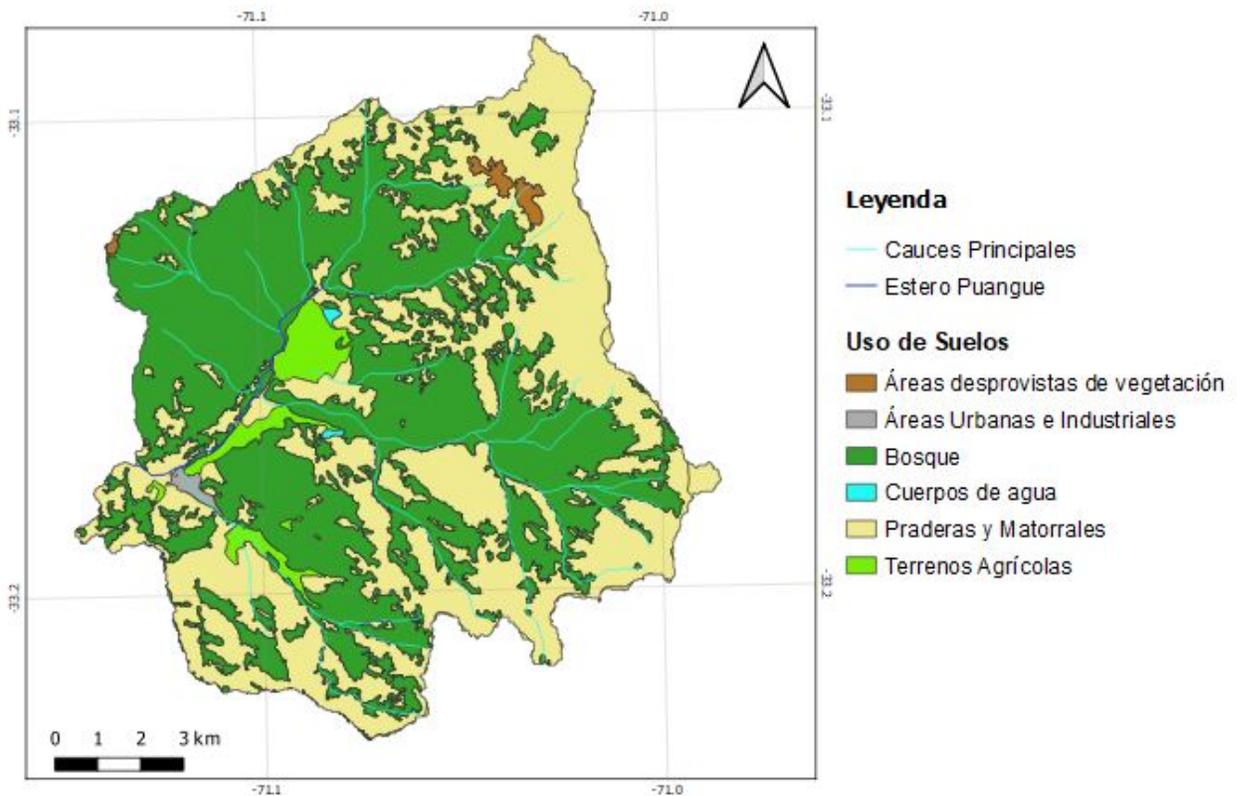


Figura 3.4: Mapa de uso de suelos, Cuenca Puangue. Elaboración propia con datos obtenidos del Ministerio de bienes nacionales; Infraestructura de datos geoespaciales. Datos actualizados el 2013.

A partir del mapa de uso de suelos (figura 3.4), se puede apreciar que el uso que utiliza una mayor área de la cuenca son los bosques, estos se ubican siguiendo la forma de la red fluvial, y desaparecen a cotas más elevadas al igual que los sistemas de drenaje. Los bosques de la Cuenca Puangue son nativos y mayoritariamente de tipo esclerófilos, estos representan un 99,6 % del área total de bosques, el otro 0,4 % está dado por bosques nativos de tipo Roble-Hualo, estos últimos afloran en zonas localizadas cercanas a la cota 1400 m. Los bosques esclerófilos se conforman principalmente por Boldo, Peumo, Quillay, Litre y Espino, a su vez, los bosques de Roble-Hualo están constituidos principalmente por Roble.

En las cotas superiores de la cuenca se observa la presencia de praderas y matorrales, mientras que en las zonas más bajas se ubican las zonas urbanas, las cuales son bastante reducidas. También se observa que en las zonas de cotas inferiores se sitúan los terrenos agrícolas, los cuales están circundantes a los esteros Puangue y Los Yuyos.

La actividad agropecuaria de la zona se caracteriza por viñas, cítricos y pastizales, además de vacunos y cerdos. Durante los últimos años la producción agrícola se ha incrementado (Huaico Malhue, 2018), esto ha impactado al recurso hídrico y al suelo, generando una creciente demanda del agua subterránea.

Tabla 3.2: Áreas y porcentajes calculados para los usos de suelo de la Cuenca Puangue. (Elaborado a partir de los datos del Ministerio de bienes nacionales actualizado al 2013).

Uso de suelos	Área (km ²)	Porcentaje %
Bosques	71.2	49.4
Praderas y Matorrales	66.9	46.4
Terrenos Agrícolas	4.4	3.1
Áreas Urbanas e Industriales	0.8	0.6
Áreas Desprovistas de Vegetación	0.4	0.3
Cuerpos de Agua	0.1	0.1
TOTAL	144	100 %

3.2.2. Cuenca Nilahue

La cuenca del Estero Nilahue tiene una orientación general noroeste. Posee una red de drenaje muy ramificada que responde a la tectónica local, la cual ha fraccionado el macizo costero en el sector. El principal curso de agua superficial es el Estero Nilahue, este nace a unos 60 km al sur de Pichilemu y desemboca en la localidad de Cahuil, ubicada a unos 10 km al sur de Pichilemu. Dentro del área de estudio el estero posee una longitud cercana a los 60km, y durante gran parte de este recorrido el estero tiene una dirección norte-sur.

Sobre el estero Nilahue y sus afluentes principales existen dos embalses de cierta importancia, el embalse Lolol en la comuna del mismo nombre, con capacidad de 6,4 millones de m³ y el embalse Nilahue sobre el estero de La Viña. Los recursos hídricos de la cuenca del estero Nilahue pueden ser complementados artificialmente por el embalse Convento Viejo ubicado en la cuenca del estero Chimbarongo.

El régimen hidrológico de la cuenca es pluvial, con precipitaciones que ocurren principalmente en los meses de invierno. La precipitación media anual es de unos 707 mm y la evapotranspiración potencial anual es 1343 mm, por lo que el IA tiene un valor de 0.52, clasificando a la Cuenca Nilahue como una zona sub húmeda – seca.

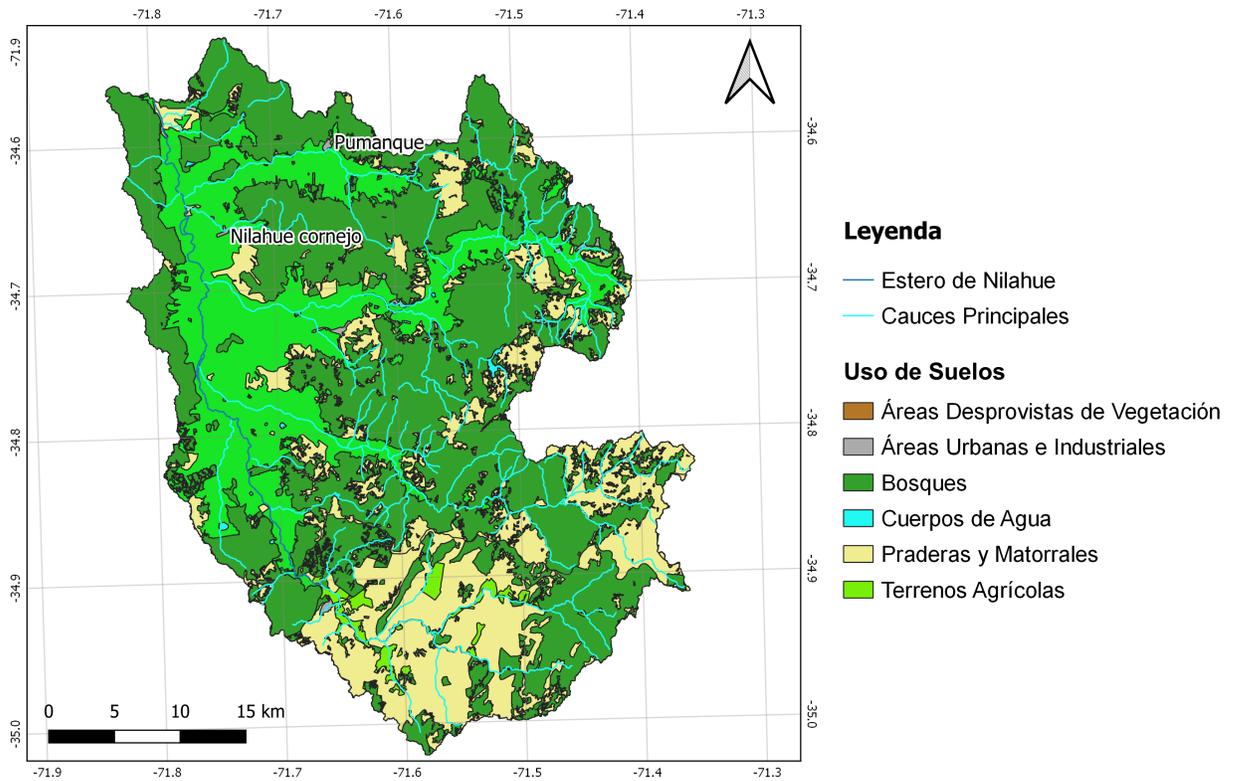


Figura 3.5: Mapa de uso de suelos, Cuenca Nilahue. Elaboración propia con datos obtenidos del Ministerio de bienes nacionales; Infraestructura de datos geoespaciales. Datos actualizados el 2013.

A partir del mapa de uso de suelos (figura 3.5), se puede apreciar que más de un 50% de la superficie de la cuenca son bosques. De esta extensión cerca de un 67% corresponde a bosque nativo, en los que se hayan bosques del tipo esclerófilos, roble-hualo y palma chilena. El 33% restante son principalmente plantaciones correspondientes a pinos y eucaliptos.

Las praderas-matorrales y los terrenos agrícolas utilizan un área muy similar. Estos últimos se sitúan en terrenos de baja pendiente circundantes a los cauces principales (Nilahue, Lolol, Pumanque y Quiahue), y utilizan gran parte de la superficie del acuífero.

En los últimos años la cuenca ha experimentado un gran crecimiento en el número de solicitudes de derecho de aprovechamientos de agua subterránea, que en su mayoría están destinadas al uso agrícola debido al gran desarrollo de esta actividad en las últimas décadas. Pero también otros sectores como el industrial y el suministro de agua potable han provocado un aumento en la demanda de los recursos hídricos.

Tabla 3.3: Áreas y porcentajes calculados para los usos de suelo de la Cuenca Nilahue. (Elaborado a partir de los datos del Ministerio de bienes nacionales actualizado al 2013).

Uso de suelos	Km	Porcentaje %
Bosques	759.403	52.261
Praderas y Matorrales	338.554	23.299
Terrenos Agrícolas	347.636	23.924
Áreas Urbanas e Industriales	4.146	0.285
Áreas Desprovistas de Vegetación	0.053	0.004
Cuerpos de Agua	3.299	0.227
TOTAL	1453	100

3.2.3. Cuenca Purapel

La Cuenca Purapel tiene una orientación noroeste. El cauce principal de la cuenca corresponde al Río Purapel, el cual presenta la misma orientación que la cuenca y cuenta con una extensión cercana a los 33 km dentro del área de estudio.

El régimen hidrológico de la Cuenca Purapel es pluvial, con caudales altamente variables intra e inter anual debido a la variabilidad de la precipitación. Durante el periodo de estudio, la precipitación presenta una media anual de 892 mm y una evapotranspiración potencial anual de 1227 mm. Con estos valores se tiene un IA esde 0.72 clasificando a la zona como húmeda.

A partir de los IA correspondiente a cada cuenca, se aprecia que la condición de aridez es mayor a medida que las cuencas se ubican más hacia el norte.

En la figura 6.1 se presenta el uso de suelos de la Cuenca Purapel. Es posible notar que cerca de un 84 % de la superficie es utilizada por bosques. Del área total de bosques un 85 % corresponde a plantaciones, que en su mayoría son pinos y en menor medida eucaliptos y aromos. Del 15 % restante un 7 % son bosques nativos del tipo esclerófilos y roble-hualo, y el 8 % son bosques mixtos

Las praderas y matorrales se sitúan en la parte sur de la Cuenca y corresponden solo a un 9 % del área total, mientras que los terrenos agrícolas se ubican cercanos al Río Purapel abarcando una superficie de casi un 6 %.

Es claro que el desarrollo económico de la cuenca está relacionado a la actividad forestal. En las últimas décadas ha existido un aumento contundente en el reemplazo del suelo de bosque nativo por plantación, la cual en su mayoría ha sido pinus radiata. Algunas investigaciones como Huber y López (1993) han demostrado que el agua consumida por esta especie por concepto de evapotranspiración supera en un 80 % al agua consumida por praderas. Esto último conduce a un aumento en la demanda de los recursos hídricos.

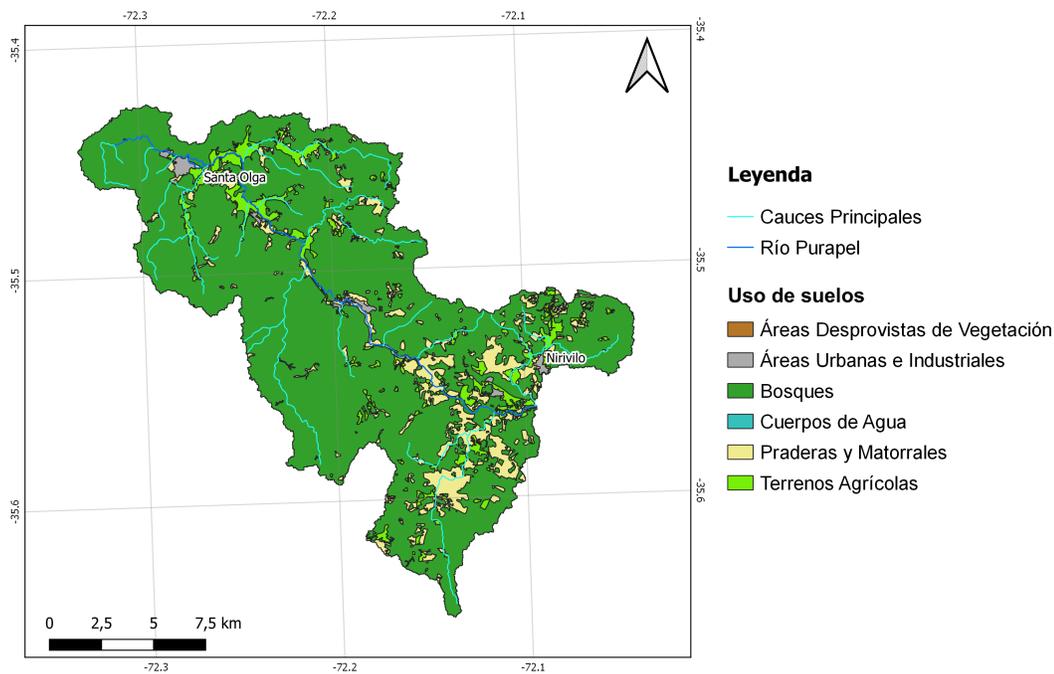


Figura 3.6: Mapa de uso de suelos, Cuenca Purapel. Elaboración propia con datos obtenidos del Ministerio de bienes nacionales; Infraestructura de datos geospaciales. Datos actualizados el 2013.

Tabla 3.4: Áreas y porcentajes calculados para los usos de suelo de la Cuenca Purapel. (Elaborado a partir de los datos del Ministerio de bienes nacionales actualizado al 2016).

Uso de suelos	Km	Porcentaje %
Bosques	219.9	83.8
Praderas y Matorrales	25.1	9.7
Terrenos Agrícolas	15.2	5.8
Áreas Urbanas e Industriales	2.1	0.8
Áreas Desprovistas de Vegetación	0.05	0.02
Cuerpos de Agua	0.01	0.004
TOTAL	262	100 %

Capítulo 4

Geomorfología

En la zona central de Chile se distinguen varias unidades morfoestructurales que se disponen paralelas al borde continental con orientación NNE-SSO. En la zona donde se ubican las cuencas en estudio, entre los 33°S y 36°S, se distinguen de oeste a este la Cordillera de Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal (figura 4.1). Las 3 cuencas se encuentran inmersas en la Cordillera de la Costa.

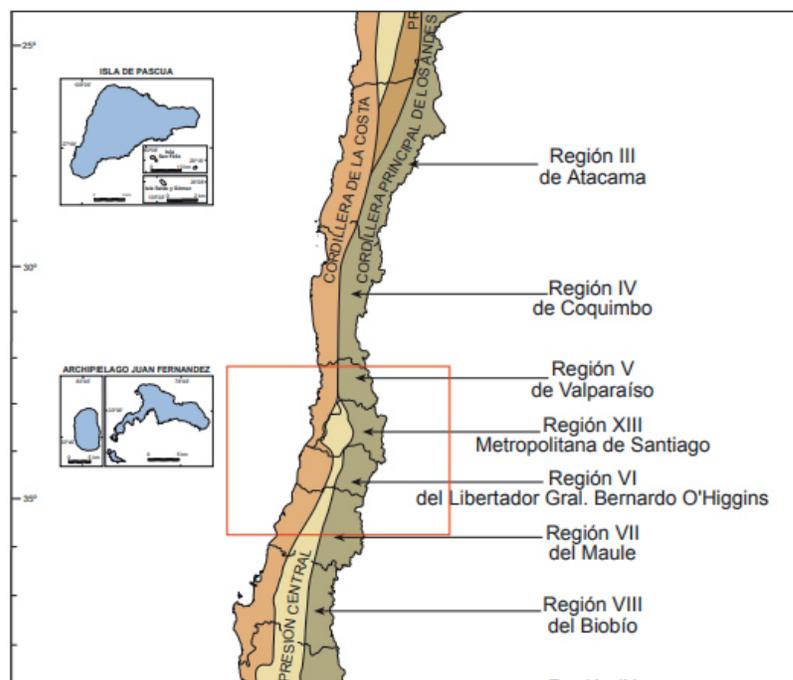


Figura 4.1: Dominios morfoestructurales de la zona central de Chile. Modificado de SERNAGEOMIN (2003).

La Cordillera de la Costa corresponde a un cordón montañoso que no sobrepasa los 2.200 m. En la zona central la altura va decreciendo hacia el sur. Puede ser dividida en una franja occidental y otra oriental. La primera está compuesta por rocas metamórficas y cristalinas del Paleozoico Superior e intrusivos carboníferos y jurásicos. El dominio oriental se caracteriza por secuencias estratificadas del mesozoico intruida por granitoides del Cretácico Temprano (Renate Wall R, 2003).

Además de estas macroformas, en la zona de estudio es posible reconocer otras unidades geomorfológicas. En la figura 4.2 se presentan los mapas de las cuencas y sus respectivas unidades geomorfológicas. Los datos se obtuvieron del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS, datos actualizados al 2015).

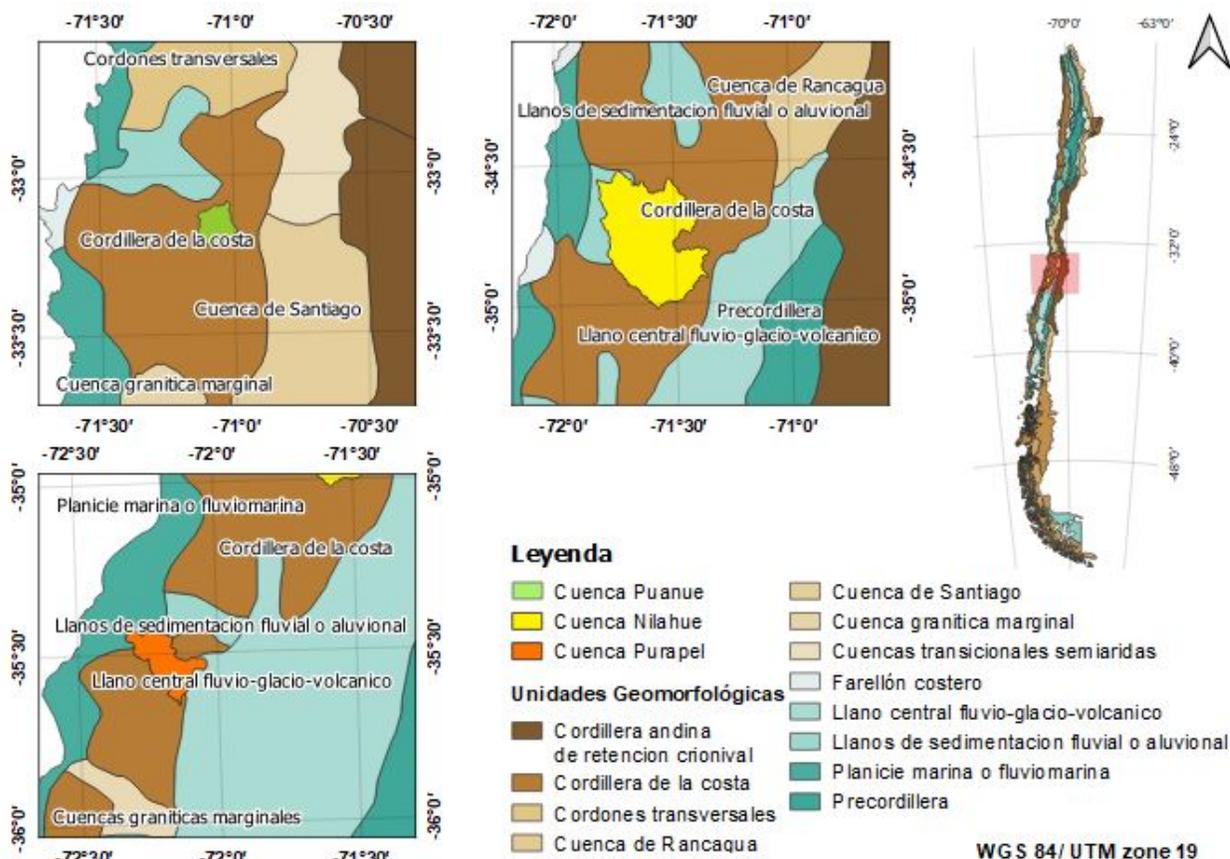


Figura 4.2: Unidades geomorfológicas de las cuencas en estudio. (Elaboración propia, datos se obtenido del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, actualizados al 2015).

A partir del mapa de unidades geomorfológicas es posible observar que la Cuenca Puanque no presenta otras unidades además de la Cordillera de la Costa. Sin embargo, en la parte occidental de la Cuenca Nilahue es posible distinguir la unidad llanos de sedimentación fluvial o aluvial, y en la Cuenca Purapel se distingue la unidad de planicie marina o fluvio marina, que también se ubica en la zona occidental de la Cuenca.

4.1. Relieve

Un Modelo Digital de Elevación (DEM) corresponde a una representación digital de la altura del terreno en una región determinada. En las siguientes Figuras se muestran los DEM de las 3 cuencas en estudio donde se aprecian las zonas de mayor y menor altitud junto con las curvas de nivel. Las imágenes satelitales corresponden a DEM ALOS-PALSAR de resolución 12,5 m. También se muestran los mapas de pendiente.

A partir de los mapas presentados en las figura 4.3 y figura 4.4, se observa que la altura de la Cuenca Puangue varía entre los 530 m y 2220 m, donde la máxima se encuentra en los bordes de la Cuenca. También es posible apreciar que el mayor porcentaje de la superficie de la cuenca corresponde a un relieve fuertemente ondulado con pendientes que varían entre los 15 – 45 %. La cuenca tiene una pendiente máxima cercana a los 70°. Aquellas zonas donde se tiene un relieve plano y suave coincide con la ubicación de la red hidrológica, los terrenos agrícolas y la zona urbana.

Por su parte, la Cuenca Nilahue presenta una elevación menor respecto a Puangue, esta varía entre los 80 m y los 940, teniendo una mayor elevación en el sector oriental (figura 4.5) . A partir del mapa de pendientes (figura 4.6), se observa que el relieve varía de plano a fuertemente ondulado. La cuenca tiene una pendiente máxima de la cuenca son 50° y las zonas de menor relieve también corresponden a sectores donde se encuentra la red hidrológica y los terrenos agrícolas.

La Cuenca Purapel es la que presenta menores elevaciones, estas varían entre los 190 m y los 750 m (figura 4.7). Su relieve es plano a suave en los sectores donde se sitúa la red hidrológica, a fuertemente ondulado. La cuenca tiene una pendiente máxima de 37° (figura 4.8).

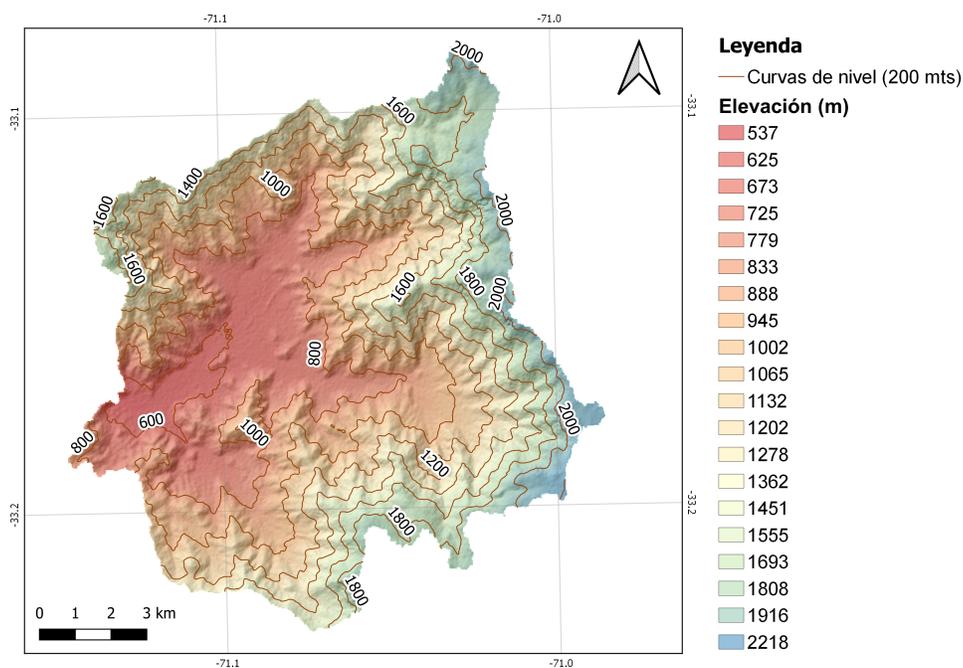


Figura 4.3: Mapa de elevación de la Cuenca Puangue con curvas de nivel. DEM ALOS PALSAR de resolución 12,5 m con fecha 18 de junio del 2015.

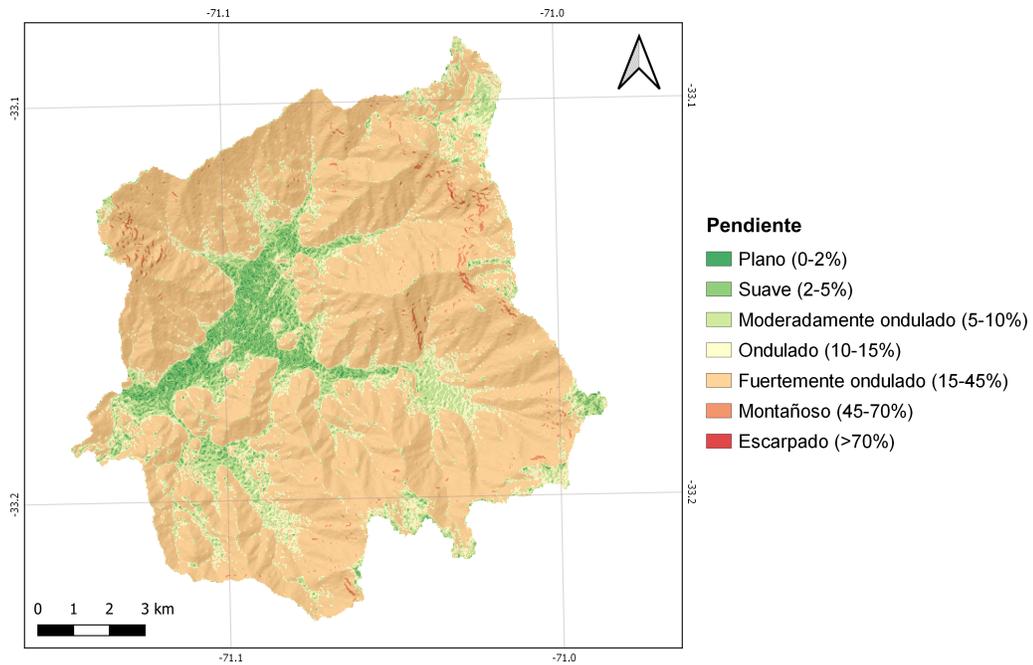


Figura 4.4: Mapa de pendiente, Cuenca Puangue.

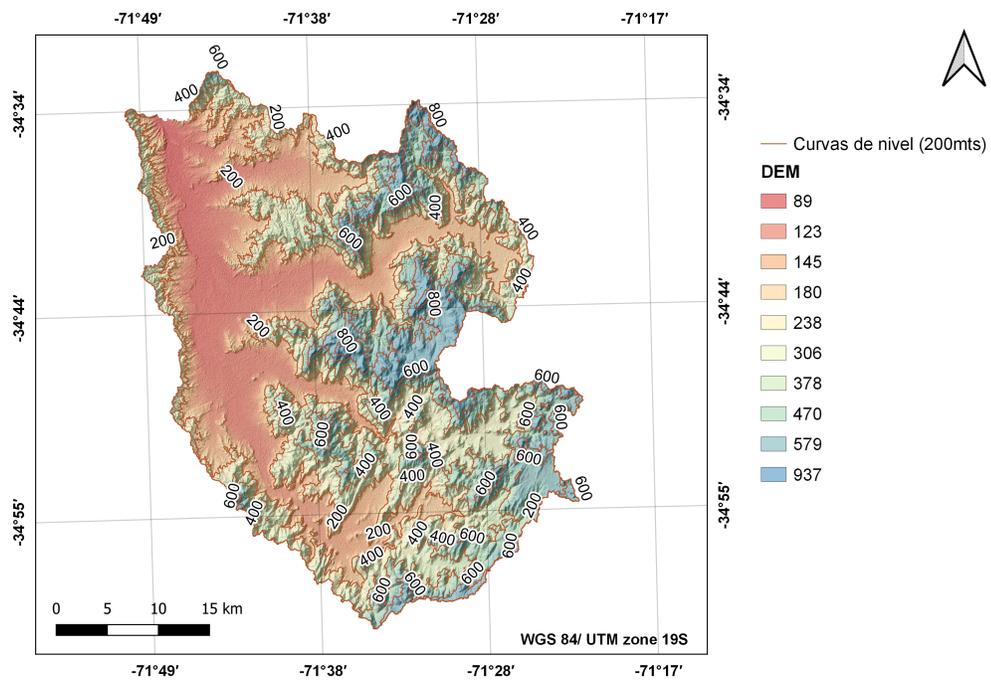


Figura 4.5: Mapa de elevación de la Cuenca Nilahue con curvas de nivel. DEM ALOS PALSAR de resolución 12,5 m con fecha 23 de agosto del 2010.

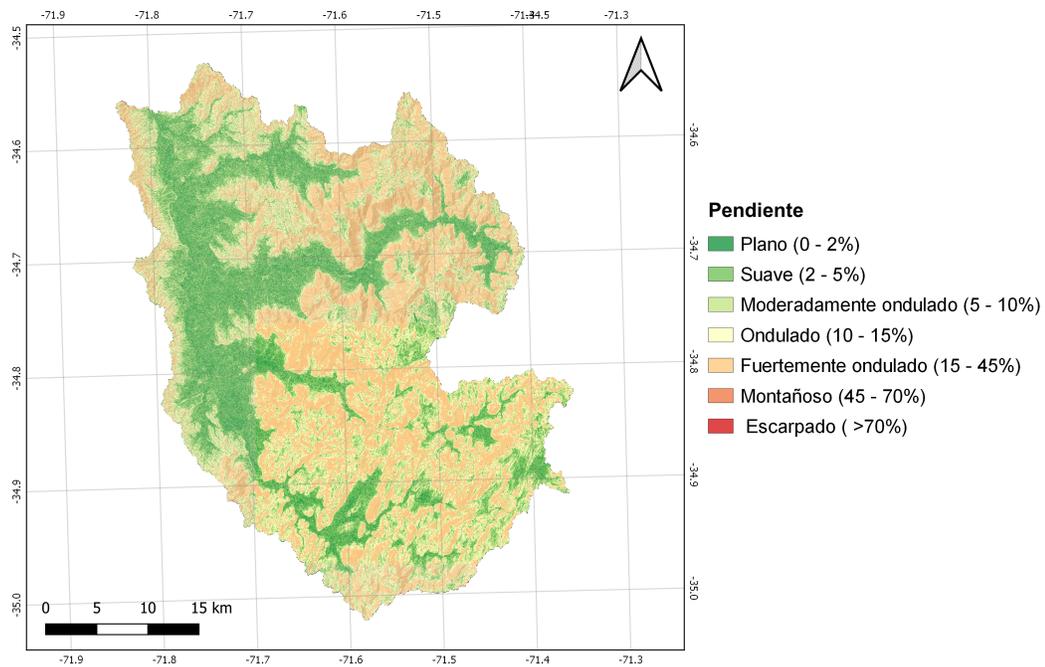


Figura 4.6: Mapa de pendiente, Cuenca Nilahue

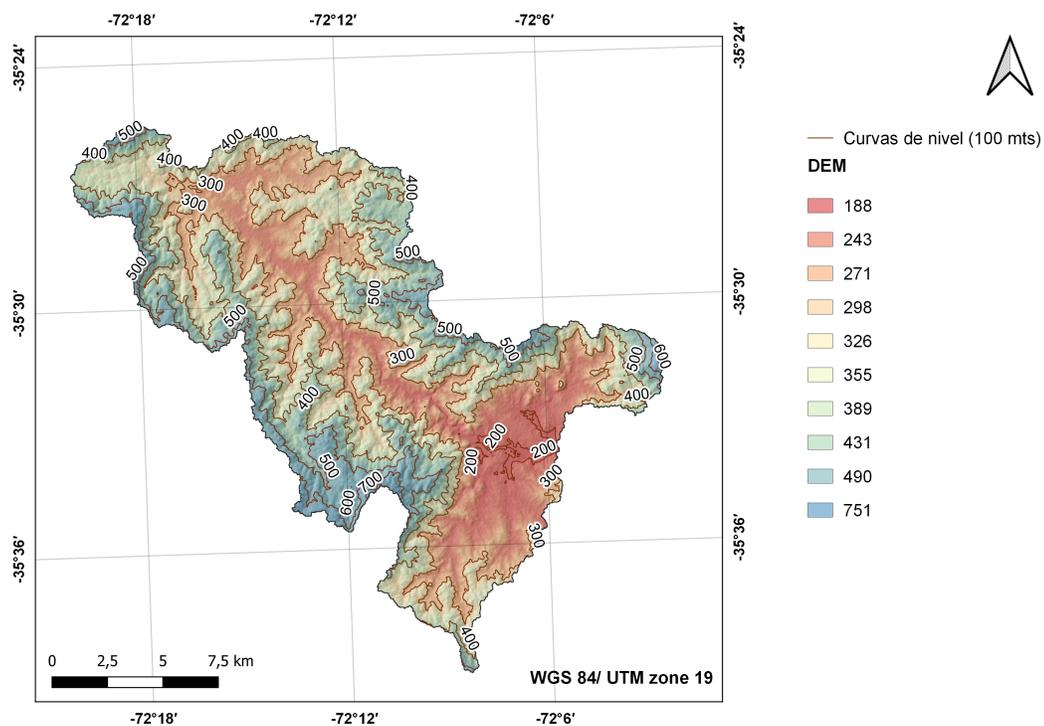


Figura 4.7: Mapa de elevación de la Cuenca Purapel con curvas de nivel. DEM ALOS PALSAR de resolución 12,5 m con fecha 11 de mayo del 2010.

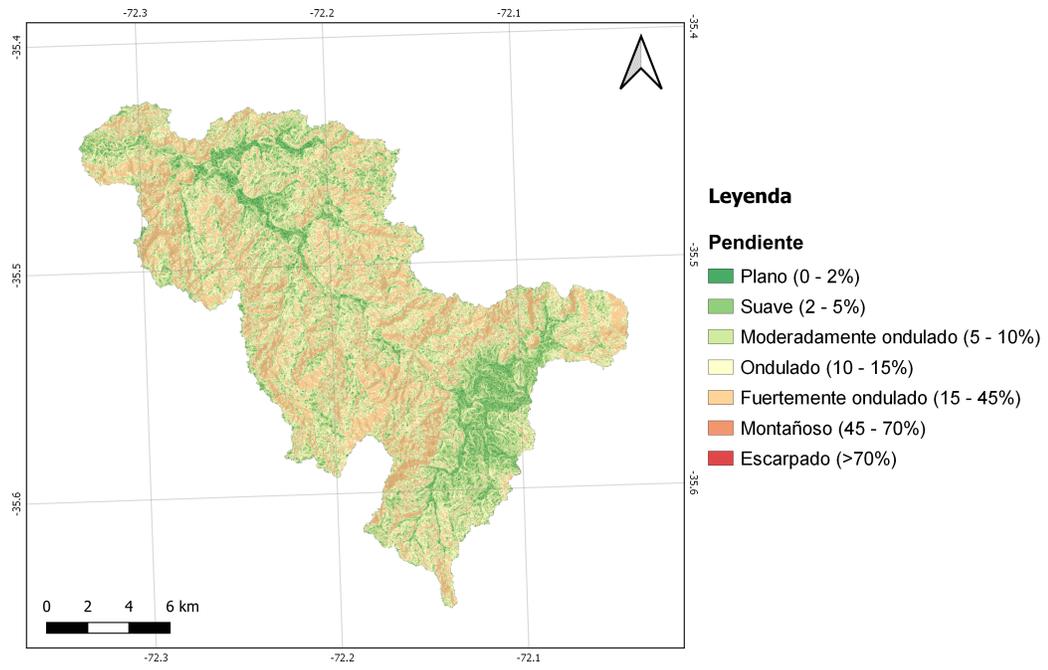


Figura 4.8: Mapa de pendiente, Cuenca Purapel.

Capítulo 5

Clima

La zona central de Chile se caracteriza por tener un clima templado, con ligeras variaciones de acuerdo a su cercanía con el océano y a la altura geográfica.

Según la clasificación climática de Köppen (1990), las 3 cuencas se caracterizan por tener un clima templado mediterráneo con influencia oceánica de verano seco (Csb). Este clima se caracteriza por inviernos fríos y lluviosos, veranos calurosos, secos y prolongados, y una vegetación correspondiente a bosque templado y matorral.

La primera letra de la clasificación de Köppen constituye un umbral de temperatura, en este caso la letra C establece que la temperatura media del mes más frío es mayor a -3°C y menor a 18°C . La segunda letra de la clasificación se utiliza para caracterizar el comportamiento de las lluvias, la letra s indica que la precipitación del mes más seco en verano es inferior a un tercio de la del mes más lluvioso de invierno. Por último, la tercera letra se utiliza para caracterizar el comportamiento térmico anual, la letra b señala que la temperatura media del mes más cálido es inferior a los 22°C y que al menos 4 meses del año cuentan con temperaturas medias que superan los 10°C .

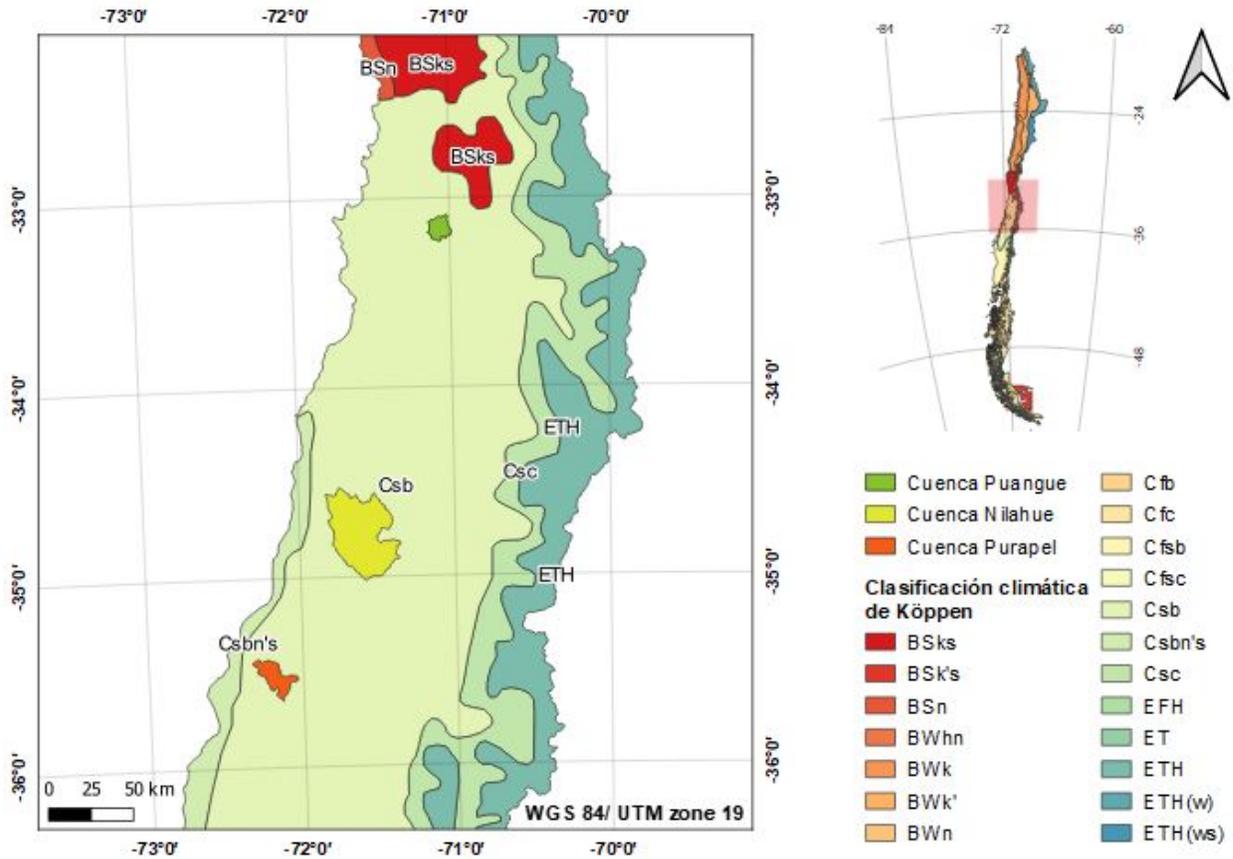


Figura 5.1: Zonas climáticas en Chile. Elaboración propia con datos del Centro de desarrollo urbano sustentable, (CEDEUS, 2015).

5.1. Temperatura

El CR² contiene la información integrada por cuenca de las temperaturas máximas y mínimas, diarias y mensuales. Se obtuvo la temperatura media mensual como un promedio entre la máxima y la mínima mensual, estos valores fueron promediados para el periodo de estudio (1979 – 2019). Según estos registros, la temperatura media de la Cuenca Puangue oscila entre 18 °C en verano y 7 °C en invierno, con un promedio anual de 12°C. La temperatura media de la Cuenca Nilahue oscila entre 20 °C en verano y 8 °C en invierno con un promedio anual de 14°C. En el caso de la Cuenca Purapel la temperatura media oscila entre 19 °C en verano y 8 °C en invierno con un promedio de 13° C.

Tabla 5.1: Temperaturas medias mensuales, máxima, mínima y promedio (1979-2019).

Cuenca	T° media promedio (°C)	T° media máx (°C)	T° media mín (°C)
Puangue	12.45	18.41	6.76
Nilahue	14.14	20.45	8.27
Purapel	13.53	18.69	8.3

En la figura 5.2 se puede observar que las 3 cuencas muestran el mismo comportamiento

de variación de la temperatura, los meses más fríos son en invierno de junio a agosto y los más calurosos en verano de diciembre a febrero. Adicionalmente, es posible notar que la Cuenca Purapel es la que posee una menor variabilidad de la temperatura media anual y la Cuenca Nilahue es que le tiene una mayor variabilidad del mismo parámetro.

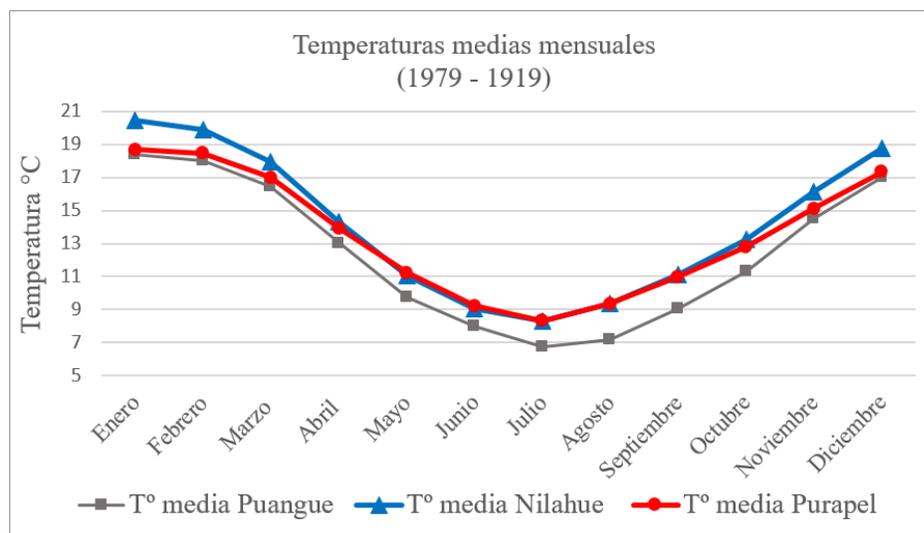


Figura 5.2: Temperaturas medias mensuales para el periodo 1979 – 2019. Cuenca Puangue, Nilahue y Purapel. (Elaboración propia).

Con los valores de temperaturas medias mensuales correspondiente a cada año del periodo de estudio, se ha comprobado que en la última década las temperaturas de las cuencas se han vuelto más extremas. Los meses de verano han incrementado sus temperaturas y los meses de invierno las han disminuido. En las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se muestra este comportamiento para cada cuenca. En promedio, la Cuenca Puangue ha aumentado su temperatura en un 0.26 °C en los meses de verano, la Cuenca Nilahue 0.24 °C y la Cuenca Purapel 0.36 °C. En invierno la disminución ha sido de 0.18 °C, 0.20 °C y 0.1 °C respectivamente.

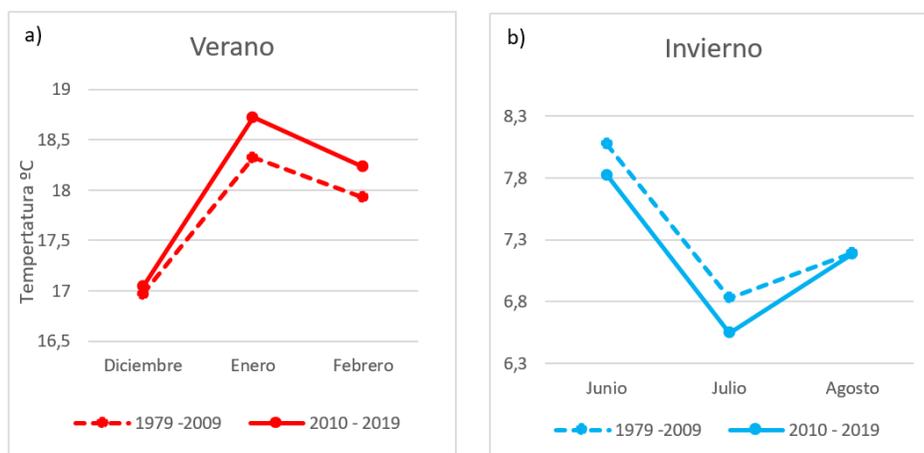


Figura 5.3: Temperatura media mensual de la Cuenca Puangue para el periodo 1979-2009 y 2010-2019. a) meses de verano y b) meses de invierno. Elaboración propia.

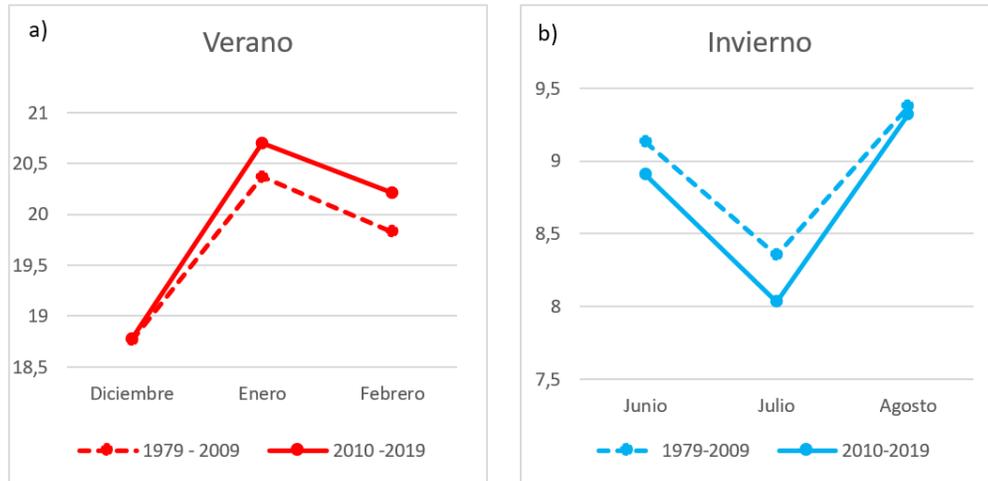


Figura 5.4: Temperatura media mensual de la Cuenca Nilahue para el periodo 1979-2009 y 2010-2019. a) meses de verano y b) meses de invierno. Elaboración propia.

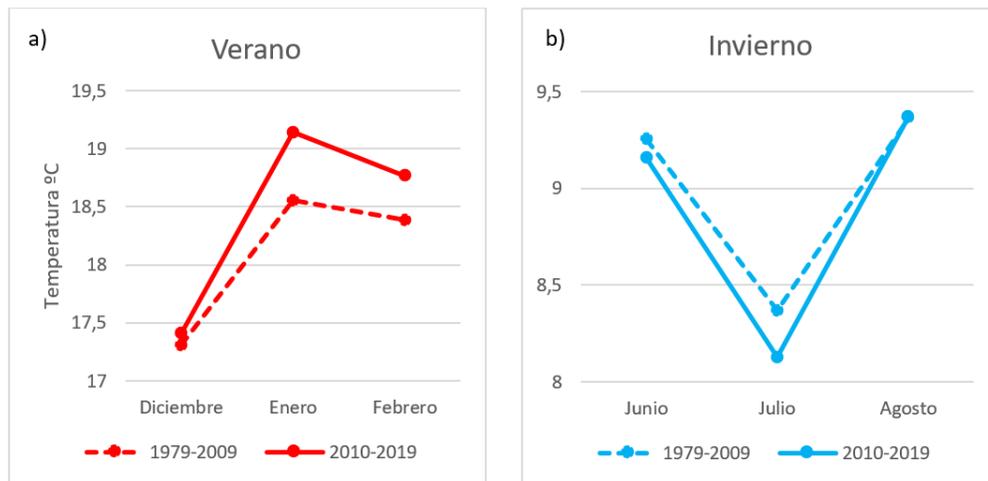


Figura 5.5: Temperatura media mensual de la Cuenca Purapel para el periodo 1979-2009 y 2010-2019. a) meses de verano y b) meses de invierno. Elaboración propia.

5.2. Precipitaciones

La precipitación en la zona central de Chile (30° - 41° S) está concentrada en un 90 % entre los meses de mayo y septiembre (Carrasco, 2006). Las perturbaciones ciclónicas relacionadas a la migración estacional del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental, tienen una implicancia directa sobre la precipitación. El desplazamiento oeste-este del anticiclón toma relevancia en invierno, donde una posición costa afuera permite la presencia de lluvias en Chile central (Quintana y Aceituno, 2012). Se ha demostrado que la variación en la intensidad del anticiclón coincide con el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO). Una mayor intensidad del anticiclón se relaciona con eventos de la Niña, donde son típicas las condiciones secas, y menores intensidades con el Niño, el cual corresponde a condiciones más húmedas. Este efecto tiene implicancias directas en la variabilidad de la precipitación interanual. A su vez, el comportamiento interdecadal se relaciona con la Oscilación Decadal del Pacífico (DOP) (Montecinos y Aceituno, 2003).

El CR² cuenta con datos diarios y mensuales de precipitaciones, con estos valores se calcularon las precipitaciones anuales de las 3 cuencas para el periodo de estudio (1979 - 2019). La Cuenca Puangue presenta precipitaciones que varían desde los 165 mm a los 1154 mm, con una precipitación promedio de 498 mm. Para el mismo periodo, la Cuenca Nilahue presenta precipitaciones anuales que oscilan entre 252 mm y 1309 mm, con un promedio de 707 mm. En el caso de la Cuenca Purapel, la precipitación mínima es de 326 mm y la máxima es de 1385 mm, con un promedio de 892 mm. Estos valores evidencian el aumento de las precipitaciones de norte a sur.

Al analizar el comportamiento de las precipitaciones anuales para el periodo de estudio, se observa que las 3 cuencas han visto disminuidas sus precipitaciones durante la última década con anomalías principalmente negativas (figuras 5.6, 5.7 y 5.8). En la Cuenca Puangue, el promedio de las precipitaciones del periodo 2009 – 2019 es un 32 % inferior que el promedio de las precipitaciones caídas en el periodo 1979 - 2009. Haciendo la misma comparación, la disminución de la Cuenca Nilahue fue de un 27 % y en la Cuenca Purapel fue de un 23 %.

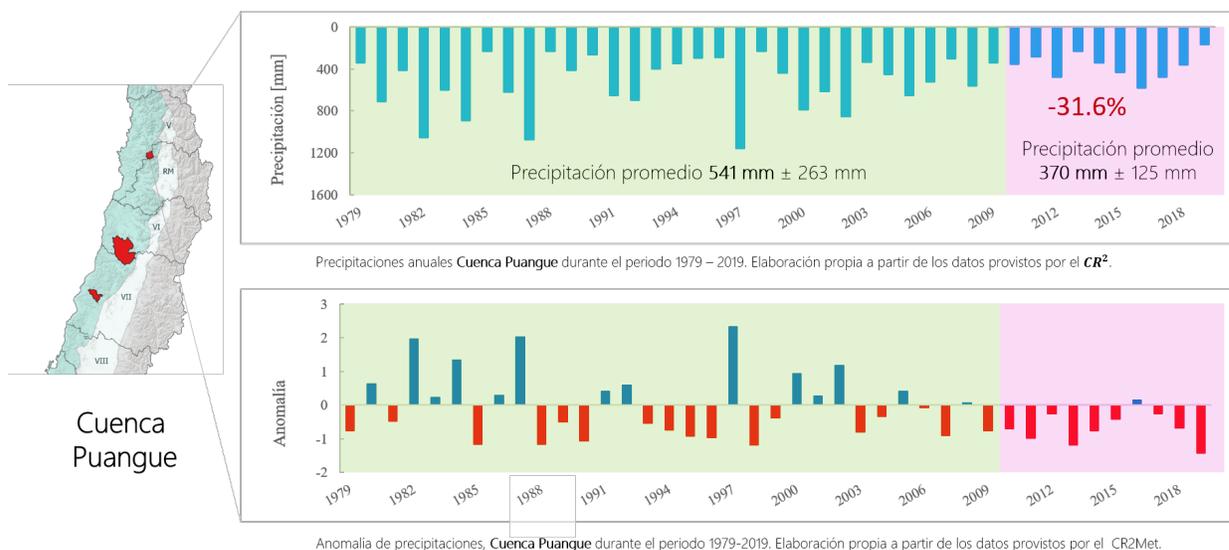


Figura 5.6: Precipitaciones anuales y anomalía de la Cuenca Puangue durante el periodo 1979 – 2019. Elaboración propia.

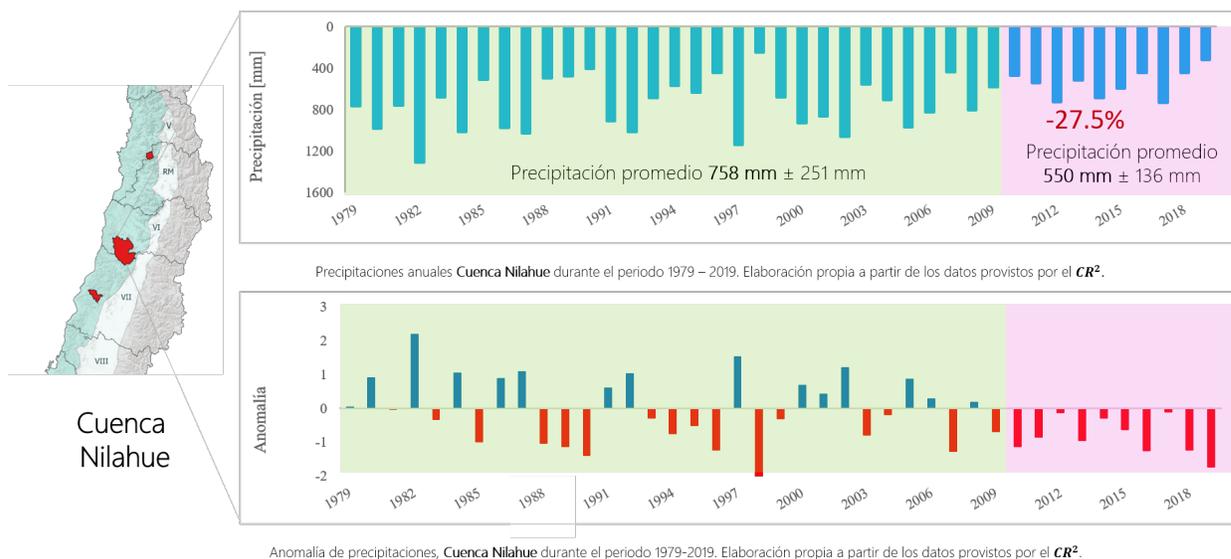


Figura 5.7: Precipitaciones anuales y anomalía de la Cuenca Nilahue durante el periodo 1979 – 2019. Elaboración propia.

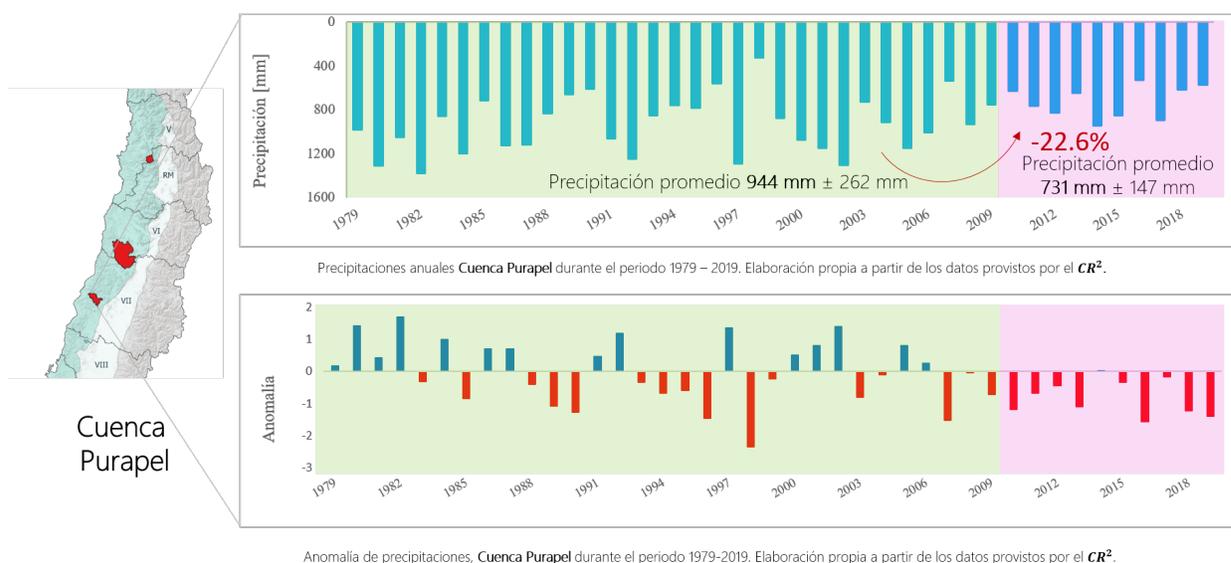


Figura 5.8: Precipitaciones anuales y anomalía de la Cuenca Purapel durante el periodo 1979 – 2019. Elaboración propia.

Los climogramas de las 3 cuencas en estudio se presentan en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11, de estos se obtiene que en promedio, un 85 % de la precipitación se concentra entre los meses de mayo a septiembre, donde se presentan las temperaturas más bajas.

También se observa que la precipitación media mensual máxima de la Cuenca Puangue se presenta en el mes de junio con 122.15 mm, el mes más seco es enero con una precipitación media de 1.44 mm. En el caso de la Cuenca Nilahue la precipitación media mínima también es en el mes de enero con 2.03 mm y la máxima en junio con 165.91 mm. Por su parte, Purapel presenta precipitaciones que varían de 4.87 mm en enero a 197.56 en junio.

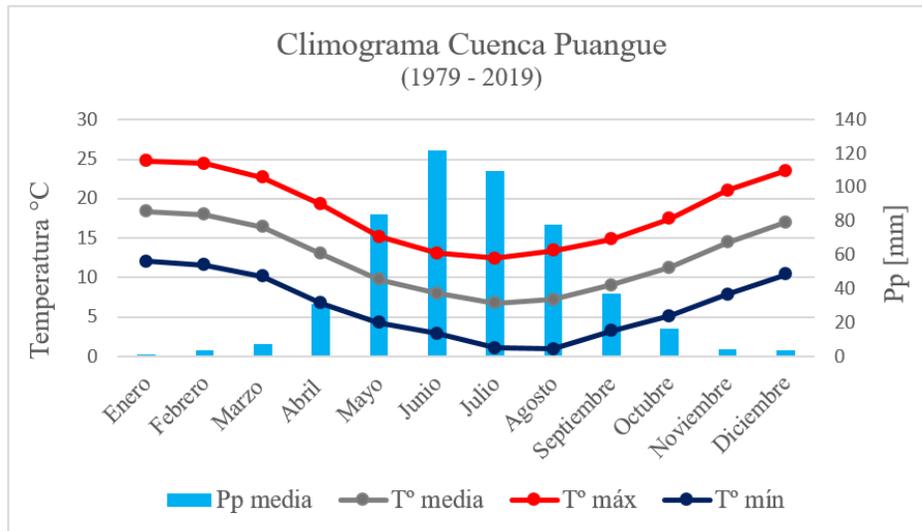


Figura 5.9: Climograma Cuenca Puangue. Precipitaciones medias mensuales, temperatura media, máxima y mínima mensuales. Elaboración propia con datos del CR².

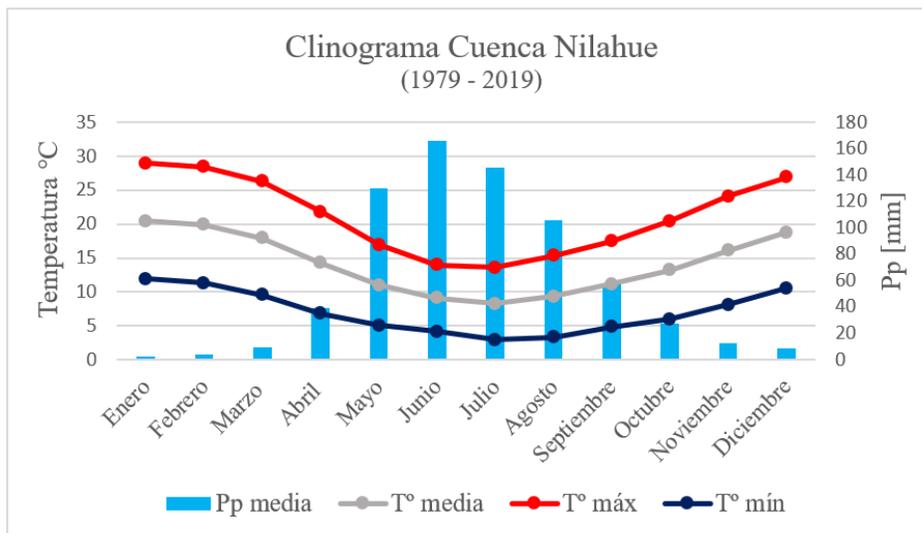


Figura 5.10: Climograma Cuenca Nilahue. Precipitaciones medias mensuales, temperatura media, máxima y mínima mensuales. Elaboración propia con datos del CR².

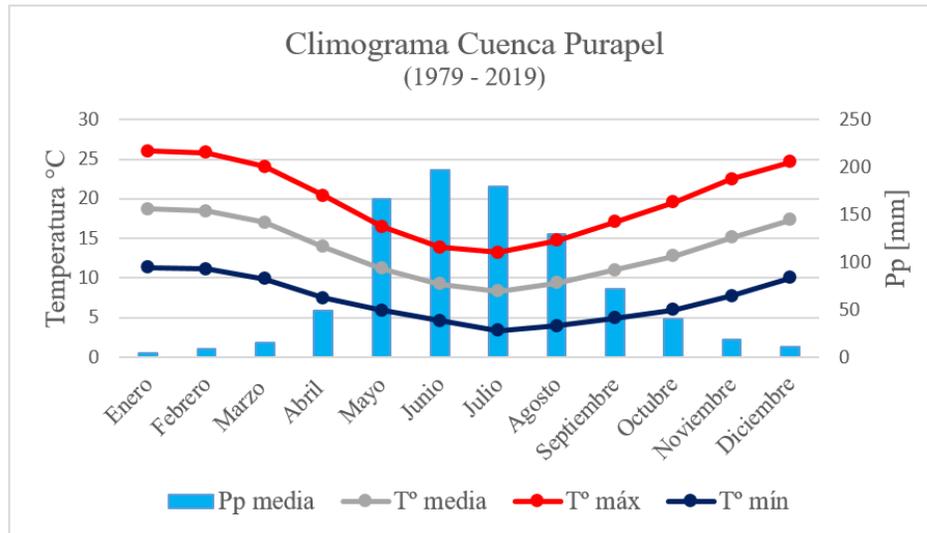


Figura 5.11: Climograma Cuenca Purapel. Precipitaciones medias mensuales, temperatura media, máxima y mínima mensuales. Elaboración propia con datos del CR².

Con el objetivo de analizar como ha variado la precipitación durante el periodo de estudio, se calcularon los promedios mensuales por década. Estos gráficos aparecen en las figuras 11.57, 11.58 y 11.59 de los anexos, junto con sus respectivas tablas de valores. A partir de ellos es posible observar que existe una alta variabilidad decadal en torno al mes en el cual se genera una mayor precipitación.

Los valores de la última década muestran la disminución transversal que ha tenido la precipitación, pero también manifiestan que esta se ha distribuido a lo largo del año, teniendo precipitaciones mayores en meses que durante el periodo histórico no son comunes. El mes de octubre representa un ejemplo de esto, el cual cuenta con un promedio de precipitaciones que se encuentran por sobre el promedio histórico.

5.3. Índice estandarizado de precipitaciones (SPI)

Existen varios índices de sequías que son usados para identificar la intensidad, duración y frecuencia de los periodos secos y húmedos, tales como Índice de Suministro de Agua Superficial (ISAS), Porcentaje de Precipitación Normal (PPN), Índice de Reclamación de Sequia (IRS). Uno de los más utilizados y que se aplicará en este trabajo es el o Índice Estandarizado de precipitaciones SPI, el cual fue desarrollado por McKee, Doesken, Kleist, et al. (1993). Este índice se reconoce por la facilidad con la que se puede aplicar a diferentes escalas de tiempo, y porque entrega mejores resultados que otros índices para explicar los impactos de la sequía (Guttman, 1998).

El índice SPI solo necesita de la variable de precipitación para determinarlo. Este índice cuantifica el déficit de precipitación a través de una estandarización de esta variable. Esta estandarización es la diferencia de precipitación a partir de la media para un tiempo determinado, dividido por la desviación estándar. Sin embargo, la desventaja del método es que generalmente la precipitación no se presenta como una distribución normal, por lo que es ne-

cesario aplicar una transformación sobre la distribución que mejor modela a la precipitación.

De forma general, el cálculo del SPI involucra 2 etapas, la primera consiste en ajustar la serie de precipitaciones a una distribución teórica Gamma de 2 parámetros, los cuales están en función de la media y la varianza del registro de datos. Algunos autores como Edwards (1997) sugieren que la distribución tipo gamma ajusta bien las series de tiempo de precipitación climatológica. La segunda etapa consiste en convertir la distribución Gamma en una distribución normal estandarizada con media 0 y varianza 1, el resultado de esto representa el SPI. Un ejemplo de esta transformación se puede observar en la figura 5.12.

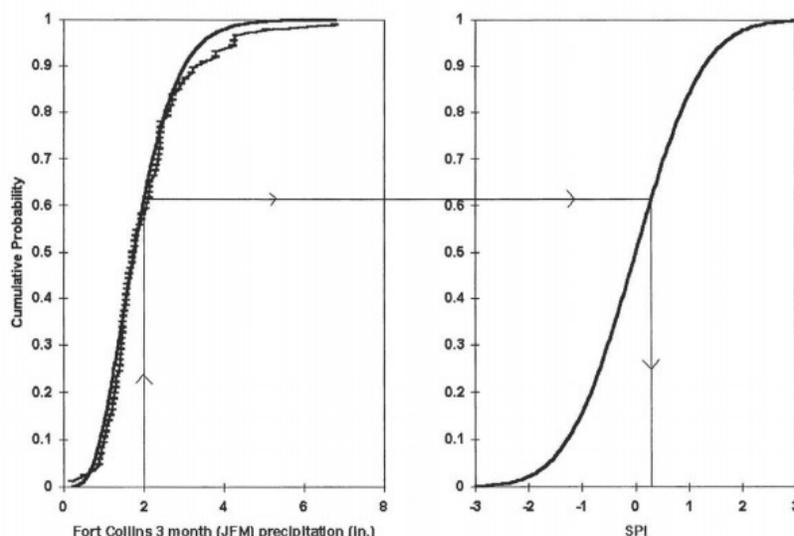


Figura 5.12: Ejemplo de transformación de una distribución gamma ajustada a una distribución normal estandarizada. Fuente: Edwards (1997).

La clasificación de los distintos niveles de sequía a partir del valor del SPI, se observa en la tabla 5.2

Tabla 5.2: Clasificación de SPI. Fuente: Modificado de Gordijn et al. (2012)

Valor SPI	Clasificación
>2	Extremadamente húmedo
1.5 – 1.99	Muy húmedo
1 – 1.49	Húmedo moderado
-0.99 – 0.99	Normal
-1 a -1.49	Sequía Moderada
-1.5 a -1.99	Sequía Severa
< -2	Sequía Extrema

A las 3 cuencas se les calculó el valor del SPI a escala anual. Con el objetivo de comparar de mejor manera la gravedad de la sequía experimentada durante el periodo 2010 – 2019 con el período histórico, el ajuste de los parámetros de la distribución Gamma se realizó

solo utilizando el período histórico de 1979 – 2009. Estos 31 años son suficientes para el procedimiento de calibración.

En las figuras 5.13, 5.15 y 5.17 se presentan las distribuciones gammas de precipitaciones con sus respectivas transformaciones a distribución normal; para Puangue, Nilahue y Pura-pel. Con la probabilidad obtenida de la distribución gamma, se calculó la probabilidad de excedencia y el tiempo de retorno anual de las precipitaciones para el periodo de estudio. Los valores obtenidos se adjuntan en las tablas 11.17 y 11.18 de anexos. En la figuras 5.14, 5.16 y 5.18 se presentan los valores de SPI anuales para el periodo de estudio 1979 - 2019.

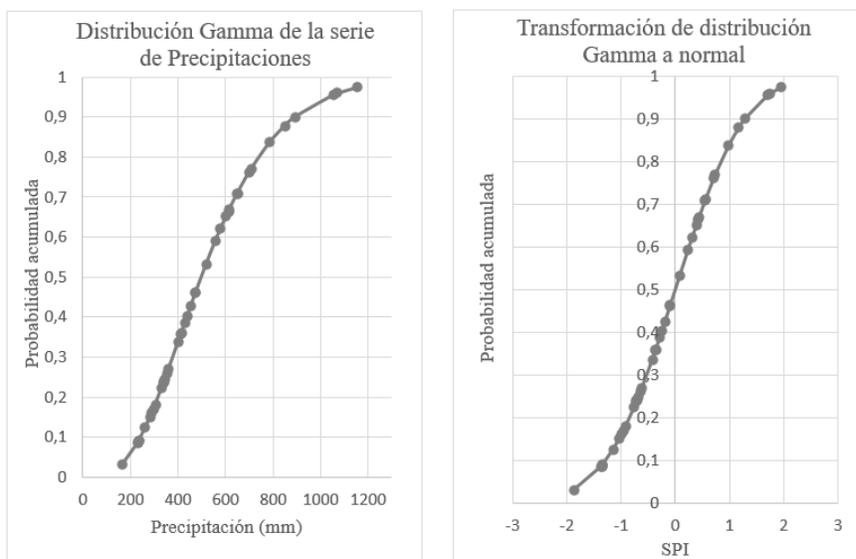


Figura 5.13: Distribución gamma de precipitaciones para la Cuenca Puangue, transformada en una distribución normal estandarizada. Valores de SPI. Elaboración propia.

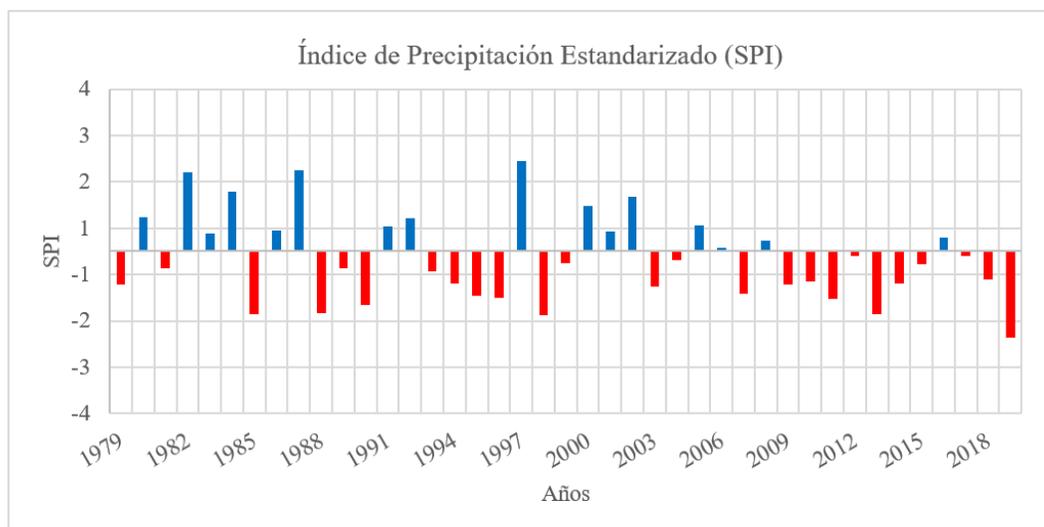


Figura 5.14: Transcurso del SPI anual para el periodo (1979-2019) en la Cuenca Puangue. Elaboración propia.

De las Figuras 5.14, 5.16 y 5.18, se observa que durante la última década, las 3 cuencas presentan valores mayoritariamente negativos del índice SPI (barras color rojo). Esto es indicativo de años que experimentan condiciones secas, lo cual se correlaciona con el déficit de precipitaciones obtenido para el mismo periodo, presentado en el capítulo 5.2.

A partir del valor del SPI anual calculado para cada cuenca presentado en la tabla 5.3, es posible observar que la Cuenca Puangue es la que presenta una menor cantidad de años con extremos secos y húmedos. Un 71 % de los años se clasifican como normales, un 17,4 % de los años presenta algún nivel de sequía, y 12,1 % de los años se clasifican con algún nivel de humedad.

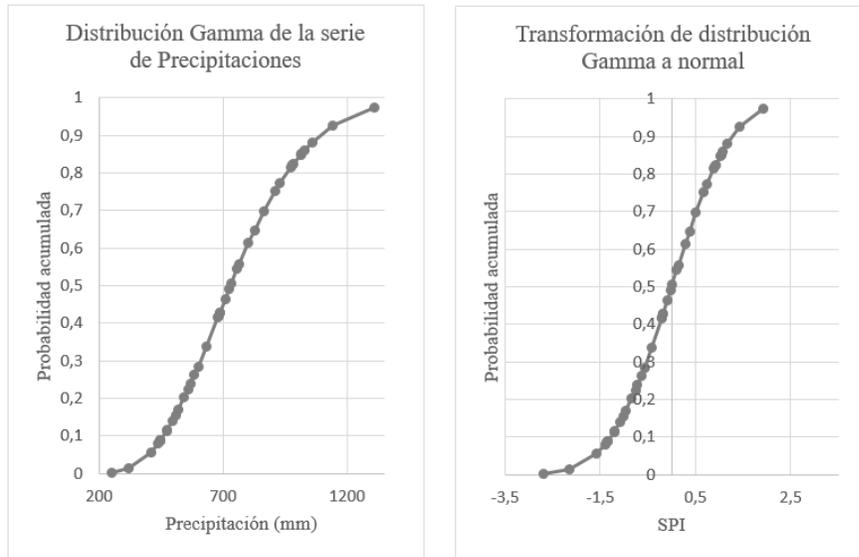


Figura 5.15: Distribución gamma de precipitaciones para la Cuenca Nilahue, transformada en una distribución normal estandarizada. Valores de SPI. Elaboración propia.

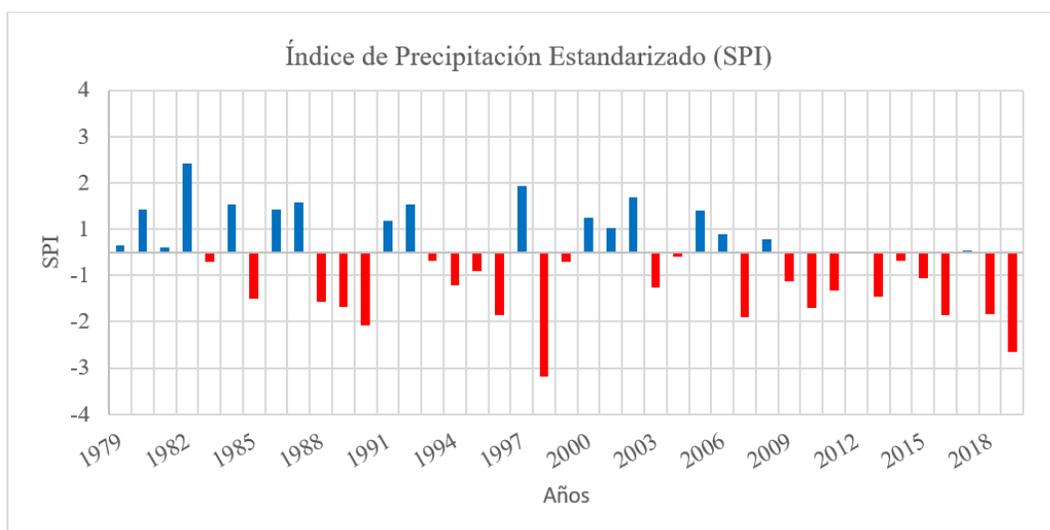


Figura 5.16: Transcurso del SPI anual para el periodo (1979-2019) en la Cuenca Nilahue. Elaboración propia.

Por otro lado, las cuencas Nilahue y Purapel muestran comportamientos bastante similares, con una condición más seca en comparación con la que se evidencia en la cuenca Puangue. En el caso de la Cuenca Nilahue un 14,6% de los años presenta algún grado de humedad, un 58,5% de los años son normales y un 26,8% corresponden a años con algún grado de sequía. La Cuenca Purapel presenta un 14,6% de los años con algún grado de humedad, al igual que Nilahue, presenta un 61% de los años son normales y un 24,3% son años con alguna condición de sequía. En las 3 cuencas, los años 1998 y 2019 son los que presentan una condición de sequía más extrema.

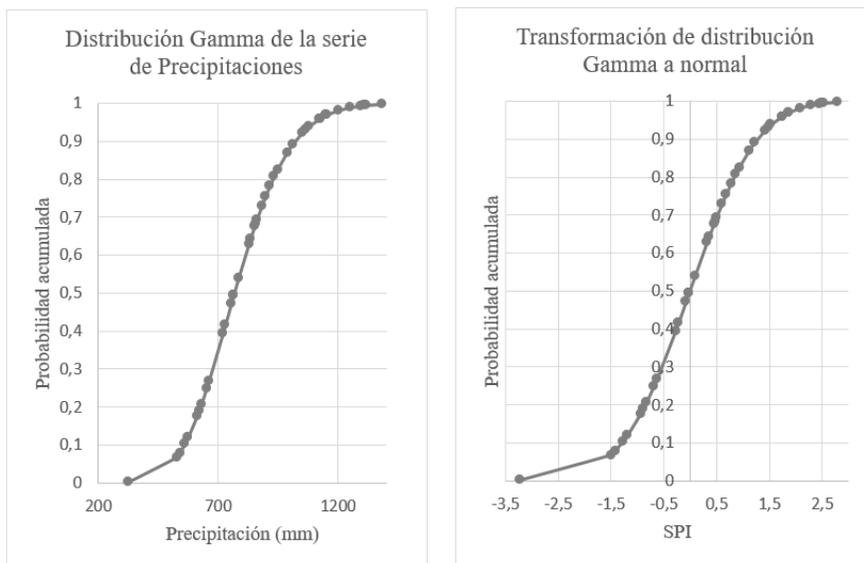


Figura 5.17: Distribución gamma de precipitaciones para la Cuenca Purapel, transformada en una distribución normal estandarizada. Valores de SPI. Elaboración propia.

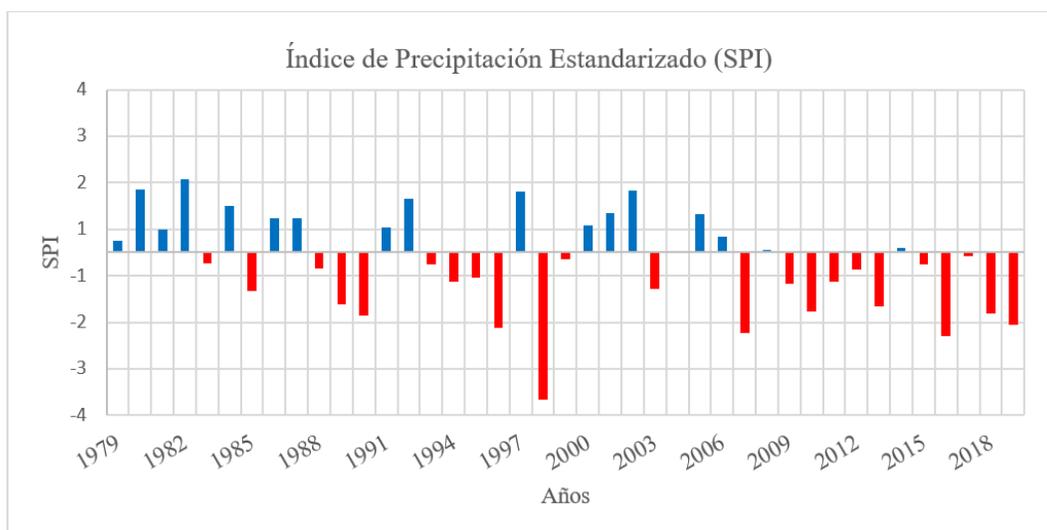


Figura 5.18: Transcurso del SPI anual para el periodo (1979-2019) en la Cuenca Purapel. Elaboración propia.

Tabla 5.3: Recopilación de los valores de SPI durante el período (1979 – 2019) de las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel. Los colores corresponden a la clasificación que aparece en la tabla 5.2. (Elaboración propia).

Años	SPI		
	Puangue	Nilahue	Purapel
1979	-0.71	0.14	0.26
1980	0.74	0.93	1.36
1981	-0.36	0.11	0.49
1982	1.7	1.92	1.57
1983	0.39	-0.22	-0.23
1984	1.28	1.04	1.01
1985	-1.35	-1.01	-0.84
1986	0.44	0.91	0.74
1987	1.74	1.08	0.74
1988	-1.34	-1.08	-0.34
1989	-0.37	-1.19	-1.11
1990	-1.15	-1.58	-1.36
1991	0.55	0.68	0.54
1992	0.71	1.03	1.16
1993	-0.42	-0.18	-0.26
1994	-0.68	-0.71	-0.64
1995	-0.96	-0.41	-0.55
1996	-0.99	-1.35	-1.62
1997	1.94	1.43	1.3
1998	-1.37	-2.7	-3.16
1999	-0.24	-0.2	-0.15
2000	0.99	0.75	0.58
2001	0.42	0.51	0.84
2002	1.17	1.18	1.33
2003	-0.76	-0.76	-0.79
2004	-0.19	-0.09	-0.01
2005	0.56	0.89	0.83
2006	0.08	0.38	0.34
2007	-0.91	-1.39	-1.74
2008	0.23	0.29	0.05
2009	-0.71	-0.64	-0.68
2010	-0.64	-1.21	-1.27
2011	-1.03	-0.83	-0.63
2012	-0.1	-0.02	-0.37
2013	-1.36	-0.96	-1.16
2014	-0.7	-0.18	0.11
2015	-0.29	-0.57	-0.25
2016	0.31	-1.36	-1.8
2017	-0.09	0.01	-0.09
2018	-0.61	-1.34	-1.31
2019	-1.87	-2.15	-1.55

5.4. Influencia del ENOS en las anomalía de precipitaciones

El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno natural caracterizado por la fluctuación de las temperaturas del océano en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera (OMM, 2014). Este fenómeno tiene una gran influencia en las condiciones climáticas de diversas partes del mundo, como por ejemplo en las precipitaciones que ocurren en la zona central de Chile. El Niño y La Niña son los componentes oceánicos, el primero se caracteriza por una menor intensidad del anticiclón subtropical, lo que genera una mayor temperatura del Pacífico Ecuatorial, y en consecuencia mayores precipitaciones en la zona central de Chile. Caso contrario sucede con La Niña, donde la intensidad del anticiclón es mayor. Ambos componentes junto con la Oscilación del Sur, que es el componente atmosférico, dan origen al término El Niño/Oscilación del Sur (Smith, Kessler, Hill, y Carlson, 2015). El ENOS además de La Niña y El Niño, presenta una componente neutra.

Con el objetivo de analizar la influencia del ENOS en las condiciones de humedad/sequía del periodo de estudio, se realizó un gráfico de dispersión entre el SPI y el promedio invernal del índice de Niño Oceánico (ONI). El índice ONI clasifica los eventos del Niño y la Niña considerando un umbral de $\pm 0,5$ °C de la media invernal. Los valores del ONI fueron obtenidos de la página del NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica), la cual entrega valores mensuales de dicho índice. Estos valores fueron promediados sobre los meses de mayo a septiembre, periodo en el cual se concentran las precipitaciones. Los gráficos de SPI en función del ONI se presentan en las figuras 5.19, 5.20 y 5.21.

A partir de los gráficos se puede observar que en las 3 cuencas existe una correspondencia entre los años que presentan mayores valores de SPI (condiciones más húmedas) con el evento del Niño. Sin embargo, para el periodo de megasequía (2010 – 2019), solo el año 2015 corresponde a un año con el fenómeno del Niño, y solo el 2011 es clasificado como Niña. Esto sugiere que ENOS tuvo poca influencia en el déficit de lluvias en el centro de Chile durante el período de megasequía. La mayoría de los años de megasequía son principalmente condiciones de ENSO neutrales.

Según Garreaud et al. (2020), la extensión espacial y temporal de la megasequía se debe principalmente a la prevalencia de un dipolo de circulación que dificulta el paso de tormentas extratropicales sobre el centro de Chile, caracterizado por anomalías anticiclónicas troposféricas profundas sobre el Pacífico subtropical y anomalías ciclónicas sobre el mar de Amundsen-Bellingshausen. A su vez, los autores sugieren que existen factores antropogénicos que contribuyen a la fuerza del dipolo del Pacífico sur, y en efecto a la intensidad y longevidad de la megasequía, dichos factores serían el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero y el agotamiento de ozono estratosférico.

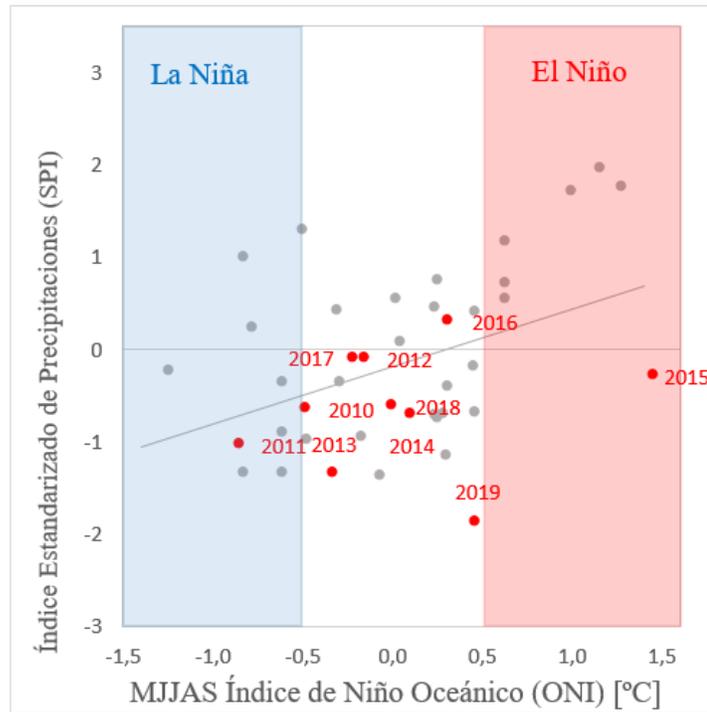


Figura 5.19: Gráfico de dispersión entre el promedio invernal (MJJAS) del índice de Niño Oceánico 3.4 (ONI) y el índice estandarizado de precipitaciones (SPI). Datos 1979 – 2019, Cuenca Puangue. Elaboración propia, inspirado en Garreaud et al. (2020).

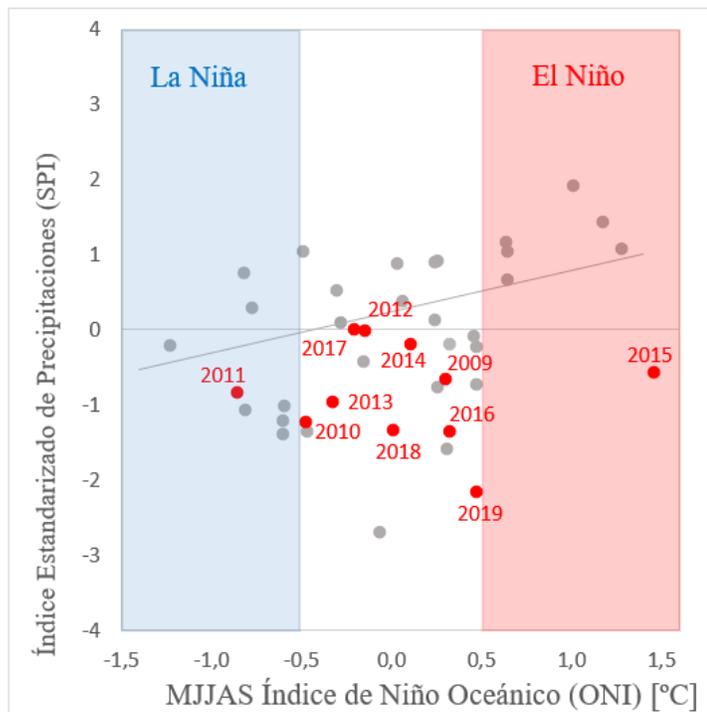


Figura 5.20: Gráfico de dispersión entre el promedio invernal (MJJAS) del índice de Niño Oceánico 3.4 (ONI) y el índice estandarizado de precipitaciones (SPI). Datos 1979 – 2019, Cuenca Nilahue. Elaboración propia, inspirado en Garreaud et al. (2020).

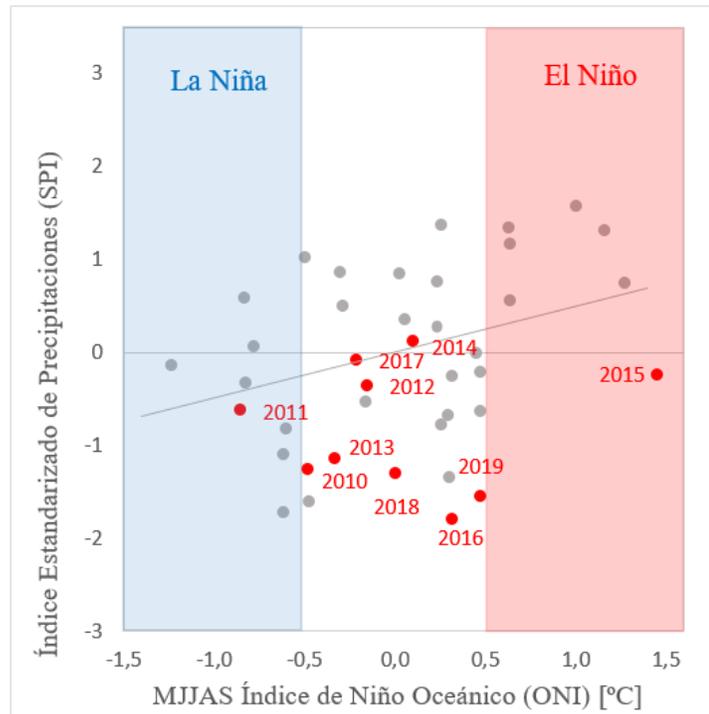


Figura 5.21: Gráfico de dispersión entre el promedio invernral (MJJAS) del índice de Niño Oceánico 3.4 (ONI) y el índice estandarizado de precipitaciones (SPI). Datos 1979 – 2019, Cuenca Purapel. Elaboración propia, inspirado en Garreaud et al. (2020).

Capítulo 6

Marco Geológico e Hidrogeológico

A escala regional, la geología comprendida entre los 33°S y los 36°S se caracteriza por presentar una alineación aproximadamente norte-sur de las unidades litológicas, situándose paralelas al margen de subducción. En la Cordillera de la Costa existen rocas metamórficas que constituyeron al prisma de acreción del Devónico-Carbonífero, también rocas plutónicas del Carbonífero-Triásico que conforman el Batolito Costero de Chile Central, que corresponde al arco magmático del Paleozoico.

Para las cuencas Nilahue y Purapel el marco geológico se obtuvo principalmente del Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003), ya que no existe información de mayor detalle. En el caso de la Cuenca Puangue, las unidades geológicas se adquirieron de las cartas geológicas escala 1:100.000 del área de Valparaíso-Curacaví (Gana, Wall, y Gutiérrez, 1996) y área Til Til – Santiago (Wall, Sellés, y Gana, 1999). Las estructuras de las 3 cuencas se obtuvieron del mapa 1:1.000.000 del Sernageomin.

6.1. Geología Cuenca Puangue

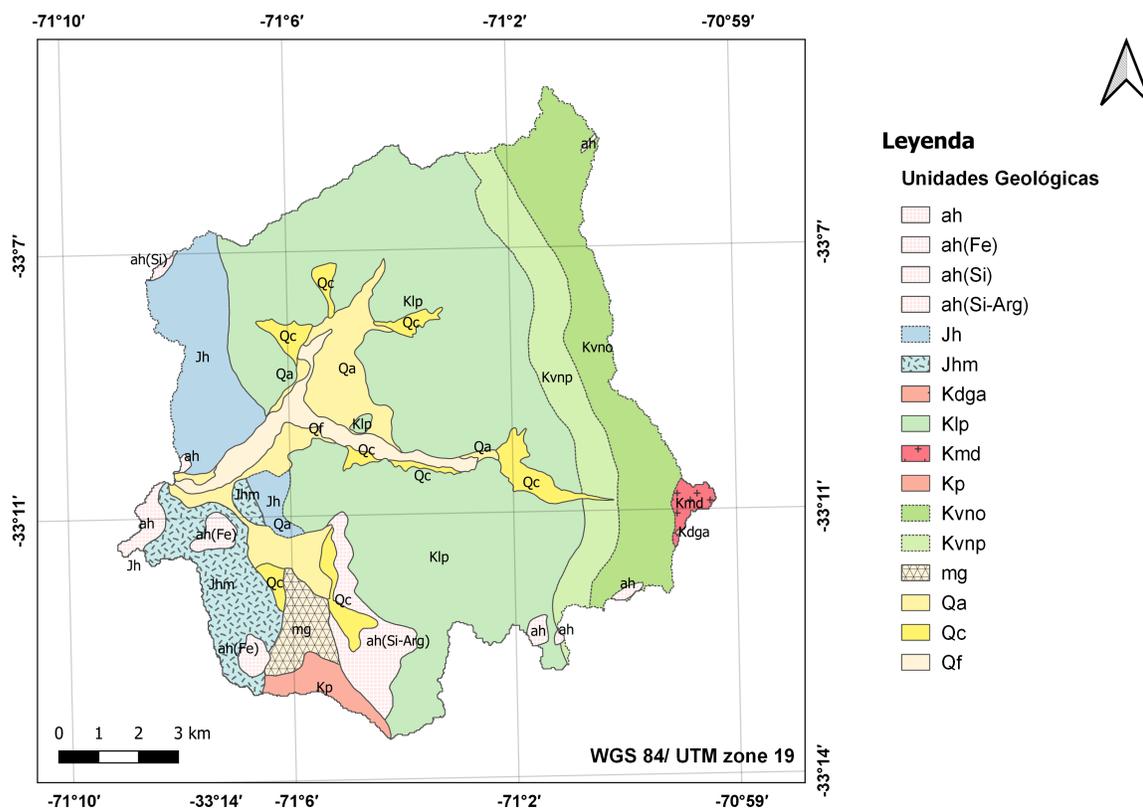


Figura 6.1: Mapa geológico correspondiente a la cuenca Puangue. Elaboración propia, construido a partir de las cartas geológicas escala 1:100.000 del área de Valparaíso-Curacaví (Gana, Wall, y Gutiérrez, 1996) y área Til Til – Santiago (Wall, Sellés, y Gana, 1999).

A continuación, se presenta la leyenda ampliada adaptada a la zona de estudio. Esta información se obtuvo de las cartas geológicas con las que se realizó el mapa

6.1.1. Rocas Estratificadas

6.1.1.1. Jh. Formación Horqueta (Batoniano-Titoniano) (Piracés, 1976)

Esta secuencia es predominantemente volcánica con intercalaciones sedimentarias continentales. Está constituida por tobas, lavas andesíticas a riolíticas, areniscas y conglomerados volcanoclásticos de ambiente aluvial, alcanzando potencias estimadas de 2.500-3.000 m. Subyace en aparente concordancia a la Formación Lo Prado. La Formación Horqueta se encuentra intruida por granitoides jurásicos y cretácicos (Kp), los cuales han desarrollado zonas de metamorfismo, así mismo, se encuentran zonas que hospedan alteración hidrotermal. Esta unidad aflora como una franja de orientación norte-sur en la zona occidental de la cuenca Puangue y presenta una sub-unidad Jhm que se caracteriza por presentar metamorfismo de contacto.

6.1.1.2. Klp. Formación Lo Prado (Berriasiano - Hauteriviano) (Thomas, 1958; Piracés, 1976)

Corresponde a una unidad sedimentaria esencialmente marina, con intercalaciones volcánicas, constituida por calizas, lutitas y areniscas calcáreas fosilíferas, areniscas, brechas y conglomerados, lavas, lavas brechosas y tobas de composición andesítica a riolítica. Se dispone en aparente concordancia sobre rocas jurásicas de la Formación Horqueta; subyace concordantemente a la Formación Veta Negra. Hospeda zonas de alteración hidrotermal. Se sitúa en la zona central de la Cuenca Puangue como una franja con disposición norte-sur, es la unidad más extensa dentro del área.

6.1.1.3. Kvn. Formación Veta Negra (Barremiano? – Aptiano?) (Thomas, 1958)

Unidad volcánica andesítica con intercalaciones sedimentarias continentales, dispuesta concordantemente sobre la Formación Lo Prado. Está intruida por rocas plutónicas del Cretácico Superior (Kdgt, Kdg). La Formación Veta Negra subyace hacia el este, fuera del área del mapa, a la Formación Las Chilcas (Thomas, 1958).

La formación se subdivide en los miembros Purehue (inferior) y Ocoa (superior).

Kvnp (Miembro Purehue): secuencia volcánica andesítica con intercalaciones de tobas y andesitas ocoíticas, fangolitas, areniscas y conglomerados volcanoclásticos rojos de ambiente aluvial. Sobreyace concordantemente a la Formación Lo Prado, con una potencia máxima estimada de 900 m.

Kvno (Miembro Ocoa): Lavas andesíticas porfídicas con grandes fenocristales de plagioclasa (ocoítas), con intercalaciones de lavas andesíticas porfídicas y afaníticas y secuencias de areniscas y conglomerados volcanoclásticos de ambiente aluvial. Alcanza una potencia máxima de aproximadamente 2.100 m.

6.1.2. Rocas intrusivas

Las rocas intrusivas que afloran en la Cuenca Puangue se encuentran en el límite del Cretácico inferior y superior, con una edad de 118 y 91 Ma. Composicionalmente muestra una amplia variación, desde granodioritas a gabros, con pórfidos andesíticos subordinados (Gana et al., 1994).

6.1.2.1. Kdga

Granodiorita de anfíbola-biotita color gris medio rosáceo, grano fino, de textura inequi-granular seriada a porfídica. Presentan cristales de plagioclasa zonada con embahiamiento de cuarzo y bordes de ortoclasa micropertítica; anfíbola esquelética reemplazada parcialmente por biotita, acompañada de magnetita granular. Se presenta en el sector occidental de la Cuenca instruyendo a la formación Kvno.

6.1.2.2. Kmd

Dioritas cuarcíferas a monzonitas cuarcíferas de piroxeno, anfíbola y biotita monzogabros de piroxeno (51-60 % SiO₂). Son rocas de color gris oscuro a gris rosáceo, textura hipidiomórfica granular, grano medio a grueso. Para estas rocas se cuenta con edades K-Ar de 100±2 Ma (biotita), 92±3 Ma (plagioclasa) (Gallego, 1994) y 83±3 Ma (roca total, mínima). A esta facie se asocian pequeños cuerpos félsicos, porfídicos o aplíticos de composición variable entre monzodioritas cuarcíferas y sienogranitso.

6.1.2.3. Kp

Granodioritas de anfíbola-biotita, tonalitas y monzodioritas cuarcíferas subordinadas. Rocas de color gris medio a verdoso claro, de grano grueso a medio, con abundantes inclusiones dioríticas. Poseen 57-69 % de SiO₂, metaluminosas de tipo I. Presenta alteración epidota-silice-Fe-argílica cerca del contacto con estratos del Jurásico y Cretácico Inferior (formaciones Horqueta u Lo Prado) en el sector de Colliguay. Intruido por “stocks” gábricos asignados al Cretácico (Kdg) y por diques andesíticos y dioríticos. Edad K-Ar en biotita: 118 Ma (Corvalán y Munizaga, 1972).

6.1.3. Unidades no consolidadas

6.1.3.1. Qc. Depósitos coluviales (Holoceno)

Sedimentos no consolidados, ubicados en las cabeceras de las quebradas; comprenden principalmente depósitos gravitacionales correspondientes a flujos en masa, matriz-soportados, de muy mala selección granulométrica, que pueden incluir desde bloques hasta arcillas, interdigitados con lentes de arenas y gravas generados por pequeños cursos de agua, permanentes o esporádicos.

6.1.3.2. Qa. Depósitos aluviales (Holoceno)

Sedimentos no consolidados, ubicados en zonas de llanura; comprenden principalmente depósitos fluviales con depósitos gravitacionales interdigitados (flujos de barro, flujos de detritos), compuestos por gravas, arenas y limos.

6.1.3.3. Qf. Depósitos fluviales (Holoceno)

Sedimentos no consolidados de cursos fluviales activos. Predominan facies de relleno de canal con base erosiva, constituidas por gravas clastosoportadas, compuestas por bolones redondeados a bien redondeados de baja esfericidad, en parte imbricados; lentes de arenas con estratificación plana-horizontal y cruzada y escasos limos finamente laminados.

6.2. Geología Cuenca Nilahue

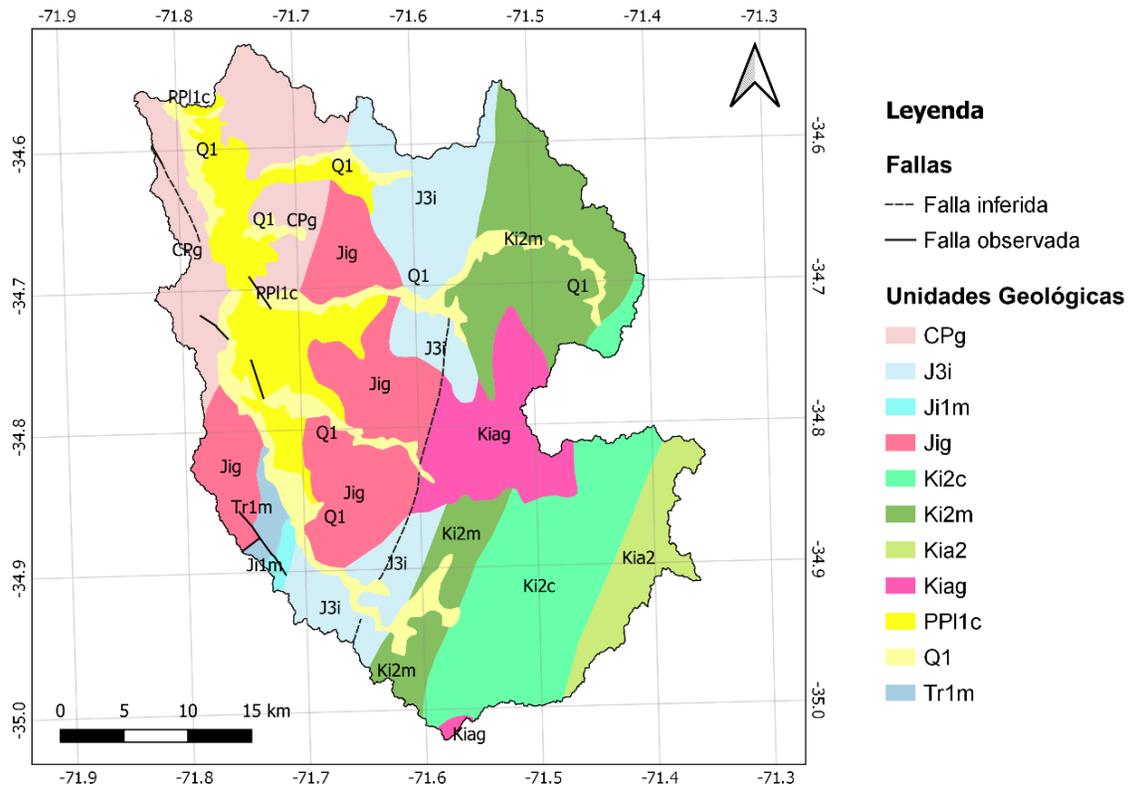


Figura 6.2: Mapa geológico correspondiente a la Cuenca Nilahue. Elaboración propia a partir del Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 del Sernageomin.

La geología de la cuenca está caracterizada por franjas de rocas estratificadas de orientación noreste-suroeste, principalmente de origen volcánico y marino, las cuales son más jóvenes en el sector oriental. Se presentan intrusivos que cortan dichas secuencias sedimentarias, y depósitos no consolidados que se ubican aledaños a la red de drenaje.

6.2.1. Rocas Estratificadas

6.2.1.1. Tr1m. Secuencias sedimentarias marinas y transicionales (Triásico Superior)

Esta unidad aflora en la zona sur-oeste de la cuenca, corresponde a areniscas, conglomerados, limolitas y calizas, que se encuentran en contacto por falla con intrusivos paleozoicos (CPg) y jurásicos (Jig), también se encuentra en contacto con secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma del Jurásico Inferior-Medio (Ji1m).

6.2.1.2. Ji1m. Secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma (Jurásico Inferior-Medio)

Esta secuencia aflora en la parte suroccidental de la cuenca, corresponde a calizas, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas; basaltos almohadillados.

6.2.1.3. J3i. Secuencias volcánicas continentales y marinas (Jurásico)

Esta secuencia se ubica en la zona central de la cuenca, se presenta interrumpida por intrusivos Jurásicos (Jig). Está constituida por lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.

6.2.1.4. Ki2m. Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas (Cretácico Inferior, Neocomiano)

Corresponde a la formación Lo Prado, está constituida por lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas. Se ubica en la zona centro-oriental de la cuenca y está intruida por rocas del cretácico inferior-superior (Kiag).

6.2.1.5. Ki2c. Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas (Cretácico Inferior-Cretácico Superior).

Está constituida por brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoítas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fósil; localmente calizas fosilíferas marinas en la base.

6.2.1.6. Kia2. Secuencias sedimentarias y volcánicas (Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo)

Corresponde a rocas epiclásticas, piroclástica y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas.

6.2.2. Rocas Intrusivas

Rocas plutónicas e hipoabisales que se distribuyen en una franja alargada constituyendo el esqueleto de la Cordillera de la Costa desde los 33° hasta los 38°S.

6.2.2.1. CPg. Batolito de la Costa (Carbonífero-Pérmico) (González-Bonorino, 1970; Hervé, 1976)

Se distribuyen en la zona occidental de la cuenca como una franja continua de dirección general NNE-SSO. Está conformado por un complejo plutónico cuya composición petrográ-

fica varía entre tonalita y granodiorita, con sectores menos extensos de diorita cuarcífera y granito. Este complejo plutónico fue definido por González-Bonorino, 1970; Hervé et al. 1976, como el Batolito de la Costa. Tiene una relación de contacto intrusivo con las rocas del basamento metamórfico e infrayace, con discordancia de erosión, a las series sedimentarias y sedimentario-volcánicas del Triásico. Representa el arco magmático del Paleozoico Superior.

6.2.2.2. Jig. Jurásico Inferior (202-178 Ma)

Se ubica en la zona central de la cuenca, son dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.

6.2.2.3. Kiag. Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (123-85 Ma)

Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita.

6.2.3. Unidades no consolidadas

6.2.3.1. PP11c Depósitos aluviales, lacustres y eólicos (Plioceno-Pleistoceno)

Conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas, generalmente consolidados. En la zona de Chile central, son niveles aterrazados adosados al sustrato de la zona costera.

6.2.3.2. Q1. (Pleistoceno-Holoceno)

Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvio-glaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.

6.3. Geología Cuenca Purapel

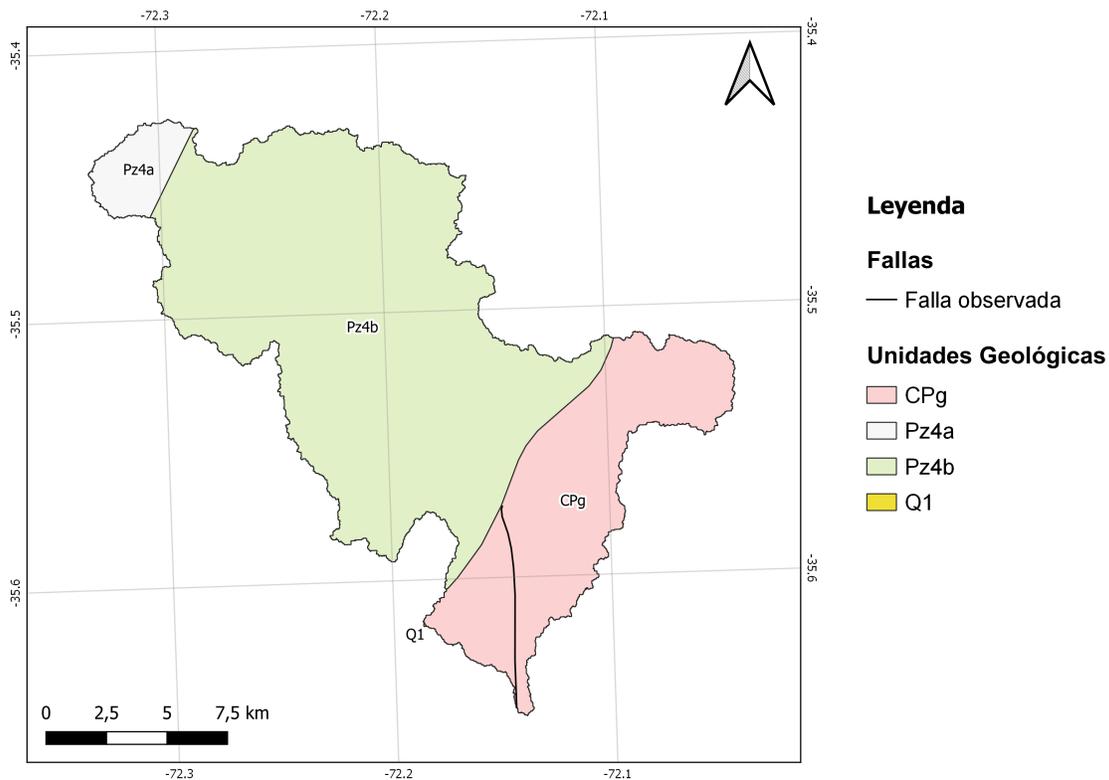


Figura 6.3: Mapa geológico correspondiente a la Cuenca Purapel. Elaboración propia a partir del Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 del Sernageomin.

6.3.1. Rocas Intrusivas

6.3.1.1. CPg Batolito de la Costa (Carbonífero-Pérmico) (González-Bonorino, 1970; Hervé, 1976)

Aflora en el sector oriental de la cuenca, está constituido por granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita.

6.3.2. Rocas metamórficas

Son el basamento del sector costero, corresponden a prismas de acreción del Paleozoico

6.3.2.1. Pz4a Silúrico?- Carbonífero

Esquistos muscovíticos y metabasitas, metachert y serpentinitas con metamorfismo de alto gradiente P/T (Serie Occidental) y metamorfismo del Carbonífero temprano.

6.3.2.2. Pz4b Silúrico? - Carbonífero.

Pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T (Serie Oriental) del Carbonífero temprano. En la Cordillera de la Costa, regiones VI a IX.

6.3.3. Unidades no consolidadas

6.3.3.1. Q1 Pleistoceno-Holoceno

Aparece en un acotado sector de la cuenca, casi imperceptible en el mapa de la Figura x, Corresponde a depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciares, deltaicos, litorales o indiferenciados.

6.4. Hidrogeología

6.4.1. Acuífero

Debido al contexto estructural y litológico que da a lugar en las cuencas de estudio, los acuíferos que se originan en ellas son del tipo fracturado. Sin embargo, existe poca información sobre el funcionamiento y en especial sobre la distribución de este tipo de acuíferos. En los capítulos siguientes se detalla la información recopilada, que en su mayoría es sobre las características de los acuíferos freáticos de las cuencas, los cuales están asociados a lechos del río, correspondiente a depósitos no consolidados. En los siguientes capítulos se adjuntan los mapas de delimitación del acuífero freático para la cuenca Puangue, Nilahue y Purapel, la porción de las cuencas que no corresponden a un acuífero freático, representan los acuíferos fracturados.

6.4.1.1. Cuenca Puangue

El acuífero de la cuenca Puangue está asociado a los depósitos no consolidados. Desde el punto de vista de la geomorfología del relleno sedimentario, el acuífero de este sector está asociado a depósitos fluviales actuales y antiguos aterrazados, además de depósitos coluviales y conos de deyección. (D. d. A. d. R. H. Dirección General de Aguas, 2002).

En el informe sobre los recursos hídricos subterráneos del Valle del Estero Puangue realizado por la DGA el año 2006, se establece que la mayoría de los pozos del Puangue Superior, sector en el que se encuentra la cuenca Puangue que se define en este estudio, se verifica la presencia de un acuífero de importancia dentro de los primeros 20 metros de profundidad. Estos sedimentos conforman estratos de espesor variable que varían entre los primeros 20m de profundidad como máximo. Los materiales del estrato lo constituyen bolones, grava y arenas de variada granulometría, posibilitando la existencia de napas libres y semiconfinadas (D. D. E. Y. P. Dirección General de Aguas, 2006).

En la figura 6.4 se detalla la delimitación del acuífero que corresponde a las unidades no consolidadas descritas en la geología de la cuenca. En superficie se delimitó por la extensión

en planta del relleno sedimentario, siguiendo la distribución de las unidades geológicas y de los rellenos más actuales (cuaternario). En profundidad el acuífero queda delimitado por la profundidad del basamento, pero en este trabajo no se cuenta con dicha información.

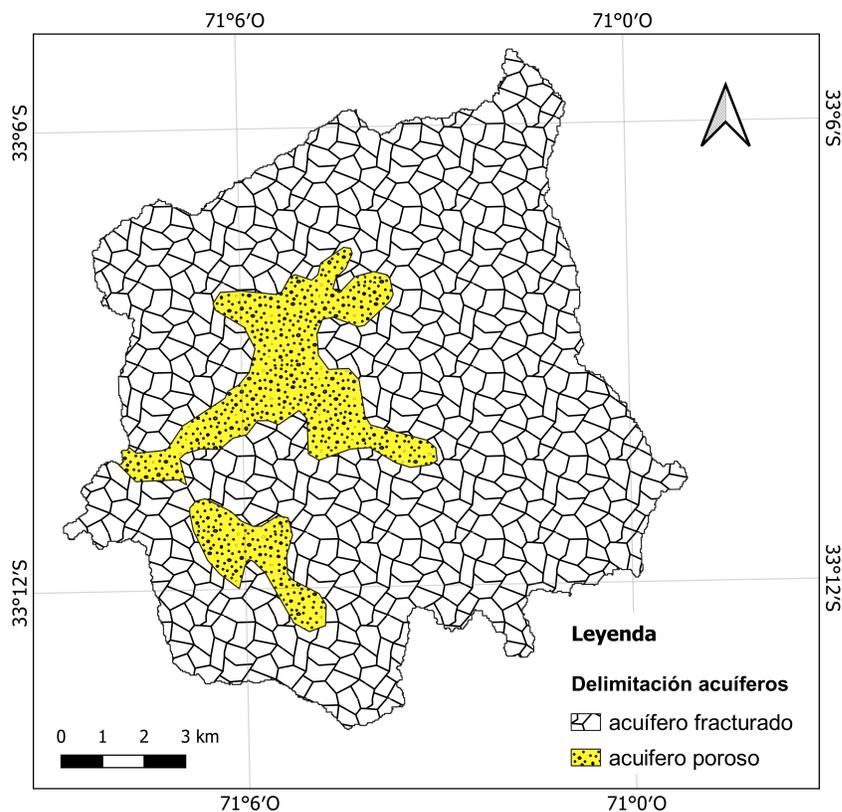


Figura 6.4: Delimitación del acuífero de la Cuenca Puangue. Elaboración propia, realizada a partir de la información recopilada de los informes de la DGA, año 2002 y 2006.

6.4.1.2. Cuenca Nilahue

En el informe “Diagnóstico de la red de aguas subterráneas Región Libertador Bernardo O´Higgins”, realizado por la DGA el año 2011, se especificó que el acuífero Nilahue está constituido por depósitos fluviales actuales del estero Nilahue y sus afluentes, junto con depósitos fluviales de valles interserranos, los que conforman un acuífero de carácter libre.

El año 2013, en el informe que lleva por nombre “Levantamiento Hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador General Bernardo O´Higgins y Región del Bío Bío” la DGA detalló que el acuífero de la Cuenca Nilahue es de tipo detrítico y comportamiento confinado, esto último contradice lo dicho el año 2011.

En la figura 6.5 se presenta la delimitación superficial estimada del acuífero Nilahue, la cual se realizó agrupando aquellas unidades geológicas que fueron definidas como unidades no consolidadas.

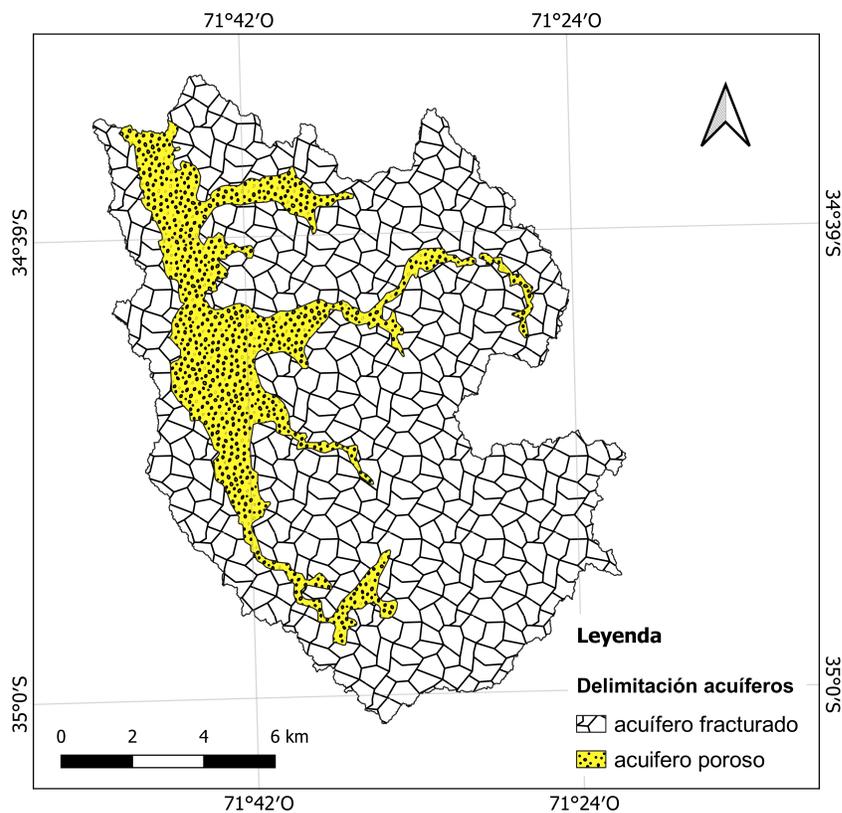


Figura 6.5: Delimitación del acuífero de la Cuenca Nilahue. Elaboración propia, realizada a partir de la información recopilada de los informes de la DGA, año 2011 y 2013.

6.4.1.3. Cuenca Purapel

En la memoria de título “Modelación de caudales recesivos para la cuenca del Río Purapel, estación Nirivilo” describen la granulometría de la superficie de la cuenca Purapel como media a fina, esto como consecuencia de la presencia de roca impermeable muy cerca de la superficie. Sugieren que es muy posible que se encuentren acuíferos compuesto de arena y grava en las zonas bajas del valle, entre los flancos. Basándose en el informe realizado por la DGA en 1986, establecen que la permeabilidad de la cuenca es de baja a ausente provocando que las aguas subterráneas sean muy bajas o ausentes.

En el estudio llamado “Modelación Hidrogeológica de la cuenca del Río Cauquenes, Región del Maule”, realizado por la DGA el año 2013, tras el procesamiento de antecedentes geológicos, delimitaron la geometría del acuífero en superficie, como el área de la unidad litológica correspondiente al relleno sedimentario.

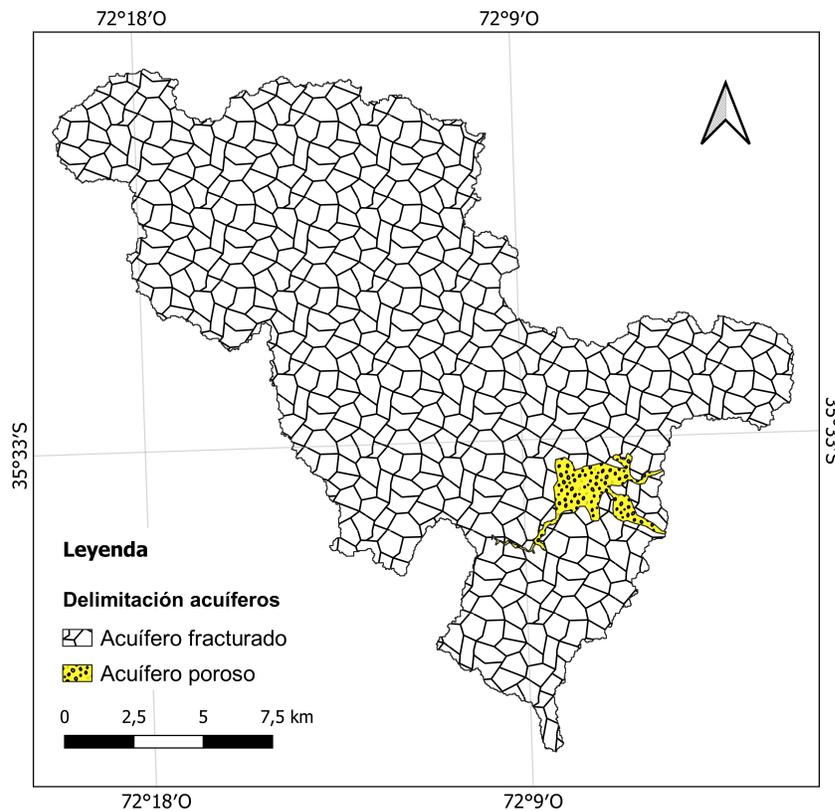


Figura 6.6: Delimitación del acuífero de la Cuenca Purapel. Modificado del informe “Modelación Hidrogeológica de la Cuenca Río Cauquenes, Región del Maule”, realizado por la DGA el año 2013.

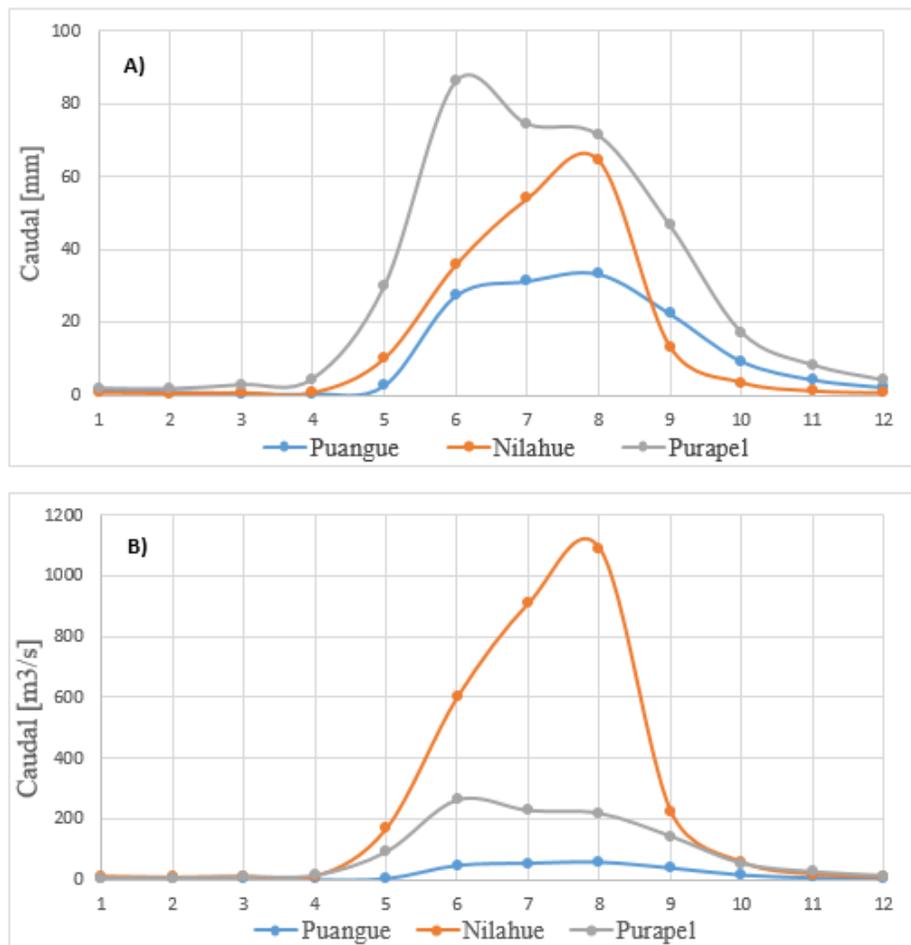
6.4.2. Red Hidrométrica

El explorador climático del Centro de Clima y resiliencia cuenta con la información integrada por cuenca de caudales diarios y mensuales. Con los caudales mensuales de los años seleccionados dentro del periodo de estudio, se calculó el caudal medio mensual de cada cuenca, dichos valores se presentan en la tabla 6.1. Los caudales medios mensuales reflejan el comportamiento pluvial, con caudales mayores entre mayo y septiembre, producto del invierno lluvioso que caracteriza a las cuencas. Destacan los meses de invierno (junio, julio y agosto), con caudales que se encuentran muy por sobre la media.

En la figura 6.7 aparecen graficados los valores de caudales medios mensuales para las 3 cuencas. En la figura A) se presentan los caudales en unidades de milímetros, es posible percatarse que los caudales son mayores de norte a sur, es decir, aumentan de Puangue a Purapel. Esto como resultado de que las precipitaciones aumentan hacia el sur. En la figura B) se presenta el caudal en unidades de m^3/s , es decir, muestra el volumen del caudal en cada cuenca. A partir de esto se observa que la cuenca Nilahue es la que presenta un mayor volumen de agua, esto debido a que abarca una área considerablemente más grande que las otras 2 cuencas, siendo casi 10 veces más grande que Puangue y 6 que Purapel.

Tabla 6.1: Caudales medios mensuales de las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel. Elaborado a partir de los datos del CR².

Caudales medios mensuales [mm]			
Mes	Cuenca Puangue	Cuenca Nilahue	Cuenca Purapel
Enero	1.39	0.61	1.75
Febrero	0.98	0.43	1.60
Marzo	0.41	0.58	2.74
Abril	0.33	0.52	4.38
Mayo	2.56	9.98	29.87
Junio	27.32	35.71	86.21
Julio	31.37	54.05	74.53
Agosto	33.35	64.67	71.44
Septiembre	22.36	13.25	46.54
Octubre	9.27	3.42	17.11
Noviembre	4.18	1.06	8.15
Diciembre	2.04	0.53	3.96

**Figura 6.7:** Caudales medios mensuales de las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel.

Los valores anuales de caudales para los años que cuentan con el registro completo, se presentan en la figuras 6.8, 6.9 y 6.10, que corresponden a Puangue, Nilahue y Purapel respectivamente. Al no contar con el registro completo de caudales para el periodo de estudio, se dificulta el análisis de tendencias a través de las décadas. Sin embargo, se observa que las 3 cuencas muestran valores interanuales con una alta variabilidad y que los caudales aumentan hacia el sur. A su vez, destaca el año 1990 por sus bajos valores, y algunos de los años que destacan por caudales altos son 1997, 1986, 2002.

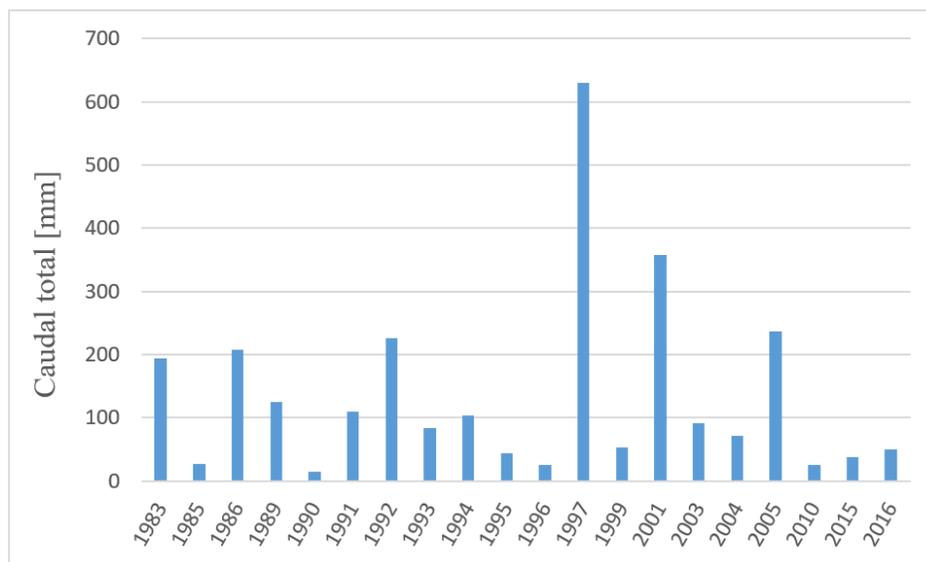


Figura 6.8: Caudales anuales de la cuenca Puangue.

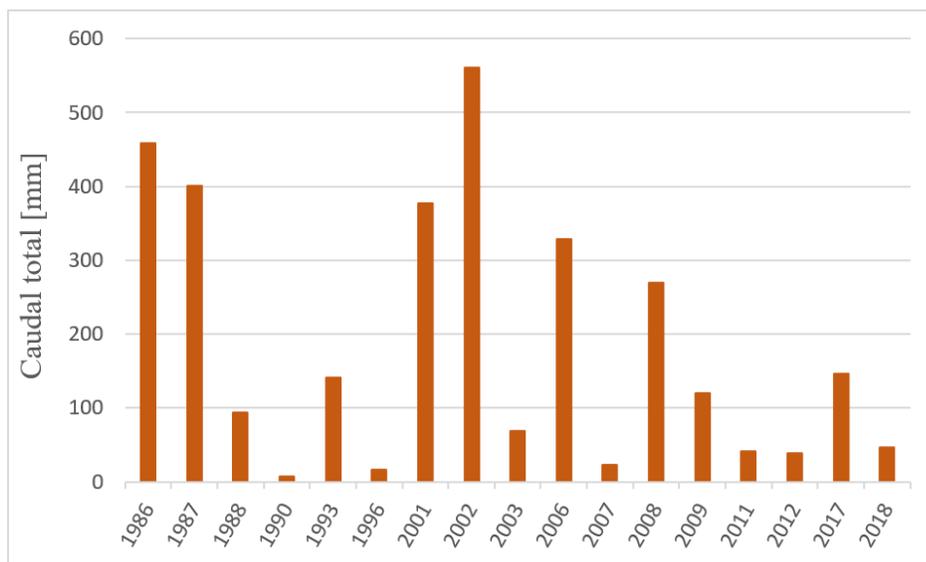


Figura 6.9: Caudales anuales de la cuenca Nilahue.

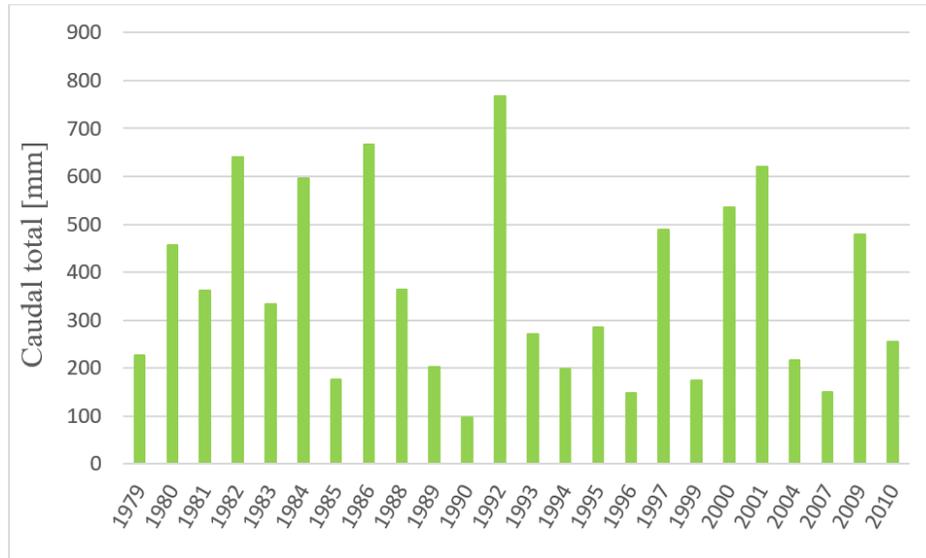


Figura 6.10: Caudales anuales de la cuenca Purapel.

Capítulo 7

Metodología

Los datos utilizados para este estudio se obtuvieron de la base de datos CAMELS-CL perteneciente al centro de clima y resiliencia (CR²). Esta base de datos cuenta con la información integrada a escala de cuenca de 531 cuencas a lo largo de Chile. En este estudio se utilizó la información diaria de precipitación (mm), temperatura (°C), evapotranspiración potencial (ETP) (estimada con la fórmula de Hargreaves) y caudal (mm/día). Esta información se obtuvo para las 3 cuencas durante el período 1979-2019.

7.1. Selección periodos de estudios

Las series de precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura se encuentran completas para el periodo de estudio (1979 - 2019), sin embargo, las series de caudales diarios contienen vacíos dentro de su registro. Para la aplicación del filtro de Eckhardt que separa el caudal total en sus 2 componentes, se utilizaron aquellos años que cuentan con más de un 90 % de la información, esto se traduce en más de 328 días con valores de caudales.

El fundamento de esta selección se debe a que el filtro es de tipo recursivo y se aplica a escala diaria, por lo tanto, si existen lapsos sin información estos deben ser rellenados y un sobre-relleno puede causar resultados que no representan en el comportamiento de la cuenca.

Utilizando este criterio, en la Cuenca Puangue se seleccionaron 20 años de los 41 que contiene el periodo de estudio, en la Cuenca Nilahue se seleccionaron 17 y en la Cuenca Purapel 23. El resumen de años seleccionados para cada cuenca se presenta en la tabla siguiente (tabla 7.1). En anexos, las tablas 11.1, 11.2 y 11.3 muestran la información completa de la cantidad de días que se contaban con información para cada año.

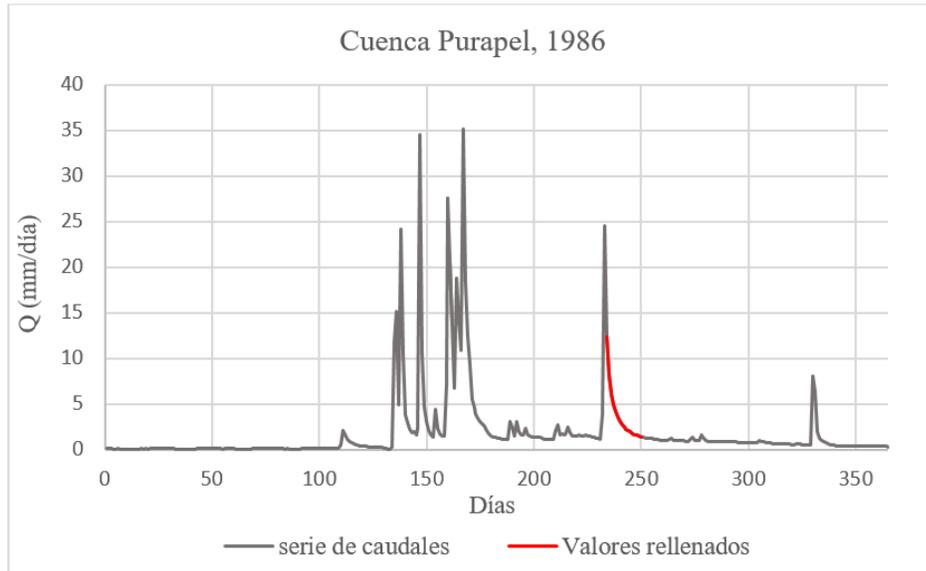
Tabla 7.1: Selección periodos de estudio para las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel.

Cuenca Puangue	Cuenca Nilahue	Cuenca Purapel
1983	1986	1979
1985	1987	1980
1986	1988	1981
1989	1990	1982
1990	1993	1983
1991	1996	1984
1992	2001	1985
1993	2002	1986
1994	2003	1988
1995	2006	1989
1996	2007	1990
1997	2008	1992
1999	2009	1993
2001	2011	1994
2003	2012	1995
2004	2017	1996
2005	2018	1997
2010		1999
2015		2000
2016		2001
		2004
		2007
		2009
		2010

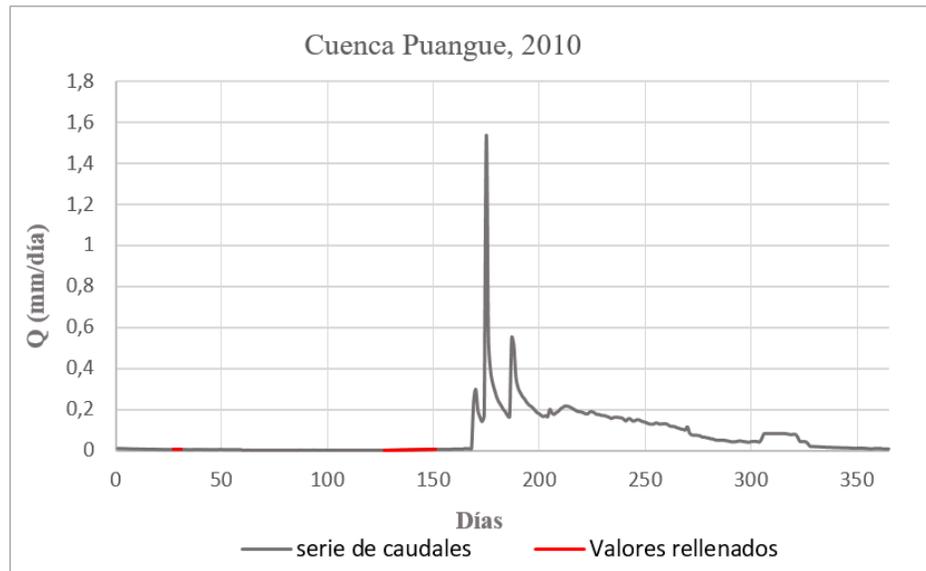
7.2. Relleno de series de caudales

Las series de caudales de los años que fueron seleccionados y que no cuentan con toda la información son rellenadas. Este relleno se realiza analizando de manera individual cada periodo sin información y aplicando un ajuste lineal o exponencial según cuando corresponda. Por ejemplo, aquellos lapsos sin información que se ubican en curvas de recesión, se les aplica un ajuste exponencial el cual representa de manera más ajustada el comportamiento hidrológico, de lo contrario, se utiliza un ajuste lineal.

Para ejemplificar lo anterior, a continuación, se presentan los hidrogramas de algunas series rellenadas con ajuste exponencial 7.1.a y con ajuste lineal 7.1.b.



(a) Relleno del hidrograma de la cuenca Purapel año 1986 utilizando ajuste exponencial.



(b) Relleno del hidrograma de la cuenca Puangue año 2010, utilizando ajuste lineal.

Figura 7.1: Relleno serie de caudales

7.3. Curvas de duración de caudales

Las curvas de duración de caudales (CDC) son utilizadas para caracterizar el régimen de descarga de caudales a largo plazo de una corriente natural. Se pueden definir como una curva de frecuencia acumulada, que muestra el porcentaje de tiempo que es probable que un caudal sea igualado o excedido en función de un valor en específico (Smakhtin, 2001). En otras palabras, es la relación entre la magnitud y la frecuencia de las descargas de caudales.

La forma de las CDC da cuenta de las condiciones hidrogeológicas de la cuenca. Se han estimado varios índices que reflejan el comportamiento del flujo base. Por ejemplo, el índice Q_{20}/Q_{90} se interpreta como una medida de la variabilidad del caudal (Arihood y Glatfelter, 1991), el índice Q_{90}/Q_{50} es representativo de la proporción del caudal base al caudal total. (Smakhtin, 2001).

Una CDC se puede construir a partir de resoluciones de tiempo de datos de caudales: anuales, mensuales y diarias. Para este trabajo se utilizó la escala diaria, la cual proporciona una forma más detallada para examinar las características de duración de un río (Smakhtin, V, 2000).

Para la construcción de la CDC de las cuencas en estudio, se procedió a ordenar las series temporales de caudales en forma decreciente según su magnitud. Se utilizó la información diaria de todos los años de estudio (1979-2019) incluyendo los valores rellenados con el ajuste lineal y exponencial. A cada valor del caudal se le asignó un número de orden (n^o) que va de 1 a N, con N correspondiente al número total de datos. Posteriormente se calculó la probabilidad de excedencia de la cuenca, la cual se expresa por:

$$P_r = 100 * \frac{n}{N + 1} \quad (7.1)$$

Finalmente, se grafican los caudales en función de su probabilidad de excedencia. La forma más conveniente de construir la CDC es utilizando la gráfica logarítmica, ya que permite en algunos casos que las curvas se linealicen y que los flujos altos y bajos de los extremos de las curvas se muestren con mayor claridad. (que podía mostrar estos extremos?).

7.3.1. Estimación del índice $BFI_{m\acute{a}x}$

El $BFI_{m\acute{a}x}$ es uno de los parámetros que utiliza el filtro de Eckhardt (2005), se refiere al máximo valor del índice de flujo base, el cual relaciona el flujo base con el caudal total a largo plazo. No hay una forma objetiva de definir $BFI_{m\acute{a}x}$, sin embargo, normalmente se espera que $BFI_{m\acute{a}x}$ pueda ser influenciado en gran medida por la geología de la cuenca (Bloomfield, Allen, y Griffiths, 2009). Según las características de la corriente y el acuífero, Eckhardt (2005) propone 3 valores para el $BFI_{m\acute{a}x}$, para corrientes perenne y acuíferos porosos 0.8, para corrientes efímeras y acuíferos porosos 0.5 y para corrientes perenne y roca dura 0.25.

Al-Faraj y Scholz (2014) Y Gordon, McMahon, Finlayson, Gippel, y Nathan (2004) propusieron que el $BFI_{m\acute{a}x}$ puede obtenerse del índice Q_{90}/Q_{50} que se extrae de la construcción de la CDC, el cual representa la proporción que contribuye el caudal base al caudal del río. En este trabajo se utilizó la relación propuesta por los autores, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$BFI_{m\acute{a}x} = Q_{90}/Q_{50} \quad (7.2)$$

Al aplicar la fórmula 7.2 en las series de caudales de las 3 cuencas en estudio, fue posible apreciar que el índice subestima la contribución del agua subterránea al caudal. Esto mismo

ha sido observado por otros autores, los cuales han sugerido ligeras correcciones a la fórmula. Collischonn y Fan (2013) propusieron una corrección para las estaciones donde realizaron su estudio, las cuales se ubican en el centro y sur de Brasil. Al mismo tiempo, plantearon que esta corrección puede extenderse a otras regiones de América del sur que incluso presenten un clima relativamente seco.

En este trabajo se utiliza la corrección realizada por Collischonn y Fan (2013) la cual se expresa de la siguiente manera:

$$BFI_{\text{máx}} = 0.8344 \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0.2146 \quad (7.3)$$

7.4. Análisis de curvas de recesión

El análisis de las curvas de recesión se utiliza ampliamente en la investigación hidrológica, la planificación y gestión de los recursos hídricos (Smakhtin, 2001). Aplicaciones comunes se dan en relación a la predicción de caudales bases, a la estimación de los recursos de agua subterránea en cuencas, para realizar modelos de precipitación y escorrentía y para el análisis hidrográfico (Sujono, Shikasho, y Hiramatsu, 2004). De estas curvas se extrajo el valor de la constante de recesión α , la cual es un parámetro del filtro Eckhardt 2005.

Las curvas de recesión se localizan en la parte específica del hidrograma que describe la disminución del flujo, esto quiere decir, que se ubican luego de eventos de precipitación e inician en los peak de los flujos de caudales (Berhail, Ouerdachi, y Boutaghane, 2012). La función matemática utilizada para describir la forma de estas curvas en condiciones de linealidad entre el almacenamiento y la descarga, es la función exponencial simple.

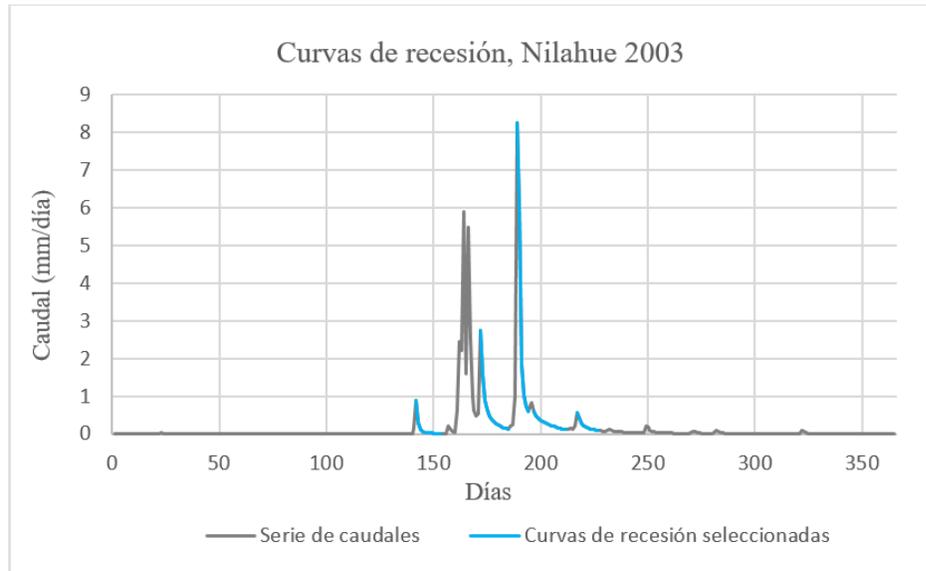
7.4.1. Selección de curvas de recesión

La selección de curvas de recesión se realizó manualmente, analizando de forma individual los hidrogramas de todos los años seleccionados con registro completo (capítulo 7.1) . Para cada cuenca se seleccionaron todas las curvas de recesión existentes, se limitó la duración de la curva a un máximo de 30 días.

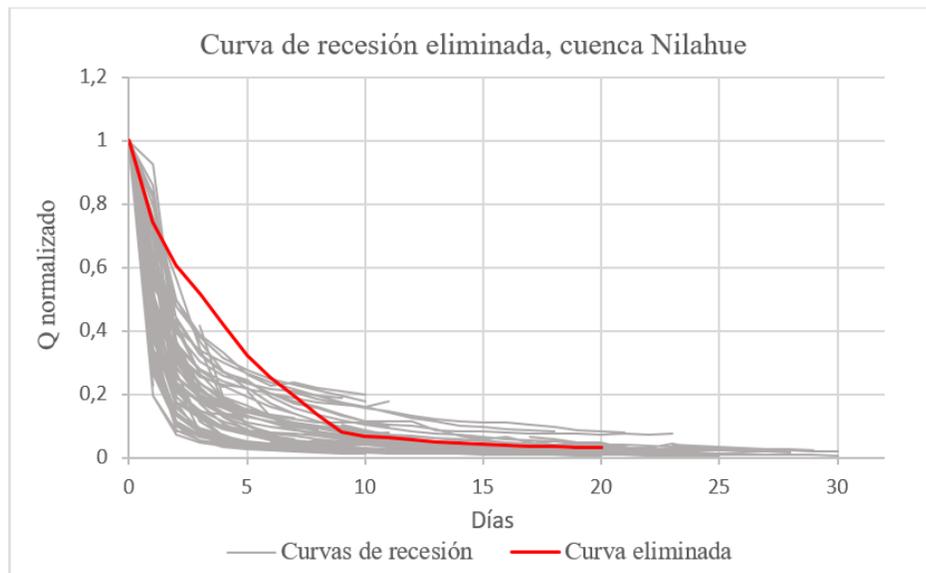
Las anomalías dentro de las curvas de recesión fueron eliminadas, debido a que podrían originar efectos erróneos en el análisis. A modo de ejemplo, en la figura 7.2.a muestra la selección de curvas de recesión de la cuenca Nilahue para el año 2003, la tercera curva de recesión es discontinua, debido a que presenta el tipo de anomalías que fueron eliminadas.

Luego de obtener la totalidad de curvas de recesión de las 3 cuenca, se procedió a realizar una segunda selección. Para esto se normalizó cada curva respecto a su valor de Q_0 , que corresponde al caudal en t_0 . Se superpusieron las curvas de recesiones normalizadas y aquellas que mostraban un comportamiento que difería contundentemente del comportamiento general, fueron eliminadas.

La figura 7.2.b , muestra gráficamente la superposición de las curvas de recesión normalizadas, pertenecientes a la cuenca Nilahue. La curva en rojo es una curva de recesión que no se consideró en el estudio, debido a que su comportamiento difiere del comportamiento general.



(a) Selección de curvas de recesión para el hidrograma del año 2003 de la cuenca de Nilahue.



(b) Las líneas grises corresponden a las curvas de recesión superpuestas. La curva roja representan el tipo de curva de recesión que no se consideró en el estudio.

Figura 7.2: Selección curvas de recesión

7.4.2. Curva de recesión maestra

La curva de recesión maestra (CRM) es una curva generalizada de recesiones del flujo en un río que ofrece una percepción de la capacidad y agotamiento del almacenamiento subterráneo (Gómez. S y Gómez. V, 2016). Representa una compilación de períodos de recesión individuales superpuestos (Posavec, Giacometti, Materazzi, y Birk, 2017). A partir del análisis de esta curva se puede extraer el valor de la constante de recesión α .

Existen diferentes métodos que permiten construir una curva de recesión maestra, Toebes y Morrissey (1969) han clasificados estos métodos de la siguiente manera:

- Medidas de caudal
- "Matching strip
- Correlación
- Tabulación

En este trabajo se utilizaron 3 métodos para obtener la CRM y en consecuencia el α buscado. Es fundamental dejar en claro que la construcción de la CRM no es trivial. La metodología de cada método se detalla a continuación

7.4.2.1. Metodología 1

Es una adaptación del método original Matching strip, propuesta por Posavec et al. (2017). Los autores utilizan las leyes trigonométricas para superponer segmentos de recesión individuales de series de tiempo.

El algoritmo que proponen traslada horizontalmente los sucesivos segmentos de recesión, colocando su vértice, es decir, el valor inicial y más alto de cada curva, en la línea de conexión apropiada, la cual es definida utilizando funciones trigonométricas sobre puntos de medición de un segmento de recesión anterior.

El primer paso que se debe realizar para lograr esta superposición, es ordenar de forma descendiente los caudales iniciales de cada curva individual de recesión, las curvas se van superponiendo en este mismo orden. Se inicia colocando la primera curva de recesión con su valor inicial en t_0 . El segundo segmento de recesión se traduce horizontalmente a la conexión adecuada, sumándole a la posición x inicial (t_0) la distancia de traslación (TD). La cual se calcula como:

$$TD = b - d \quad (7.4)$$

$$\text{Con } b = X_{1,2} - X_{1,1} \quad (7.5)$$

$$y \quad d = \frac{c}{\tan\alpha} = \frac{c}{a/b} = \frac{Y_{2,1} - Y_{1,2}}{(Y_{1,1} - Y_{1,2})/(X_{1,2} - X_{1,1})} \quad (7.6)$$

Donde $X_{1,1}$ - $X_{1,2}$ representan el tiempo relativo del primer y segundo punto de medición del segmento de recesión n°1. $Y_{1,1}$ e $Y_{1,2}$ representan los valores medidos de caudal del primer y segundo punto de medición del segmento de recesión n°1. En consecuencia, $Y_{2,1}$ representa el primer valor medido de caudal del segmento de recesión n°2. Luego de colocar la segunda curva como se detalló anteriormente, el proceso se repite para la superposición de las curvas siguientes. En la figura 7.3 se observa la trigonometría del procedimiento de superposición.

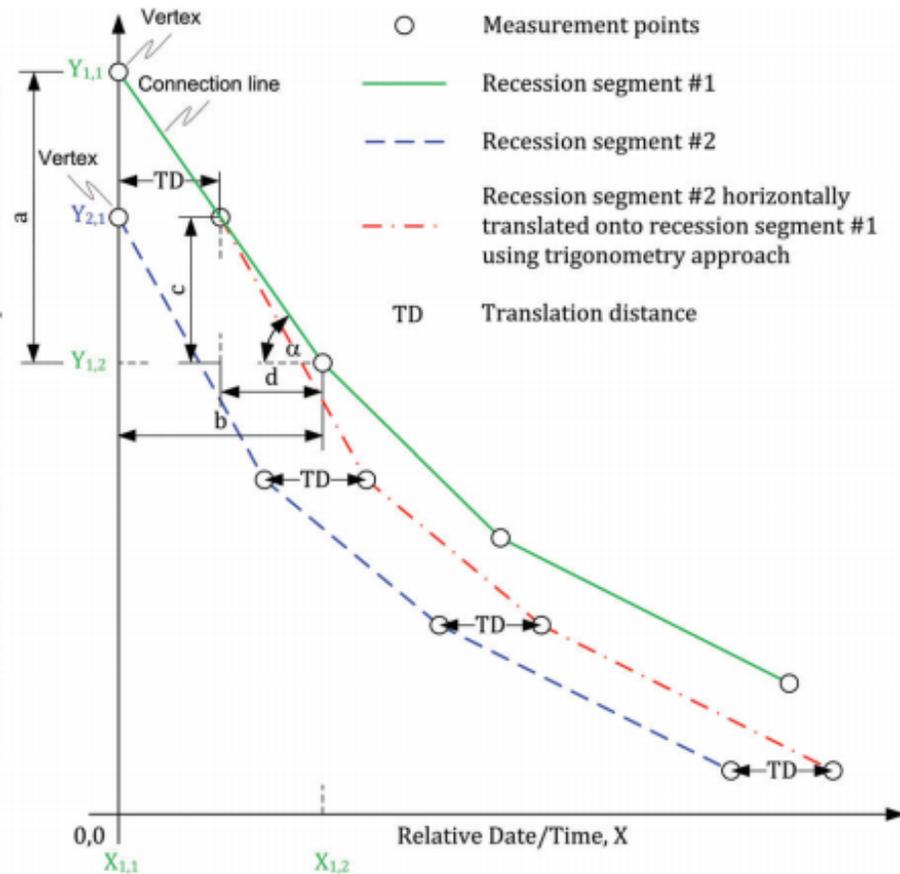


Figura 7.3: Trigonometría utilizada para el procedimiento de superposición de curvas de recesión. Extraída de Posavec et al. (2017).

Cuando se tienen todas las curvas superpuestas, la CRM se obtiene al aplicar una línea de tendencia exponencial sobre ellas. El procedimiento de esta metodología se realizó manualmente sobre las 3 cuencas.

Algunos estudios como sugieren que este es un buen método para obtener la curva maestra, no obstante, en su contra tiene que es trabajoso. Actualmente existen algunos programas que realizan este procedimiento automáticamente.

7.4.2.2. Metodología 2

Este método consiste en construir una curva promedio de las curvas de recesión individual normalizadas y superpuestas. La CRM será el ajuste exponencial realizado manualmente, que tenga un mayor coeficiente de determinación respecto a la curva promedio.

La construcción de la curva promedio se realiza calculando el caudal promedio para cada tiempo. Las curvas de recesión individual no tienen la misma duración por lo que no todos los tiempos contarán con la misma cantidad de caudales para promediar. Se estableció que el límite de duración de las curvas individuales es de 30 días, por lo que la curva promedio tiene esa extensión, y los primeros días poseen más valores para promediar que los últimos.

7.4.2.3. Metodología 3

Corresponde al método de correlación, el cual se basa en la relación reducida durante el mismo intervalo de tiempo. Para ello se grafica el caudal en cualquier punto de la curva de recesión en el eje x y el caudal después de un tiempo de retardo en el eje y, esto para todos los datos de todas las curvas de recesión utilizadas. Bajo este procedimiento, se tiene que si la descarga en cualquier momento de la curva es 0, la descarga x días después también lo será, con esta hipótesis todos los puntos del gráfico y el origen están conectados como una línea recta (Yang, Choi, y Lim, 2018). En este estudio el tiempo de retardo utilizado fue de 1 día.

La CRM corresponde a la envolvente los datos graficados, la cual se genera aplicando el ajuste lineal a los datos que intersecta el origen.

7.5. Estimación constante de recesión α

El parámetro α caracteriza al acuífero relacionando los valores de descarga del almacenamiento con un intervalo de tiempo durante las recesiones, cuando la esorrentía directa es cero y se puede suponer que la recarga de agua subterránea es insignificante (Collischonn y Fan, 2013).

Al asumir que la relación almacenamiento - descarga es lineal, se tiene que el flujo base disminuye consistentemente a una tasa constante durante el período de recesión, la constante de recesión representa la mayor parte de las características de recesión del flujo base. (Yang, Choi, y Lim, 2018).

La constante α puede estimarse a partir de la pendiente de una CRM (Smakhtin, 2001). En este trabajo se aplicaron 3 metodologías distintas para la obtención de α , que corresponden a las 3 metodologías utilizadas para construir la CRM (capítulo 7.4.2).

Las CRM construidas con las metodologías de adaptación del Matching strip y con el método de curva promedio, tienen forma exponencial, por lo que el α corresponde al valor que está elevado la exponencial. En otras palabras, α queda expresada por una modificación

de la ecuación 2.5, la cual se presenta a continuación:

$$\alpha = \frac{\ln(Q_t/Q_0)}{t} \quad (7.7)$$

En el caso del método de correlación, la CRM se realizó con un ajuste lineal de los datos, α se obtuvo de la pendiente de este ajuste, cuya expresión está determinada por:

$$\alpha = \left(\frac{Q_{t+1}}{Q_t}\right)^{1/t} \quad (7.8)$$

La CMR construida con el método de Matching strip, se realizó aplicando una línea de tendencia exponencial, esto fue automático utilizando excel. Sin embargo, la CMR construida con el método de curva promedio, se tuvo que realizar manualmente debido a que la curva de tendencia exponencial que proponía excel, no refleja el comportamiento de las curvas superpuestas, ya que hacía una sobreestimación del caudal. El criterio utilizado para seleccionar la curva correcta construida manualmente, fue que tuviera el mayor coeficiente de determinación con dos decimales.

7.6. Aplicación Filtro Eckhardt.

El filtro que se utilizará en este estudio para separar el caudal base del caudal total, es el propuesto por (Eckhardt, 2005), el cual sale explicado con mayor detalle en el capítulo 2.5, donde aparece la fórmula con la que se define el filtro (fórmula 2.3).

Este filtro se aplicó sobre los años seleccionados como “años con registro completo” de 6 formas diferentes, las cuales corresponden a las combinaciones que se generan con los 2 valores de $BFI_{m\acute{a}x}$ y 3 valores de α encontrados.

El filtro es de tipo recursivo, es decir, utiliza el valor del caudal base del día anterior (b_{t-1}), por lo tanto, para dar inicio al filtro es necesario definir un valor de b_{t-1} . Así mismo, como los años seleccionados con registro completo no son consecutivos, en aquellos momentos en que hayan saltos de años, también se debe definir el valor de b_{t-1} .

En una primera instancia se hizo correr el filtro sin considerar los saltos de años, es decir, si los años seleccionados saltaban del 2004 al 2007, el filtro aplicado el 1 de enero del 2007 recurría al valor del caudal base del 31 de diciembre del 2004. El caudal base que iniciaba el filtro, fue estimado arbitrariamente como el 50 % del promedio de los caudales totales de 15 días antes. En el caso de la Cuenca Purapel, el primer año seleccionado es el primer año con el que se cuenta información, por lo tanto, este 50 % se obtuvo del promedio de caudales totales de los primeros 15 días de enero.

Luego se aplicó una corrección a la estimación de b_{t-1} . Probando el filtro se observó que un cambio en el valor del caudal base tenía una influencia en el valor del flujo base, de 10 a 14 días posteriores. Se calculó el porcentaje que representaba el caudal base del caudal total,

específicamente para el mes de diciembre, debido a que el valor de los b_{t-1} que se quieren rellenar, corresponden al 31 de diciembre de algún año. Para la Cuenca Puangue, se obtuvo que este porcentaje era de 56,8%, en la Cuenca Nilahue el porcentaje fue de un 80,9% y en la Cuenca Purapel 39,6%. Finalmente, el valor de los b_{t-1} sin información se estimaron como los porcentajes encontrados, del promedio de 15 días anteriores del caudal total.

7.7. Cuantificación de la recarga

Para cuantificar la recarga difusa es fundamental comprender el flujo del agua, esto incluye el paso desde la atmósfera al suelo, las diferentes rutas que puede tomar habiéndose infiltrado en el suelo y su posible regreso a la atmósfera. La ecuación de balance hídrico es la que incorpora los componentes involucrados en la dinámica del agua y la que permite encontrar un valor numérico para la recarga. Vale mencionar que esta ecuación modela y representa la realidad de una forma simplificada, por tanto no considera todos los parámetros que interactúan en la realidad, de hecho, ningún modelo lo hace. En la Figura 7.4 se presenta el diagrama de flujo de agua que es utilizado como modelo conceptual para las 3 cuencas. A continuación se explicará con más detalle las etapas y consideraciones realizadas para estimar la recarga.

El agua que llega al suelo producto de un evento de precipitación, puede: 1) escurrir superficialmente a través de corrientes, ríos y lagos. Esta componente se denomina escorrentía directa y en este estudio se obtuvo a partir del de la aplicación del filtro de Eckhardt; o 2) infiltrar las primeras capas del suelo, humedeciéndolo y almacenándose en él. La caja A de la figura 7.4), representa la capa de suelo en el cual se va almacenando la humedad. No obstante, existe un límite para este almacenamiento, el cual está determinado por la capacidad máxima de retención de humedad que posee el suelo.

Parte de la humedad almacenada en el suelo puede retornar a la atmósfera producto de la evaporación, o ser utilizada por las plantas, ambos procesos se estudian en conjunto y se denominan evapotranspiración. Existe un valor de la evapotranspiración que es óptima, en el cual la humedad del suelo logra suplir la demanda de las plantas, a este valor se le denomina evapotranspiración potencial (ETP), y depende de varios factores como de la temperatura, tipo de suelo, vegetación, viento, etc. Cuando la disponibilidad de agua en el suelo es igual o mayor a la ETP, la evapotranspiración real (ETR) toma el valor de la ETP, de lo contrario, la ETR corresponde a la disponibilidad real que existe en ese momento.

Cuando las cuencas reciben aportes de agua en condiciones tales que el suelo se encuentra con su capacidad máxima de retención de humedad, el excedente de agua se redistribuye a través de diferentes rutas, puede fluir hacia las aguas subterráneas o a cuerpos superficiales de agua. De acuerdo a esto, aquella cantidad de agua que logra percolar profundamente y llegar al acuífero, es considerada como la recarga difusa.

El balance hídrico cuantifica los componentes en cada periodo asumiendo condiciones iniciales de humedad conocidas. En este estudio se aplicó el balance a una escala diaria, para luego obtener valores mensuales y anuales. La única fuente de recarga considerada fue la precipitación, y como descargas se consideró la evapotranspiración real (mm/día) y la

escorrentía directa (mm/día).

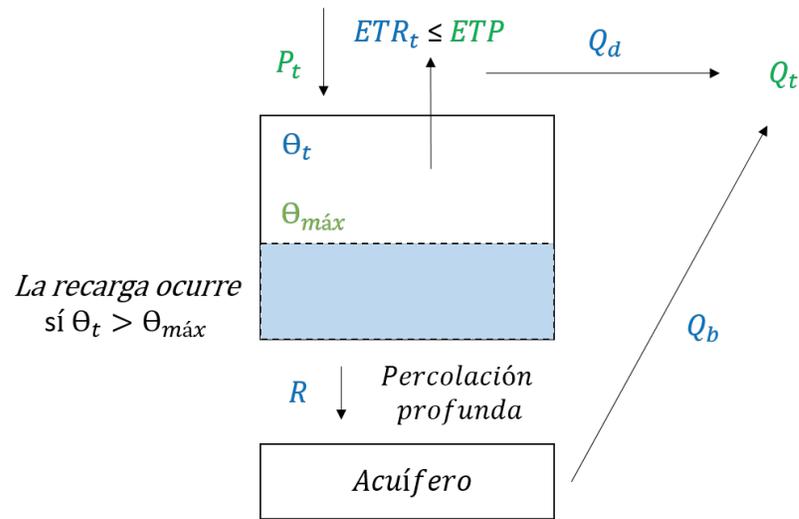


Figura 7.4: Diagrama flujo de agua. P corresponde a la precipitación, ETP a la evapotranspiración potencial, ETR a la evapotranspiración real, Θ a la humedad del suelo, $\Theta_{máx}$ a la humedad máxima del suelo, Q_t al caudal total, Q_d a la escorrentía directa (superficial, rápida), Q_b al caudal base (subterráneo, lento), R recarga del acuífero.

El diagrama de la figura modela el comportamiento del flujo de agua que se explicó anteriormente. En la figura aparece la ecuación del balance hídrico, la cual permite obtener el valor de la recarga. Esta ecuación se resuelve evaluando de forma secuencial e individual cada término. Los parámetros con sub índice i representa los valores de cada día, el sub-índice $(i-1)$ representa los del día anterior. La secuencia consta de 4 etapas las cuales salen numeradas en el diagrama y se explican a continuación.

7.7.1. 1) Obtención de la infiltración

Esta primera etapa consiste en calcular el valor de la infiltración, es decir, el flujo de agua que penetra la superficie de la tierra. El valor de la infiltración se obtiene de la diferencia entre la precipitación y la escorrentía directa, tal como muestra la ecuación 7.9.

Los valores diarios de precipitación para las 3 cuencas durante el periodo de 1979 - 2019, se obtuvieron del centro de clima y resiliencia (CR²), en unidades de mm/día. A su vez, los valores de escorrentía directa (Q_d) se obtuvieron de la aplicación del filtro de Eckhardt (2005). Dicho filtro permitió separar de los datos de caudales totales obtenidos también del CR², la fracción correspondiente al flujo base. Se estimó la escorrentía directa como la diferencia entre el caudal total y el flujo base.

$$Inf = P_i - Qd_i \quad (7.9)$$

7.7.2. 2) Contenido de humedad

Esta etapa consiste en calcular la humedad del suelo, la cual se determina tal como aparece en la ecuación 7.10, donde la humedad del suelo es igual a la infiltración en t_i ($P_i - Qd_i$), más la humedad del suelo del día anterior (Θ_{i-1}), menos el valor de la ETR_i , con la condición de que la humedad del suelo debe ser mayor o igual a 0.

$$\Theta_i = \Theta_{i-1} + (P_i - Qd_i) - ETR_i \quad (7.10)$$

Como se mencionó anteriormente, el suelo posee una capacidad máxima de retención de humedad. Esta capacidad de campo está determinada por la textura del suelo, es decir, por el tamaño de los sedimentos. Según (Doneen, Westcot, et al., 1984) la humedad máxima del suelo varían entre 60 mm cuando los sedimentos son gruesos, tipo arena, arena arcillosa, a 250 mm para sedimentos finos como arcilla, arcilla limosa.

En este estudio se consideró un $\Theta_{m\acute{a}x}$ de 150 mm para las 3 cuencas. Este valor fue seleccionado como un promedio de los valores que existen en la literatura y basándose en estudios realizados en cuencas que comparten ciertas similitudes con las cuencas de este estudio. Por ejemplo, Uribe, Arumí, González, y Salgado (2003) consideró un $\Theta_{m\acute{a}x} = 150$ mm en una cuenca que se ubica en la Cordillera de la Costa de la Región del Ñuble. Con esta consideración se tiene que Θ_i está limitado por el valor de 150 mm. Adicionalmente se calculó la recarga para condiciones de $\Theta_{m\acute{a}x}$ de 100 mm y 200 mm.

7.7.3. 3) Obtención Evapotranspiración real (ETR)

La ETR está en función de la evapotranspiración potencial, de la humedad del suelo del día anterior y de la infiltración. Si la humedad del suelo del día anterior (Θ_{i-1}) más la infiltración en t_i es menor que la evapotranspiración potencial, la ETR es igual a (Θ_{i-1}) más la infiltración, esta suma es mayor o igual a 0. Caso contrario, si la humedad del suelo más la infiltración es mayor o igual a la ETP, la ETR es igual a la ETP.

El valor de la ETP se obtuvo de la base de datos de CAMELS, a partir de la fórmula propuesta por Hargreaves y Samani (1985), la cual utiliza básicamente los datos de temperatura y radiación para su cálculo.

7.7.4. 4) Estimación de la recarga

Por último, se consideró que la recarga ocurre solo si Θ_i es mayor que $\Theta_{m\acute{a}x} = 150$ mm, y su valor corresponde a todo el excedente de esta diferencia. El cálculo de la recarga se realizó sobre los años a los cuales se aplicó el filtro de separación de caudal, ya que solo estos proveen el valor de la escorrentía directa. Para estimar los valores de recarga de aquellos que no contaban con toda la información para calcularla, se realizó un ajuste lineal de los valores anuales de recarga en función de la precipitación, de este modo se obtiene la curva que permite estimar la recarga. Estos gráficos se presentan en resultados.

Capítulo 8

Resultados

8.1. Curvas de duración de Caudales

Las curvas de duración de caudales se construyeron con los datos de caudales obtenidos de la base de datos CAMELS-CL correspondiente al periodo 1979-2019, y con aquellos valores que fueron rellenados utilizando un ajuste lineal o exponencial (cap. 7.2). La figura 8.1 muestra las curvas de duración de Puangue, Nilahue y Purapel. El eje y se encuentra en escala logarítmica.

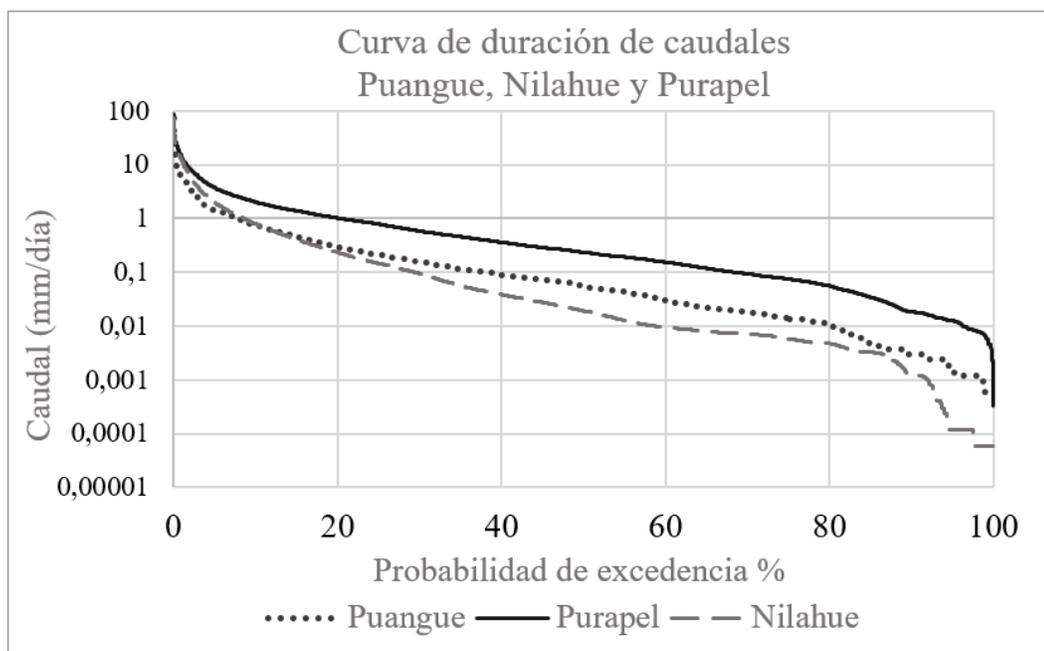


Figura 8.1: Curvas de duración de caudales en escala logarítmica. Cuenca de Puangue, Nilahue y Purapel.

La cuenca Puangue cuenta con un total de 12.305 valores de caudales diarios, este número representa al N utilizado en la ecuación de probabilidad de excedencia (ecuación 7.1). Su caudal máximo histórico es de 71,88 mm/día. En el caso de la cuenca Nilahue, el valor de N es 10.301 y su máximo histórico de 75,17 mm/día. Por último, la cuenca Purapel presenta un N de 12.141, con un máximo histórico de 88,12 mm/día.

En la figura 8.1 se puede apreciar que la curva de duración perteneciente a la cuenca Purapel, se encuentra siempre sobre las curvas de Nilahue y Puangue. Esto es consistente con las condiciones hidrológicas de la cuenca, ya que al encontrarse más al sur que las otras dos, cuenta con más eventos de precipitación, que son más prolongados y que aportan un mayor volumen de agua.

Adicionalmente, se aprecia que la probabilidad de excedencia cercana a un 12 % es un valor crítico para las curvas de Nilahue y Puangue. Las probabilidades de excedencia menores a este 12 %, muestran que la curva de Nilahue se encuentra sobre la curva de Puangue, esto es consistente con la ubicación geográfica de las cuencas, ya que, al estar más al sur Nilahue, presenta un mayor aporte de precipitación. Sin embargo, para probabilidades de excedencia mayores a este 12 %, la curva Puangue es la que presenta mayores caudales. Este comportamiento podría ser explicado por la geología de las cuencas. En Nilahue las precipitaciones son mayores que en Puangue, por lo que se esperaría que para diferentes probabilidades de excedencia, los caudales también lo fueran. Sin embargo, eso no ocurre.

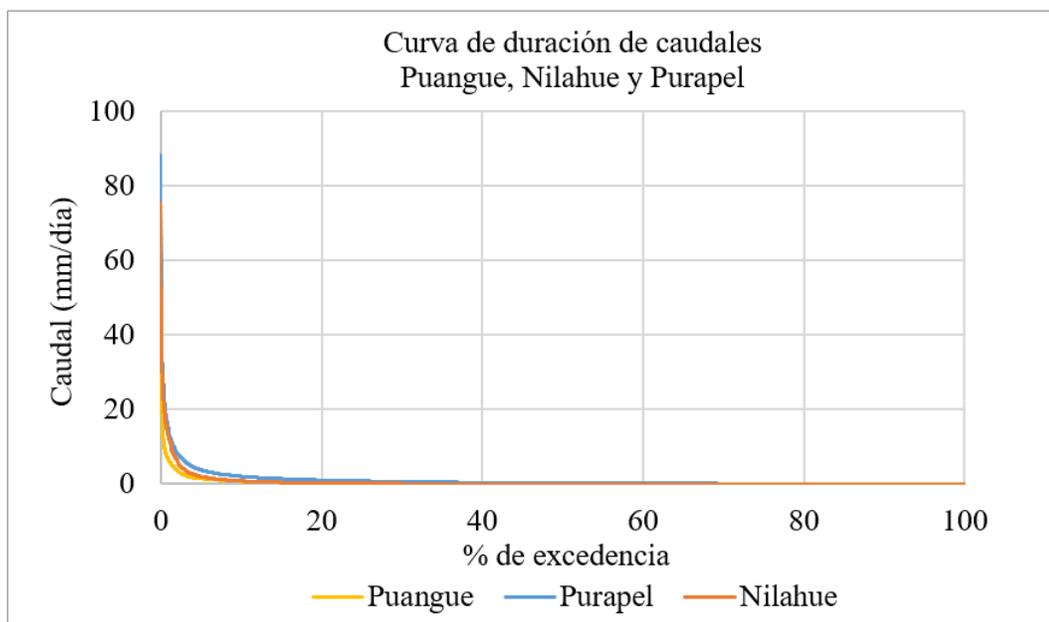


Figura 8.2: Curvas de duración de caudales (Puangue, Nilahue y Purapel).

En la imagen 8.2 se presentan las curvas de duración de las 3 cuencas, con el eje y sin escala logarítmica. A partir de ella se puede apreciar que las 3 curvas presentan un comportamiento bastante similar donde la pendiente en el tramo inicial es muy pronunciada, indicando que los caudales altos se presentan durante tiempos cortos, los cuales se generan entre mayo y septiembre debido al régimen pluvial que caracteriza a las cuencas. Según Medina (1987) esta forma es característica en cuencas de montaña, situación que coincide con la geomorfología en la que se sitúan las cuencas. En ríos de llanura no existen diferencias muy notables en los diferentes tramos de la curva, por lo cual se tienen curvas con menor pendiente. Las formas de curvas típicas que señala este autor se presentan en la siguiente imagen.

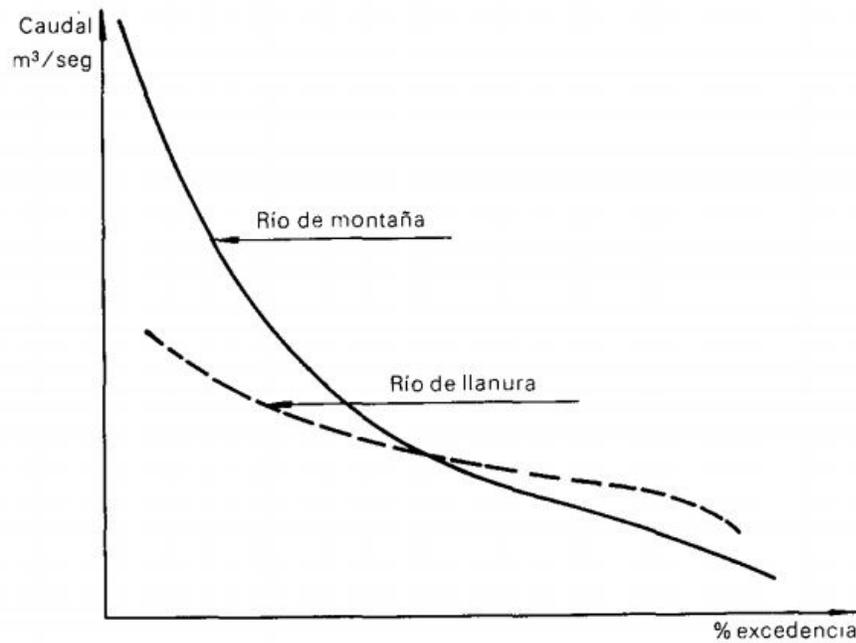


Figura 8.3: Curvas típicas de duración de caudales. Imagen obtenida de Medina (1987).

8.1.1. Obtención $BFI_{m\acute{a}x}$

Como se mencionó en el capítulo 7.3.1, el índice $BFI_{m\acute{a}x}$ se obtiene de una relación entre los valores de caudales Q_{90} y Q_{50} . En la tabla 8.1 se presentan dichos valores en conjunto con el valor del $BFI_{m\acute{a}x}$ utilizado en este trabajo, el cual se obtuvo de la corrección sugerida por Collischonn y Fan (2013).

Tabla 8.1: Valor del índice $BFI_{m\acute{a}x}$ y $BFI_{m\acute{a}x}$ corregido.

Cuenca	Q_{50}	Q_{90}	$BFI_{m\acute{a}x}$	$BFI_{m\acute{a}x}$ (Collischonn y Fan, 2013)
Puangue	0.0557	0.0029	0.0537	0.2594
Nilahue	0.019	0.0011	0.0623	0.2666
Purapel	0.2364	0.0184	0.0779	0.2795

A partir de la tabla 8.1 es posible apreciar que el $BFI_{m\acute{a}x}$ es mayor a medida que las cuencas se ubican más al sur. En consecuencia, como el $BFI_{m\acute{a}x}$ representa la máxima contribución que genera el caudal base al caudal total, se podría decir que este aporte sería mayor en Purapel que es la que se sitúan más al sur y menor en Puangue que es la cuenca más septentrional.

Al comparar los valores de los $BFI_{m\acute{a}x}$ obtenidos con los que propone Eckhardt en la literatura, es posible apreciar que este valor es muy cercano al que Eckhardt definió para acuíferos en roca fractura con corrientes perenne ($BFI_{m\acute{a}x} = 0.25$). Esto concide con la características hidrogeológica de las cuencas, ya que al situarse en la Cordillera de la Costa los acuíferos son principalmente fracturados.

8.2. Curvas maestras de recesión y obtención constante de recesión α

8.2.1. Metodología 1

En la Cuenca Puangue inicialmente se seleccionaron 42 periodos de recesión, solo 32 de ellos fueron utilizados para construir la curva de recesión maestra. En la figura 8.4, se presenta la superposición de las curvas recesión aplicando la metodología descrita en el capítulo 7.4.2.1. La curva maestra se muestra en rojo.

En el caso de la Cuenca Nilahue, las curvas totales de recesión eran 63, de ellas se utilizaron 61. La figura 8.5 muestra la curva maestra de recesión para la cuenca Nilahue.

Para Purapel se contaba con un total de 95 curvas de recesión, se utilizaron 81 para la construcción de la curva maestra de recesión, esto se observa en la figura 8.6.

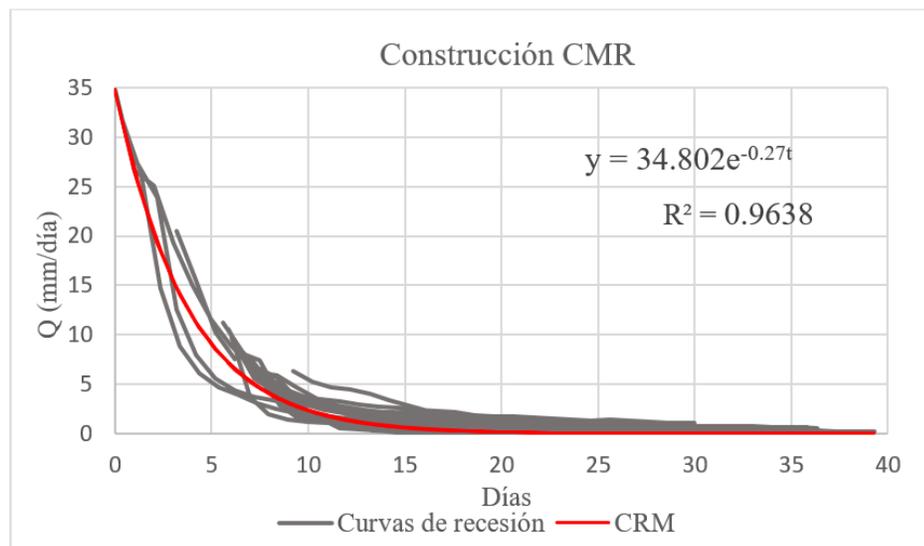


Figura 8.4: Construcción CMR para la Cuenca Puangue con la metodología 1

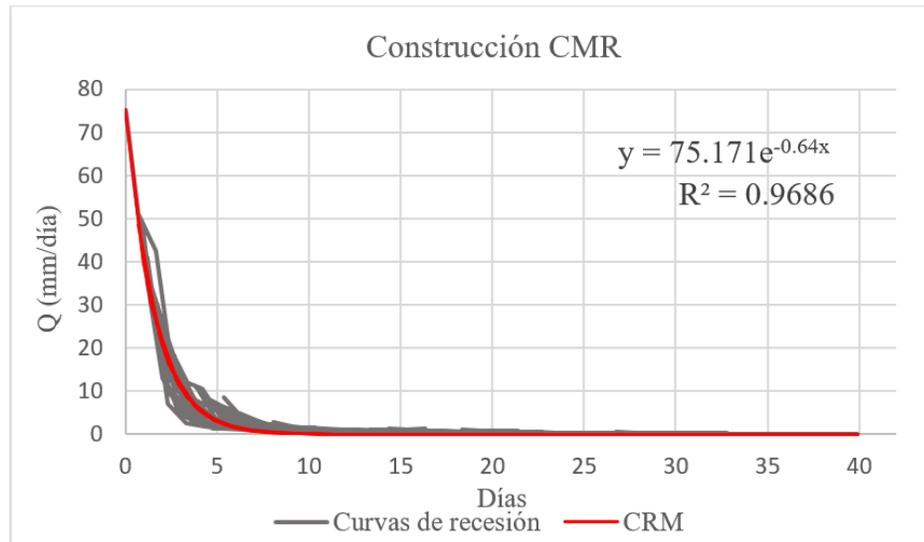


Figura 8.5: Construcción CMR para la Cuenca Nilahue con la metodología 1

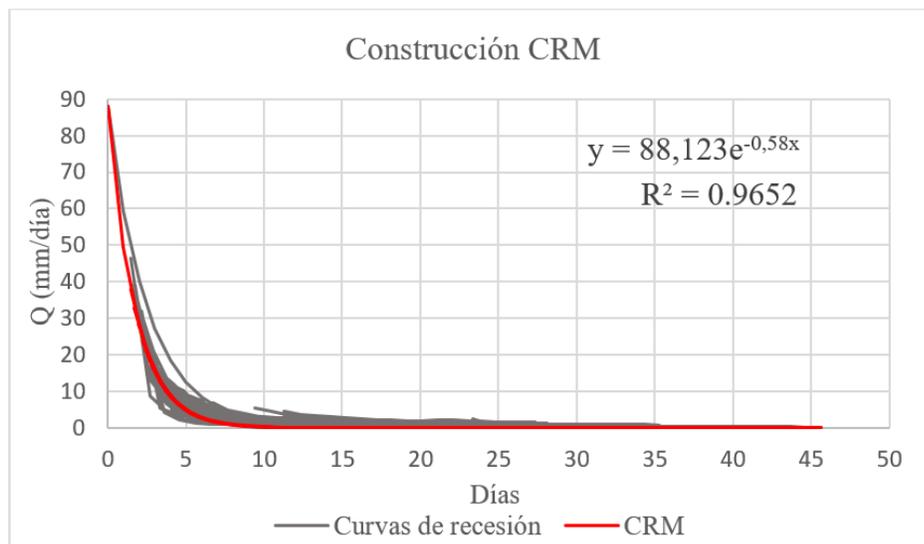


Figura 8.6: Construcción CMR para la Cuenca Purapel con la metodología 1

En la tabla 8.2 se presentan los valores de los parámetros obtenidos de la construcción de la curva de recesión maestra. A partir de ella, se observa que el mayor valor del coeficiente de recesión lo tiene la Cuenca Nilahue, y el menor valor lo tiene la cuenca Puangue. La constante α es el valor al cual se eleva la exponencial, lo que corresponde a la pendiente de la curva maestra de recesión. Un mayor valor de esta constante sería indicativo de una respuesta rápida de la descarga del flujo subterráneo.

Tabla 8.2: Recopilación de los parámetros obtenidos con la aplicación de la metodología 1.

Cuenca	CMR	R ²	α
Puangué	$Q_t = 34.802e^{-0.27t}$	0.9638	0.27
Nilahue	$Q_t = 75.171e^{-0.64t}$	0.9686	0.64
Purapel	$Q_t = 88.123e^{-0.58t}$	0.9652	0.58

8.2.2. Metodología 2

Como se explicó en el capítulo 7.4.2.2, la obtención de la curva maestra de recesión construida bajo esta metodología, se obtiene al superponer las curvas de recesión normalizadas que fueron seleccionadas. Luego se calcula el promedio de los caudales para cada tiempo, lo que dará lugar a la curva promedio, y finalmente se construye manualmente la curva exponencial que representa de mejor manera a la curva promedio calculada.

El resultado de la construcción de las CMR se puede ver en las figuras 8.7, 8.8 y 8.9 que corresponden a la cuenca Puangué, Nilahue y Purapel respectivamente.

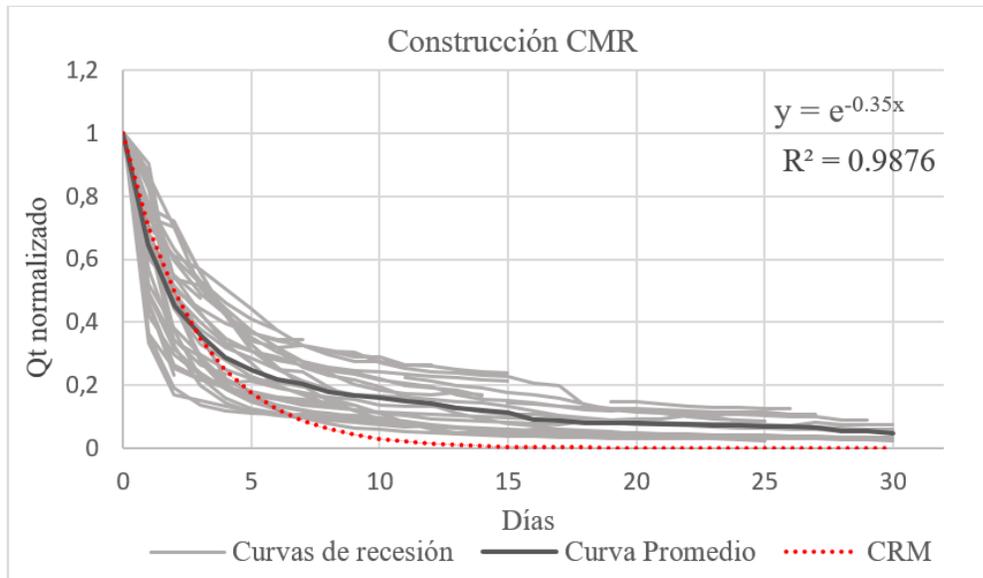


Figura 8.7: Construcción CMR para la Cuenca Puangué con la metodología 2

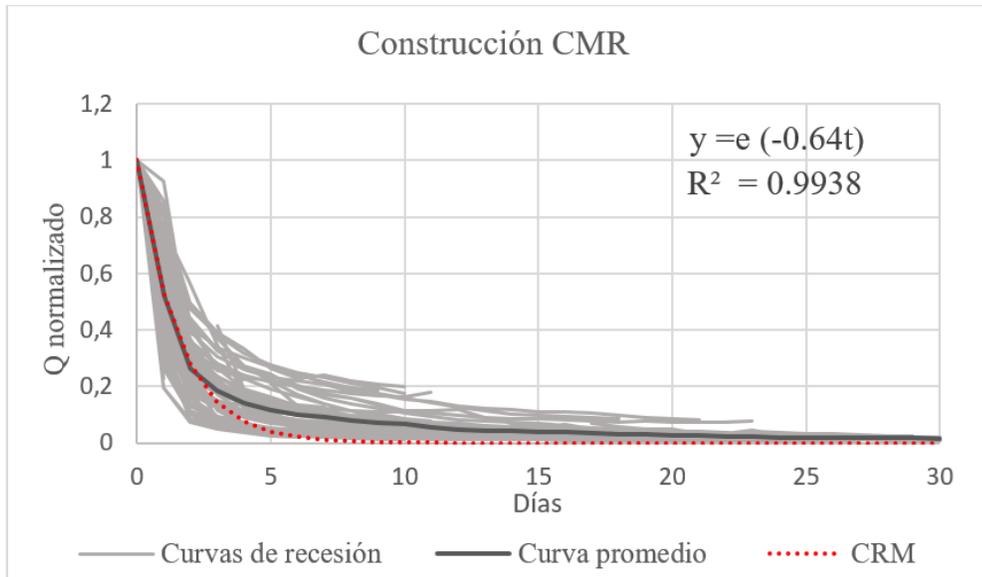


Figura 8.8: Construcción CMR para la Cuenca Nilahue con la metodología 2

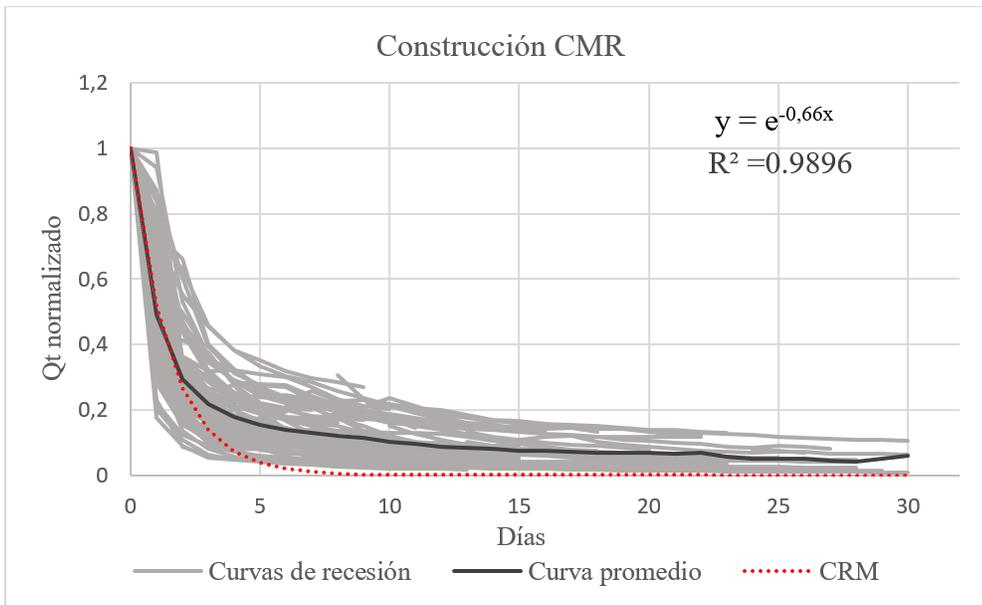


Figura 8.9: Construcción CMR para la Cuenca Purapel con la metodología 2

A partir de las figuras, es posible apreciar que la curva de recesión maestra genera un buen ajuste para los primeros días de la recesión. Sin embargo, en las 3 cuencas se muestra que pasado los 4 días, esta curva genera una subestimación del caudal.

A partir de la tabla 8.3, es posible observar que aplicando este método los valores de α son similares a los obtenidos con el método anterior, con la diferencia de que acá la cuenca Purapel es la que presenta un α más grande, seguido de Nilahue y Puangue, en el método anterior la cuenca Nilahue era la que presentaba un α mayor.

Tabla 8.3: Recopilación de los parámetros obtenidos con la metodología 2

Cuenca	CMR	R ²	α
Puangue	$Q_t = e^{-0.35t}$	0.9876	0.35
Nilahue	$Q_t = e^{-0.64t}$	0.9938	0.64
Purapel	$Q_t = e^{-0.66t}$	0.9896	0.66

8.2.3. Metodología 3

La curva maestra obtenida con este método para Puangue, Nilahue y Purapel, se muestran en las figuras 8.10, 8.11, 8.12, respectivamente.

El valor del α que se obtiene con este método, es el que más difiere respecto de los otros 2 métodos. También es el que presenta un menor coeficiente de determinación (R_2).

A partir de la literatura, se sabe que este método posee gran variabilidad, ya que depende del intervalo de retardo utilizado. Mientras mayor sea el intervalo de retardo, más preciso será el valor de la constante de recesión. Sin embargo, en este caso, se necesita periodos de datos más largos. En este estudio se utilizó un intervalo de retardo de 1 día.

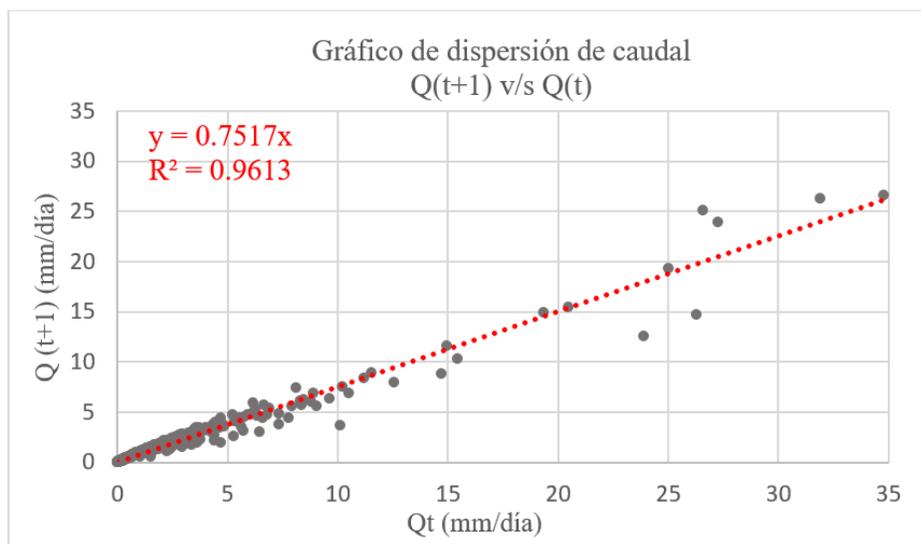


Figura 8.10: Construcción CMR para la Cuenca Puangue con la metodología 3

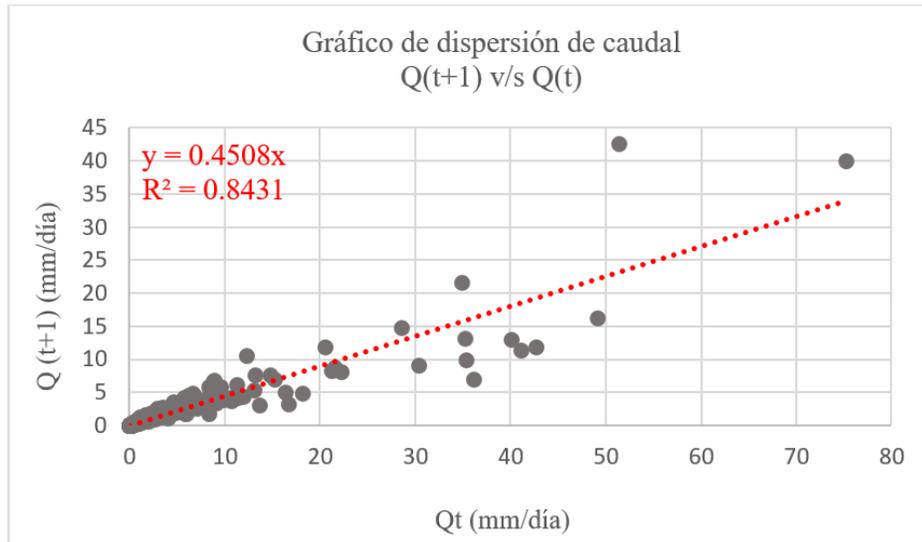


Figura 8.11: Construcción CMR para la Cuenca Nilahue con la metodología 3

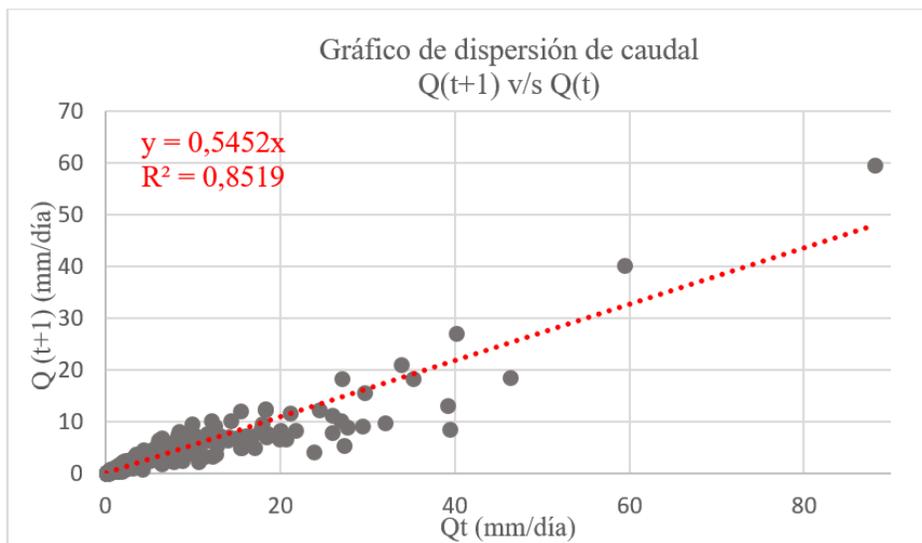


Figura 8.12: Construcción CMR para la Cuenca Purapel con la metodología 3

En la tabla 8.5 se presenta la recopilación de los α obtenidos con las 3 metodologías. A partir de estos valores, es posible apreciar que los métodos Matching strip y curva promedio generan valores bastante similares, de hecho, en la Cuenca Nilahue el valor es idéntico y en las otras 2 cuencas, el método matching strip es el que presenta un valor de α menor. El método de curva promedio es el que presenta un mayor coeficiente de determinación

(R^2), y el método de correlación es el que posee un menor valor de este mismo coeficiente.

En general se puede decir que un α mayor sería representativo de una respuesta más rápida de la descarga del flujo subterráneo, esto puede estar influenciado por las condiciones hidrogeológicas de las cuencas, como la existencia de un acuífero libre, o un acuífero ubicado a menor profundidad, o que la conexión entre el acuífero y el curso superficial sea mayor. El método de curva promedio muestra el α es mayor a medida que las cuencas se ubican más al sur. En los otros 2 métodos no se observa una tendencia clara.

Tabla 8.4: Recopilación de los parámetros obtenidos con la aplicación la metodología 3

Cuenca	CMR	R ²	α
Puangue	$Q_t = 0.7517t$	0.9613	0.7517
Nilahue	$Q_t = 0.4508t$	0.8431	0.4508
Purapel	$Q_t = 0.5452t$	0.8519	0.5452

Tabla 8.5: Recopilación de los valores de α y R², obtenidos aplicando las 3 metodologías.

Cuenca	Método	Metodología 1	Metodología 2	Metodología 3
Puangue	α	0.27	0.35	0.7517
	R ²	0.9638	0.9876	0.9613
Nilahue	α	0.64	0.64	0.4508
	R ²	0.9686	0.9938	0.8431
Purapel	α	0.58	0.66	0.5452
	R ²	0.9652	0.9896	0.8519

8.3. Separación del caudal base

La separación del caudal base se realizó aplicando el filtro numérico propuesto por Eckhardt (2005) (capítulo 2.5). Los parámetros de la ecuación se calibraron según las características de las cuencas. La metodología utilizada para la obtención del parámetro $BFI_{m\acute{a}x}$ se presenta en el capítulo 7.3.1 y los resultados obtenidos para cada cuenca se presentan en el apartado 8.1.1. En el caso del parámetro α , la tabla 8.5 del capítulo anterior, resume los valores obtenidos aplicando las 3 metodologías.

El caudal base se calculó de 6 formas distintas en cada cuenca, siendo esta la cantidad de combinaciones que se pueden realizar con los 2 valores de $BFI_{m\acute{a}x}$ y los 3 valores de α .

A modo de ejemplo, en las figuras 8.13, 8.14 y 8.15, se muestran los gráficos que presentan las 2 componentes del caudal, y la precipitación diaria de la Cuenca Puangue para el año 1983, con las 6 combinaciones mencionadas anteriormente. Solo se muestra este breve periodo porque, de lo contrario, es difícil distinguir el flujo base con claridad. El caudal total está representado por la curva roja "Streamflow", los flujos bases por las áreas grises y negras "Baseflow", y la escorrentía directa o también denominada flujo rápido queda representada por el área entre las curvas de caudal total y caudal base.

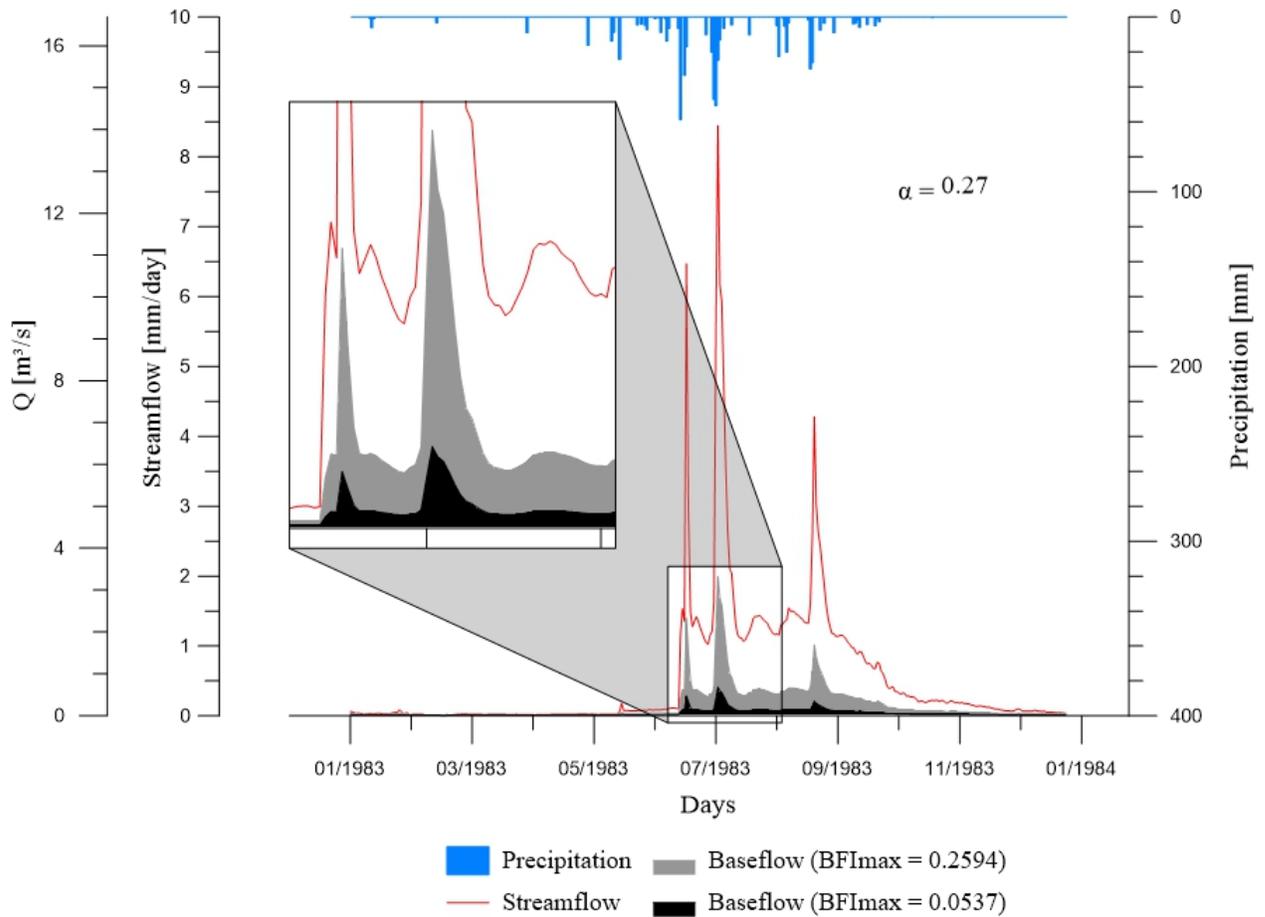


Figura 8.13: Separación de flujo base diario de un año típico en la Cuenca Puangue (1983). $\alpha = 0.27$, en negro el caudal base que utiliza el $BFI_{m\acute{a}x}$ establecido por Al-Faraj y Scholz (2014) y Gordon et al. (2004) (ec. 7.2). En gris el caudal base que utiliza la corrección del $BFI_{m\acute{a}x}$ sugerida por Collishonn y Fan, 2013 (ec. 7.3).

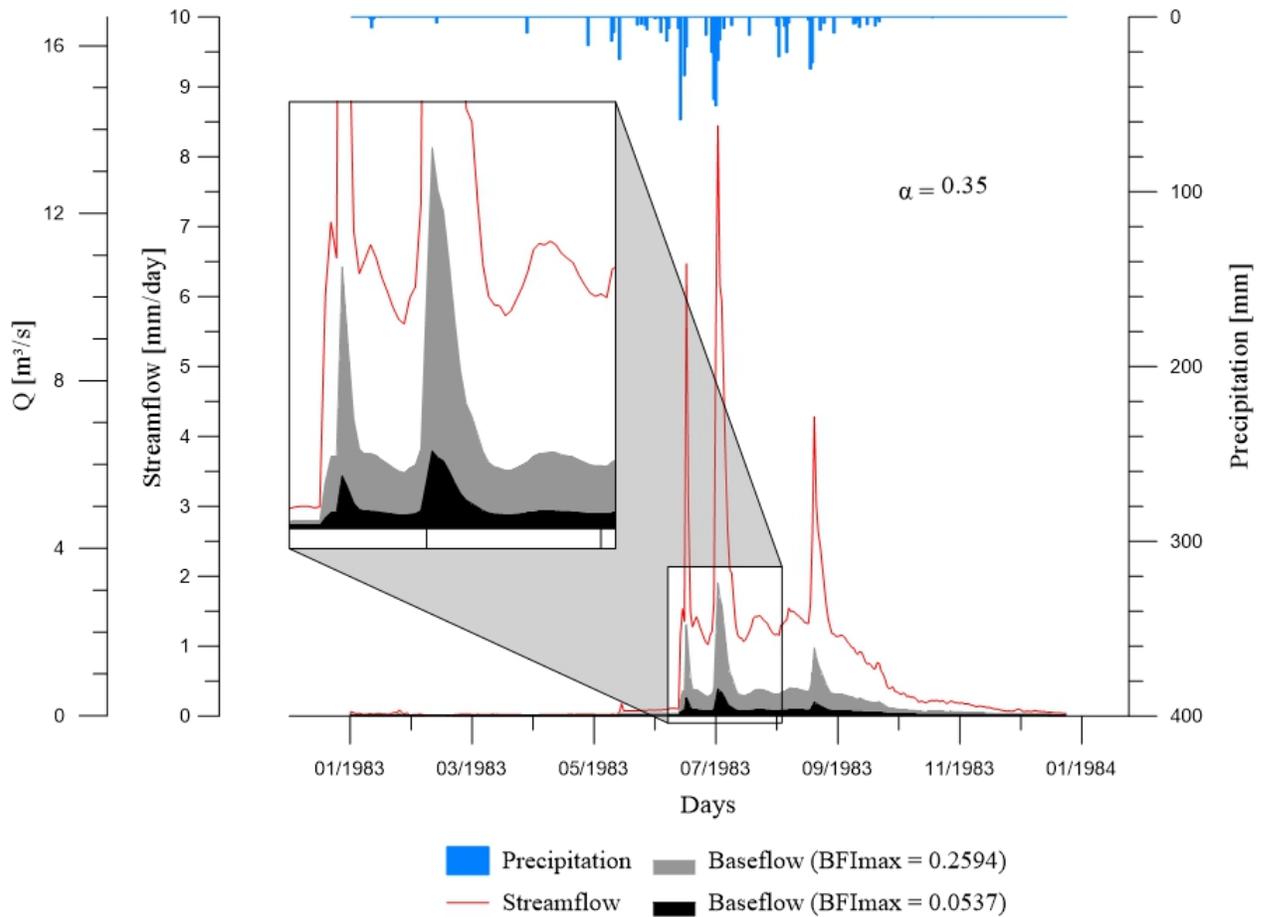


Figura 8.14: Separación de flujo base diario de un año típico en la Cuenca Puangue (1983). $\alpha = 0.35$, en negro el caudal base que utiliza el $BFI_{m\acute{a}x}$ establecido por Al-Faraj y Scholz (2014) y Gordon et al. (2004) (ec. 7.2). En gris el caudal base que utiliza la corrección del $BFI_{m\acute{a}x}$ sugerida por Collishonn y Fan, 2013 (ec. 7.3).

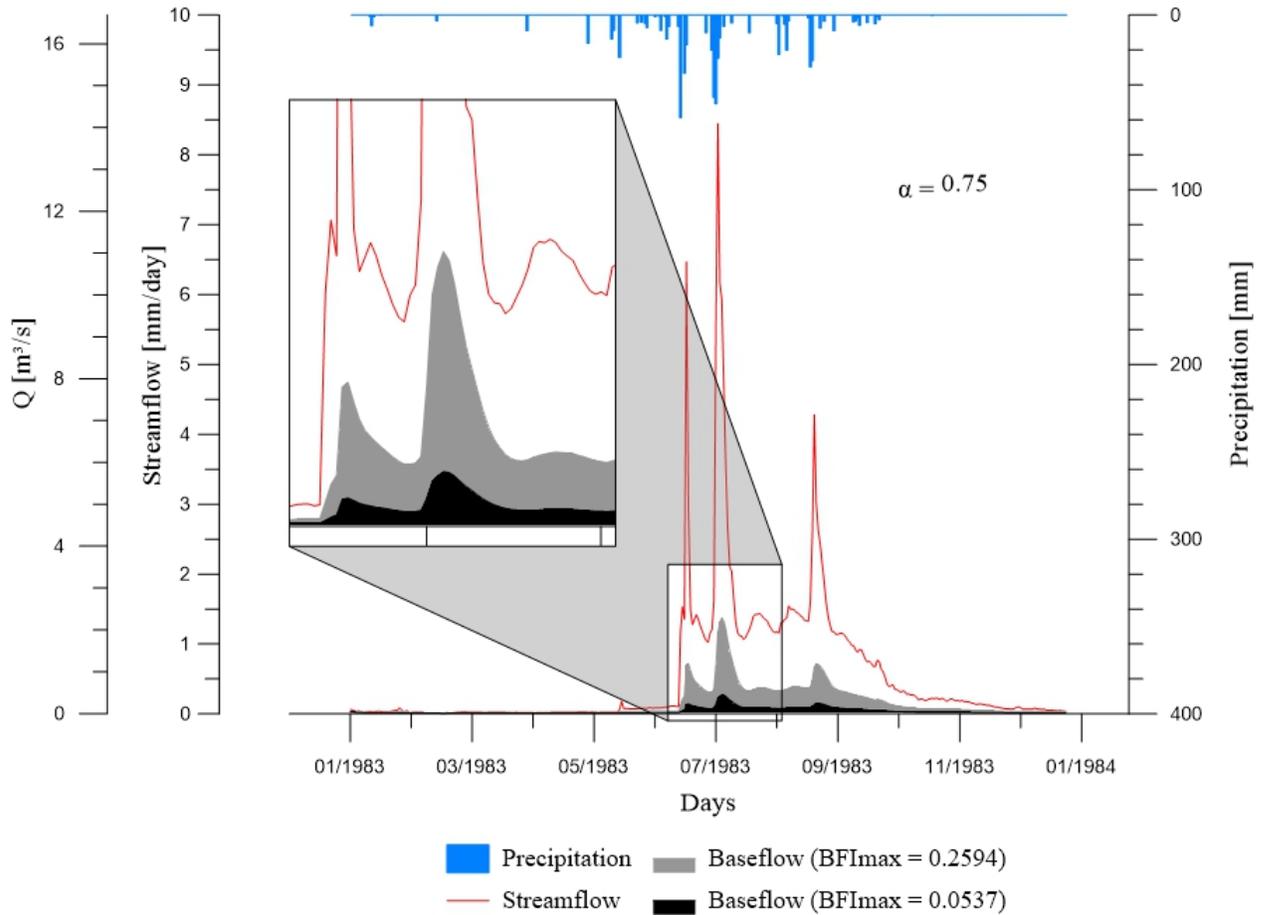


Figura 8.15: Separación de flujo base diario de un año típico en la Cuenca Puangue (1983). $\alpha = 0.75$, en negro el caudal base que utiliza el $BFI_{m\acute{a}x}$ establecido por Al-Faraj y Scholz (2014) y Gordon et al. (2004) (ec. 7.2). En gris el caudal base que utiliza la corrección del $BFI_{m\acute{a}x}$ sugerida por Collishonn y Fan, 2013 (ec. 7.3).

A partir del análisis de las figuras de separación de caudal base (figuras 8.13, 8.14 y 8.15), es posible apreciar que un cambio en el valor de la constante de recesión, no genera grandes cambios en el valor del flujo base. En las figuras se muestra que un cambio notorio entre un $\alpha = 0.27$ a un $\alpha = 0.75$ presenta caudales bases con volúmenes bastante similares, siendo un poco menor para α más grandes. Sin embargo, un cambio en el valor del $BFI_{m\acute{a}x}$ es más influyente en el volumen de caudal base, esto se observa comparando los caudales en negro y gris que aparecen en las figuras. Un valor mayor del $BFI_{m\acute{a}x}$ genera mayores volúmenes de caudales (área gris), con valles más profundos en el hidrograma. Es posible observar que el $BFI_{m\acute{a}x}$ propuesto por (Al-Faraj y Scholz, 2014) y (Gordon, McMahon, Finlayson, Gippel, y Nathan, 2004)(ec. 7.2), subestima el caudal base (área negra).

Al analizar la forma de los caudales bases en función del α utilizado, se observa que α pequeños y grandes muestran un comportamiento similar, mostrando un abrupto aumento del caudal base asociados a eventos de precipitación. La diferencia radica en que un α grande presenta peaks suavizados y redondeados, seguidos de una disminución gradual del caudal base. Constantes α pequeñas presentan peaks marcados y más altos, seguidos de una disminución abrupta del caudal.

En función de los resultados obtenidos a partir de las diferentes combinaciones de parámetros, se decidió calcular la recarga utilizando los valores de caudales base calculados con el $BFI_{máx}$ corregido por (Collischonn y Fan, 2013), ya que soluciona la subestimación del caudal base y el α obtenido con la metodología de “Curva Promedio”, ya que refleja bien el comportamiento inicial de la curva de recesión, y presenta un coeficiente de determinación R^2 mayor que los otros métodos. Por último, como ya se comentó anteriormente, el valor del α obtenido con esta metodología es similar al obtenido con el método de Matching strip, y para efectos del cálculo del valor de la recarga, no existe una diferencia significativa si se utiliza el uno o el otro, esto se observa al comparar las figuras 8.13 y 8.14.

8.4. Valor umbral

El valor umbral corresponde al menor valor que admite el caudal base. Este valor se obtuvo al graficar en escala logarítmica el caudal base de todo el registro. La línea horizontal roja que aparece en las figuras 8.16, 8.17 y 8.18 representa el valor umbral de Puangue, Nilahue y Purapel, respectivamente. La elección de esta línea, y en consecuencia del valor umbral, se basa en que refleja el comportamiento general que tiene los caudales bases mínimos durante el periodo de estudio. La aplicación del valor umbral es una condición de borde que se incorpora al sistema para reflejar el comportamiento hidrológico de las cuencas.

Al valor del caudal base obtenido mediante la aplicación del filtro Eckhardt, se le suma el valor umbral, esto da lugar a un nuevo valor de caudal base corregido. Vale mencionar que el caudal base no puede ser mayor que el caudal total, siendo una condición límite que se aplica al sistema.

Los valores umbrales de cada cuenca se presentan en la siguiente tabla 8.6 junto con la probabilidad de excedencia asociada a cada valor umbral. Esta probabilidad de excedencia se obtuvo utilizando las curvas de duración de caudales.

Tabla 8.6: Valor umbral junto con la probabilidad de excedencia respectiva, para cada cuenca.

Cuenca	Valor umbral Caudal (mm/día)	Probabilidad de excedencia (%)
Puangue	0.01	80.39
Nilahue	0.005	77.4
Purapel	0.05	81.01

De la tabla 8.6, se observa que el valor umbral es bastante bajo, no genera una gran diferencia en el valor final del caudal base, más bien es una condición hidrogeológica que se aplica. También se puede observar que la probabilidad de excedencia asociada a los valores umbrales, es similar en las 3 cuencas y se aproxima a un 80% de excedencia.

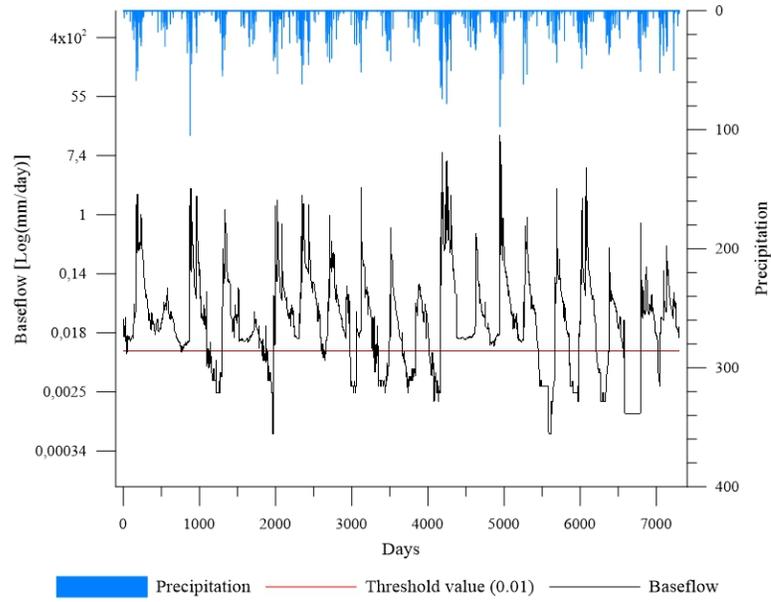


Figura 8.16: Obtención del valor umbral para la cuenca Puangué.

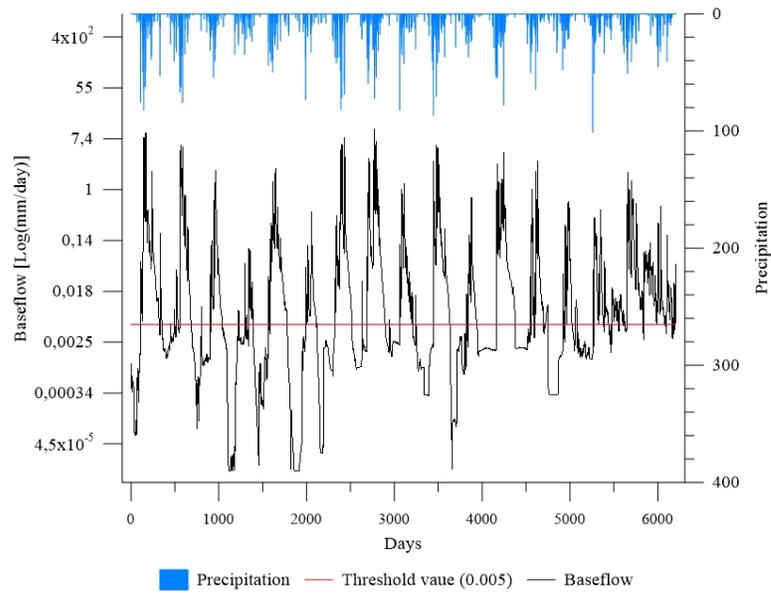


Figura 8.17: Obtención del valor umbral para la cuenca Nilahue.

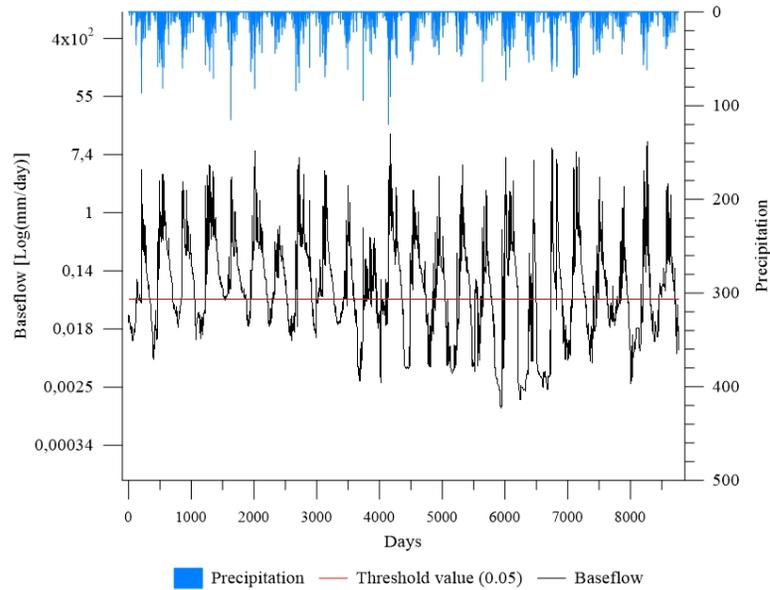


Figura 8.18: Obtención del valor umbral para la cuenca Purapel.

8.5. Resultados finales de la separación del flujo base

En las figuras siguientes (8.19, 8.20 y 8.21) se presentan los gráficos con los valores finales de la separación del flujo base. Se muestran los gráficos para el periodo 1979-2019, de Puangue, Nilahue y Purapel respectivamente. El valor del caudal base está graficado considerando el valor umbral.

Se puede ver que los gráficos presentan ciertos lapsos sin información, esto se debe a que la separación del caudal no se aplicó sobre todos los años. Los datos se graficaron a una escala mensual en milímetros, y también se agregó otro eje Y para tener los valores mensuales en m^3/s . El valor de la escorrentía directa queda dada por el área entre la curva del caudal total (Streamflow) y la del flujo base (Baseflow).

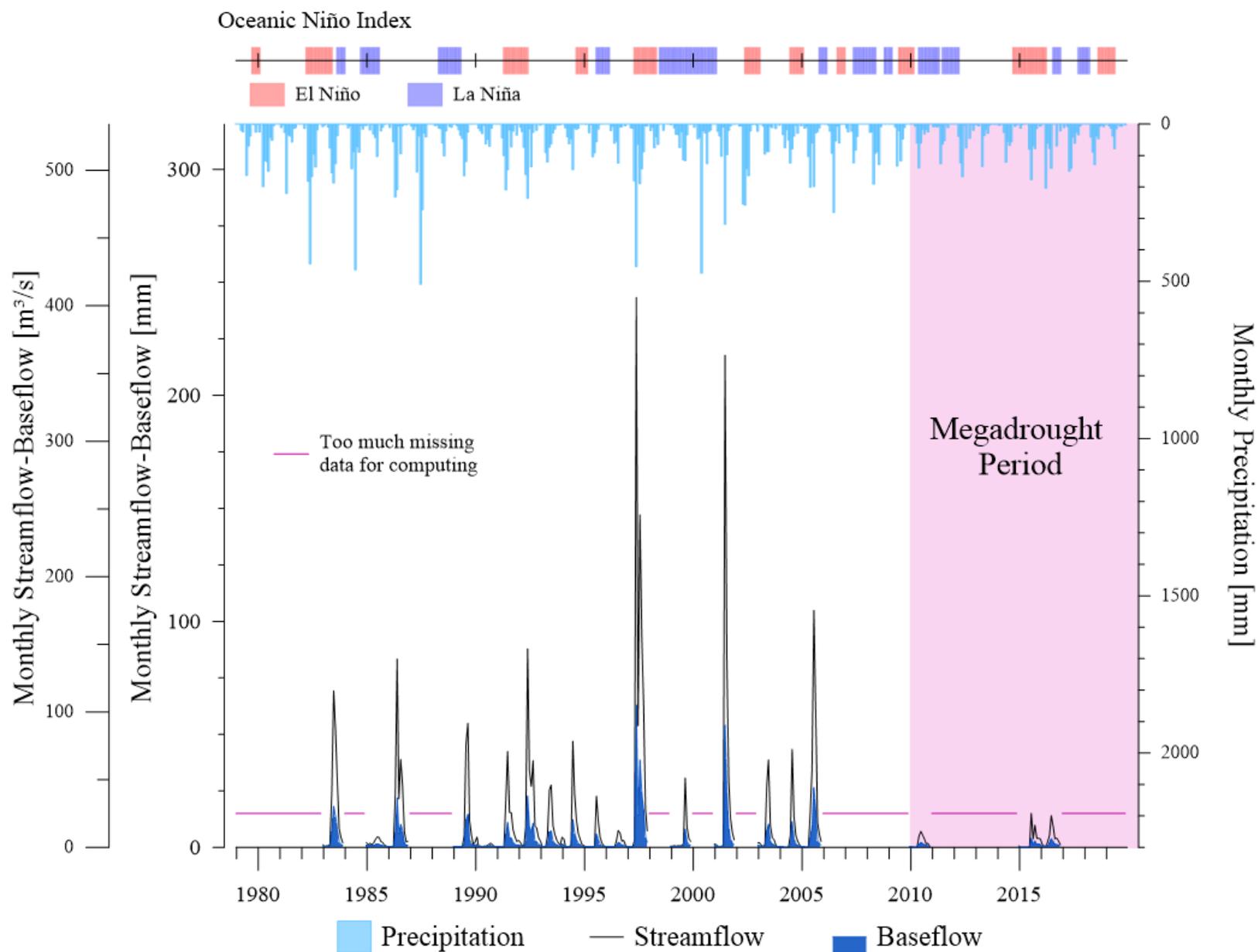


Figura 8.19: Componentes de caudal para la cuenca Puangue durante 1979-2019. La curva negra representa el caudal total, el área azul el caudal base, y la escorrentía directa está representada por el área entre las curvas de caudal total y caudal base.

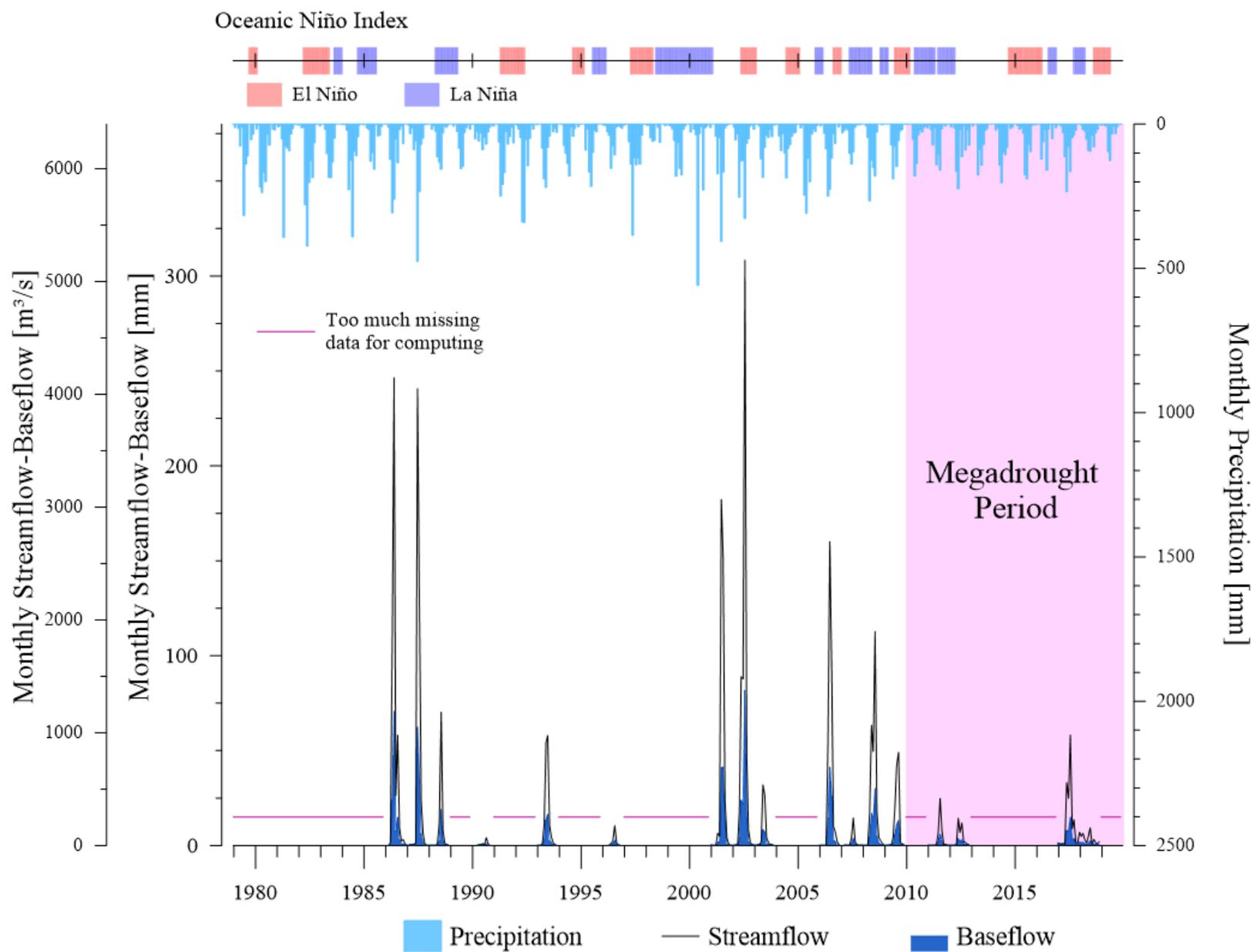


Figura 8.20: Componentes de caudal para la cuenca Nilahue durante 1979-2019. La curva negra representa el caudal total, el área azul el caudal base, y la escorrentía directa está representada por el área entre las curvas de caudal total y caudal base.

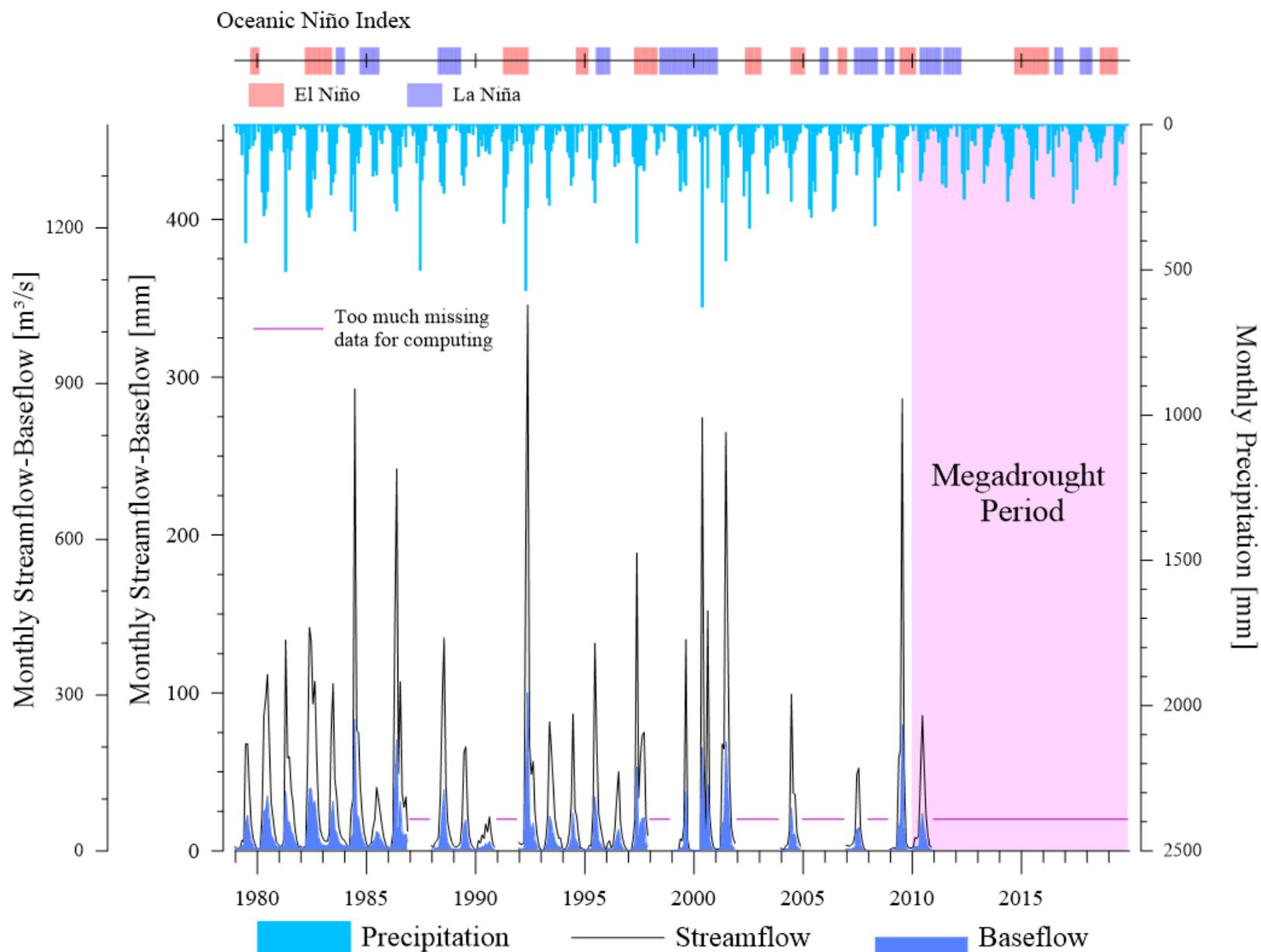


Figura 8.21: Componentes de caudal para la cuenca Purapel durante 1979-2019. La curva negra representa el caudal total, el área azul el caudal base, y la escorrentía directa está representada por el área entre las curvas de caudal total y caudal base.

8.6. Tendencia de Niveles estáticos en pozos

Con el objetivo de observar la tendencia de los niveles de agua subterránea y evaluar los cambios que ha tenido el recurso hídrico durante el periodo de estudio, es que se recopiló la información mensual de niveles estáticos de pozos monitoreados por la DGA. De la página (<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>) se obtuvo la información correspondiente al periodo de 1979-2019, de los pozos que se sitúan en la Cordillera de la Costa de las Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule.

En la Región de Valparaíso existen 93 pozos que se sitúan en la Cordillera de la Costa, se recopiló la información de 30 de ellos para analizar la tendencia del agua subterránea. En el caso de la Región Metropolitana se utilizó la información de 20 pozos de un total de 24. Para la Región del Libertador Bernardo O'higgins se cuenta con un total de 41 pozos y 19 de ellos fueron monitoreados. Por último, en la Región del Maule existe solo 1 pozo que se ubica en la Cordillera de la Costa, este fue el único que se analizó, pero lamentablemente cuenta con un registro bastante acotado.

Los criterios utilizados para la selección de los pozos de monitoreo, fueron: 1) que tuvieran el registro lo más completo posible para poder realizar una comparación sobre la tendencia que se observaba anteriormente y la actual, y 2) que se encontraran bien distribuidos dentro de la Región.

A continuación se presentan los 4 mapas que muestran las ubicación de los pozos que son monitoreados por la DGA en cada región y que se ubican en la Cordillera de la Costa (figuras 8.22, 8.27, 8.32 y 8.37). También se presentan algunos de los gráficos que muestran la evolución de los niveles estáticos en cada región.

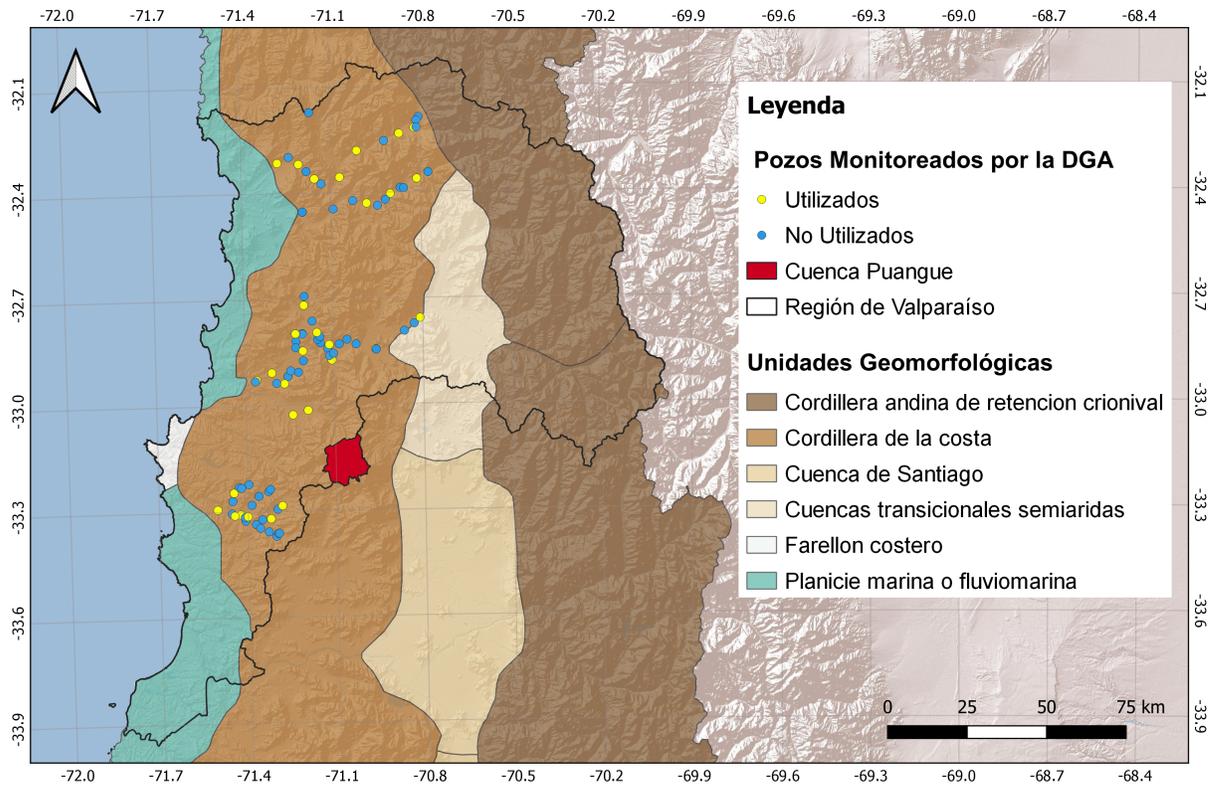


Figura 8.22: Ubicación de pozos de medición de niveles estáticos monitoreados por la DGA. Región de Valparaíso. En amarillo los pozos utilizados en este trabajo. Elaboración propia.

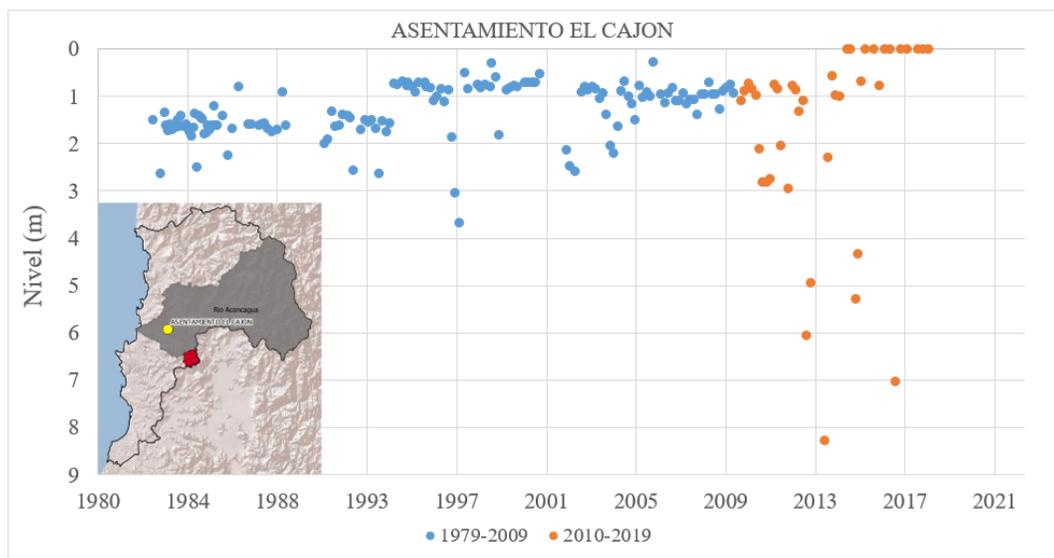


Figura 8.23: Niveles estáticos en pozo Asentamiento el cajon. Región de Valparaíso

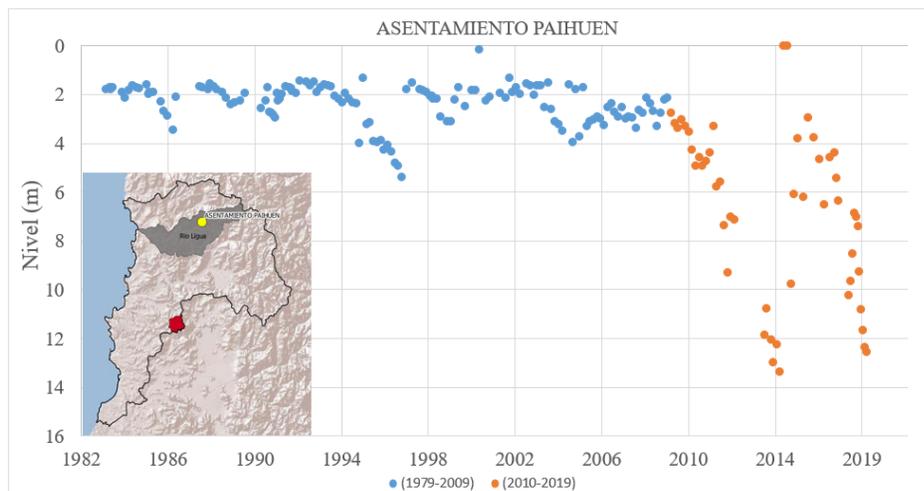


Figura 8.24: Niveles estáticos en pozo Asentamiento Paihuen. Región de Valparaíso.

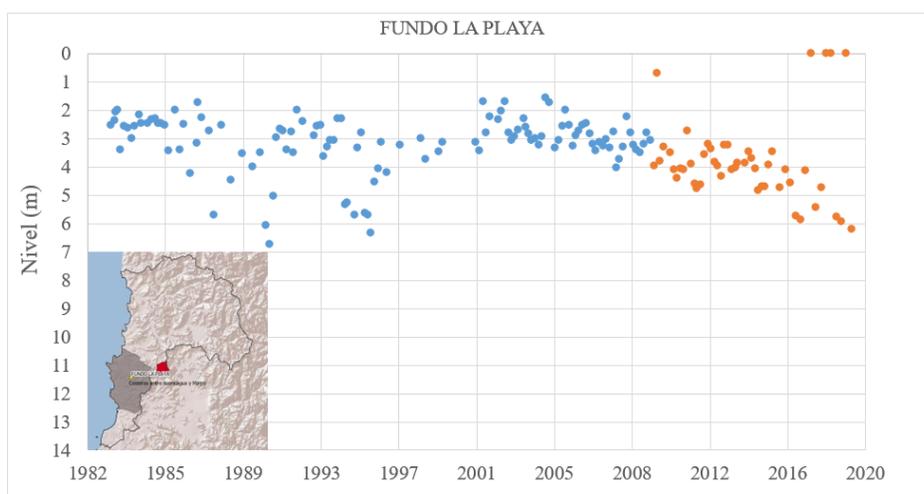


Figura 8.25: Niveles estáticos en pozo Fundo La Playa. Región de Valparaíso.

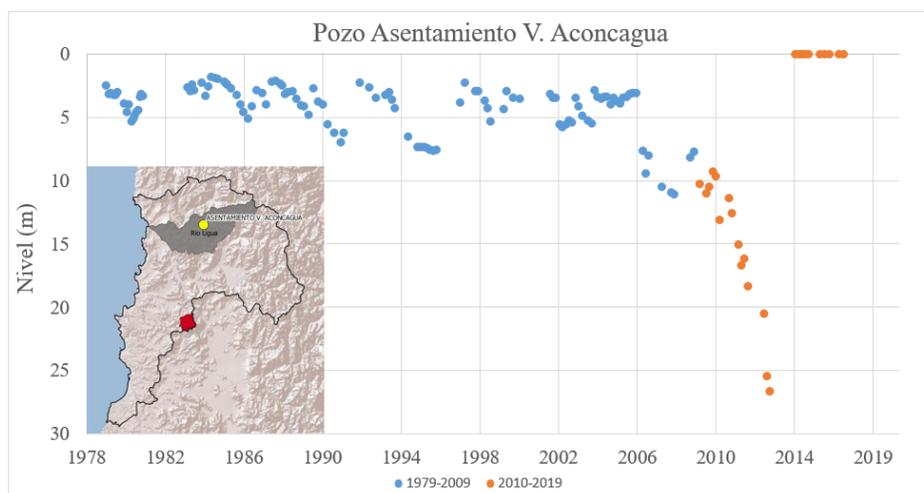


Figura 8.26: Niveles estáticos en pozo Asentamiento V. Aconcagua. Región de Valparaíso.

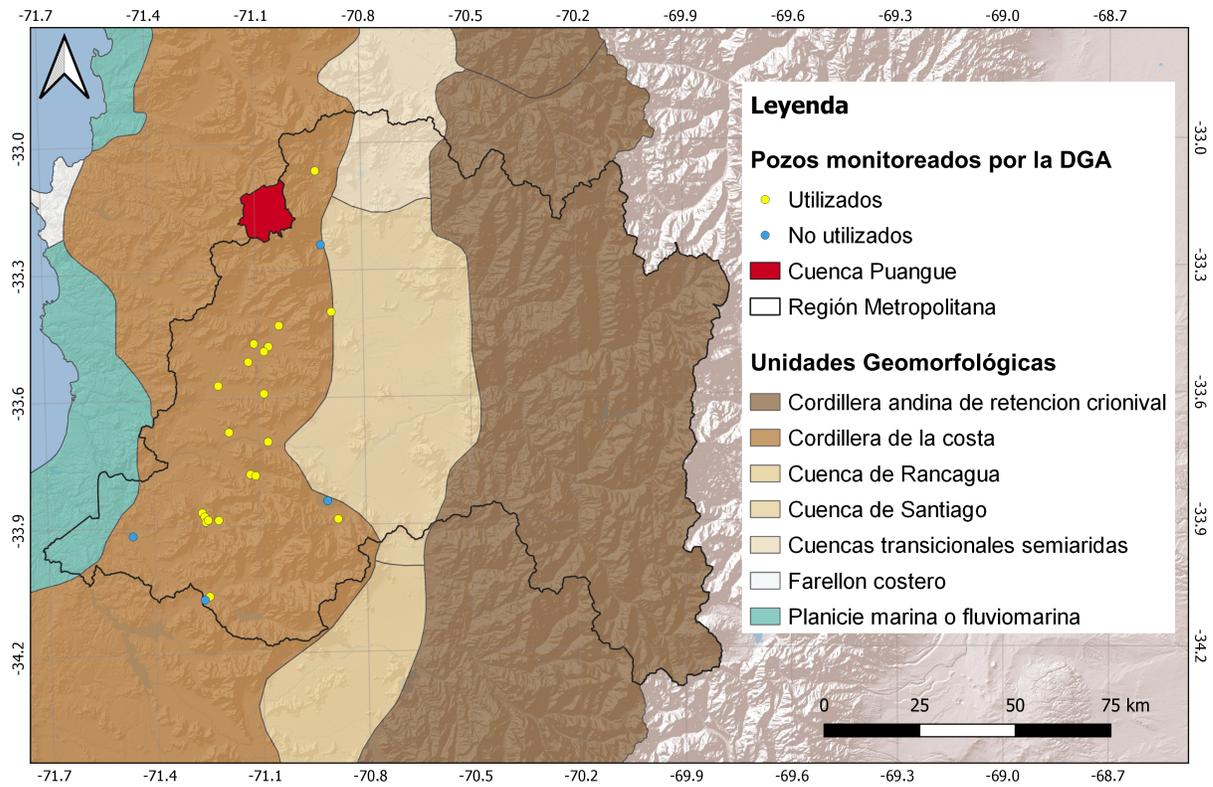


Figura 8.27: Ubicación de pozos de medición de niveles estáticos monitoreados por la DGA. En amarillo los pozos seleccionados para el monitoreo. Región de Metropolitana

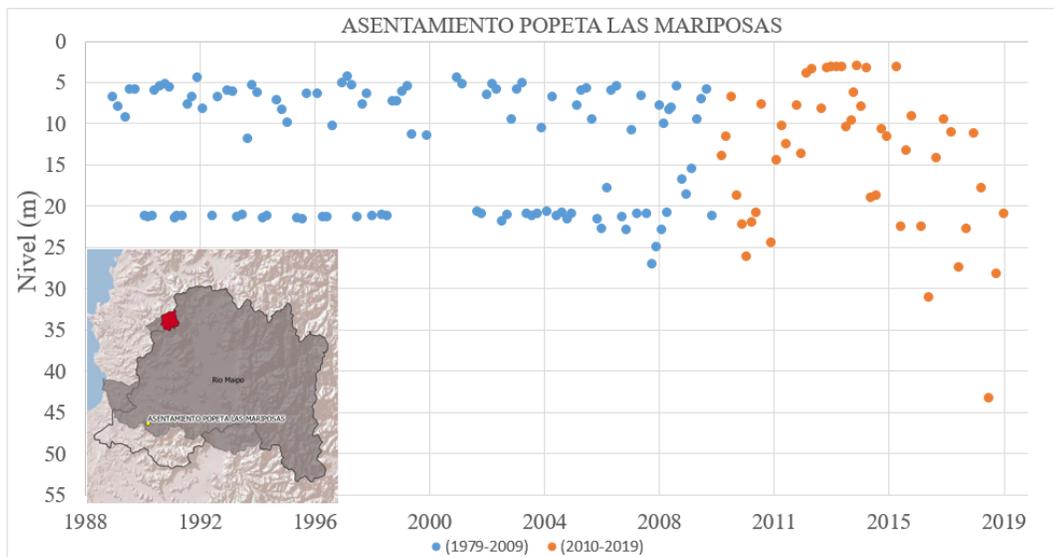


Figura 8.28: Niveles estáticos en pozo Asentamiento Popeta las Mariposas. Región Metropolitana.

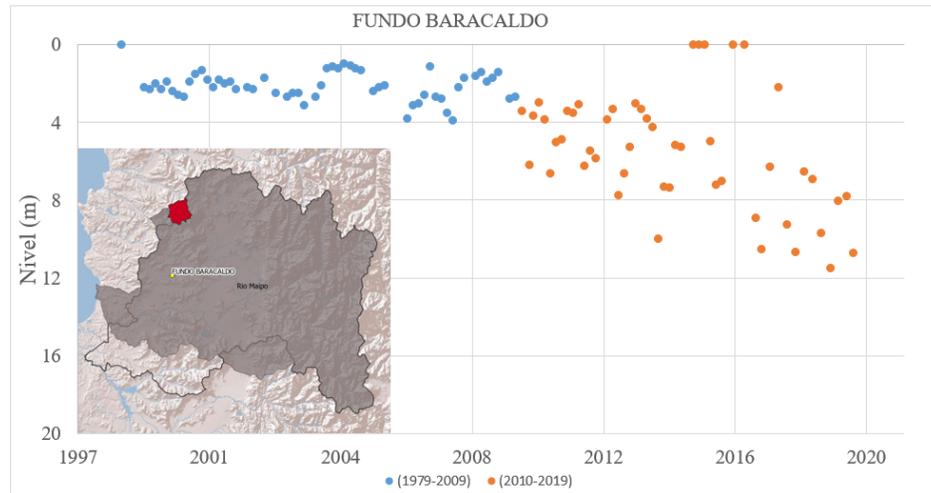


Figura 8.29: Niveles estáticos en pozo Fundo Baracaldo. Región Metropolitana.

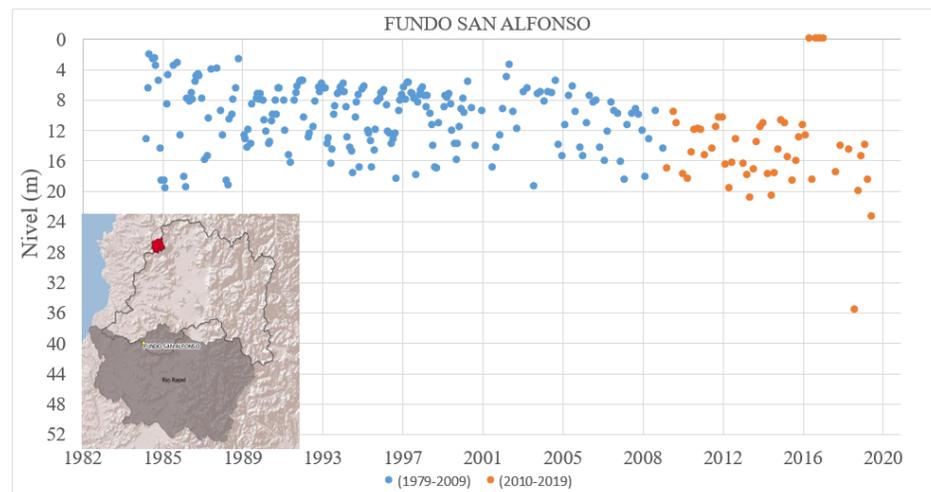


Figura 8.30: Niveles estáticos en pozo Fundo San Alfonso. Región Metropolitana.

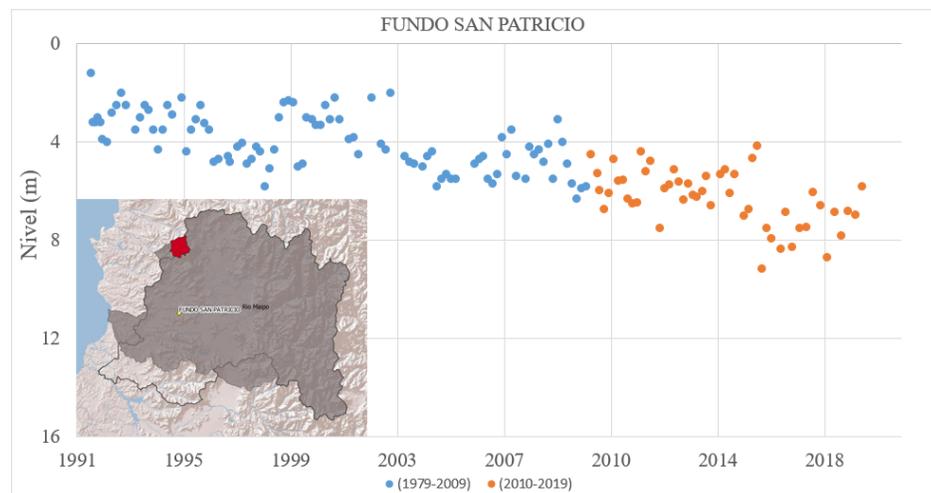


Figura 8.31: Niveles estáticos en pozo Fundo San Patricio. Región Metropolitana.

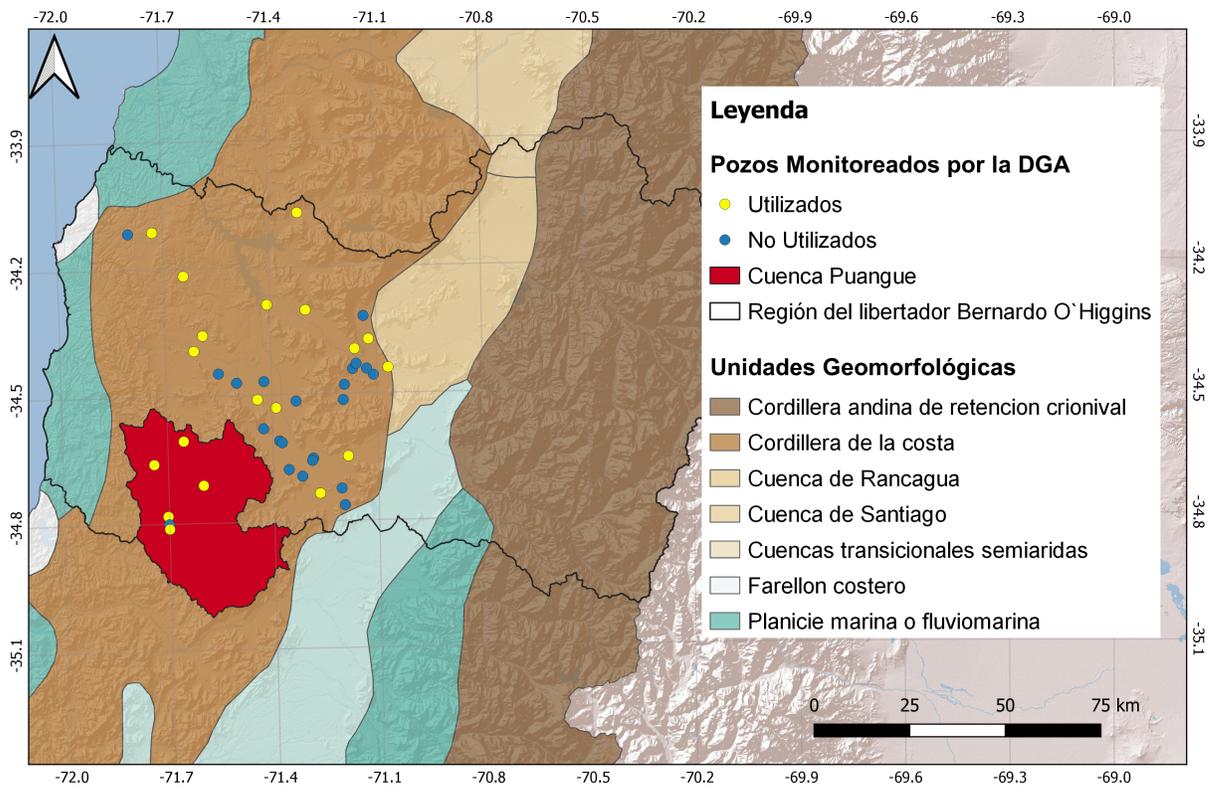


Figura 8.32: Ubicación de pozos de medición de niveles estáticos monitoreados por la DGA. En amarillo los pozos seleccionados para el monitoreo. Región del Libertador Bernardo O'Higgins

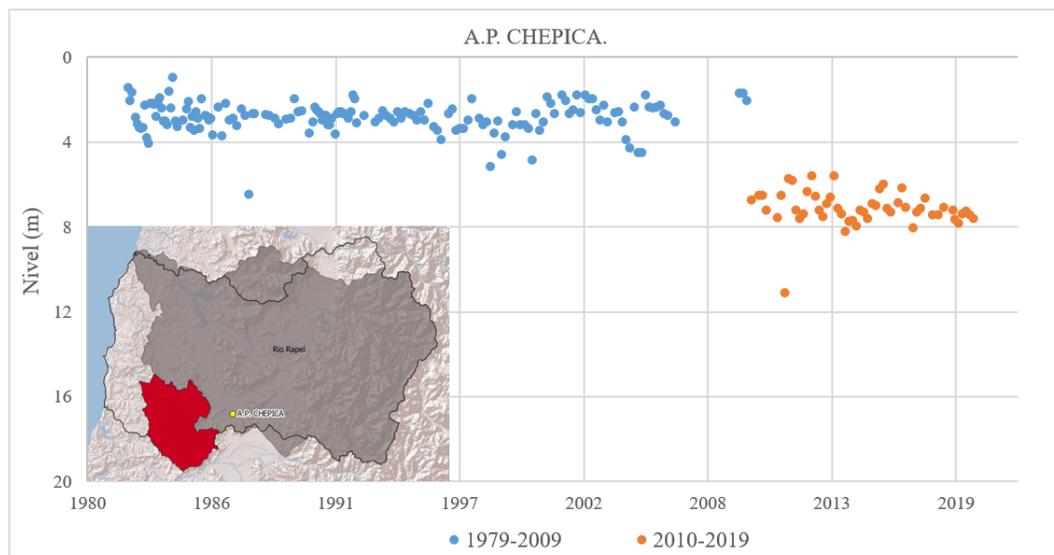


Figura 8.33: Niveles estáticos en pozo A.P. CHEPICA. Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

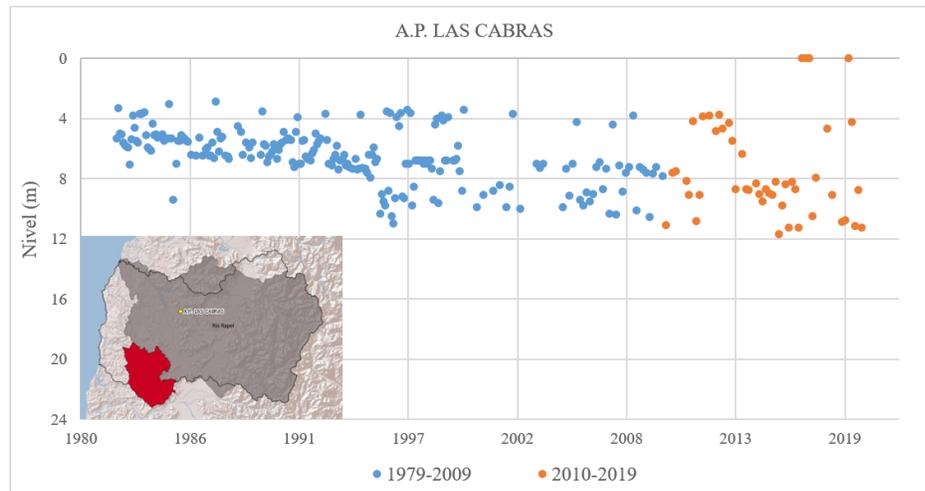


Figura 8.34: Niveles estáticos en pozo A.P Las Cabras. Región del Libertador Bernardo O'Higgins

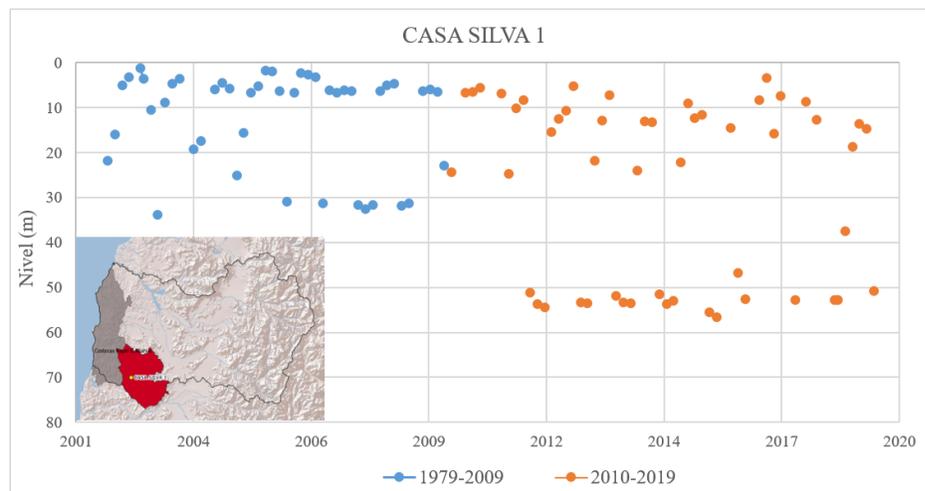


Figura 8.35: Niveles estáticos en pozo Casa Silva (1). Región del Libertador Bernardo O'Higgins

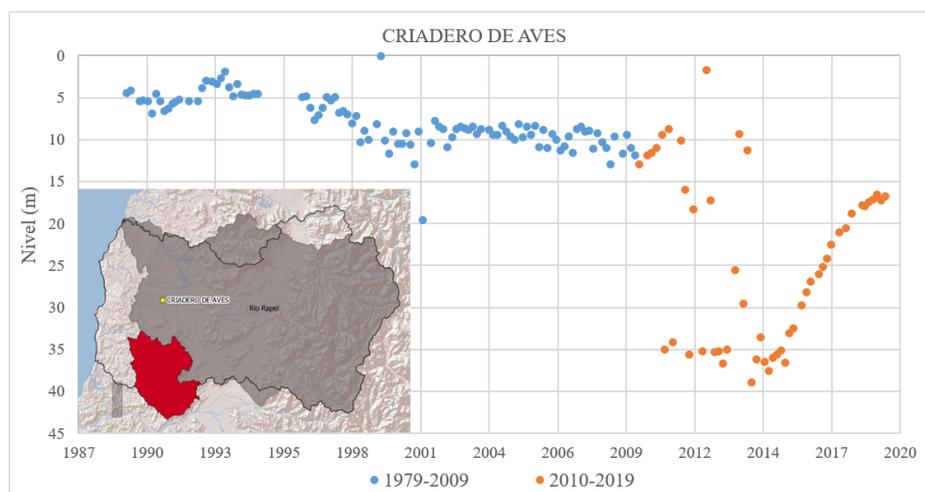


Figura 8.36: Niveles estáticos en pozo Criadero de Aves. Región del Libertador Bernardo O'Higgins

En anexos, de la figura 11.1 a la figura 11.56 se presenta la totalidad de los gráficos que muestran la evolución de los niveles de agua subterránea en los pozos que fueron analizados en cada región.

Del análisis de pozos situados en la Región de Valparaíso, es posible notar que la mayoría de ellos poseen un nivel estático histórico que se encuentra entre los 2 a 6 metros de profundidad. Se observa que 17 de los pozos muestran una clara tendencia de un aumento en la profundidad del nivel estático a partir del año 2010. De los pozos restantes, 7 de ellos muestran una tendencia lineal en la que los niveles se han mantenido constantes en el tiempo, y 6 de ellos poseen poca información para realizar esta comparación. La disminución del nivel freático que se ha evidenciado en la mayoría de los pozos, puede ser tan notoria como la que experimenta el pozo Asentamiento V. Aconcagua (figura 8.26), el cual presenta un comportamiento lineal y estable de los niveles estáticos desde 1979 hasta el 2009 que oscila cercano a los 4 metros de profundidad, y que luego, a partir del año 2010 presenta una evidente disminución llegando a superar los 25 metros de profundidad. A su vez, esta disminución puede ser menos perceptible como la que presenta el pozo Tabolango (1) (figura 11.16) que de un nivel estable de 2-4 metros de profundidad, disminuyó hasta los 8 metros a partir del año 2010.

El análisis de los pozos situados en la Región Metropolitana muestran que los niveles estáticos históricos presentan un comportamiento lineal, con niveles estables en el tiempo que varían en un rango amplio de profundidad, que va desde los 5 a los 20 metros aproximadamente. Al igual que lo observado en la Región de Valparaíso, los pozos muestran un aumento en la profundidad de los niveles estáticos a partir del año 2010. Sin embargo, esta disminución no es tan evidente como la que se presenta en Valparaíso. No obstante, durante el periodo de megasequía, algunos pozos como los que se presentan en las figuras 11.39, 11.35 y 11.31, muestran elevadas profundidades que se escapan a las del registro histórico, sobre todo para el año 2019. Por ejemplo, el pozo Fundo el Parron (figura 11.35) muestra que durante el 2016-2019 algunas mediciones son cercanas a los 18 metros de profundidad, mientras que los valores históricos no superan los 4 metros de profundidad. De un total de 20 pozos analizados, 7 de ellos muestran una tendencia lineal con niveles que se han mantenido estables durante todo el periodo de estudio, y los 13 restantes evidencian que desde el 2010 el nivel freático se ha profundizado.

En cuanto a lo experimentado por los pozos situados en la Región de O'Higgins, también es posible observar el aumento de la profundidad de los niveles estáticos a partir del 2010. A modo de ejemplo, esto se puede ver en las figuras 8.36, 8.33 y 11.53. Sin embargo, de los 19 pozos analizados, 9 de ellos muestran una tendencia lineal de los niveles estáticos, 6 muestran una tendencia que va a la disminución. Los 4 restantes muestran valores dispersos sin una tendencia clara, o en su defecto, una acotada cantidad de mediciones que no permite comparar el periodo histórico con la megasequía. Los niveles históricos estáticos de los pozos se encuentran a profundidades bastante variadas, en algunos casos alcanzan los 40 metros de profundidad, pero que en su gran mayoría oscilan entre los 3 y los 10 metros de profundidad.

En la Región del Maule no es posible realizar una comparación entre el periodo histórico y la megasequía, ya que solo se cuenta con las mediciones de un pozo durante el periodo 2013-2019, el cual que presenta valores estables cercano a los 12 metros de profundidad.

8.7. Componentes del Balance Hídrico

8.7.1. Precipitación

De los datos de precipitación diaria obtenidos del CR², se calcularon los valores mensuales para cada cuenca durante el periodo 1979 - 2019. Estos valores se presentan en anexos, desde la tabla 11.11 a la 11.16. En el capítulo de Precipitaciones 5.2, se presentan los gráficos con los valores de precipitaciones anuales de cada cuenca para el periodo 1979-2019 (5.6, 5.7 y 5.8), donde es posible observar la disminución que ha experimentado la precipitación en la última década. En ese mismo capítulo se analizan las variaciones respecto a los promedios mensuales de precipitaciones a escala decadal, dichos gráficos se presentan en las figuras 11.57, 11.58 y 11.59 de los anexos.

8.7.2. Evapotranspiración Portencial (ETP)

Los valores diarios de ETP también se obtuvieron del CR². A partir de ellos se calcularon los valores mensuales y anuales. En la figura 8.39 se presentan los valores anuales de la ETP de las 3 cuencas para el periodo 1979 - 2019. Se puede observar que no existe una gran variabilidad inter-anual. La cuenca Nilahue es la que presenta los mayores valores ETP, seguida de Purapel y Puangue.

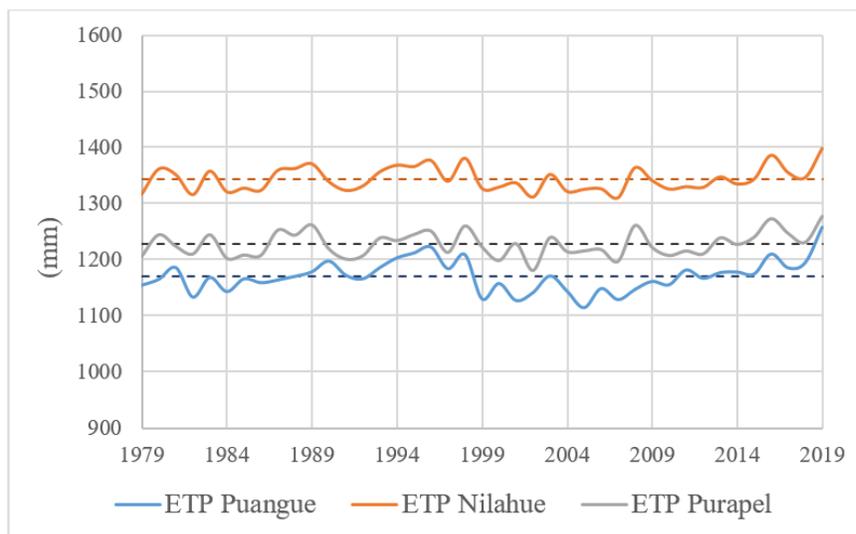


Figura 8.39: Potencial de evapotranspiración anual para las cuencas de Puangue Nilahue y Purapel. Elaboración propia.

Se calcularon los promedios mensuales de ETP, cuyos resultados se presentan en la figura 8.40. A partir de los datos obtenidos, se observa que existe una alta variabilidad intra-anual, donde los mayores valores se concentran en los meses de octubre a marzo y los menores valores ocurren principalmente en invierno. Este comportamiento se asemeja al que experimentan las temperaturas medias mensuales (capítulo 5.1).

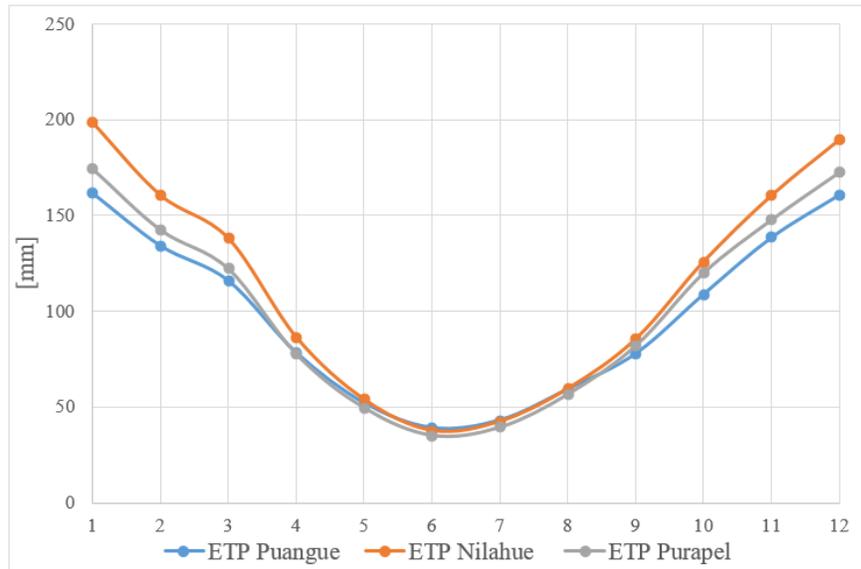


Figura 8.40: Promedio mensual de evapotranspiración potencial para las cuencas de Puangue Nilahue y Purapel. Elaboración propia.

8.7.3. Escorrentía directa (Q_d)

Como se explicó en la metodología, la escorrentía directa (Q_d) corresponde a una descarga del sistema, la cual se calculó a partir de la aplicación del filtro propuesto por Eckhardt (2005). Se obtuvieron los valores diarios de Q_d en unidad de milímetros de aquellos años que fueron seleccionados para aplicación del filtro, estos fueron sumados para obtener valores mensuales y anuales.

Se procedió a calcular los promedios mensuales de la escorrentía directa (Q_d), del flujo base (Q_b), y se contrastaron con los valores de precipitaciones medias mensuales, dichos gráfico aparecen en la figura 8.41, 8.42 y 8.43 correspondiente a las cuenca Puengue, Nilahue y Purapel respectivamente. Es posible observar que Q_d y Q_b presentan una alta variabilidad interanual, pasando de valores cercanos a 0 en épocas estivales a caudales notoriamente mayores durante los meses de mayo a septiembre, esto como resultado del régimen pluvial que caracteriza a las cuencas. Durante estos meses, también es posible observar que la escorrentía superficial es mucho mayor que el caudal base, sin embargo, para los meses de estiaje en los que la precipitación es mucho menor, los valores de Q_d y Q_b se asemejan mucho más.

En relación al gráfico de la cuenca Puangue (8.41), se observa que la escorrentía superficial mensual de los meses más caudalosos se encuentra entre los 20 a 25 milímetros. El caudal base máximo no supera los 10 milímetros.

En el caso de la cuenca Nilahue, los mayores valores de escorrentía superficial se concentran en el mes de agosto, con valores cercanos a los 50 mm. Por su parte, el caudal base en los meses de invierno se sitúa entre los 10 a 20 milímetros.

Para la cuenca Purapel, los valores máximos de escorrentía superficial se encuentran sobre los 60 milímetros y se dan en el mes de junio. Los caudales bases de los meses invernales

varían entre los 20 a 25 milímetros, valores que presenta la cuenca Puangue para la escorrentía directa.

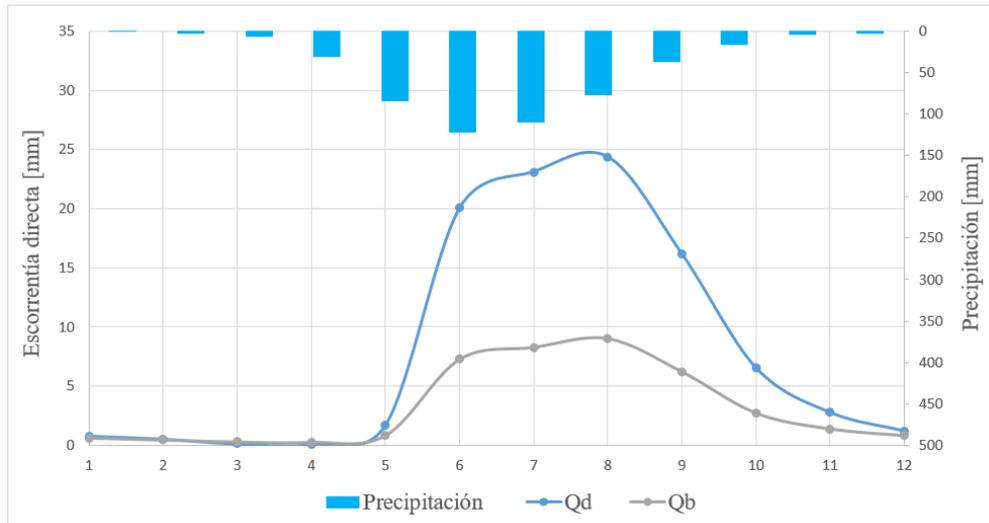


Figura 8.41: Promedio mensual de Escorrentía directa (Qd), Flujo base (Qb) y Precipitación (Pp) de la cuenca Puangue, para los años a los que se aplicó el filtro de Eckhardt. (Elaboración propia)

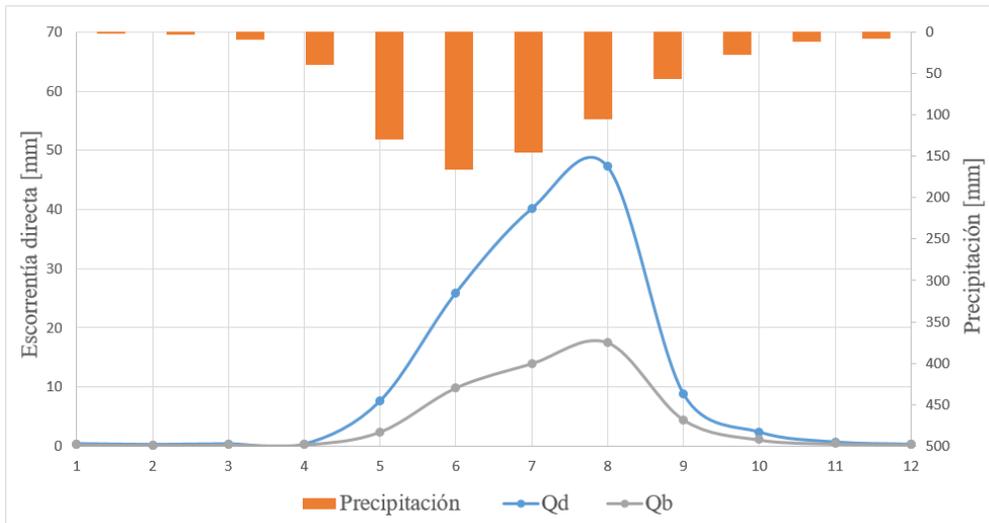


Figura 8.42: Promedio mensual de Escorrentía directa (Qd), Flujo base (Qb) y Precipitación (Pp) de la cuenca Nilahue, para los años a los que se aplicó el filtro de Eckhardt. (Elaboración propia)

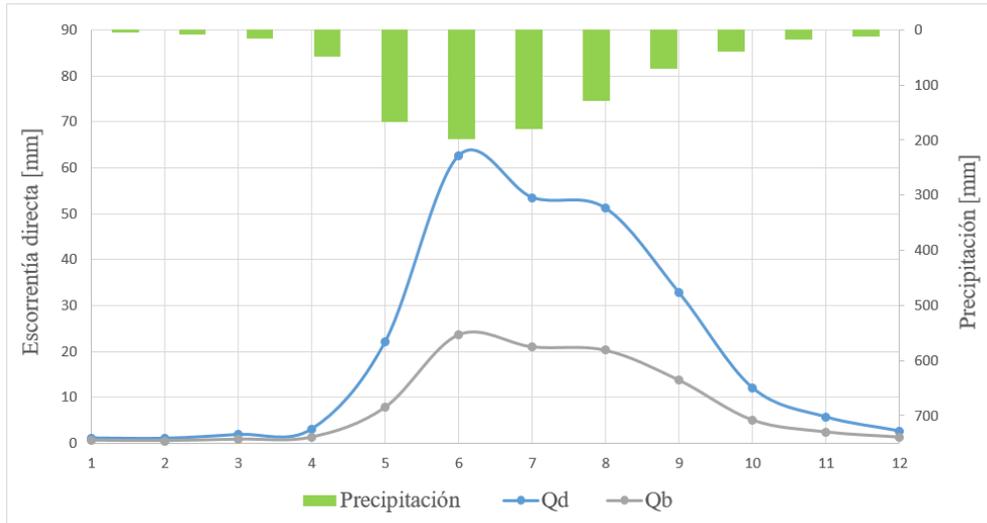


Figura 8.43: Promedio mensual de Escorrentía directa (Qd), Flujo base (Qb) y Precipitación (Pp) de la cuenca Purapel, para los años a los que se aplicó el filtro de Eckhardt. (Elaboración propia)

En las figuras 8.44, 8.45 y 8.46 se presentan los gráficos que muestran el porcentaje mensual que representa Qd y Qb del caudal total para las cuencas de Puangue, Nilahue y Purapel respectivamente.

En el caso de Puangue, se observa que para la mayoría de los meses la escorrentía directa es la que más aporta al caudal total, pero en los meses de marzo y abril es el caudal base el que representa un mayor porcentaje del caudal total, llegando incluso a un 80%, valor que es superior al porcentaje que representa la escorrentía en cualquier mes. La alta contribución que realiza el caudal base al caudal total se presenta al finalizar la temporada estival, en los meses en que el caudal total presenta los valores más bajos.

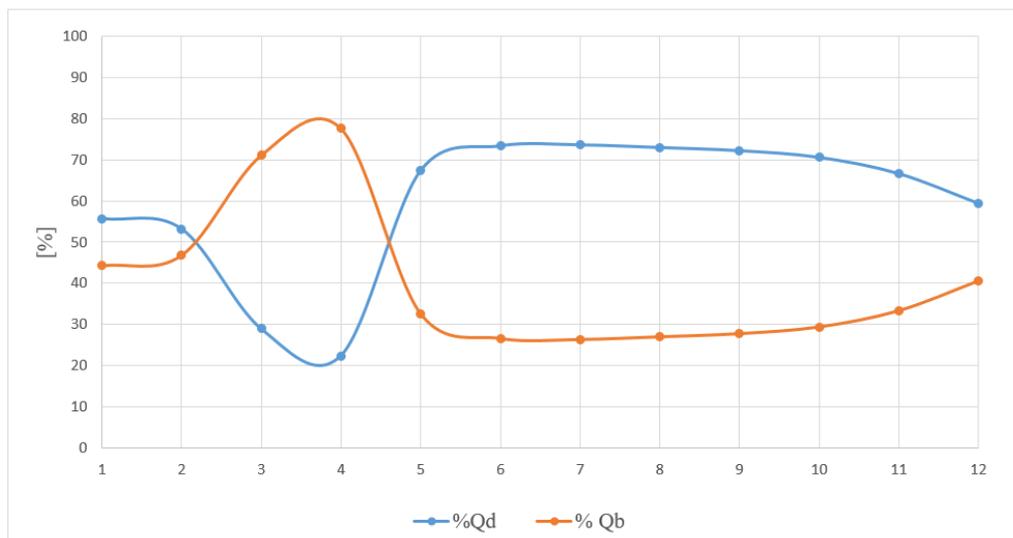


Figura 8.44: Porcentaje mensual que representa Qd y Qb respecto al valor del caudal total, cuenca Puangue. (Elaboración propia).

En la cuenca Nilahue el mayor aporte del caudal base ocurre entre diciembre a abril, meses que corresponden a temporadas de estiaje. Sin embargo, en esta cuenca la escorrentía directa representa un mayor porcentaje del caudal total durante todo el año.

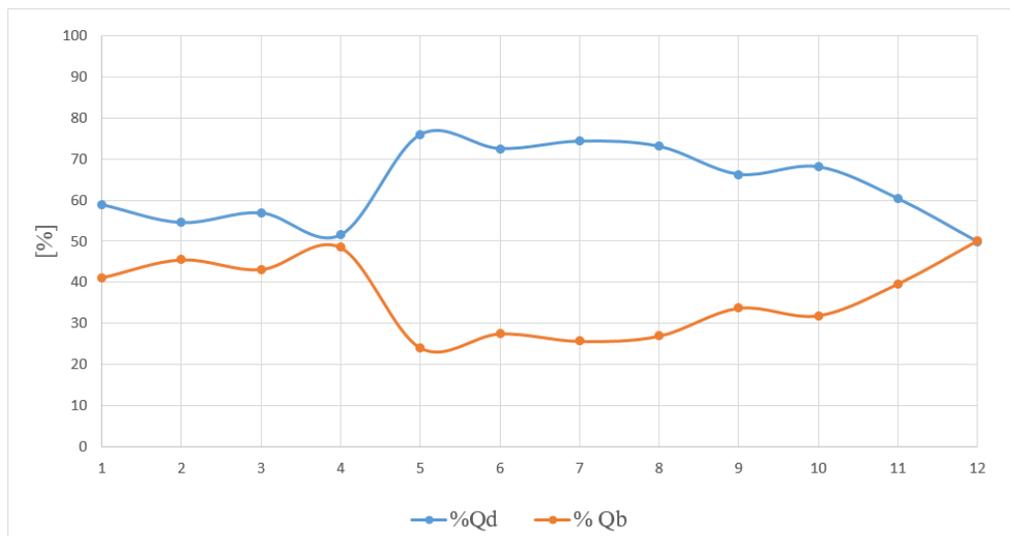


Figura 8.45: Porcentaje mensual que representa Qd y Qb respecto al valor del caudal total, cuenca Nilahue. (Elaboración propia).

El comportamiento de Purapel muestra que el porcentaje de Qd y Qb respecto al caudal total, es bastante homogéneo durante todo el año. La escorrentía superficial es siempre mayor que el caudal base y el porcentaje que representa del caudal total es muy cercano al 70% durante todos los meses del año.

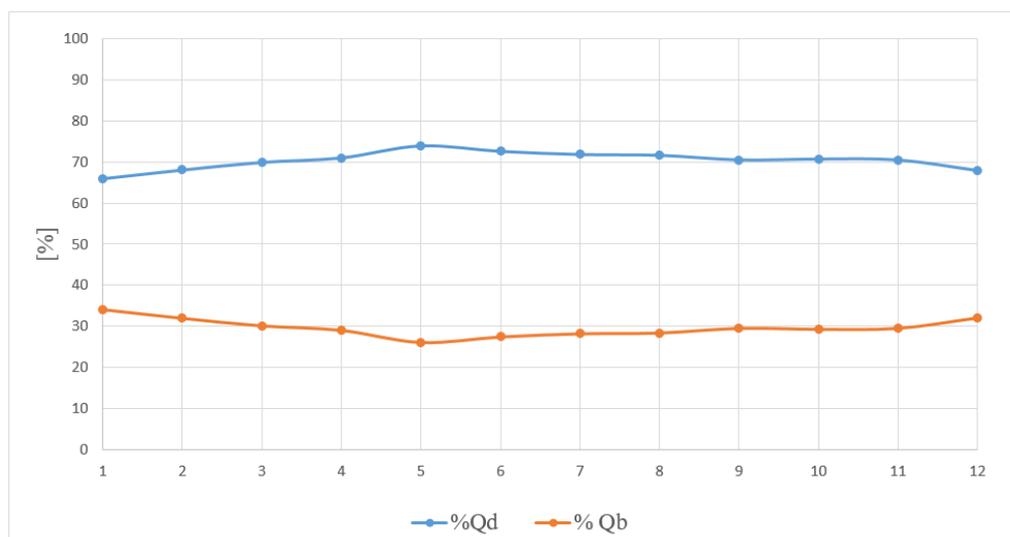


Figura 8.46: Porcentaje mensual que representa Qd y Qb respecto al valor del caudal total, cuenca Purapel. (Elaboración propia).

A partir de los 3 gráficos, se puede observar que en condiciones de mayor aridez como la que presenta Puangue, y particularmente en periodos de estiaje, el caudal base es primordial ya que se presenta como el principal alimentador del cauce.

En la figura 8.47 se presenta la precipitación y escorrentía anual de la cuenca Puangue, ordenada de menor a mayor respecto a Qd. Se calculó el porcentaje que representa Qd de las precipitaciones y se observa que existe una relación entre dichos parámetros, donde a valores mayores de precipitación la escorrentía representa un mayor porcentaje de ella. En promedio, la escorrentía directa corresponde a un 16,5% de la precipitación con un máximo de un 42% y un mínimo de 3%. Para valores de precipitaciones anuales inferiores a unos 400 mm, la escorrentía disminuye considerablemente representando menos de un 20% de la precipitación.

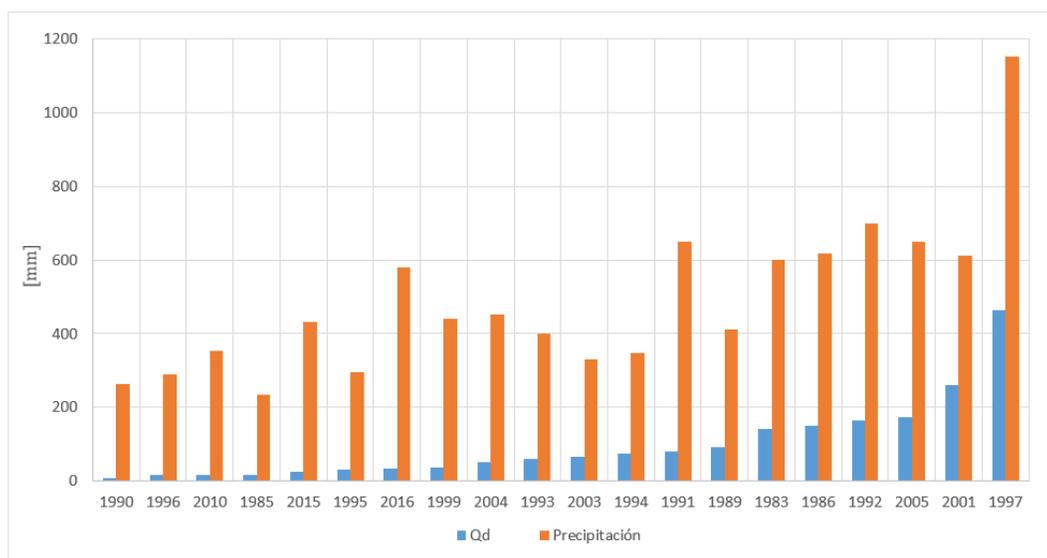


Figura 8.47: Valores anuales de la Precipitación y escorrentía de la cuenca Puangue. (Elaboración propia).

Si bien la relación precipitación-escorrentía muestra cierta linealidad, no siempre es tan directa, ya que se tienen años con un alto volumen acumulado de precipitaciones, como por ejemplo 1991, donde la escorrentía superficial es menor que años que presentan una menor precipitación. Esto último se puede observar en la figura 8.48, gráfico que relaciona dichos parámetros y donde al aplicar una regresión lineal a los datos, se ve que algunos de ellos se alejan de la línea de tendencia. A partir de esta línea de tendencia se tiene que para precipitaciones anuales menores a unos 320 mm, la escorrentía superficial es prácticamente nula.

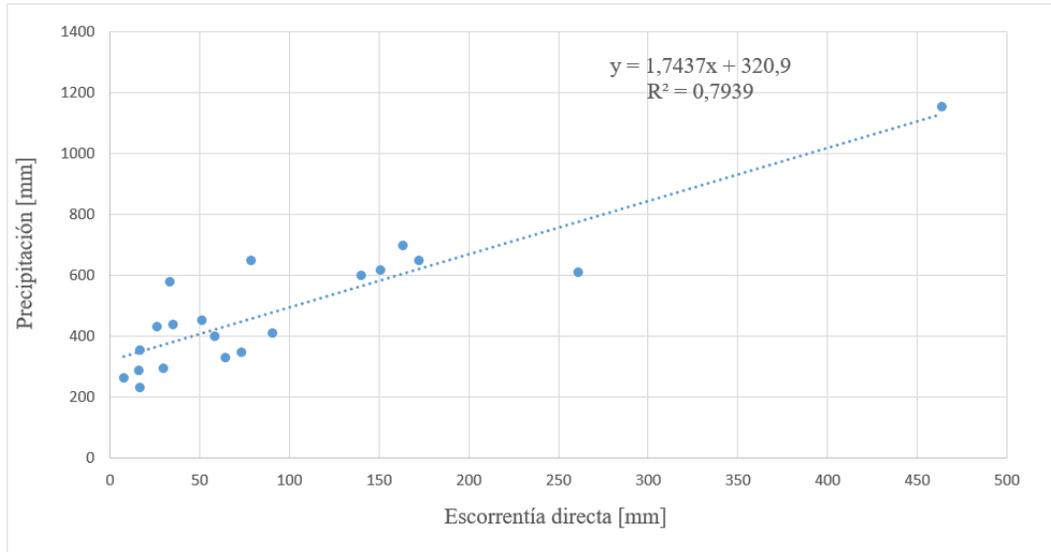


Figura 8.48: Relación entre la Precipitación y la escoorrentía anual de la cuenca Puangué. (Elaboración propia).

En el caso de Nilahue, también es posible notar una relación lineal entre la precipitación y la escoorrentía superficial anual. En el gráfico 8.49 se presentan dichos valores. El año 2012 se aleja un poco de la linealidad, ya que la escoorrentía superficial es baja en relación al volumen de agua precipitada. Adicionalmente, se obtuvo que en promedio la escoorrentía directa representa un 16,2 % de la precipitación, con un máximo de un 38 % y un mínimo de un 1 %. De acuerdo al ajuste lineal presentado en la figura 8.50, se esperaría tener valores nulos o muy bajos de Qd para precipitaciones menores a 470 milímetros.

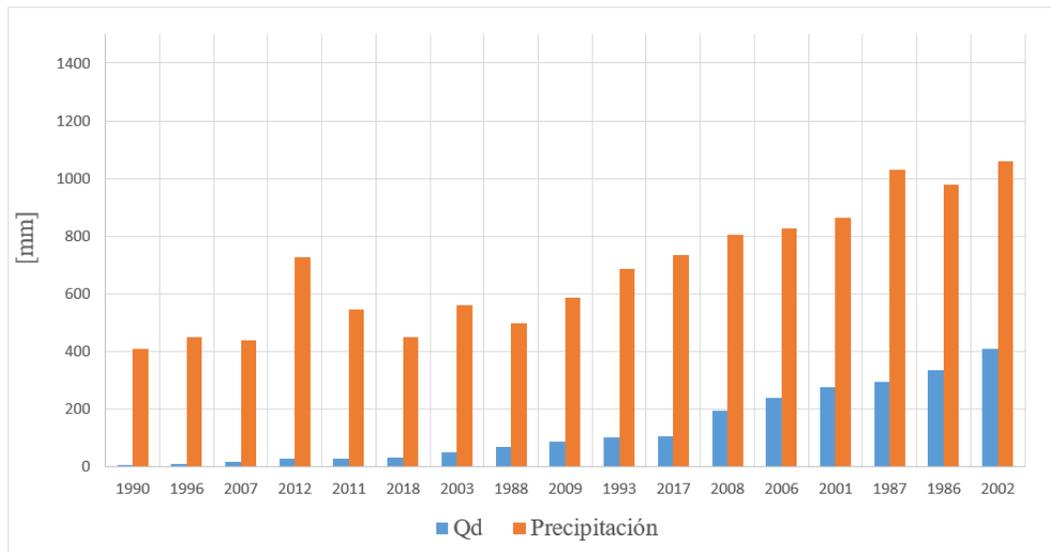


Figura 8.49: Valores anuales de la Precipitación y escoorrentía de la cuenca Nilahue. (Elaboración propia).

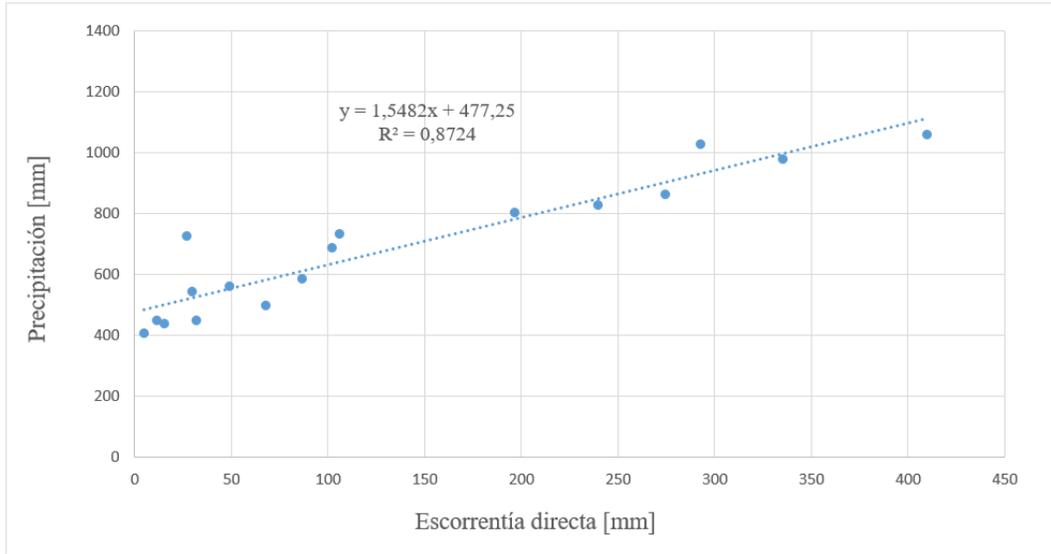


Figura 8.50: Relación entre la Precipitación y la escoorrentía anual de la cuenca Nilahue. (Elaboración propia).

En el caso de Purapel la relación de linealidad no es tan directa, esto se observa a partir de la figura 8.51 y se corrobora con la figura 8.52, donde al aplicar un ajuste lineal a los datos, se aprecia como muchos de ellos se alejan de la tendencia, por lo que se obtiene un bajo coeficiente de determinación de 0,64. En Nilahue el coeficiente era de 0,87 y en Puangue de 0,79. Del ajuste líneal realizado, es posible observar que precipitaciones menores a 550 milímetros anuales generarían una Qd muy baja a nula. Respecto al porcentaje que representa Qd de la precipitación, se tiene que en promedio corresponde a un 26 %, con un máximo de 46 % y un mínimo de un 11 %. Dichos valores muestran que la escoorrentía directa representa un mayor porcentaje en la cuenca Purapel, seguido de Puangue y Nilahue.

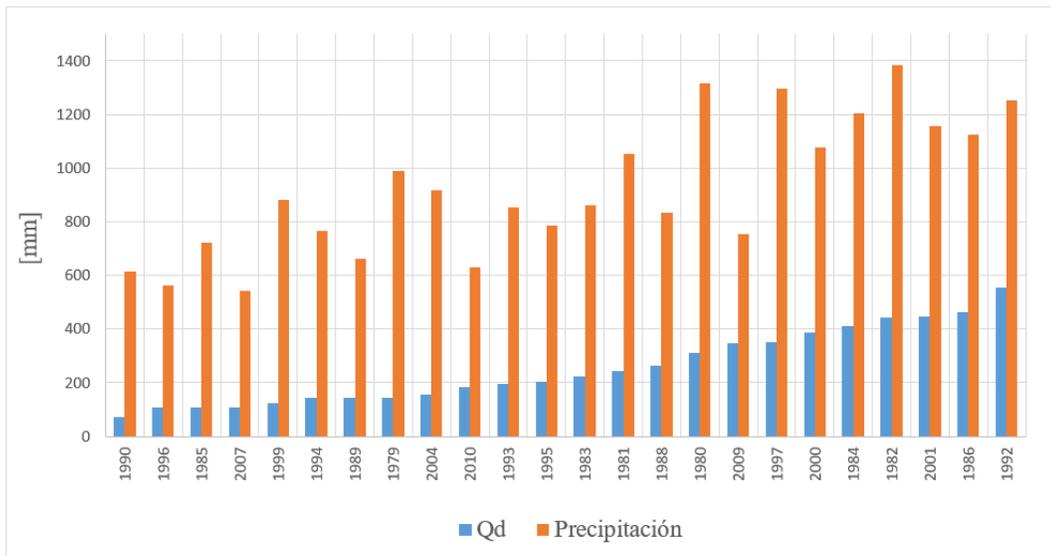


Figura 8.51: Valores anuales de la Precipitación y escoorrentía de la cuenca Purapel. (Elaboración propia).

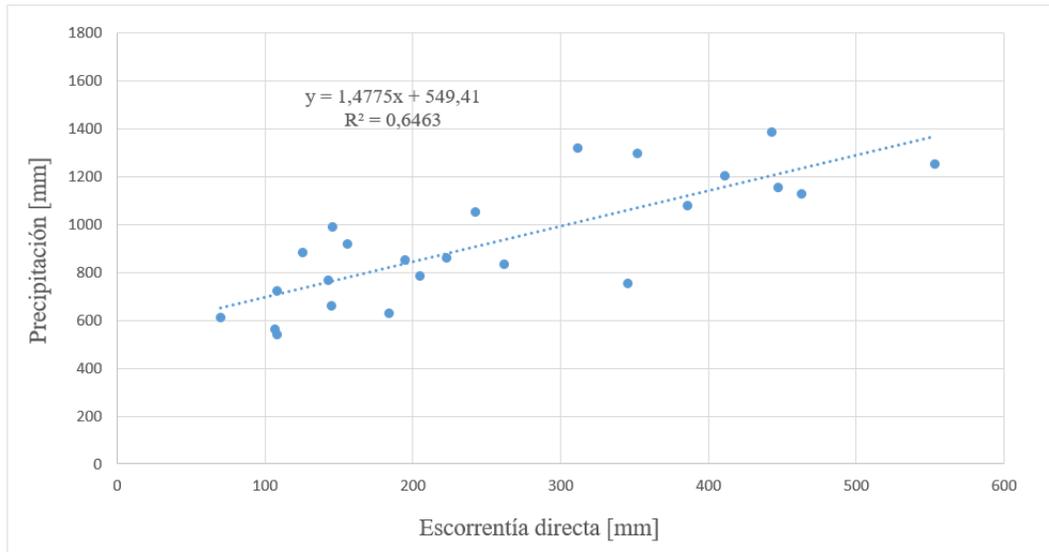


Figura 8.52: Relación entre la Precipitación y la escorrentía anual de la cuenca Purapel. (Elaboración propia).

8.8. Recarga

La recarga de cada cuenca se obtuvo realizando el balance hídrico, tal y como sale explicado en el capítulo 7.7. La Recarga se calculó a una escala diaria sobre los años a los que se les realizó la separación del caudal. Luego se obtuvieron los valores mensuales y anuales. Para el resto de los años la recarga se estimó a una escala anual, a partir de la construcción de la curva que relaciona las precipitaciones con la recargas calculadas. La construcción de esta curva se presenta en las siguientes figuras 8.53, 8.54 y 8.55, correspondiente a Puangue, Nilahue y Purapel respectivamente. En Puangue se utilizaron 16 años para construir esta curva, en Nilahue 17 años y en Purapel 24 años.

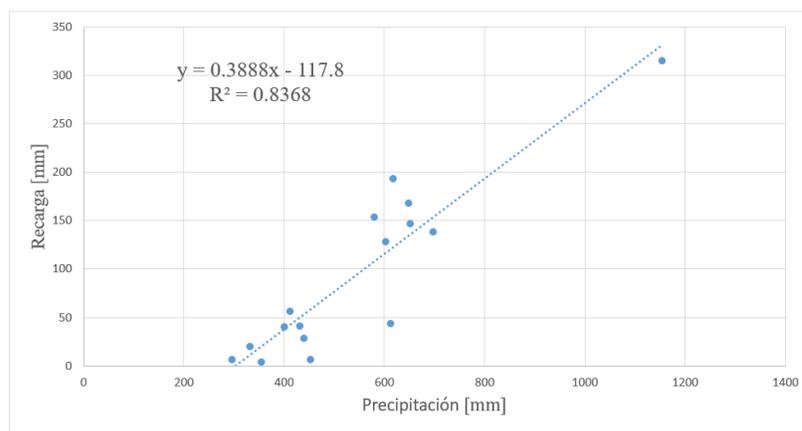


Figura 8.53: Curva que relaciona las precipitaciones con la recargas calculada, cuenca Puangue.

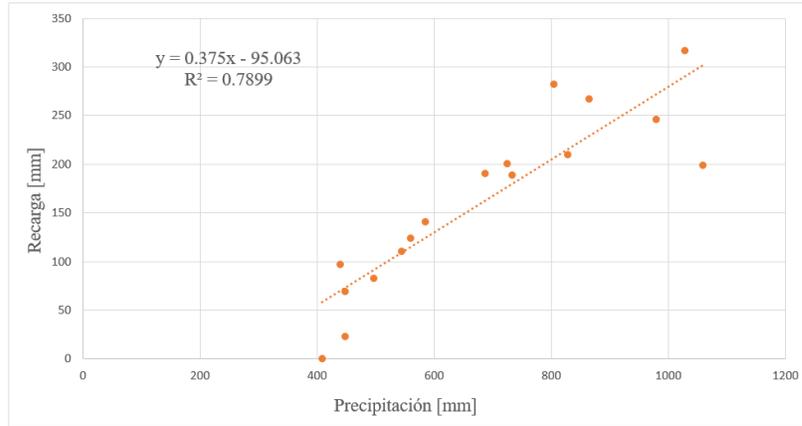


Figura 8.54: Curva que relaciona las precipitaciones con la recargas calculada, cuenca Nilahue.

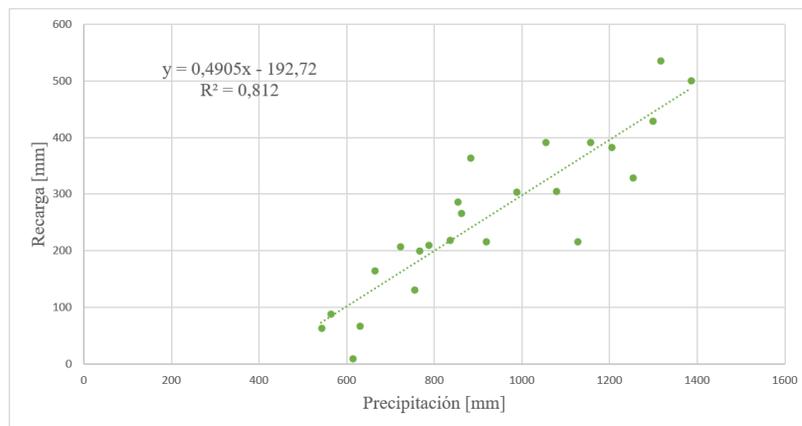


Figura 8.55: Curva que relaciona las precipitaciones con la recargas calculada, cuenca Purapel.

En la tabla 8.7 se recopilan las ecuaciones que permiten estimar la recarga. A partir de ellas se puede inferir que en la cuenca Puangue, precipitaciones anuales menores a 302 milímetros generarían recargas nulas. En el caso de Nilahue, bajo los 254 milímetros de precipitación anual la recarga sería nula, y en Purapel la recarga nula se daría bajo los 475 milímetros de precipitación anual.

Tabla 8.7: Ecuaciones para estimar la recarga de Puangue, Nilahue y Purapel, junto con su respectivo coeficiente de determinación (R^2). R corresponde a la recarga y Pp a la precipitación

	Ec. para estimar la recarga	R^2
Puangue	$R = 0.3888 * P_p - 117.8$	0.8368
Nilahue	$R = 0.375 * P_p - 95.063$	0.7899
Purapel	$R = 0.4905 * P_p - 192.72$	0.812

En las figuras 8.56, 8.57 y 8.58 se presentan los valores anuales de precipitación y recarga de las 3 cuencas. La línea amarilla corresponde al promedio histórico de precipitaciones y la línea roja al promedio de las recargas. Es posible notar que existe una alta variabilidad de dichos parámetros, presentando años que se encuentran sobre y bajo la media. Sin embargo, a partir del 2009, tanto la precipitación como la recarga presentan valores que se encuentran mayormente bajo la media. Este análisis se complementa con los gráficos de anomalías presentado en las figuras 8.59, 8.60, 8.61, que muestran una clara tendencia a la disminución en las precipitaciones y recargas, con anomalías negativas de ambas variables durante el periodo de megasequía, a excepción del año 2016 que en la cuenca Puangue presenta anomalías positivas de ambos parámetros, y del año 2012 en la cuenca Nilahue que presenta una anomalía positiva de la recarga.

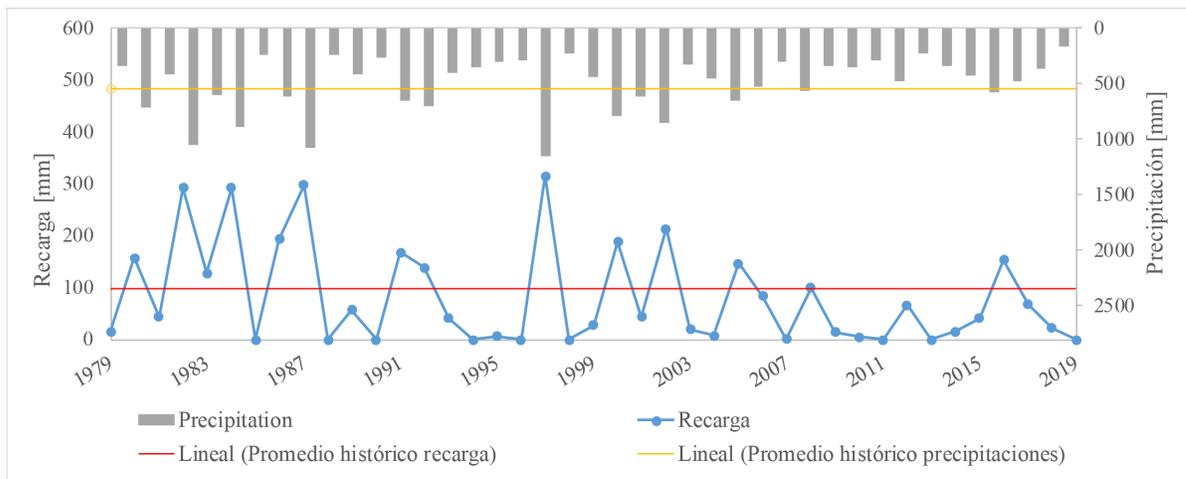


Figura 8.56: Valores anuales de Precipitación y Recarga de la cuenca Puangue. Elaboración propia.

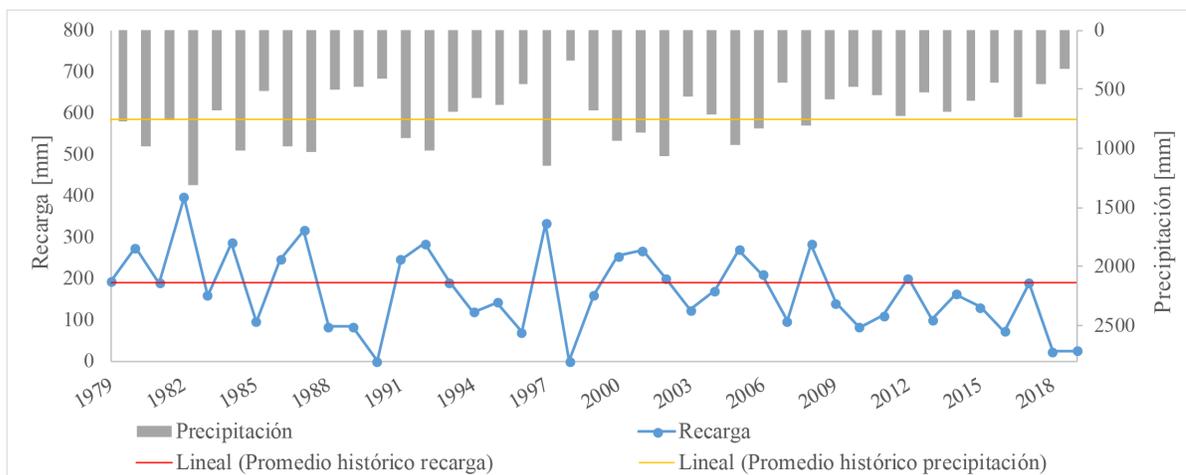


Figura 8.57: Valores anuales de Precipitación y Recarga de la cuenca Nilahue. Elaboración propia.

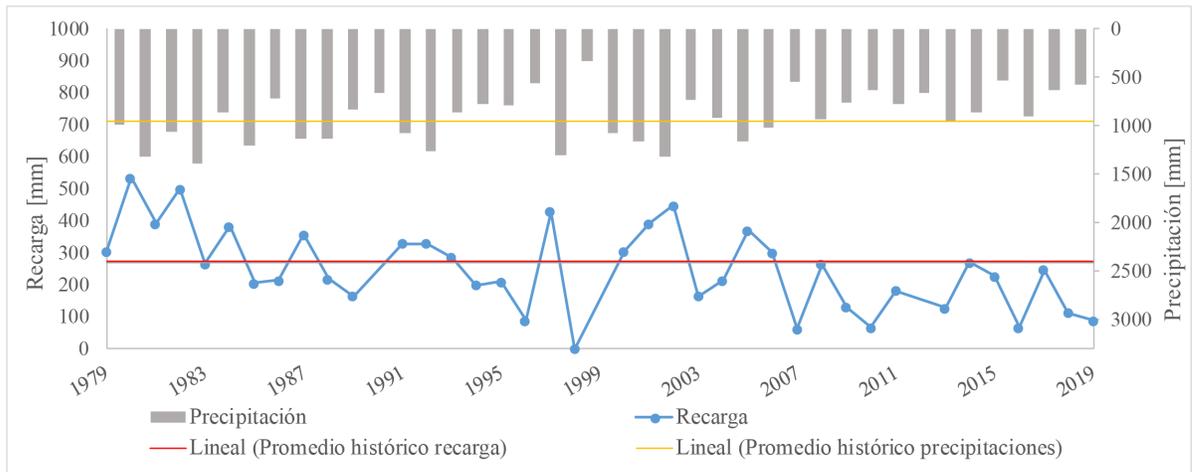


Figura 8.58: Valores anuales de Precipitación y Recarga de la cuenca Purapel. Elaboración propia.

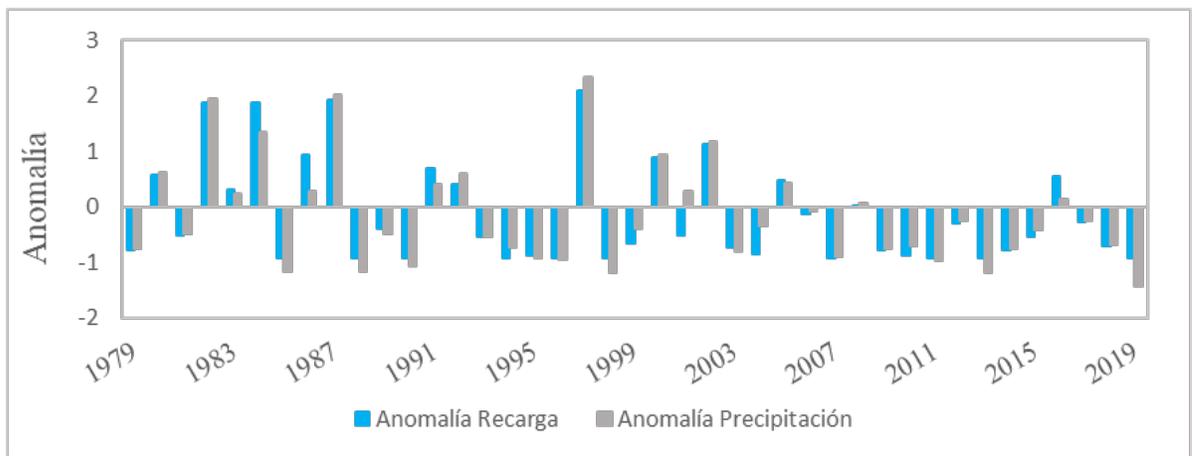


Figura 8.59: Anomalía de Precipitación y Recarga, Cuenca Puangue. Elaboración propia.

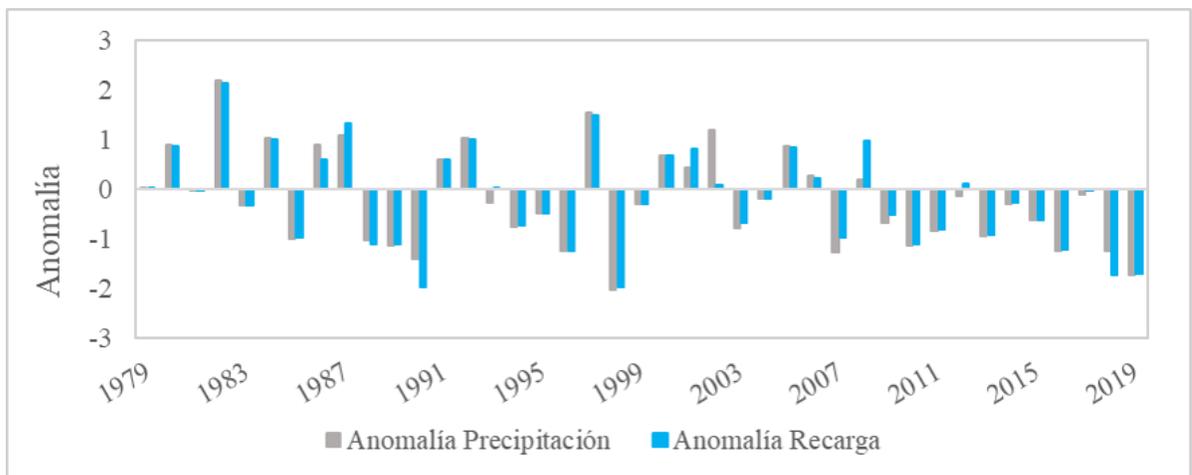


Figura 8.60: Anomalía de Precipitación y Recarga, Cuenca Nilahue. Elaboración propia.

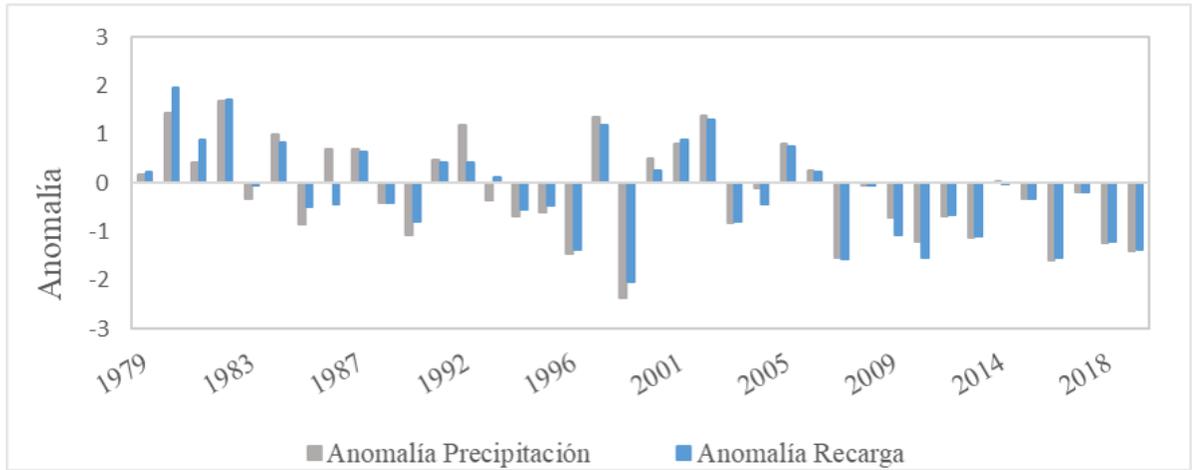


Figura 8.61: Anomalía de Precipitación y Recarga, Cuenca Purapel. Elaboración propia.

En la figura 8.62, se presenta los promedios mensuales de las recargas para las 3 cuencas. El promedio se calculó sobre los años en que la recarga fue calculada y no estimada, es decir, sobre los años a los que se aplicó la separación del caudal base. Las 3 cuencas muestran que la recarga ocurre en los meses de mayo a septiembre, consecuente con los meses en que se genera la precipitación. En el caso de la cuenca Puangue, la recarga se concentra mayoritariamente en el mes de junio con un valor cercano a los 43 milímetros, seguido de julio y agosto con promedios de 18 y 8 milímetros. En la cuenca Nilahue la recarga ocurre de forma más homogénea en los meses de invierno, distribuyéndose entre los 40 y 52 milímetros. La cuenca Purapel muestra que la recarga ocurre principalmente en los meses de mayo a agosto, y los valores más altos ocurren en junio y julio entre los 83 y 90 milímetros.

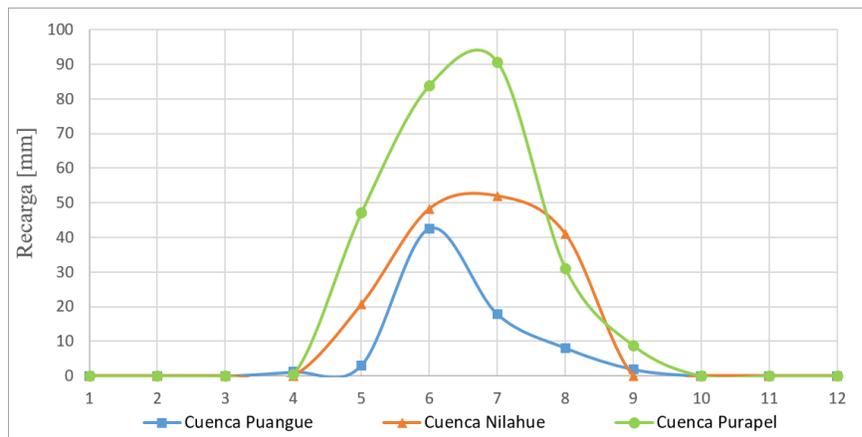


Figura 8.62: Promedio mensual de la Recargas en Puangue, Nilahue y Purapel. Elaboración propia.

En la tablas 8.8, 8.9 y 8.10 se presentan los valores anuales de los parámetro que integran el balance hídrico, es decir, de la precipitación, evapotranspiración real, escorrentía superficial y recarga. Además se incluyen los valores de la evapotranspiración potencial y del caudal base. Esto para el periodo comprendido entre 1979 y 2019. En la figuras 8.63, 8.64 y 8.65 se muestran los gráficos con los valores mensuales de Precipitación, evapotranspiración real, escorrentía superficial y recarga.

Tabla 8.8: Valores anuales de los componentes del balance hídrico, Pp = precipitación, ETR = evapotranspiración real, Qd = escorrentía directa y R=recarga. También se incorpora los valores de ETP = evapotranspiración potencial y Qb = caudal base. Cuenca Puangue.

Años	Pp [mm]	ETP [mm]	ETR [mm]	Qd [mm]	Qb [mm]	R [mm]
1979	341.1	1154.5	-	-	-	14.8
1980	707.1	1165.0	-	-	-	157.1
1981	414.3	1186.1	-	-	-	43.3
1982	1055.4	1133.1	-	-	-	292.5
1983	601.8	1168.5	339.8	139.9	53.9	128.4
1984	893.0	1142.9	-	-	-	292.5
1985	232.9	1165.9	222.7	16.5	10.7	0.0
1986	616.8	1159.0	284.3	150.7	57.5	193.1
1987	1070.5	1163.9	-	-	-	298.4
1988	233.6	1170.2	-	-	-	0.0
1989	412.3	1178.5	275.7	90.4	34.8	56.6
1990	263.3	1197.7	261.4	7.5	7.5	0.0
1991	649.0	1172.2	407.0	78.7	31.3	168.0
1992	698.0	1166.0	410.1	163.3	62.1	138.6
1993	400.6	1186.2	307.4	58.5	25.2	40.2
1994	346.6	1203.5	286.0	73.2	29.7	0.0
1995	296.0	1212.3	263.5	29.7	13.7	6.4
1996	289.7	1223.0	277.4	15.9	9.0	0.0
1997	1154.1	1184.0	387.9	463.5	165.9	315.0
1998	229.4	1209.3	-	-	-	0.0
1999	440.0	1129.9	380.6	35.3	17.3	28.1
2000	788.1	1157.6	-	-	-	188.6
2001	612.3	1126.9	322.8	261.0	96.4	43.3
2002	851.9	1141.1	-	-	-	213.4
2003	331.5	1171.0	253.6	64.3	27.2	19.9
2004	453.2	1143.8	398.9	51.2	20.8	6.8
2005	651.0	1114.0	339.1	172.2	63.9	147.1
2006	519.5	1148.5	-	-	-	84.2
2007	304.0	1128.6	-	-	-	0.4
2008	558.7	1146.9	-	-	-	99.4
2009	340.5	1161.3	-	-	-	14.6
2010	354.8	1155.2	335.1	16.5	9.1	4.1
2011	282.9	1181.8	-	-	-	0.0
2012	475.0	1166.8	-	-	-	66.9
2013	231.1	1177.0	-	-	-	0.0
2014	342.6	1178.1	-	-	-	15.4
2015	430.6	1174.5	366.8	26.1	11.5	41.2
2016	579.2	1210.5	398.7	33.2	16.4	153.9
2017	475.6	1185.5	-	-	-	67.1
2018	360.8	1194.7	-	-	-	22.5
2019	164.8	1258.5	-	-	-	0.0

Tabla 8.9: Valores anuales de los componentes del balance hídrico, Pp = precipitación, ETR = evapotranspiración real, Qd = escorrentía directa y R=recarga. También se incorpora los valores de ETP = evapotranspiración potencial y Qb = caudal base. Cuenca Nilahue.

Años	Pp [mm]	ETP [mm]	ETR [mm]	Qd [mm]	Qb [mm]	R [mm]
1979	765.9	1316.6	-	-	-	192.2
1980	983.2	1361.8	-	-	-	273.6
1981	757.7	1351.5	-	-	-	189.1
1982	1309.2	1315.6	-	-	-	395.9
1983	678.8	1357.9	-	-	-	159.5
1984	1017.6	1320.6	-	-	-	286.5
1985	509.4	1327.3	-	-	-	96.0
1986	978.8	1323.3	399.3	335.1	123.7	246.4
1987	1028.4	1359.5	419.6	292.7	108.8	316.8
1988	497.5	1362.6	347.1	67.7	26.5	83.1
1989	475.8	1371.1	-	-	-	83.4
1990	408.7	1338.8	404.2	4.6	3.1	0.0
1991	909.5	1323.2	-	-	-	246.0
1992	1014.3	1331.3	-	-	-	285.3
1993	687.3	1356.8	395.6	102.1	39.0	190.5
1994	569.0	1368.6	-	-	-	118.3
1995	633.5	1366.1	-	-	-	142.5
1996	448.0	1377.2	367.0	11.4	5.4	69.7
1997	1141.4	1339.7	-	-	-	333.0
1998	252.1	1381.1	-	-	-	0.0
1999	681.6	1326.9	-	-	-	160.5
2000	930.3	1329.1	-	-	-	253.8
2001	864.3	1336.8	325.5	274.6	102.1	267.0
2002	1059.2	1311.2	452.0	409.8	151.2	198.7
2003	560.2	1352.0	387.8	48.8	20.1	123.9
2004	709.4	1321.4	-	-	-	170.9
2005	972.5	1325.3	-	-	-	269.6
2006	828.0	1326.2	381.4	239.4	88.8	209.7
2007	439.6	1310.0	327.6	15.3	7.4	96.8
2008	804.0	1364.3	329.5	196.3	73.8	282.7
2009	585.2	1341.1	358.5	86.4	33.8	141.2
2010	472.5	1325.6	-	-	-	82.1
2011	544.4	1329.9	405.0	29.4	12.2	110.4
2012	725.2	1328.6	497.8	27.1	12.2	200.7
2013	519.9	1347.6	-	-	-	99.9
2014	686.5	1334.8	-	-	-	162.4
2015	599.7	1343.4	-	-	-	129.8
2016	446.1	1386.7	-	-	-	72.2
2017	733.9	1355.2	443.1	105.9	41.0	188.6
2018	448.6	1346.4	409.7	32.0	14.1	22.8
2019	321.1	1398.8	-	-	-	25.3

Tabla 8.10: Valores anuales de los componentes del balance hídrico, Pp = precipitación, ETR = evapotranspiración real, Qd = escorrentía directa y R=recarga. También se incorpora los valores de ETP = evapotranspiración potencial y Qb = caudal base. Cuenca Purapel.

Años	Pp [mm]	ETP [mm]	Qd [mm]	Qb [mm]	ETR [mm]	R [mm]
1979	988.1	1205.5	145.4	80.9	542.3	303.6
1980	1316.9	1243.5	311.9	144.5	475.4	536.0
1981	1052.6	1223.1	242.2	119.1	431.0	392.1
1982	1385.2	1209.4	442.8	196.6	458.5	501.1
1983	862.1	1243.5	222.6	111.8	396.1	266.7
1984	1204.6	1201.8	410.8	184.8	433.6	383.9
1985	721.0	1207.6	108.1	67.4	417.0	207.3
1986	1125.6	1206.9	462.8	204.1	469.9	216.0
1987	1124.5	1251.8	-	-	-	358.9
1988	835.6	1242.7	262.0	101.7	379.7	218.4
1989	662.7	1261.1	145.3	56.4	367.7	165.2
1990	612.6	1218.4	70.2	27.3	537.2	9.5
1991	1067.1	1200.4	-	-	-	330.7
1992	1253.2	1206.4	553.2	215.0	397.1	329.4
1993	853.5	1237.8	195.1	75.7	386.7	286.8
1994	765.3	1233.2	142.7	55.4	428.9	200.3
1995	786.4	1243.9	205.1	79.6	383.7	210.1
1996	563.0	1250.2	106.8	41.4	381.1	89.1
1997	1297.6	1212.2	352.1	136.4	525.0	430.4
1998	326.4	1259.3	-	-	-	0.0
1999	882.4	1222.2	125.2	48.6	394.2	364.4
2000	1077.1	1197.9	385.9	149.7	395.6	306.0
2001	1155.1	1227.9	447.3	173.6	333.1	392.1
2002	1307.7	1180.3	-	-	-	448.7
2003	730.6	1238.6	-	-	-	165.6
2004	916.3	1213.5	156.0	60.6	550.9	215.6
2005	1151.3	1214.9	-	-	-	372.0
2006	1010.1	1217.3	-	-	-	302.7
2007	542.0	1196.4	108.5	42.2	380.6	63.4
2008	933.9	1260.0	-	-	-	265.3
2009	755.3	1221.3	345.6	134.1	290.1	130.9
2010	630.8	1206.8	183.8	71.4	398.8	67.4
2011	766.2	1214.8	-	-	-	183.1
2012	828.7	1209.4	-	-	-	213.7
2013	653.3	1238.0	-	-	-	127.7
2014	948.1	1226.5	-	-	-	272.3
2015	856.7	1239.2	-	-	-	227.5
2016	530.0	1272.0	-	-	-	67.3
2017	897.6	1246.0	-	-	-	247.6
2018	621.7	1230.1	-	-	-	112.2
2019	575.3	1276.0	-	-	-	89.5

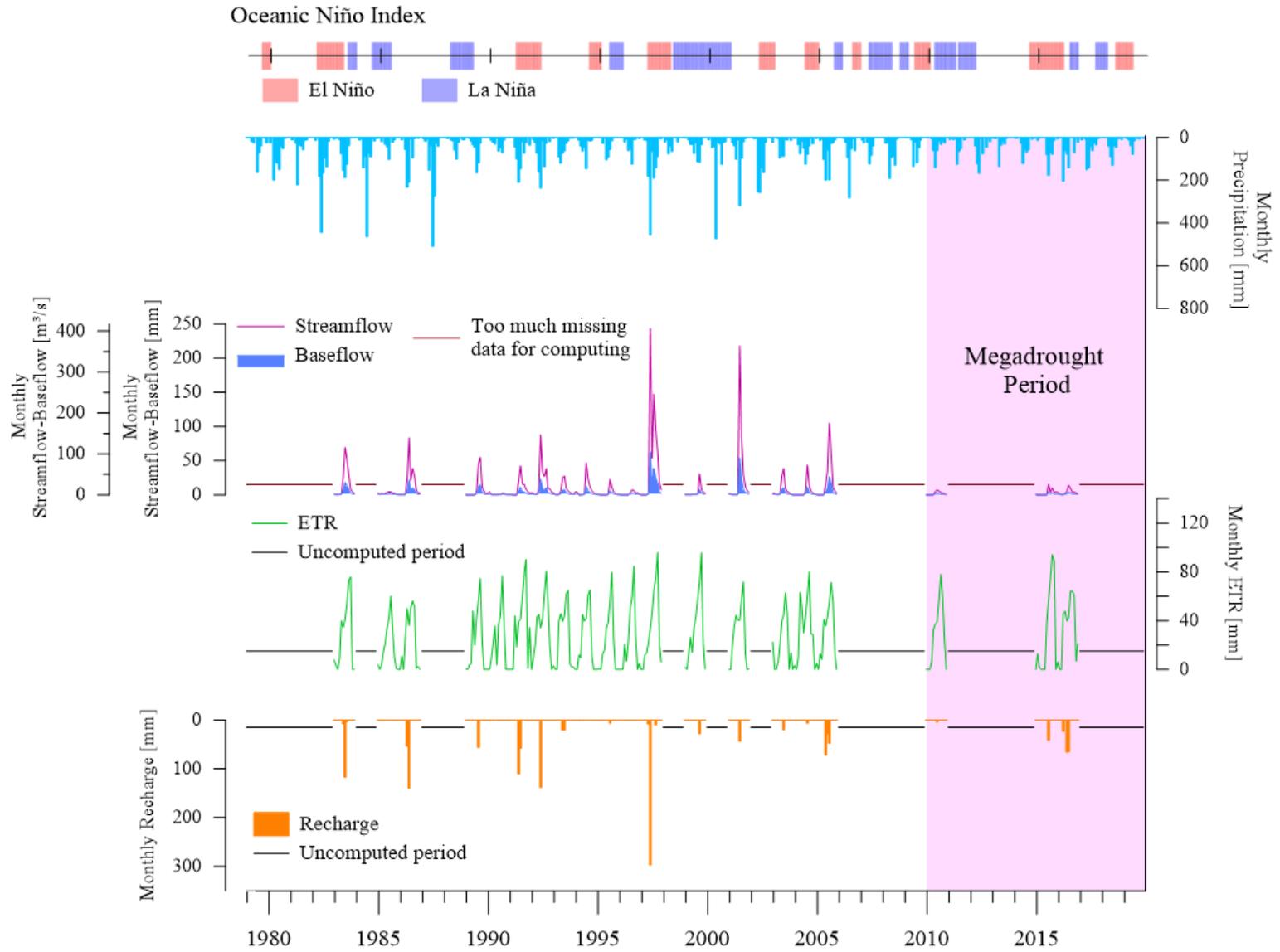


Figura 8.63: Componentes del balance hídrico. Cuenca Puangue, periodo 1979-2019. Elaboración propia.

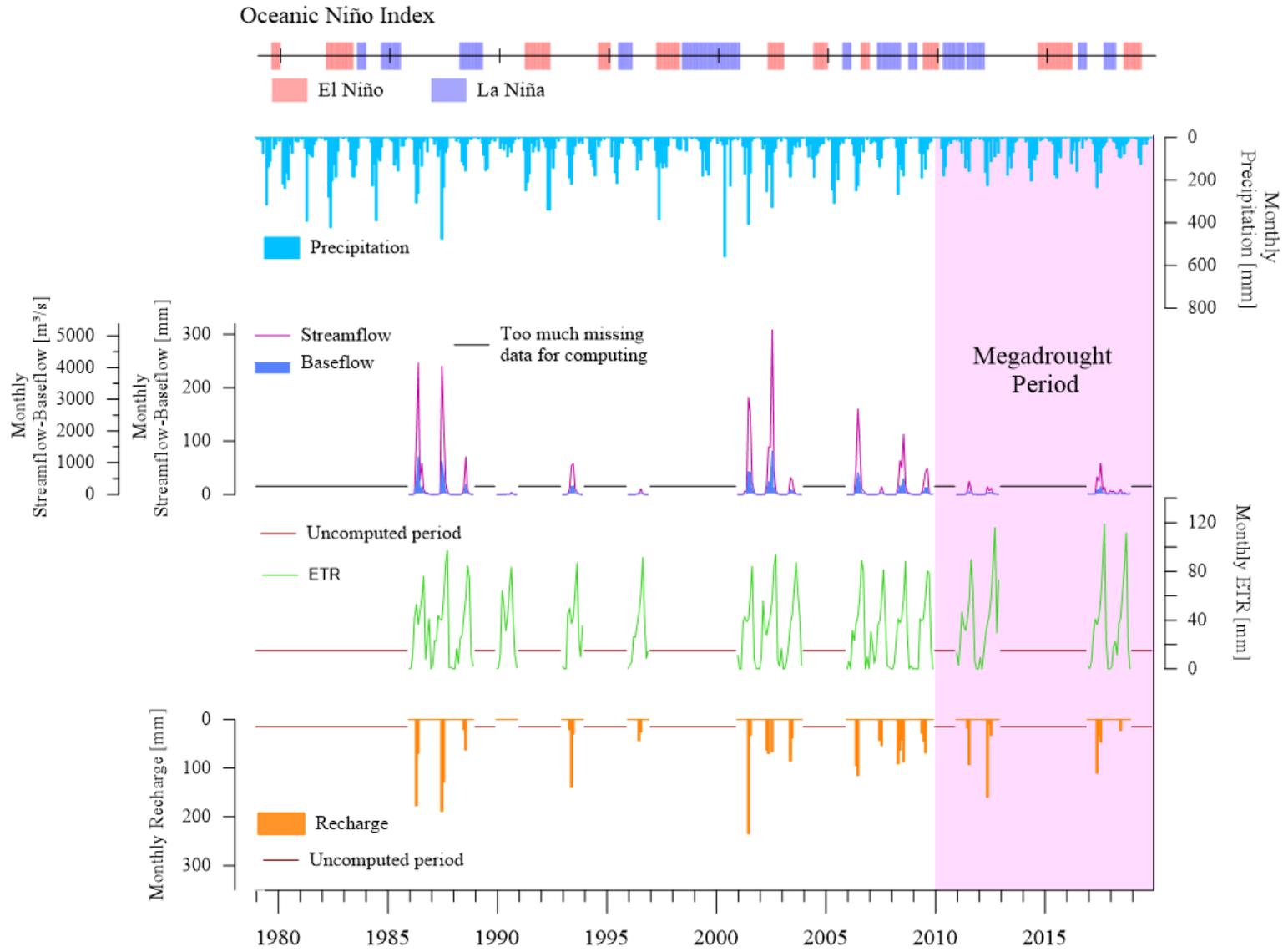


Figura 8.64: Componentes del balance hídrico. Cuenca Nilahue, periodo 1979-2019. Elaboración propia.

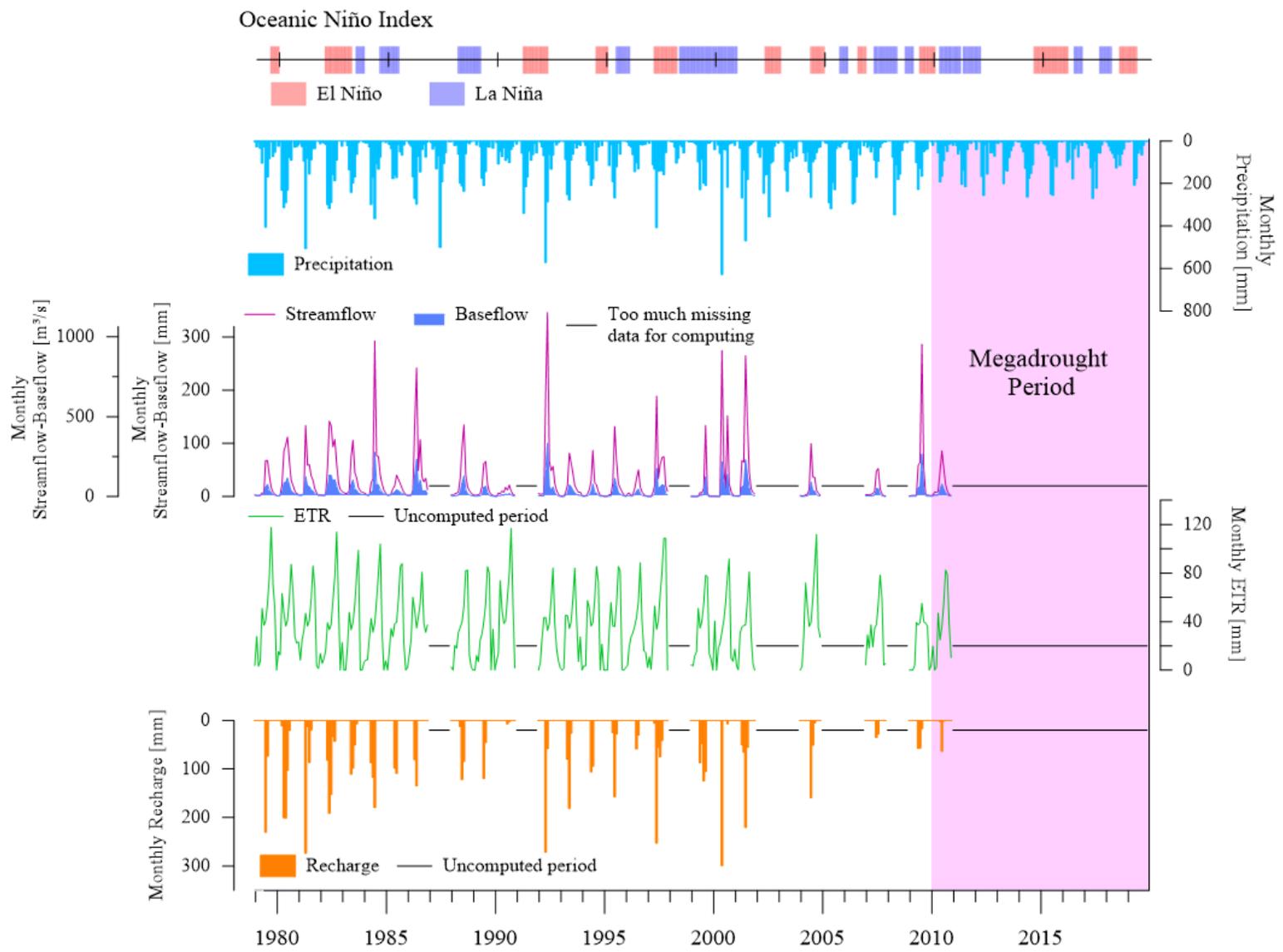


Figura 8.65: Componentes del balance hídrico. Cuenca Purapel, periodo 1979-2019. Elaboración propia.

Capítulo 9

Discusión

Para la realización de este estudio se utilizó el Filtro digital Eckhardt 2005 con el fin de obtener la separación del caudal base. Sobre esto, la metodología se basó en la utilización de dos parámetros que integran el filtro mencionado; obteniendo dos valores para el parámetro $BFI_{m\acute{a}x}$ y tres valores para el α . Los resultados muestran que el parámetro $BFI_{m\acute{a}x}$ tiene una mayor incidencia en el volumen que se obtiene del caudal base. En un inicio, el $BFI_{m\acute{a}x}$ fue calculado con la fórmula propuesta por Al-Faraj y Scholz (2014) Y Gordon et al. (2004) presentó valores que subestimaban el caudal base. Debido a esto, el valor final de $BFI_{m\acute{a}x}$ fue calculado con la corrección que propuso Collischonn y Fan (2013), la cual soluciona este problema de subestimación. Los valores encontrados en este trabajo son similares al que propuso Eckhardt para para acuíferos en roca fracturada con corrientes perenne, lo cual es característico de la geomorfología que poseen las cuencas en estudio.

En torno al tratamiento del parámetro α , los 3 valores calculados con las diversas metodologías no generaron mayores cambios en el volumen que representaba el caudal base. Para la separación del caudal se utilizó el valor del parámetro α calculado con la segunda metodología, debido a que esta representaba de manera más pertinente el ajuste de los datos en los primeros días de recesión y tenía un mayor coeficiente de determinación.

En las figuras 9.1, 9.3 y 9.5 se presentan los gráficos de Precipitación anual versus Recarga anual para las 3 cuencas. En ellas se distinguen los años que fueron calculados de los que se estimaron. También se muestran las líneas de tendencia que tendrían los datos si $\theta_{m\acute{a}x}$ fuera 100 y 200 milímetros. El caso de estudio es en función de un $\theta_{m\acute{a}x}$ de 150 mm.

A partir de las figuras es posible apreciar que los círculos y triángulos rojos, que corresponden a los valores de la última década (2010-2019), se caracterizan por presentar recargas y precipitaciones bajas en comparación con el resto del periodo de estudio. Esto se refuerza con los diagramas de cajas y bigotes presentado en las figuras 9.2, 9.4 y 9.6, donde se muestra el promedio, media y cuartiles de las recargas y precipitaciones para el periodo histórico (1970-2009) y el de la megasequía (2010-2019), y se confirma que los valores son inferiores en este último. Adicionalmente, en las tablas 9.1, 9.2 y 9.3 se presentan los valores promedios y la desviación estándar de la recarga y la precipitación para el periodo histórico, como para la última década, y se muestra la variación de esta última respecto al histórico.

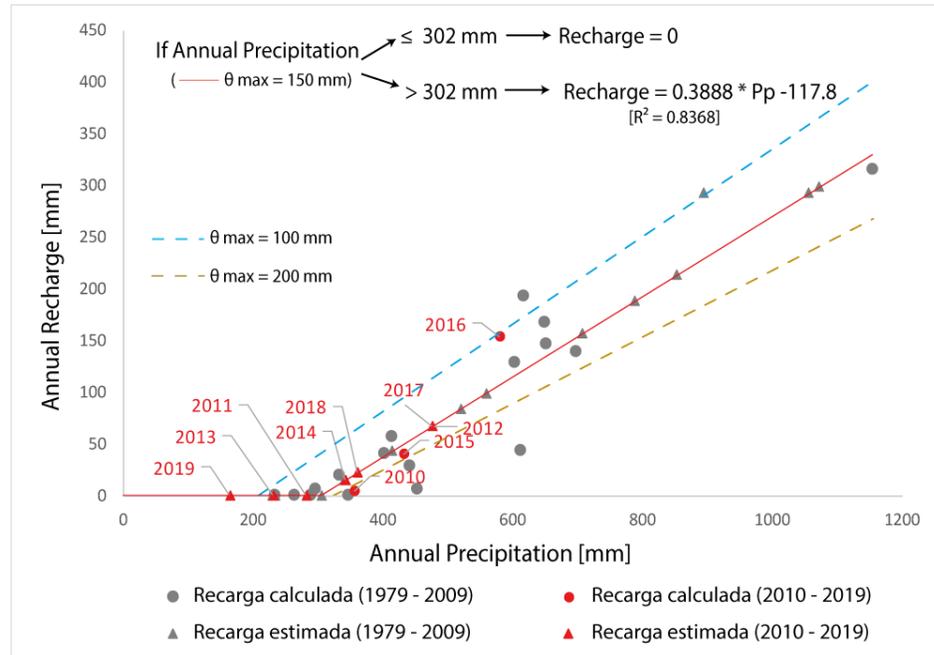


Figura 9.1: Precipitación versus Recarga anual de la cuenca Puangue, para el periodo 1979-2019.

Tabla 9.1: Promedio de precipitaciones y recarga para el periodo histórico de 1979-2009 y periodo de la megasequía 2010-2019. Cuenca Puangue.

	1979-2009		2010-2019		Variation %
	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	
Pp (mm)	540.5	262.6	369.7	124.6	-31.6
R (mm)	96.5	104.4	37.1	48.7	-61.5
R/ Pp	0.18		0.10		-43.8

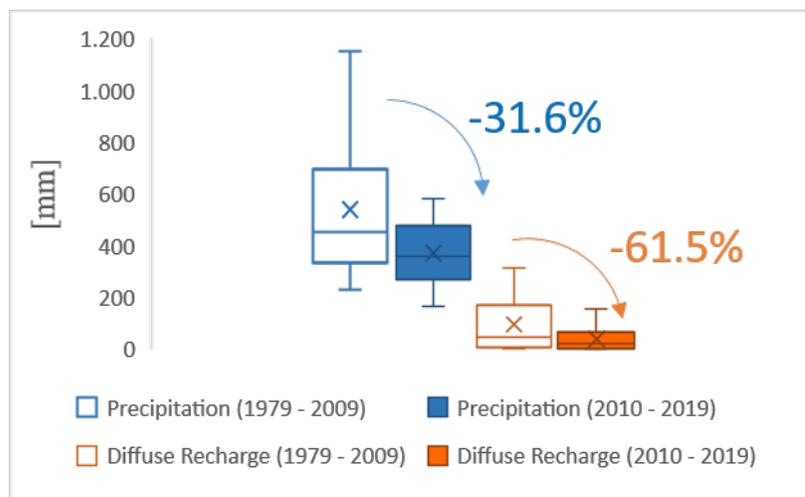


Figura 9.2: Diagrama de cajas y bigotes de los parámetros de recarga y precipitación, para el periodo histórico (1979 - 2009) y el evento de megasequía (2010 - 2019) de la cuenca Puangue.

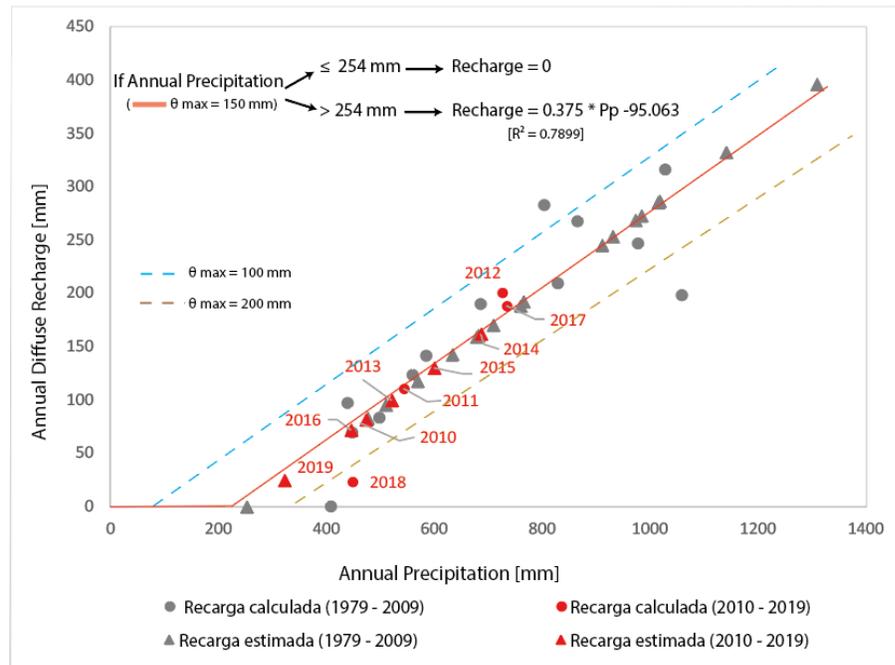


Figura 9.3: Precipitación versus Recarga anual de la cuenca Nilahue, para el periodo 1979-2019.

Tabla 9.2: Promedio de precipitaciones y recarga para el periodo histórico de 1979-2009 y periodo de la megasequía 2010-2019. Cuenca Nilahue.

	1979-2009		2010-2019		Variation %
	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	
Pp (mm)	758.1	250.9	549.8	135.8	-27.5
R (mm)	189.8	96.5	109.4	62.0	-42.3
R/ Pp	0.25		0.20		-20.5

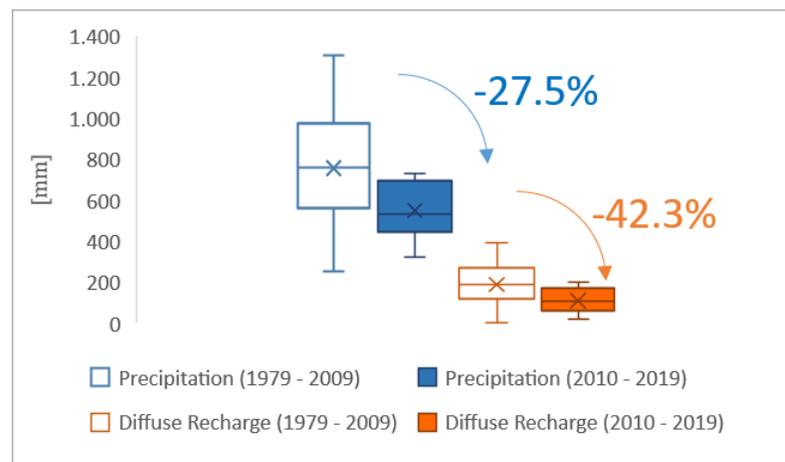


Figura 9.4: Diagrama de cajas y bigotes de los parámetros de recarga y precipitación, para el periodo histórico (1979 - 2009) y el evento de megasequía (2010 - 2019) de la cuenca Nilahue

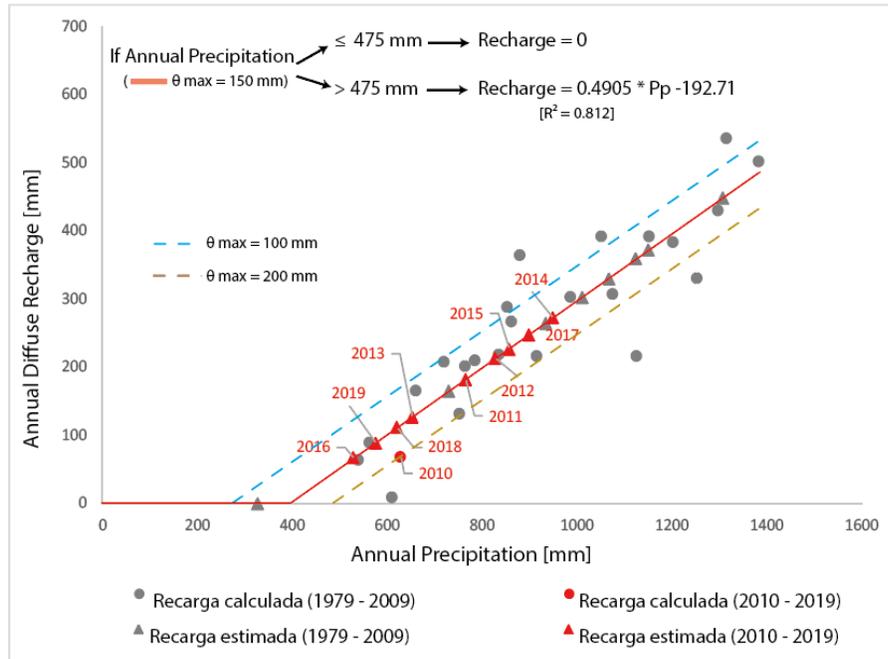


Figura 9.5: Precipitación anual versus Recarga anual de la cuenca Purapel, para el periodo 1979-2019.

Tabla 9.3: Promedio de precipitaciones y recarga para el periodo histórico de 1979-2009 y periodo de la megasequía 2010-2019. Cuenca Purapel.

	1979-2009		2010-2019		Variation %
	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	
Pp (mm)	944.1	261.7	730.8	146.9	-22.6
R (mm)	273.0	134.3	160.8	77.3	-41.1
R/Pp	0.29		0.22		-23.9

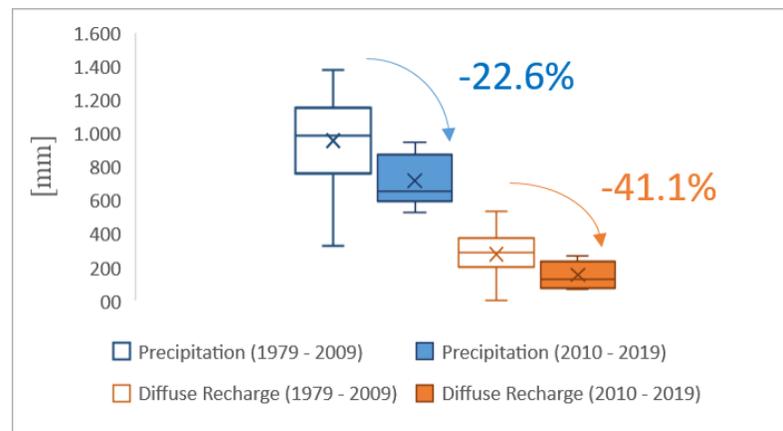


Figura 9.6: Diagrama de cajas y bigotes de los parámetros de recarga y precipitación, para el periodo histórico (1979 - 2009) y el evento de megasequía (2010 - 2019) de la cuenca Purapel

Durante el periodo de megasequía las cuencas presentaron carencias sostenidas en la precipitación y recarga, siendo el 2019 uno de los años que experimentó un mayor déficit. Durante la megasequía la cuenca Puangue presentó una disminución en la precipitación de un 31 %, en Nilahue la disminución fue de un 27 % y en Purapel de un 22 %. Esto implicó que la recarga disminuyera en un 61 %, 42 % y 41 % respectivamente. Por lo que la variación de la recarga es considerablemente mayor que la variabilidad de la precipitación que la genera.

En la cuenca Puangue las tasas anuales de Recarga respecto de la precipitación varían entre un 0-32 % con un promedio de 12 % durante todo el periodo de estudio (1979-2019). Al analizar por separado el periodo histórico y el de megasequía, la recarga representa en promedio un 18 % y un 10 % de la precipitación anual respectivamente. En el caso de la cuenca Nilahue, esta variación va de un 0-35 % para todo el periodo de estudio, con un promedio de 22 %. Durante el periodo histórico la tasa de recarga corresponde a un 25 % y a un 20 % para el periodo de megasequía. A su vez, la cuenca Purapel muestra una variación de un 0-41 % con un valor promedio de 25 %. Los valores promedios para el periodo histórico y el de megasequía corresponden a un 29 % y 22 % respectivamente.

Al comparar estas cifras con las tasas de recarga que propone la literatura, es posible percatarse que existe concordancia con lo propuesto por algunos autores. Las tasas de recarga encontradas en la literatura fueron bastante variadas. Por ejemplo, en climas áridos o semi-áridos tales como los que se dan en la cuenca de Puangue, algunos estudios como Scanlon et al. (2006) y Uribe et al. (2003) obtuvieron que la recarga representa entre un 1 - 5 % de la precipitación anual. Al compararlo con los valores encontrados para la cuenca Puangue, estos últimos serían algo mayores. Sin embargo, otros estudios realizados también en climas semi-áridos obtuvieron tasas mayores. Por ejemplo, Acosta y Custodio (2008) propusieron tasas de recarga que fueron en promedio de un 14 %, siendo este estudio realizado en el Salar de Huasco en acuíferos sedimentarios y fracturados, en presencia de un clima árido. Otros valores promedios de tasas de recarga propuesta por autores en climas semiáridos son: 7-10 %, estudio realizado a partir del balance de agua, España (Hornero, Manzano, Ortega, y Custodio, 2013); 9,5 %, estudio realizado en un bloque de montaña con clima semiárido (FRANCISCO, 2019); 14 %, estudio realizado en Nebraska (Szilagyi, Zlotnik, Gates, y Jozsa, 2011); 35,3 % en cordones medanosos en una zona semiárida Argentina, (Carrica, Lexow, y Bonorino, 2012). Para climas subhúmedos-húmedos tales como los que se dan en las cuencas de Nilahue y Purapel, Varni (2013) propone un valor promedio de la tasa de recarga de un 16,7 %. En resumen, los valores encontrados en este estudio se encuentran acorde con lo que han propuestos diferentes autores.

La utilización del balance hídrico confirma que, a grandes rasgos, la recarga está asociada a la magnitud de las precipitaciones y refleja la distribución estacional de ellas. En los gráficos de Precipitación versus Recarga anual (figuras 9.1, 9.3 y 9.5), se observó que la recarga es directamente proporcional a la precipitación, y que en general a mayores precipitaciones, mayor es la recarga. Sin embargo, esto no siempre es así, ya que además de la magnitud de la precipitación, la forma en se distribuye en el tiempo tiene una influencia directa sobre el proceso de recarga, al igual que el estado de saturación del suelo en el momento en que ocurre la precipitación.

Apelando a un ejemplo para explicar de mejor manera lo dicho, en los gráficos 9.7, 9.8 y 9.9, se muestran los valores mensuales de las variables que integran el balance hídrico, para los años 2004, 2015 y 1997 en la cuenca Puangue. El año 2004 la cuenca Puangue presentó precipitaciones que alcanzaron los 453 milímetros, valor que fue mayor a los 430 milímetros caídos el año 2015. Por el contrario, la recarga el año 2004 fue menor a la que se evidenció el 2015, correspondiendo a 6,8 y 41 milímetros respectivamente. Esto se debe a que el 2004 la precipitación se distribuyó de forma más homogénea durante el año, presentando precipitaciones desde el mes de marzo hasta septiembre, pero sin contar con un mes donde la precipitación se concentrara lo suficiente. Esto generó que la fracción de precipitación que logró infiltrar el suelo y le concedió humedad a este, fuera consumida por concepto de evapotranspiración, sin alcanzar la capacidad máxima de retención de humedad para generar recarga. En cambio, el año 2015 la precipitación se concentró en los meses de julio y mayormente en agosto. El agua que precipitó el mes de julio logró alcanzar la capacidad máxima de retención del suelo, dando lugar a que la recarga tuviera lugar el mes de agosto. Esta situación es más evidente al analizar el año 1997, donde la precipitación además de presentar valores elevados se concentró en mayo y junio, generando una recarga importante el mes de junio.

En anexos, de la figura 11.63 a la 11.92 se presenta la totalidad de los gráficos que muestran las variables que integran el balance hídrico en una escala mensual.

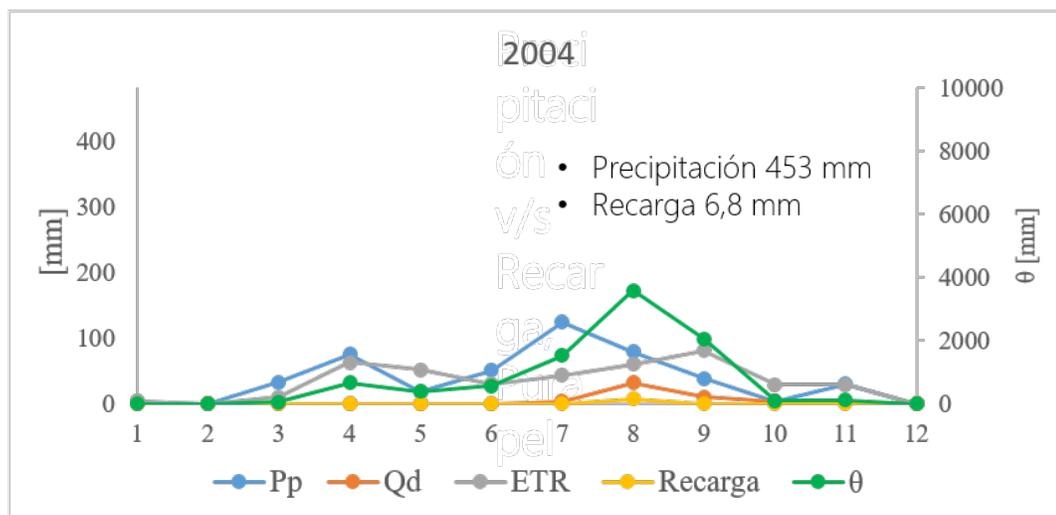


Figura 9.7: Valores mensuales de las variables que integran el balance hídrico. Cuenca Puangue, año 2004. Elaboración propia.

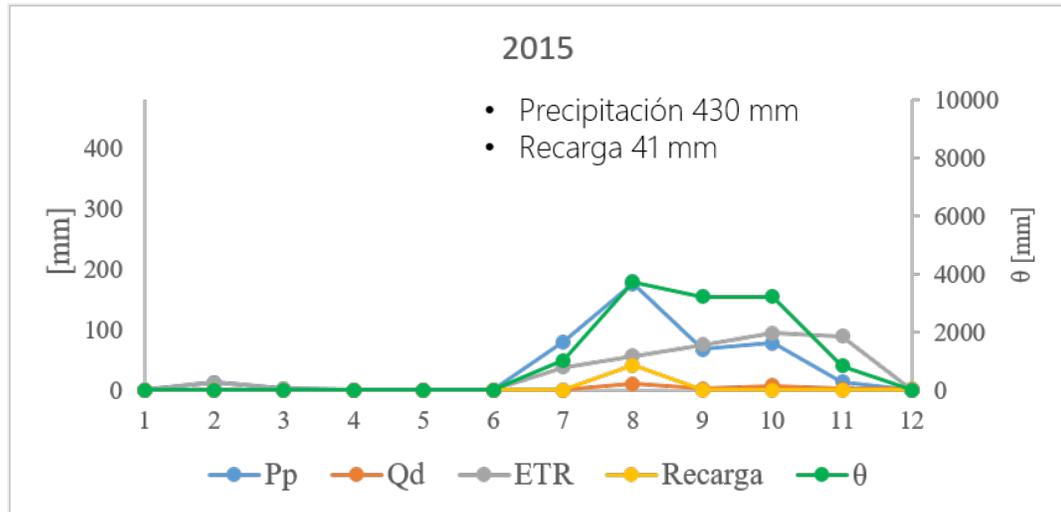


Figura 9.8: Valores mensuales de las variables que integran el balance hídrico. Cuenca Puangue, año 2015. Elaboración propia.

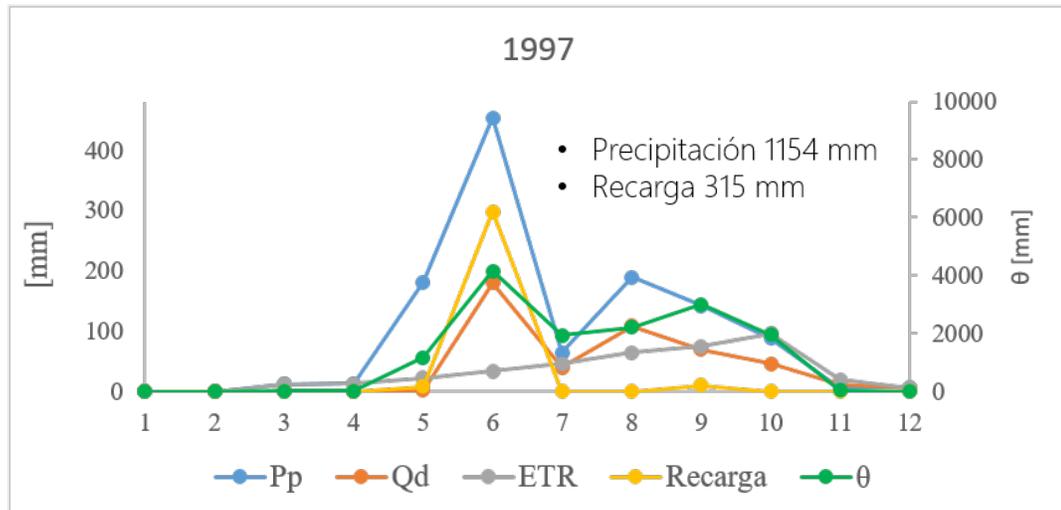


Figura 9.9: Valores mensuales de las variables que integran el balance hídrico. Cuenca Puangue, año 1997. Elaboración propia.

El caso de estudio consideró un Θ máx de 150 mm para el cálculo de la recarga. No obstante, también se evaluó la recarga para un Θ máx de 100 y 200 mm, los cuales son valores que admite la literatura (figuras 8.53, 8.54 y 8.55). El uso de los diferentes Θ generó variaciones en la recarga que en el caso de la cuenca Puangue van entre 174% y -67%, en el caso de Nilahue la variación corresponde a $\pm 34\%$, y en Purapel +46% y -29%. Lo cual muestra que la recarga es bastante susceptible a la retención de humedad máxima que permite el suelo.

9.1. Proyecciones de la recarga bajo efectos del cambio climático

Es de conocimiento público que el cambio climático se intensifica de manera extensa, rápida y sin precedentes. A partir de lo estipulado en último informe realizado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Zhongming, Linong, Wangqiang, Wei, et al., 2021), se han analizado los efectos que tendrían los cambios de la temperatura y la precipitación sobre las recargas de las cuencas en estudio. En el informe se concluye que "...a menos que las emisiones de gases de efecto invernadero se reduzcan de manera inmediata, rápida y a gran escala, limitar el calentamiento a cerca de 1,5 °C o incluso a 2 °C será un objetivo inalcanzable".

La figura 9.10 se obtuvo del informe realizado por el IPCC publicado en agosto del 2021. En ella se presentan los mapas que muestran las simulaciones de los cambios que tendría la precipitación, para un aumento de 1.5°C, 2°C y 4°C. Se puede observar que en la zona central de Chile, a las latitudes donde se sitúan las cuencas, un escenario de un aumento en 2°C podría provocar una disminución de la precipitación en el rango de 10 a 20 %, mientras que un aumento de 4°C generaría un déficit de un 25-40 %.

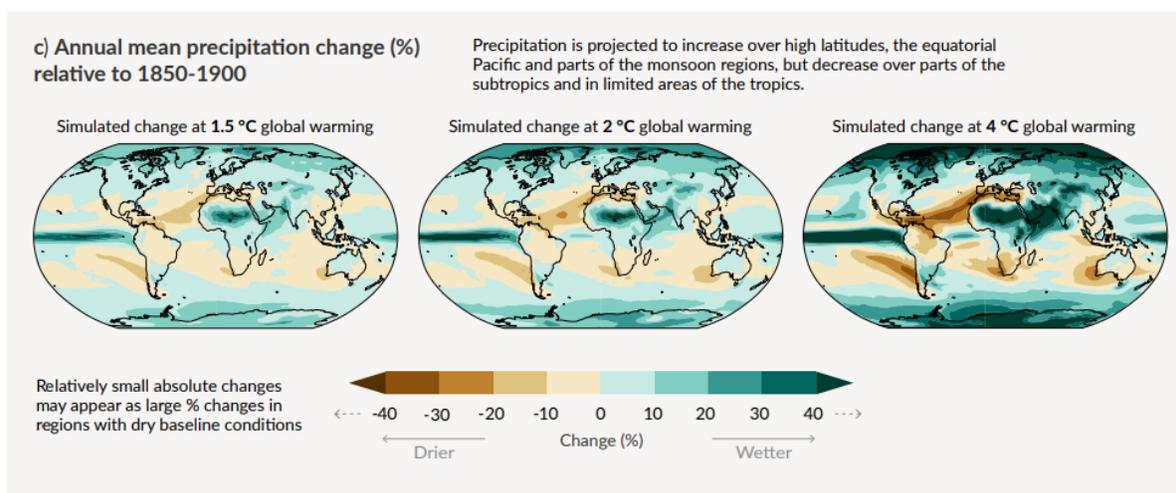


Figura 9.10: Cambios simulados de la precipitación en función de cambios de temperatura. Obtenido de Zhongming et al. (2021).

Se realizó una simulación más específica utilizando el Atlas interactivo del GTI del IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch>). Se configuró la simulación utilizando el escenario 8.5, el cual considera un incremento sostenido en las emisiones de gases de efecto invernadero para fines del siglo XXI, representando el escenario más desfavorable posible, y cuya trayectoria de emisiones de gases invernadero es la que se ha estado evidenciado. En la Figura 9.11 se observa dicha trayectoria.

A su vez, se configuró la simulación estableciendo un aumento de la temperatura de 3°C y considerando el periodo de 1981-2010 como línea base. La figura 9.12 es el resultado de esta simulación.

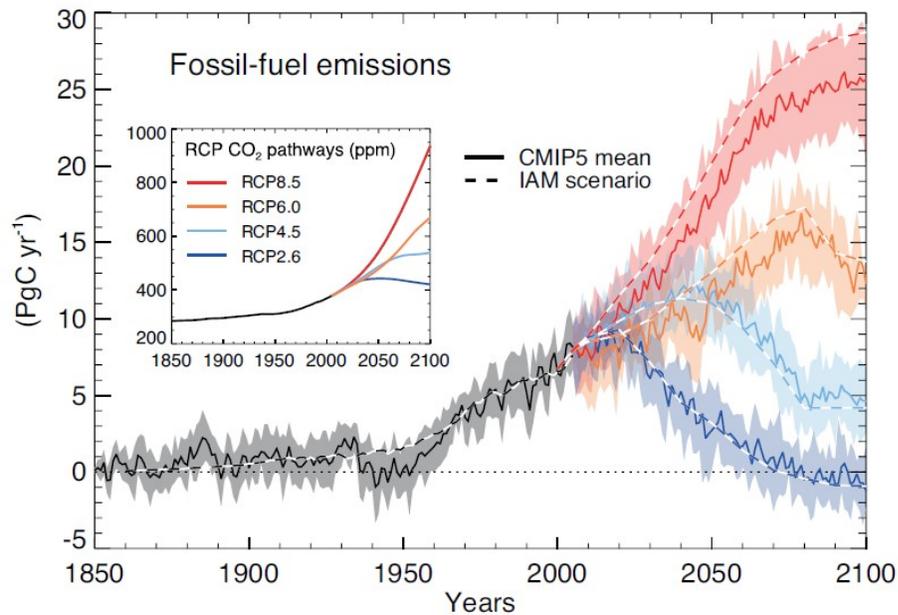


Figura 9.11: Trayectorias de emisiones de distintos escenarios de cambio climático y su comparación en relación a las emisiones observadas históricas.

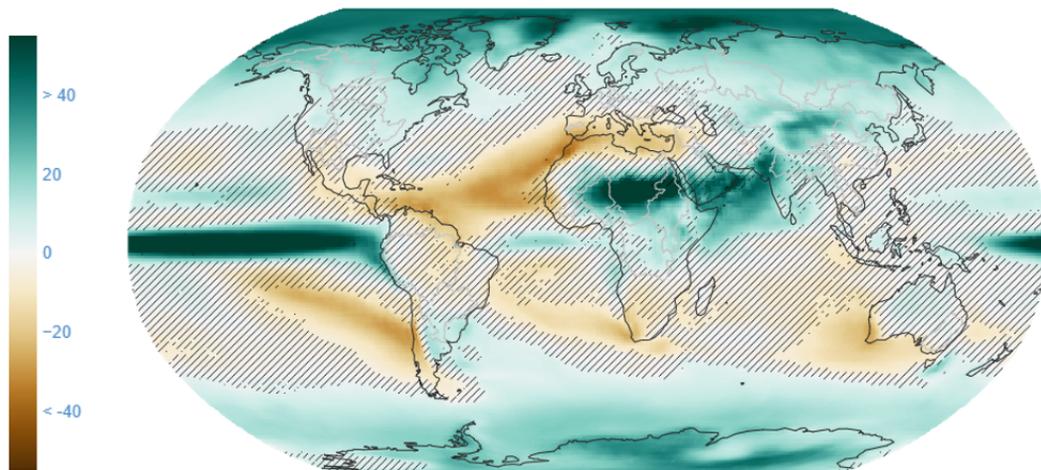


Figura 9.12: Cambios simulados de la precipitación. Configurado para un aumento de 3°C , bajo el escenario RCP8.5 y considerando el periodo 1981-2010 como la línea base. Elaboración propia a partir del Atlas interactivo del GTI del IPCC.

La figura 9.12 muestra que los déficit de precipitaciones para la zona central estarían en el rango de los 25-30%. Dichos déficit son los que se han evidenciado durante la megasequía que acontece desde el año 2010 a Chile, por lo que esta podría ser una ventana a lo que nos depara futuro.

En la tabla siguiente se muestran los déficit que tendría la recarga para diferentes disminuciones de la precipitación. Con la información recopilada, se prevé que la disminución de la precipitación para la zona central de Chile sea cercana a un 30 %. por lo que la recarga disminuiría en 70 % para la cuenca de Puangue, en Nilahue un 45 % y en Purapel un 52 %.

Tabla 9.4: Disminución de la recarga en función de déficit de precipitación, Cuenca Puangue , Nilahue y Purapel. Sin R = Sin recarga. Elaboración propia.

	-10 %	-20 %	-30 %	-40 %	-50 %	-60 %	-70 %
Puangue	26 %	48 %	70 %	91 %	Sin R	-	-
Nilahue	15 %	30 %	45 %	60 %	75 %	90 %	Sin R
Purapel	18 %	35 %	52 %	69 %	86 %	Sin R	-

Capítulo 10

Conclusión

Los resultados de este trabajo proporcionan información valiosa sobre el proceso de recarga que tiene lugar en cuencas situadas en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile. Se logró obtener una cuantificación de los parámetros que están incluidos en el balance hídrico, que si bien son estimaciones, permiten tener una aproximación para realizar un análisis con una base más sólida. Entre los resultados destaca que la variación que experimentó la recarga durante el periodo de megasequía, es considerablemente mayor que la variabilidad de la precipitación que la genera.

Respecto a los resultados de la separación del caudal, se obtuvo que en la mayoría de los meses es la escorrentía directa aquella que genera un mayor aporte al caudal total. Sin embargo, esta condición varía respecto a los meses estivales, o aquellos meses donde se reporta un menor registro del caudal, ya que en estos casos el caudal base aumenta su aporte, pudiéndose transformar en el principal alimentador del cauce, sobre todo en regiones que presentan un clima de mayor aridez, como es el caso de la Cuenca Puangue.

La tasa de recarga en la cuenca Puangue fue del orden del 18 % de la precipitación media anual para el periodo histórico (1979-2009), y de un 10 % durante la megasequía (2010-2019). En Nilahue, para el periodo histórico se obtuvo que en promedio la recarga corresponde a un 25 % de la precipitación y un 20 % durante la megasequía. Para la cuenca Purapel la recarga en el periodo histórico fue de un 29 % y 22 % para el periodo de megasequía.

Las proyecciones que el IPCC plantea sobre el cambio climático muestran que para la macrozona centro-sur de Chile se espera un déficit de precipitaciones sería cercano al 30 %. Interpolando esta información con los resultados obtenidos en este trabajo que relacionan la recarga con la precipitación, se tiene que para esa disminución de precipitaciones la recarga tendría un déficit de un 70 %, 45 % y 52 % en Puangue, Nilahue y Purapel respectivamente. Dichos déficit son los que se han evidenciado durante la megasequía que acontece desde el año 2010 a Chile, por lo que esta podría ser una ventana a lo que nos depara futuro.

En conclusión este estudio mostró resultados significantes respecto a la realidad sobre la cuantificación de los recursos de agua subterránea; alertando el porvenir de la nación y la utilización de nuestros medios naturales, en búsqueda de una armonización en torno al manejo y la producción de este mismo, señalando la urgencia de un cambio y una conciencia mayor en relación a la realidad climática.

Capítulo 11

Recomendaciones

Los resultados de esta tesis son alentadores en cuanto a la aplicación del balance hídrico como método para cuantificar la recarga. No obstante, este trabajo presenta un nivel de incertidumbre asociado a la estimación de cada variable que integra el balance, por lo que algunos aspectos deben ser mejorados.

Se sugiere realizar un estudio en terreno que permita obtener valores de humedad máxima de retención del suelo. Esto en consecuencia de que la recarga es bastante susceptible a Θ máx, ya que como se vió en el capítulo de discusiones el uso de un teta máx de 100 y 200 milímetros, genera cambios en la recarga sobre el 30%. Un estudio en terreno podría permitir incluso definir diferentes Θ máx dentro de la cuenca, y eventualmente esto permitiría definir zonas que son más susceptibles a la recarga.

En este estudio se consideró la precipitación como única fuente de recarga. Sin embargo, podrían existir otros aportes ocasionados por la interconexión con cuencas colindantes. Un estudio en terreno podría verificar si dicha situación acontece, en ese caso, considerar dichos aportes en el balance hídrico permitiría un análisis más preciso.

Bibliografía

- Acosta, O., y Custodio, E. (2008). Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el salar del huasco (norte de Chile).
- a la Nación, I. (2015). La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. *Centro*.
- Al-Faraj, F. A., y Scholz, M. (2014). Assessment of temporal hydrologic anomalies coupled with drought impact for a transboundary river flow regime: the diyala watershed case study. *Journal of Hydrology*, 517, 64–73.
- Arnold, J., Allen, P., Muttiah, R., y Bernhardt, G. (1995). Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Groundwater*, 33(6), 1010–1018.
- Berhail, S., Ouerdachi, L., y Boutaghane, H. (2012). The use of the recession index as indicator for components of flow. *Energy Procedia*, 18, 741–750.
- Bloomfield, J., Allen, D., y Griffiths, K. (2009). Examining geological controls on baseflow index (bfi) using regression analysis: An illustration from the thames basin, uk. *Journal of Hydrology*, 373(1-2), 164–176.
- Carrasco, J. (2006). Precipitation events in central Chile and its relation with the mjo. En *Proc. eighth int. conf. on southern hemisphere meteorology and oceanography* (pp. 1719–1722).
- Carrica, J., Lexow, C., y Bonorino, A. G. (2012). La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. En *Xi congreso latinoamericano de hidrogeología, iv congreso colombiano de hidrogeología*.
- Collischonn, W., y Fan, F. M. (2013). Defining parameters for eckhardt's digital baseflow filter. *Hydrological Processes*, 27(18), 2614–2622.
- Dirección General de Aguas, A. M. C. S. (2013). Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la región del libertador general Bernardo O'Higgins y región del Bío-Bío. *Informe Final*.
- Dirección General de Aguas, A. M. C. S. (2014a). Diagnóstico de zonas de recarga en cuencas del secano Maule VII región del Maule. *Resumen Ejecutivo*.
- Dirección General de Aguas, A. M. C. S. (2014b). Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la región del libertador general Bernardo O'Higgins, del Maule y del Bío-Bío, etapa 2. *Informe Final*.
- Dirección General de Aguas, D. d. A. d. R. H. (2002). Informe de zonificación hidrogeológica para las regiones metropolitana y v. *Informe técnico*.
- Dirección General de Aguas, D. D. A. D. R. H. (2007). Evaluación de los recursos hídricos

- subterráneos del acuífero de Nilahue. *Informe técnico*.
- Dirección General de Aguas, D. D. E. Y. P. (2006). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del valle del estero Puangue: Diagnóstico situación actual. *Informe técnico*.
- Dirección General de Aguas, G. I. S. N. . (2013). Modelación hidrogeológica de la cuenca del río Cauquenes, región del Maule. *Informe Final*.
- Dirección General de Aguas, I. I. y. P. (1993). Diagnóstico, disponibilidad y requerimientos de agua en la región metropolitana : estero Puangue. *Informe técnico*.
- Doneen, L. D., Westcot, D., y cols. (1984). *Irrigation practice and water management*.
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(2), 507–515.
- Edwards, D. C. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. (Inf. Téc.). AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH.
- Fitts, C. R. (2002). *Groundwater science*. Elsevier.
- FRANCISCO, J. D. T. G. (2019). Implicaciones en la variación de la morfología, la vegetación y la climatología en la recarga potencial de bloque de montaña en una región semiárida mediterránea.
- Gaitán, A. F. S. (2012). El crecimiento de la población mundial a la luz de la gobernanza transnacional. *Novos Estudos Jurídicos*, 17(1), 125–138.
- Gana, P., Wall, R., y Gutiérrez, A. (1996). Mapa geológico del área de Valparaíso-Curacaví, región de Valparaíso y región metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, mapas geológicos n 1, escala 1: 100.000. *Santiago*.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., y Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439.
- Gómez, S. S., y Gómez, V. V. L. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del río de Oro (Santander, Colombia). *Dyna*, 83(196), 213–222.
- Gordijn, P. J., Rice, E., y Ward, D. (2012). The effects of fire on woody plant encroachment are exacerbated by succession of trees of decreased palatability. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 14(6), 411–422.
- Gordon, N. D., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Gippel, C. J., y Nathan, R. J. (2004). *Stream hydrology: an introduction for ecologists*. John Wiley and Sons.
- Guttman, N. B. (1998). Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113–121.
- Hornero, J., Manzano, M., Ortega, L., y Custodio, E. (2013). Recarga natural al acuífero de Alcadozo (España) mediante balance de cloruro atmosférico y balance de agua en el suelo. En *VIII Congreso argentino de hidrogeología y VI Seminario latinoamericano sobre termas actuales de la hidrología subterránea (La Plata, 17 al 20 de septiembre de 2013)*.

- Huaico Malhue, A. I. (2018). Análisis de la evolución de las áreas ambientalmente sensibles a la desertificación en la cuenca del puangue en Chile. *Idesia (Arica)*, 36(4), 61–70.
- Huber, A., y López, D. (1993). Cambios en el balance hídrico provocados por tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (d. don), Valdivia, Chile. *Bosque*, 14(2), 11–18.
- Köppen, W. (1990). Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. (Schluss). *Geographische Zeitschrift*, 6(12. H), 657–679.
- Lerner, D. N., Issar, A. S., y Simmers, I. (1990). *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge* (Vol. 8). Heise Hannover.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., y cols. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Proceedings of the 8th conference on applied climatology* (Vol. 17, pp. 179–183).
- Medina, G. S. (1987). Hidrología en cuencas pequeñas con información escasa. *Ingeniería e investigación*(16), 24–30.
- Mohammed, R., y Scholz, M. (2018). Flow–duration curve integration into digital filtering algorithms for simulating climate variability based on river baseflow. *Hydrological Sciences Journal*, 63(10), 1558–1573.
- Montecinos, A., y Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of climate*, 16(2), 281–296.
- Mundial, B. (2020). Situación de la demanda de recursos hídricos en Chile por parte de los principales usuarios. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/BCN*.
- Nathan, R. J., y McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water resources research*, 26(7), 1465–1473.
- Posavec, K., Giacometti, M., Materazzi, M., y Birk, S. (2017). Method and Excel VBA algorithm for modeling master recession curve using trigonometry approach. *Groundwater*, 55(6), 891–898.
- Quintana, J., y Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30–43° S. *Atmósfera*, 25(1), 1–22.
- Renate Wall R, P. G. F., Daniel Sellés M. (2003). Área Tiltill - Santiago, región metropolitana. *SERNAGEOMIN, Mapas geológicos N° 11, escala 1:100.000. Santiago de Chile..*
- Salazar, C. (2003). Situación de los recursos hídricos en Chile. *Con el apoyo de la Fundación Nippon. Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, AC, México.*
- Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., Gaye, C. B., Edmunds, W. M., y Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(15), 3335–3370.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa geológico de Chile: Versión digital. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.*
- Singh, S. K., Pahlow, M., Booker, D. J., Shankar, U., y Chamorro, A. (2019). Towards baseflow index characterisation at national scale in New Zealand. *Journal of Hydrology*, 568, 646–657.

- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of hydrology*, 240(3-4), 147–186.
- Smith, N., Kessler, W. S., Hill, K., y Carlson, D. (2015). Avances en la observación y en la predicción del fenómeno de el niño-oscilación del sur.
- Stehr, C. (2019). Recursos hídricos en Chile: impactos y adaptación al cambio climático.
- Stewart, M. (2015). Promising new baseflow separation and recession analysis methods applied to streamflow at Glendhu catchment, New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2587–2603.
- Sujono, J., Shikasho, S., y Hiramatsu, K. (2004). A comparison of techniques for hydrograph recession analysis. *Hydrological processes*, 18(3), 403–413.
- Szilagyi, J., Zlotnik, V. A., Gates, J. B., y Jozsa, J. (2011). Mapping mean annual groundwater recharge in the Nebraska sand hills, USA. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1503–1513.
- Toebes, C., y Morrissey, W. B. (1969). Base-flow-recession curves.
- Touhami, I. (2014). Estimación del balance hídrico y de la recarga en el acuífero Ventós-castellar (se, España). efectos del cambio climático.
- Uribe, H., Arumí, J. L., González, L., y Salgado, L. (2003). Balances hidrológicos para estimar recarga de acuíferos en el secano interior, Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 18(3), 17–28.
- Varni, M. R. (2013). Aplicación de varias metodologías para estimar la recarga al acuífero pampeano, Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(3), 67–85.
- Wall, R., Sellés, D., y Gana, P. (1999). Área Tiltill-Santiago, región metropolitana. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos*, 11(17), 1.
- Wittenberg, H., y Sivapalan, M. (1999). Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *Journal of hydrology*, 219(1-2), 20–33.
- Yang, H., Choi, H. T., y Lim, H. (2018). Applicability assessment of estimation methods for baseflow recession constants in small forest catchments. *Water*, 10(8), 1074.
- Zhongming, Z., Linong, L., Wangqiang, Z., Wei, L., y cols. (2021). Ar6 climate change 2021: The physical science basis.

ANEXOS

Anexo A

A continuación se presentan las tablas de cada cuenca, que muestran la cantidad de días al año que contaban con los datos de caudales durante el periodo de estudio, indicando la cantidad de días con información y si el año fue seleccionado para realizar la separación del caudal.

Tabla 11.1: Selección periodos de estudio Puangue

Fecha	Días totales	Días con información	Seleccionado
1979	365	184	no
1980	366	207	no
1981	365	254	no
1982	365	286	no
1983	365	360	si
1984	366	309	no
1985	365	329	si
1986	365	365	si
1987	365	307	no
1988	366	323	no
1989	365	356	si
1990	365	365	si
1991	365	365	si
1992	366	366	si
1993	365	365	si
1994	365	365	si
1995	365	347	si
1996	366	358	si
1997	365	328	si
1998	365	295	no
1999	365	365	si
2000	366	288	no
2001	365	337	si
2002	365	301	no
2003	365	342	si
2004	366	361	si
2005	365	359	si
2006	365	273	no
2007	365	212	no
2008	366	277	no
2009	365	266	no
2010	365	335	si
2011	365	245	no
2012	366	242	no
2013	365	234	no
2014	365	179	no
2015	365	365	si
2016	366	349	si
2017	365	319	no
2018	365	0	no
2019	365	0	no

Tabla 11.2: Selección periodo de estudio Cuenca Nilahue

Fecha	Días totales	Días con información	Seleccionado
1979	365	0	No
1980	366	0	No
1981	365	0	No
1982	365	0	No
1983	365	0	No
1984	366	0	No
1985	365	183	No
1986	365	364	Si
1987	365	365	Si
1988	366	366	Si
1989	365	295	No
1990	365	363	Si
1991	365	298	No
1992	366	292	No
1993	365	328	Si
1994	365	302	No
1995	365	269	No
1996	366	336	Si
1997	365	318	No
1998	365	300	No
1999	365	198	No
2000	366	203	No
2001	365	365	Si
2002	365	365	Si
2003	365	365	Si
2004	366	290	No
2005	365	240	No
2006	365	365	Si
2007	365	361	Si
2008	366	366	Si
2009	365	336	Si
2010	365	157	No
2011	365	365	Si
2012	366	366	Si
2013	365	286	No
2014	365	164	No
2015	365	0	No
2016	366	170	No
2017	365	358	Si
2018	365	365	Si
2019	365	120	No

Tabla 11.3: Selección periodo de estudio Cuenca Purapel

Fecha	Días totales	Días con información	Seleccionado
1979	365	364	si
1980	366	363	si
1981	365	347	si
1982	365	344	si
1983	365	365	si
1984	366	366	si
1985	365	359	si
1986	365	346	si
1987	365	285	no
1988	366	340	si
1989	365	357	si
1990	365	351	si
1991	365	292	no
1992	366	354	si
1993	365	358	si
1994	365	346	si
1995	365	365	si
1996	366	349	si
1997	365	327	si
1998	365	304	no
1999	365	365	si
2000	366	348	si
2001	365	354	si
2002	365	264	no
2003	365	295	no
2004	366	338	si
2005	365	261	no
2006	365	95	no
2007	365	365	si
2008	366	310	no
2009	365	347	si
2010	365	365	si
2011	365	149	no
2012	366	224	no
2013	365	231	no
2014	365	0	no
2015	365	184	no
2016	366	90	no
2017	365	61	no
2018	365	90	no
2019	365	239	no

Anexo B

Pozos Región Valparaíso

A continuación se presenta el registro histórico de niveles estáticos de 26 pozos ubicados en la Cordillera de la Costa.

Los Puntos azules corresponden al periodo 1979-2009 y los naranjos al 2010-2019. Muchos de estos pozos muestran una tendencia en la cual el nivel estático se encuentra más profundo en el periodo 2010-2019 que en el de 1979-2009.

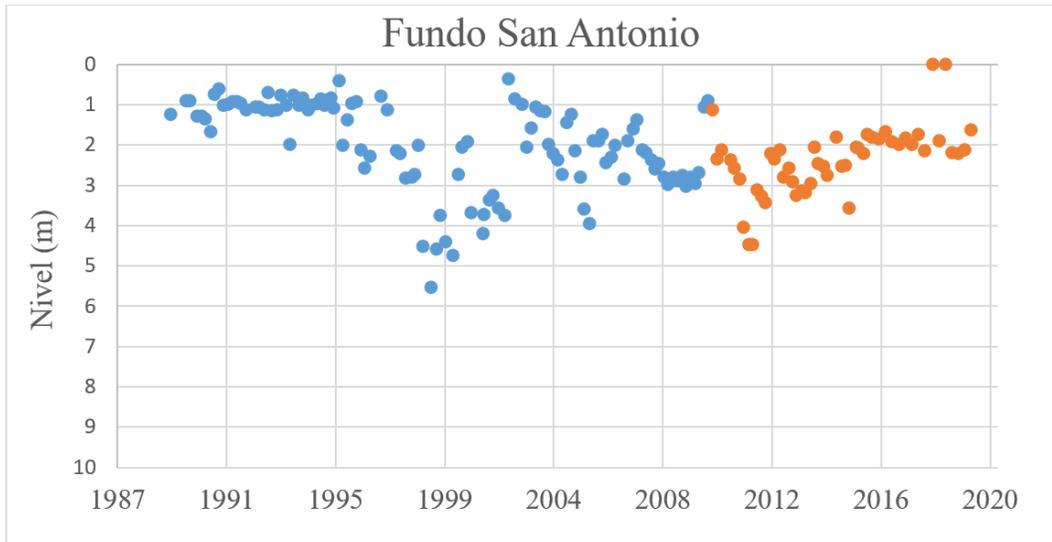


Figura 11.1: Pozo Fundo San Antonio.

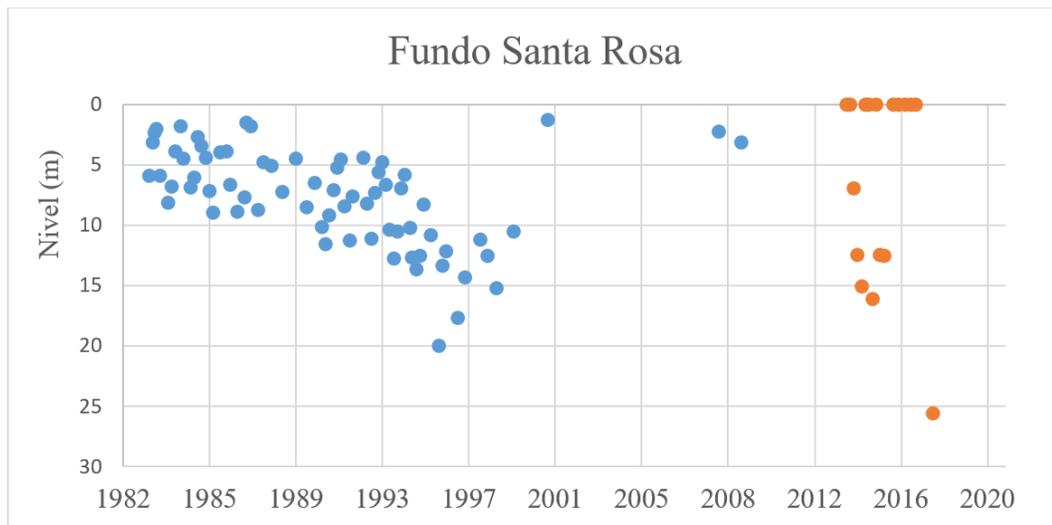


Figura 11.2: Pozo Fundo Santa Rosa.

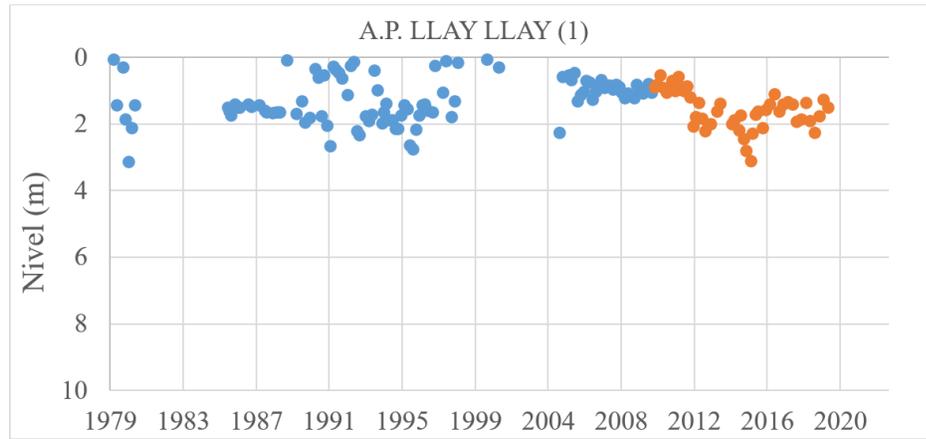


Figura 11.3: Pozo Fundo A.P. LLAY LLAY (1).

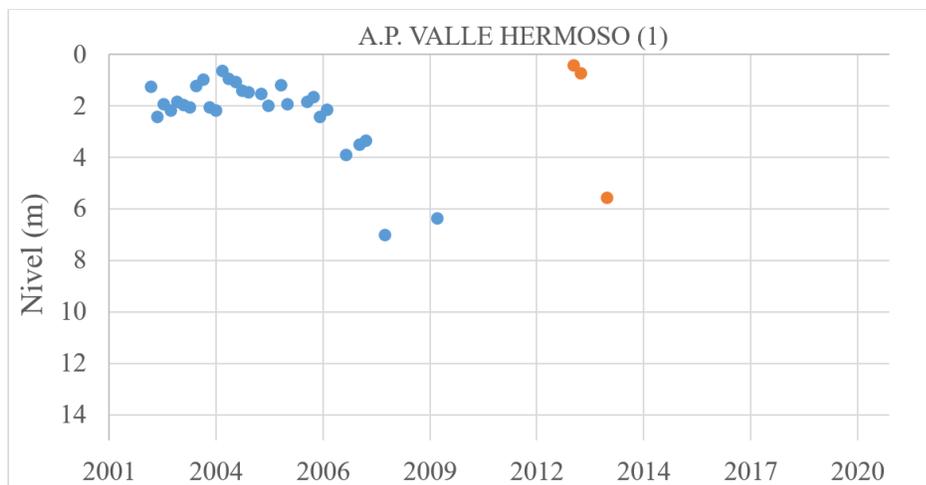


Figura 11.4: Pozo Fundo A.P.Valle Hermoso (1).

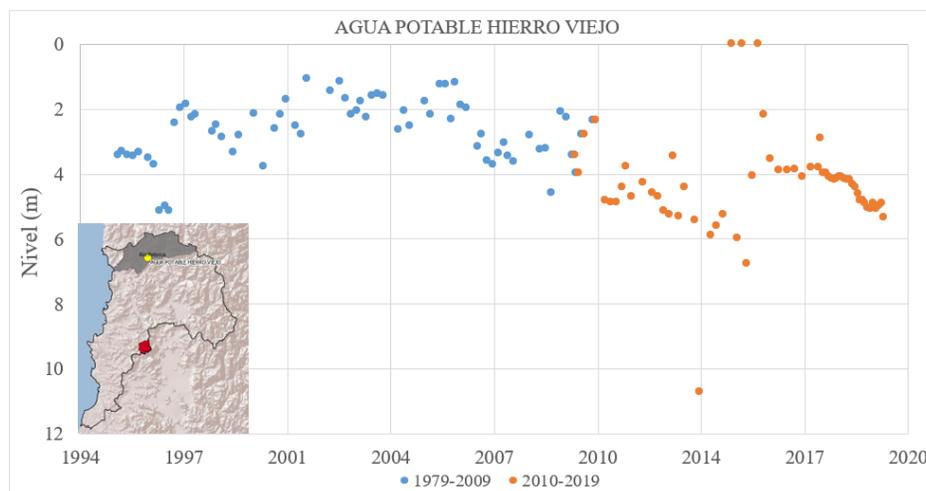


Figura 11.5: Pozo Agua Potable Hierro Viejo.

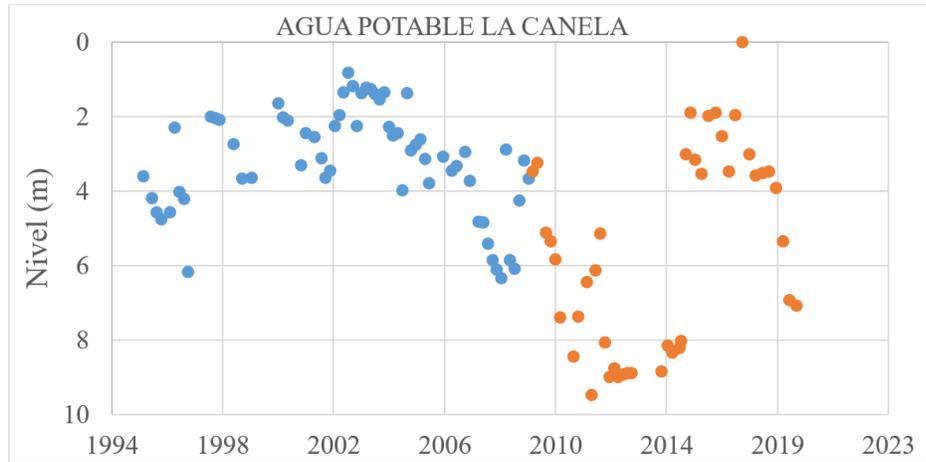


Figura 11.6: Pozo Agua Potable La Canela.

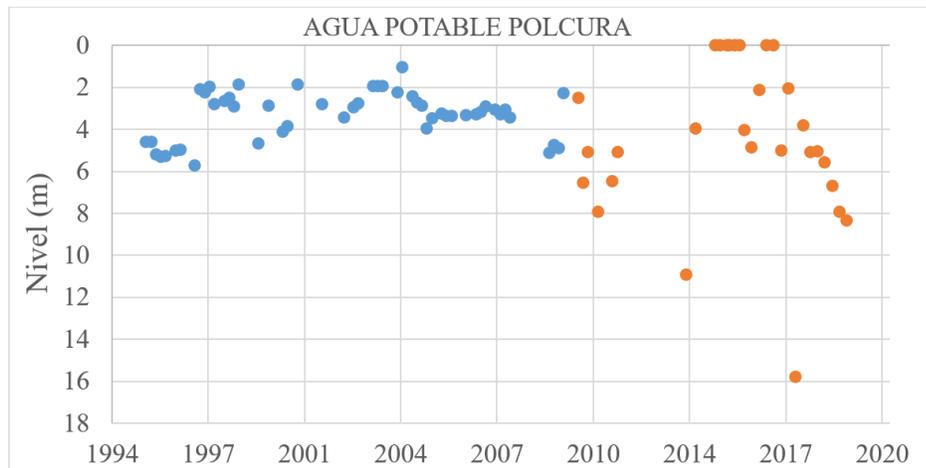


Figura 11.7: Pozo Agua Potable Polcura.

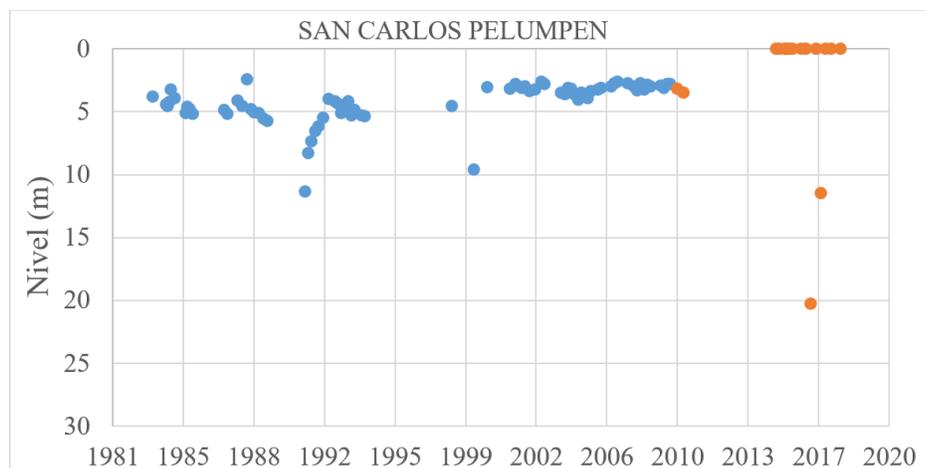


Figura 11.8: Pozo San Carlos Pelumpen.

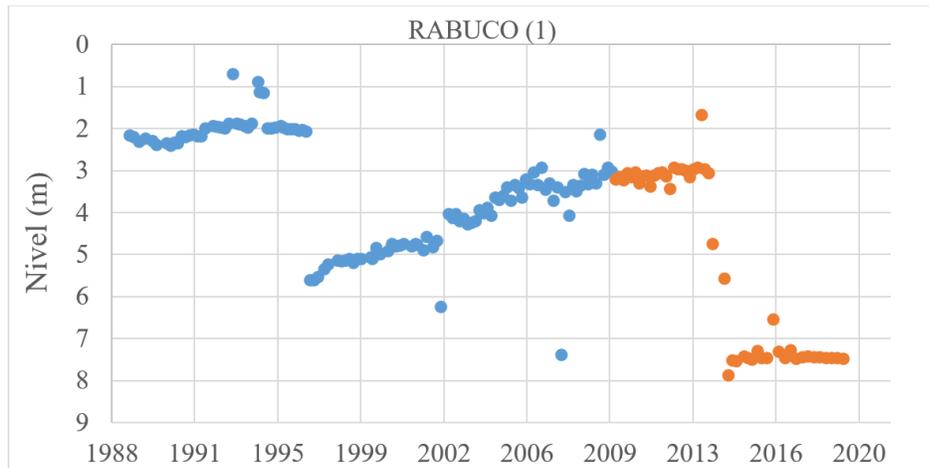


Figura 11.9: Pozo Rabuco (1).

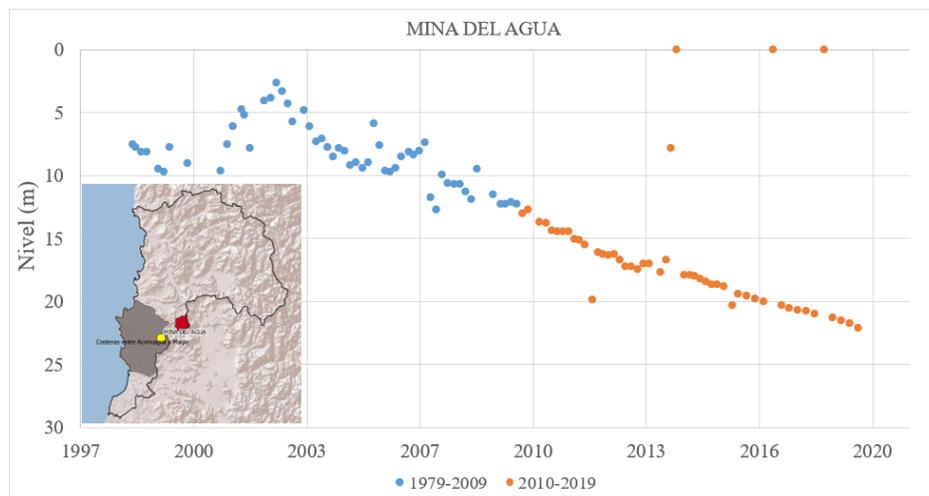


Figura 11.10: Pozo Mina del agua.

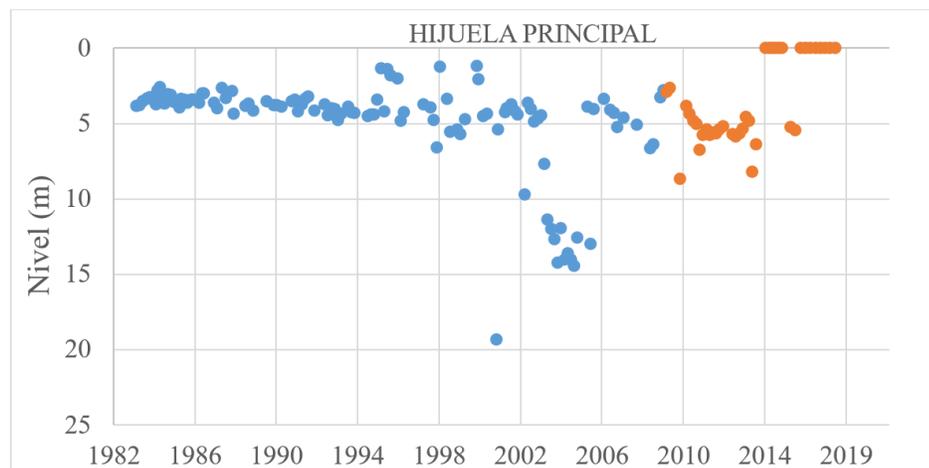


Figura 11.11: Pozo Hijueta Principal.

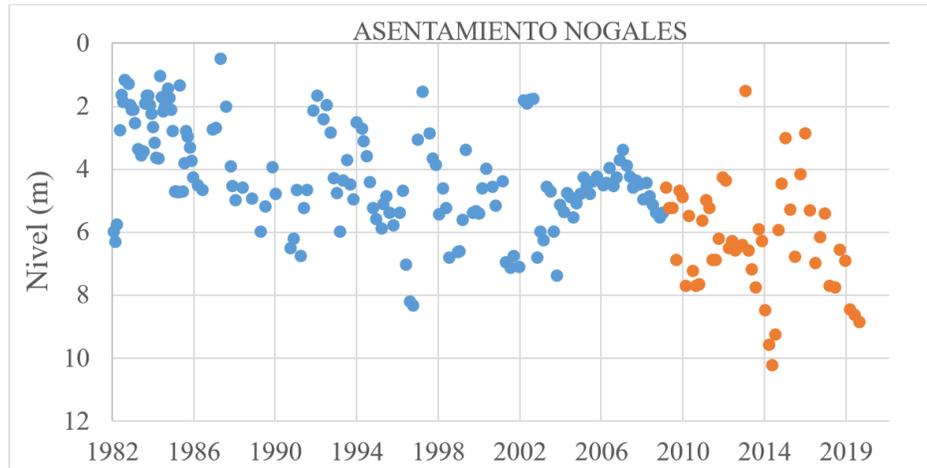


Figura 11.12: Pozo Asentamiento Nogales.

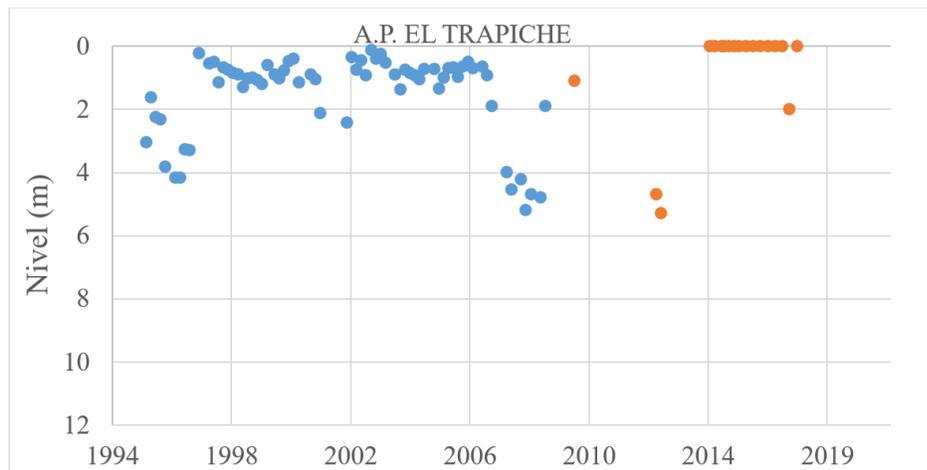


Figura 11.13: Pozo A.P. El Trapiche.

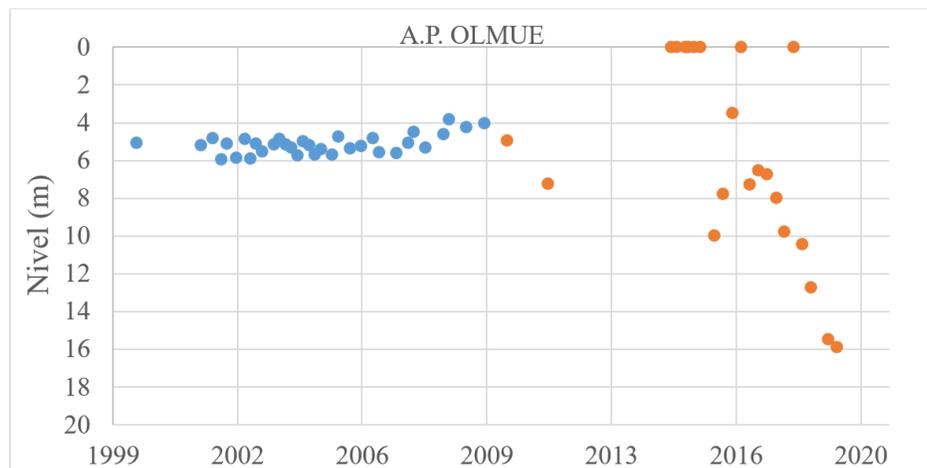


Figura 11.14: Pozo A.P. Olmue.

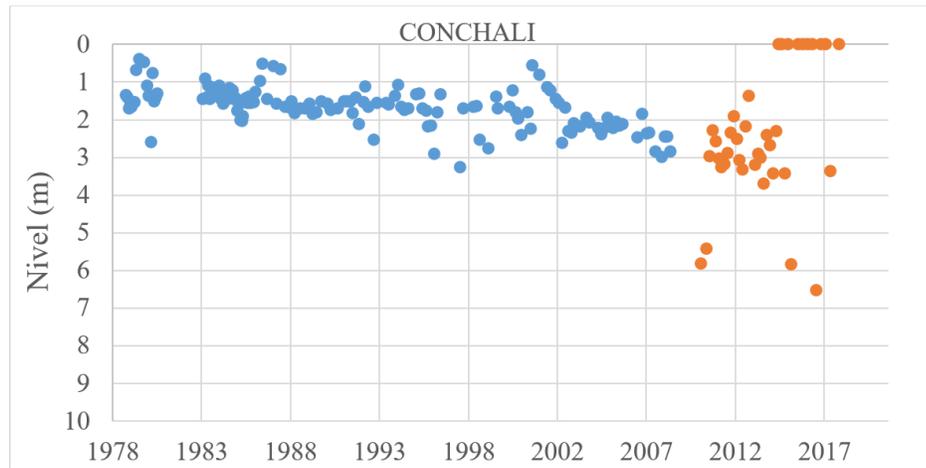


Figura 11.15: Pozo Conchali.

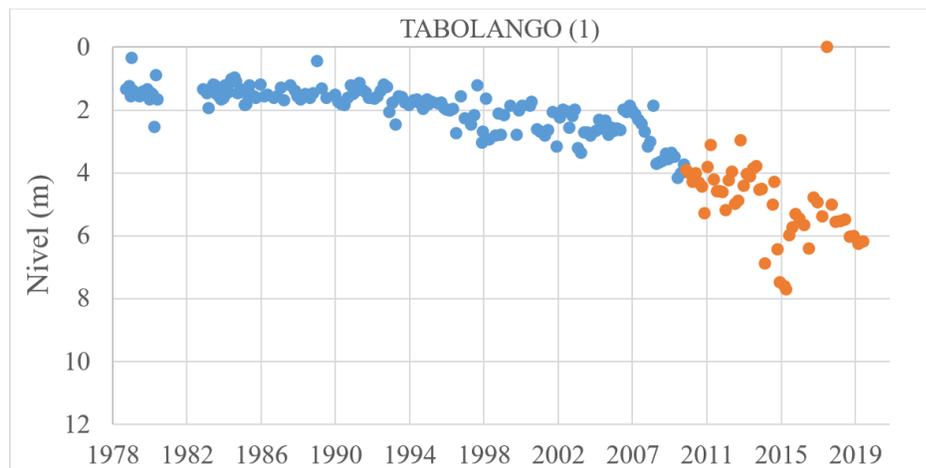


Figura 11.16: Pozo Tabolango (1).

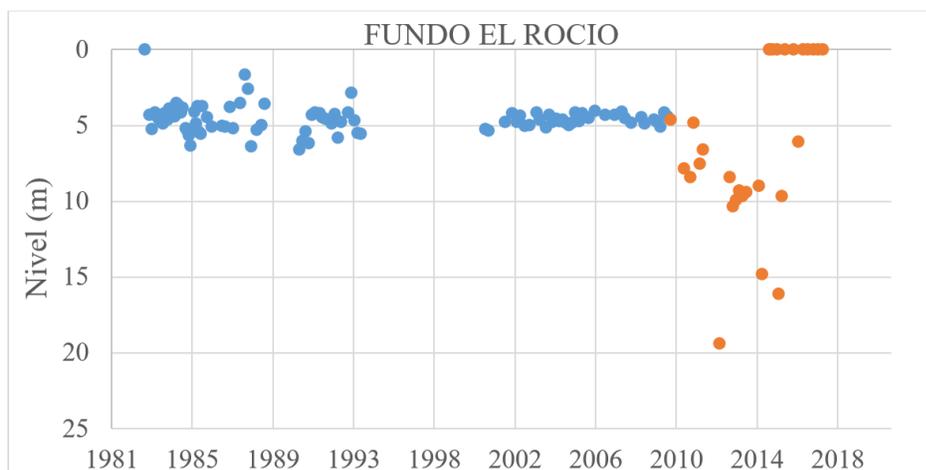


Figura 11.17: Pozo Fundo El Rocio.

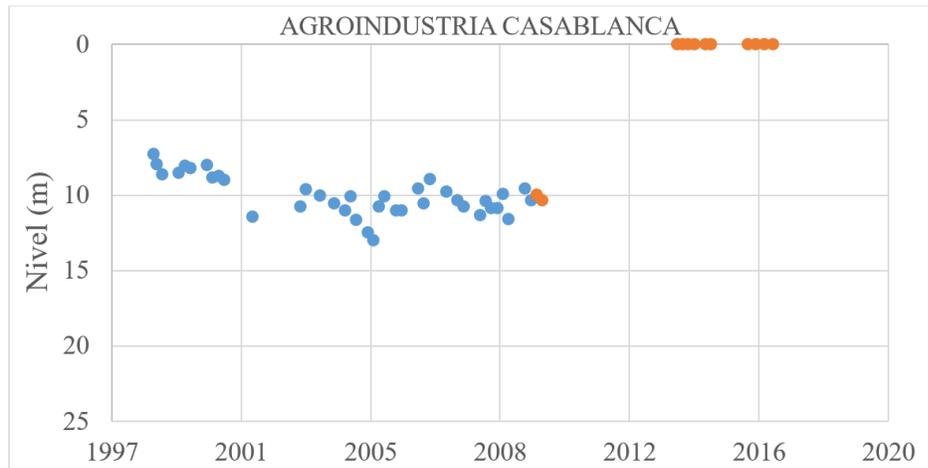


Figura 11.18: Pozo Agroindustria Casablanca.

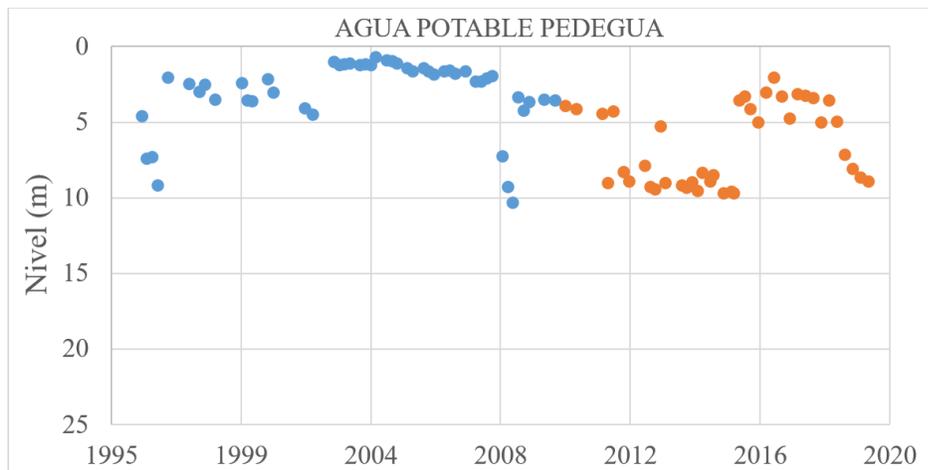


Figura 11.19: Pozo Agua Potable Pedegua.

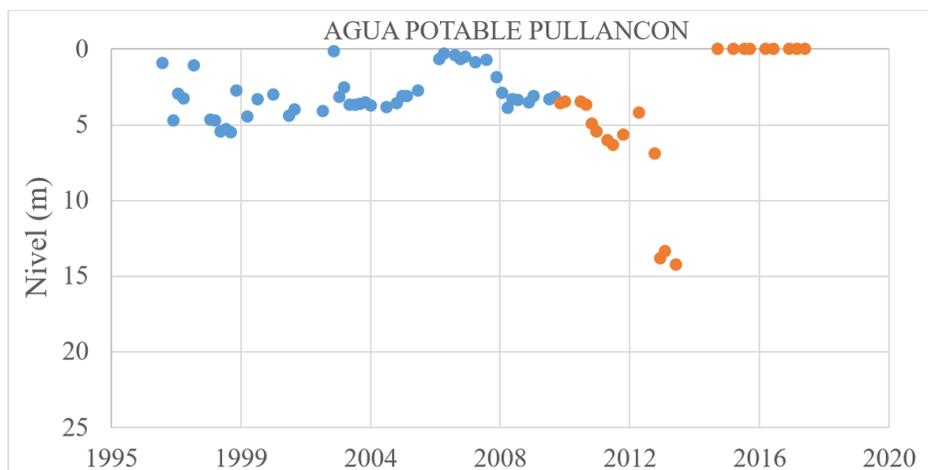


Figura 11.20: Pozo Agua Potable Pullancon.

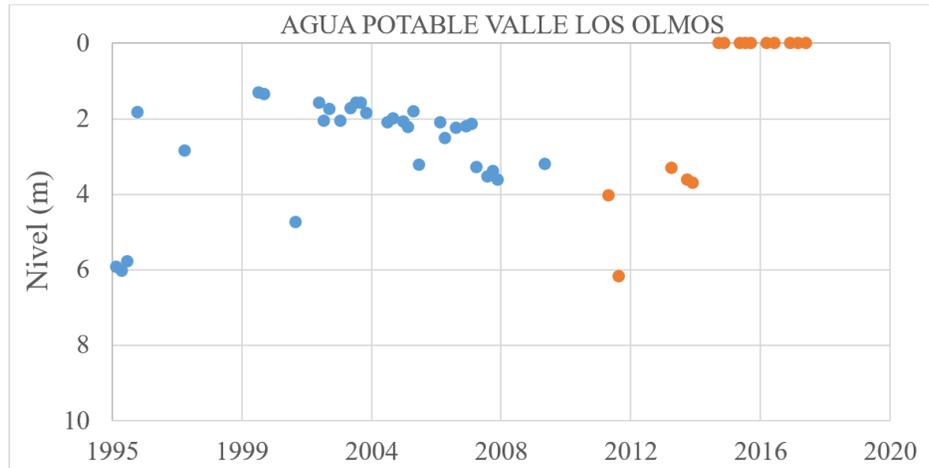


Figura 11.21: Pozo Agua Potable Valle Los Olmos.

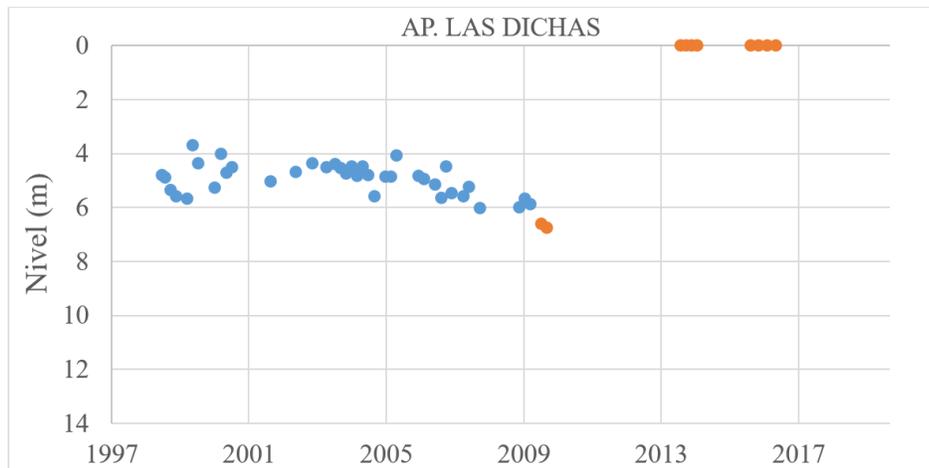


Figura 11.22: Pozo A.P. Las Dichas.

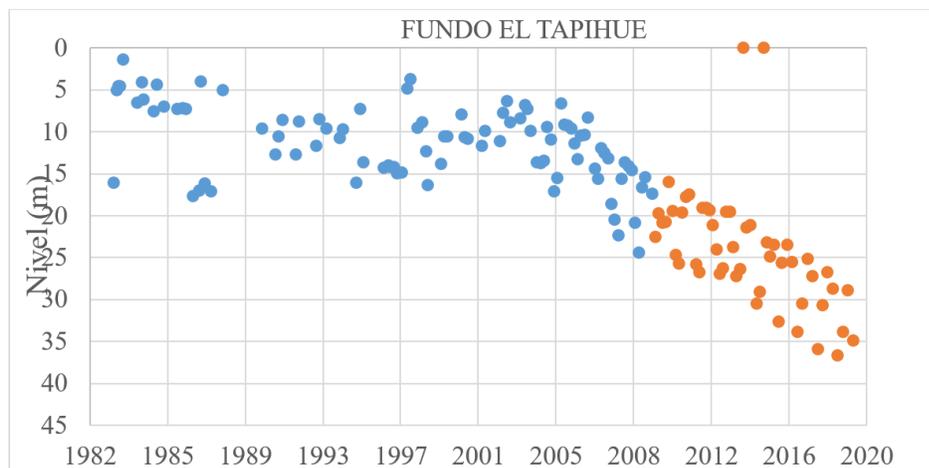


Figura 11.23: Pozo Fundo El Tapihue.

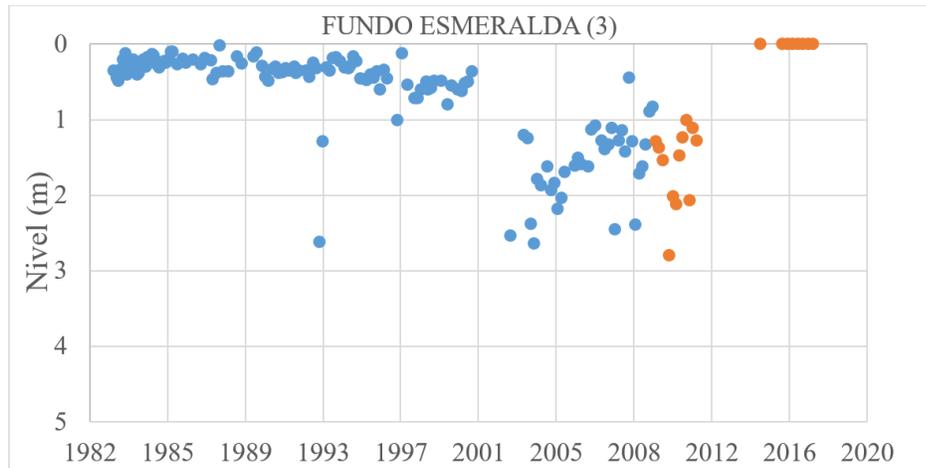


Figura 11.24: Pozo Fundo Esmeralda (3).

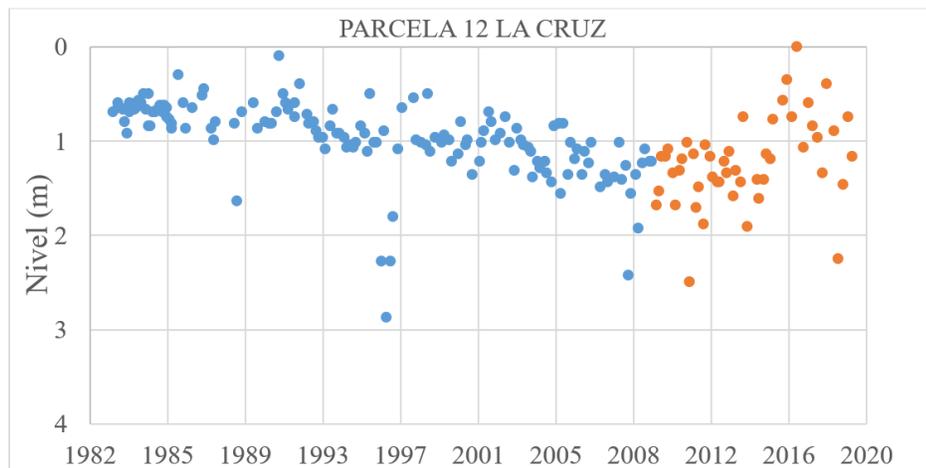


Figura 11.25: Pozo Parcela 12 La Cruz.

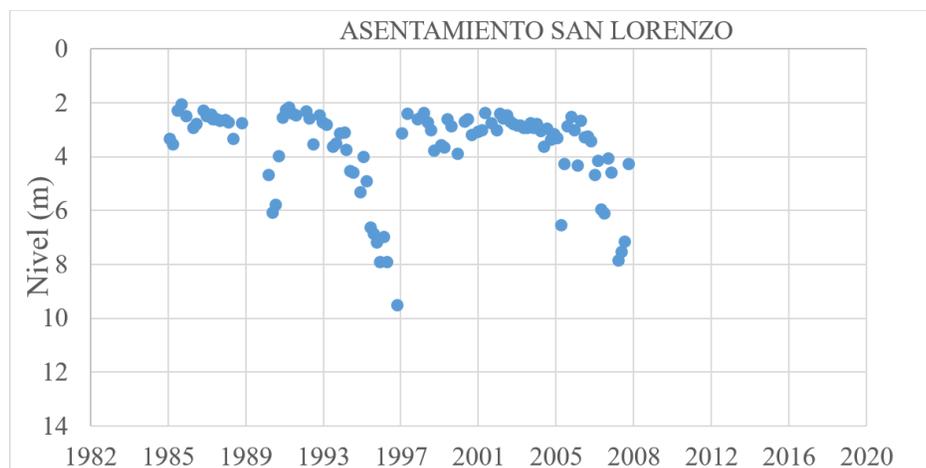


Figura 11.26: Pozo Asentamiento San Lorenzo.

Tabla 11.4: Estaciones de niveles estáticos situadas en la Cordillera de la Costa de la Región de Valparaíso.

Código BNA	Nombre estación	Este	Norte
05426008-3	Fundo San Antonio	291316	6368962
05520009-2	Fundo Santa Rosa	274180	6312033
05210003-8	Asentamiento V. Aconcagua	321113	6413209
05422003-0	A.P. Llay Llay (1)	316551	6364348
05221010-0	A.P. Valle Hermoso (1)	293473	6407256
05110005-0	Agua Potable Hierro Viejo	310475	6426647
05120010-1	Agua Potable La Canela	297218	6417725
05110004-2	Agua Potable Polcura	323775	6432125
05426009-1	Asentamiento El Cajon	287925	6353281
05427012-7	San Carlos Pelumpen	295366	6344981
05423015-K	Rabuco (1)	302835	6360810
05520018-1	Mina Del Agua	287320	6314955
05420007-2	Hijuela Principal	330541	6374246
05424007-4	Asentamiento Nogales	293894	6377974
05210009-7	Asentamiento Paihuen	329439	6418024
05120017-9	A.P. El Trapiche	285498	6422555
05427010-0	A.P. Olmue	301983	6365643
05424012-0	Conchali	298051	6369456
05210008-9	Asentamiento San Lorenzo	313704	6410157
05426021-0	Tabolango (1)	279167	6354308
05427011-9	Fundo El Rocio	290611	6343514
05520026-2	Agroindustria Csacablanca	276471	6311438
05120016-0	Agua Potable Pedegua	305136	6418270
05120009-8	Agua Potable Pullancon	292171	6422236
05100008-0	Agua Potable Valle Los Olmos	328524	6433979
05520020-3	AP. Las Dichas	266949	6313465
05520004-1	Fundo El Tapihue	283757	6310831
05426011-3	Fundo Esmeralda (3)	283913	6356636
05520005-K	Fundo La Playa	272058	6318805
05426015-6	Parcela 12 La Cruz	293675	6363593

Pozos Región Metropolitana

A continuación se presenta el registro histórico de niveles estáticos de 16 pozos ubicados en la Cordillera de la Costa.

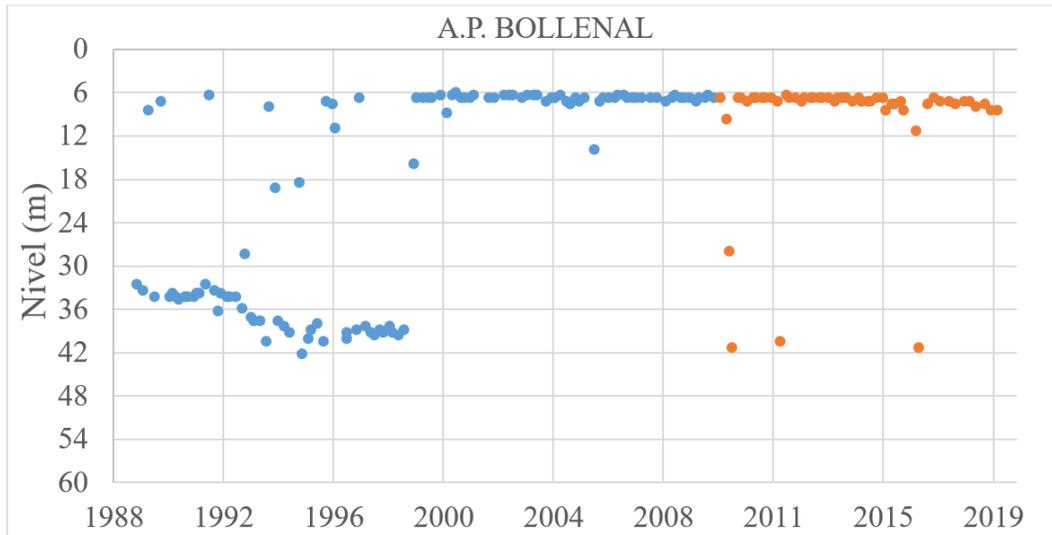


Figura 11.27: Pozo A.P. Bollenal.

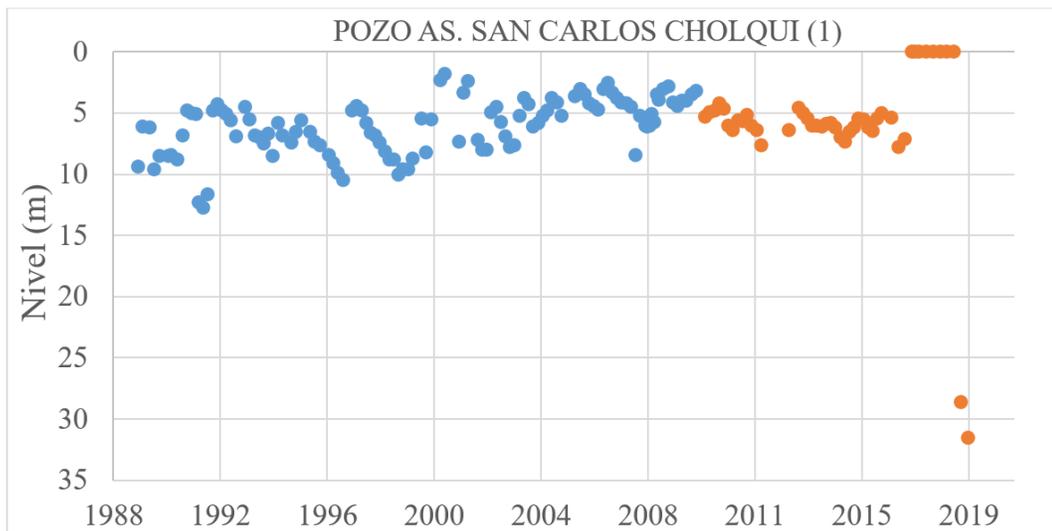


Figura 11.28: pozo As. San Carlos Cholqui (1)

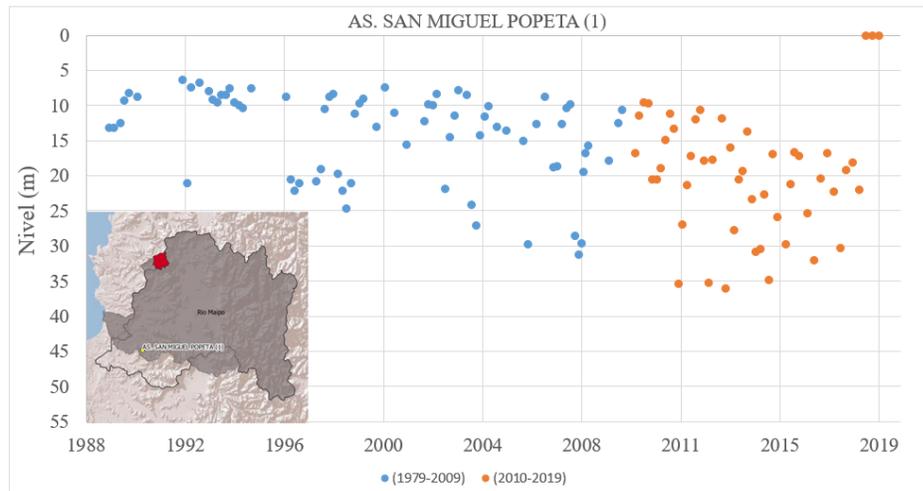


Figura 11.29: Pozo AS. San Miguel Popeta (1)

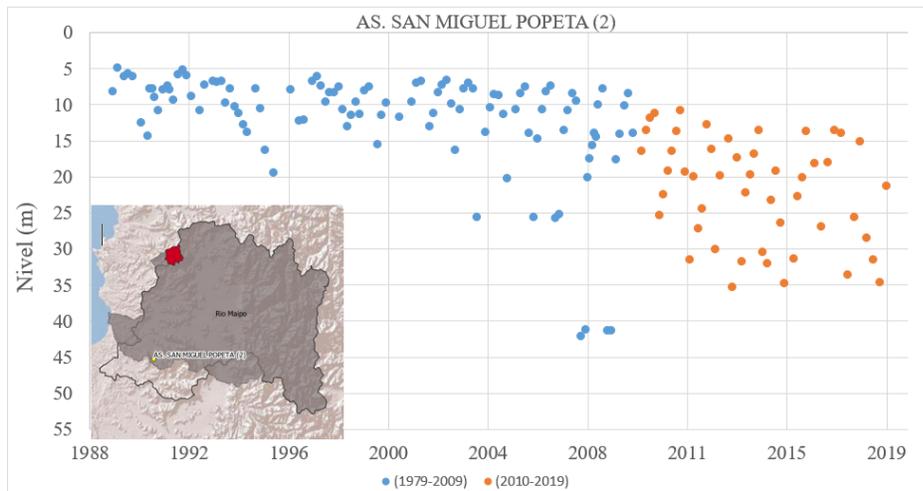


Figura 11.30: Pozo AS. San Miguel Popeta (2)

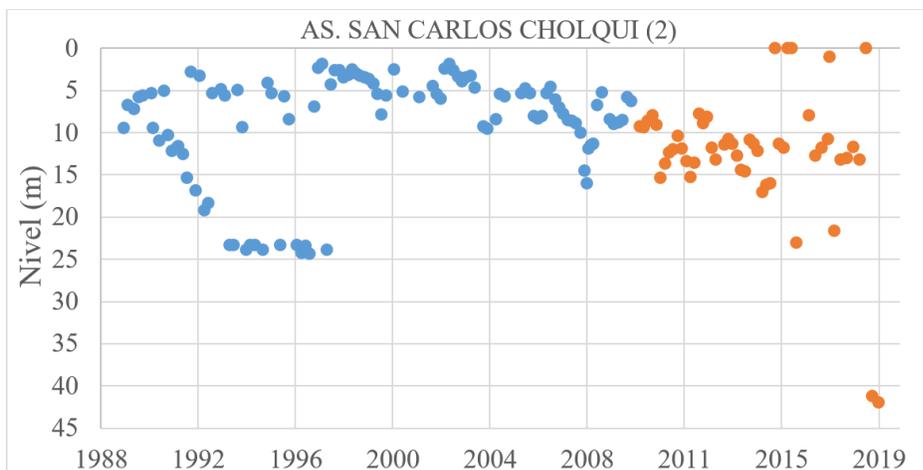


Figura 11.31: Pozo Asentamiento San Carlos Cholqui (2)

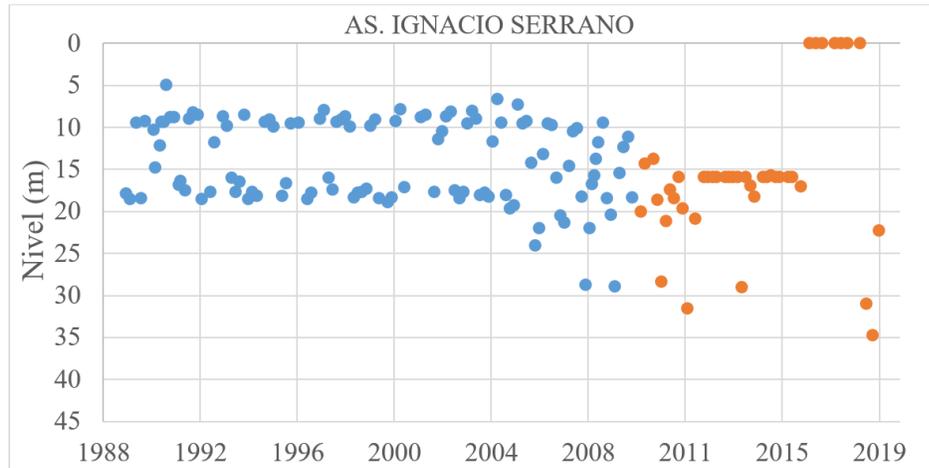


Figura 11.32: Pozo Asentamiento San Ignacio Serrano

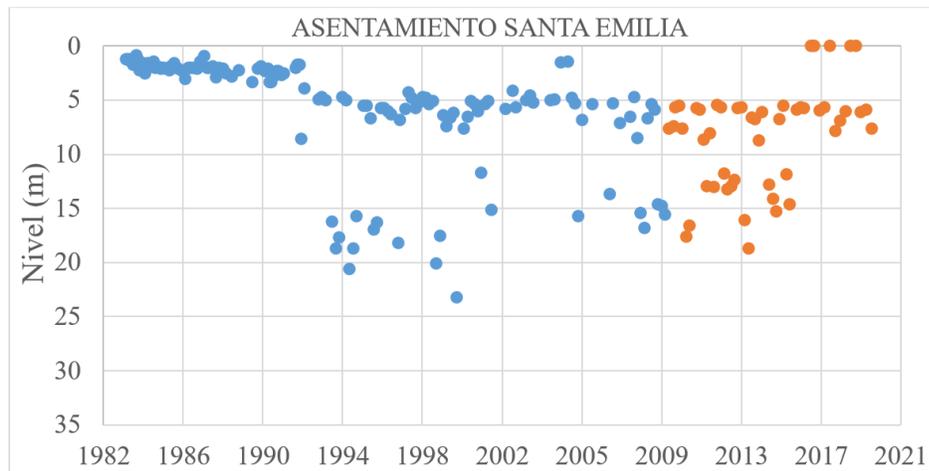


Figura 11.33: Pozo Asentamiento Santa Emilia

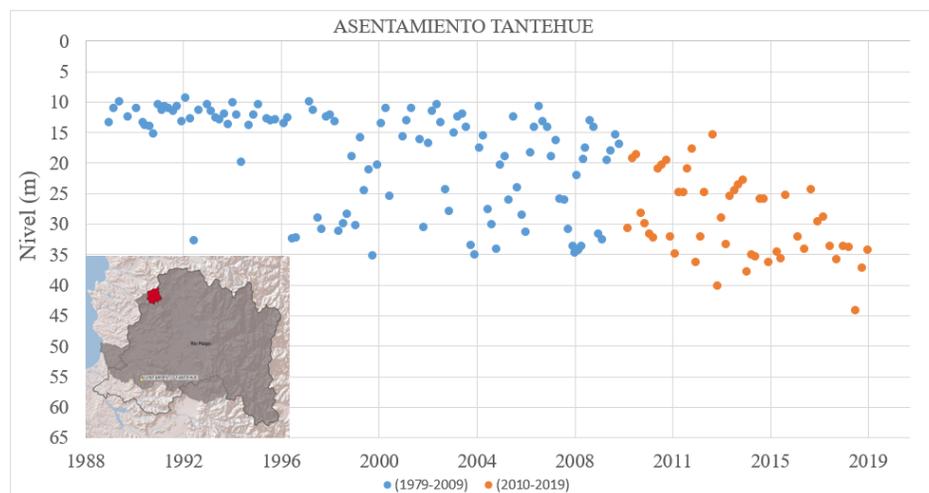


Figura 11.34: Pozo Asentamiento Tantehue



Figura 11.35: Pozo Fundo El Parron

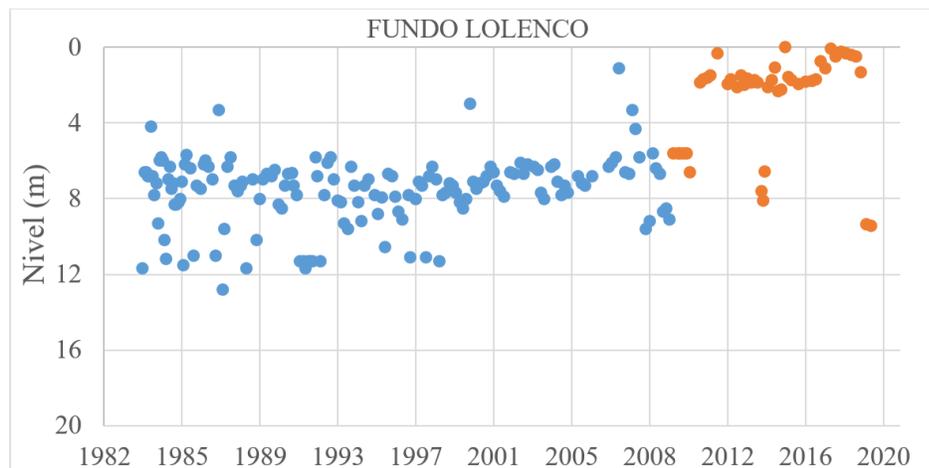


Figura 11.36: Pozo Fundo Lolenco

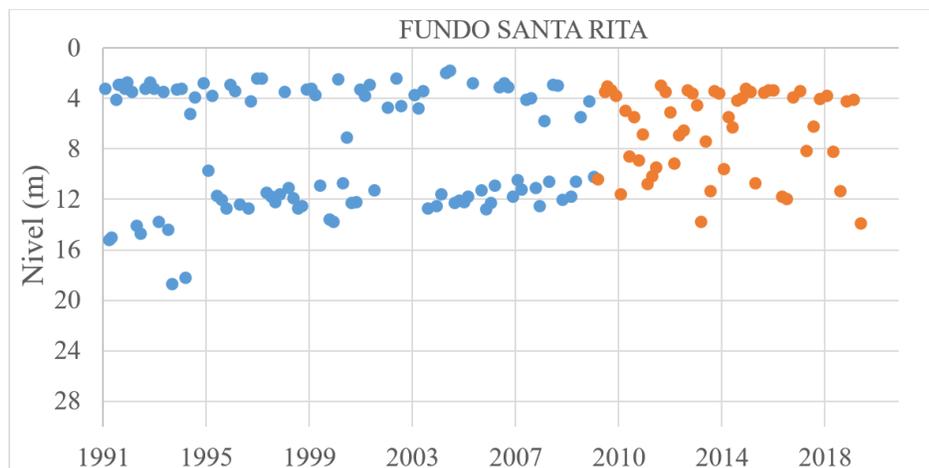


Figura 11.37: Pozo Fundo Santa Rita

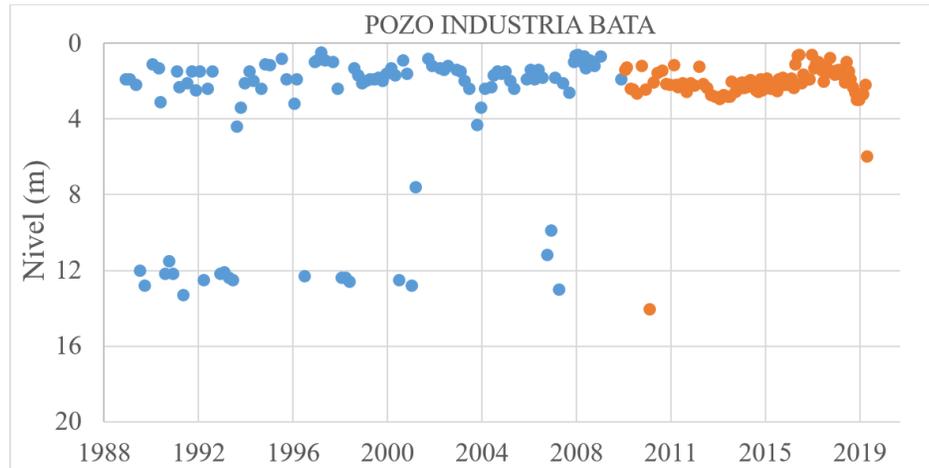


Figura 11.38: Pozo Industria Bata

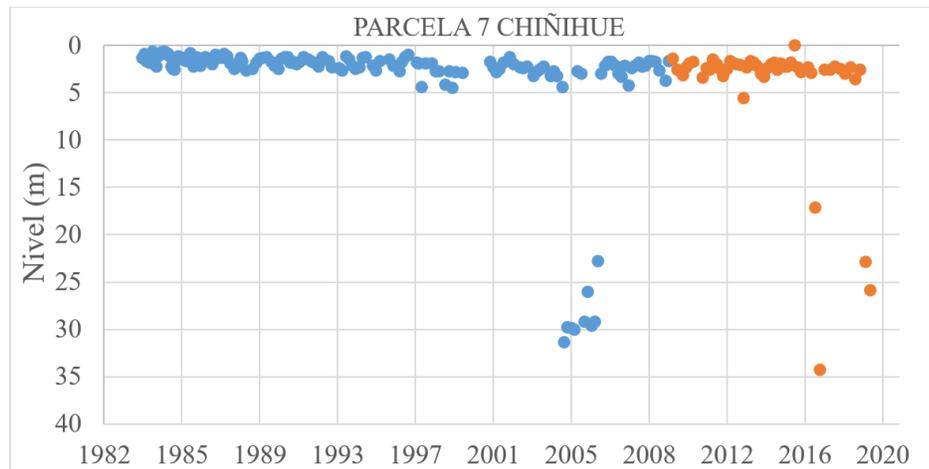


Figura 11.39: Pozo Parcela 7 Chiñihue

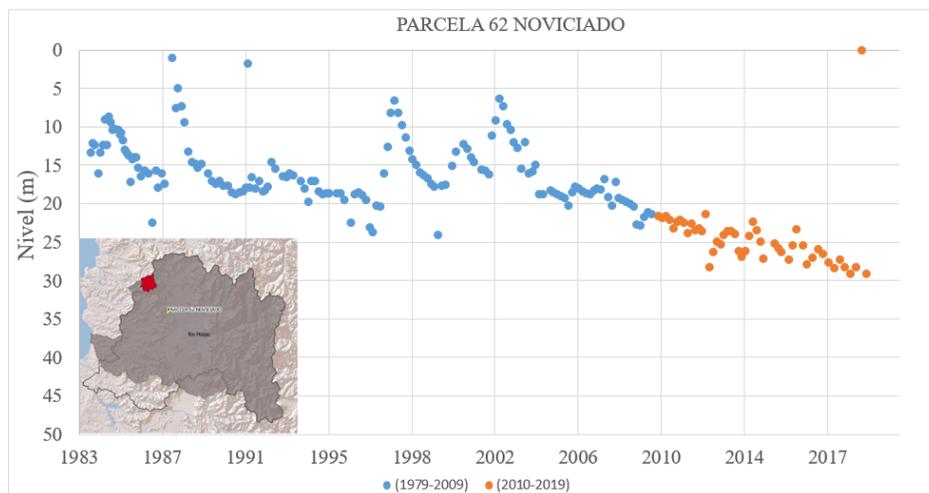


Figura 11.40: Pozo Parcela 62 Noviciado

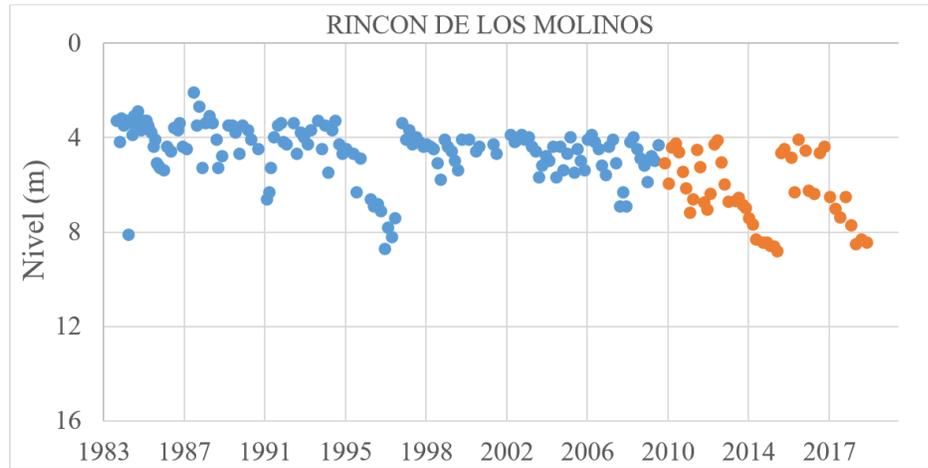


Figura 11.41: Pozo Rincon de los Molinos

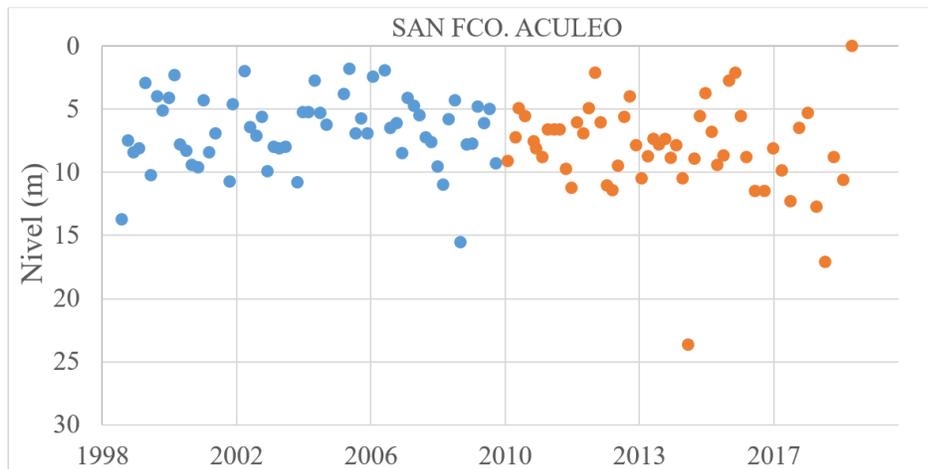


Figura 11.42: Pozo San Fco. Aculeo

Tabla 11.5: Estaciones de niveles estáticos situadas en la Cordillera de la Costa de la Región Metropolitana.

Código BNA	Nombre estación	Este	Norte
05745003-7	A.P. Bollenal	294723	6283534
05747006-2	AS. Ignacio Serrano	292148	6248418
05740009-9	AS. San Carlos Cholqui (2)	304575	6260064
05747003-8	AS. San Miguel Popeta (1)	291250	6249279
05747004-6	AS. San Miguel Popeta (2)	291584	6247940
05747002-K	AS. Popeta Las Mariposas	290608	6250322
05744004-K	Asentamiento Santa Emilia	304097	6294558
05747005-4	Asentamiento Tantehue	294918	6248372
05744008-2	Fundo Baracaldo	302570	6289815
05744007-4	Fundo El Parron	306685	6292573
05744006-6	Fundo Lolenco	310574	6299346
06041004-6	Fundo San Alfonso	292611	6228459
05745002-9	Fundo San Patricio	306726	6281529
05744005-8	Fundo Santa Rita	307842	6293856
05736003-8	Parcela 62 Noviciado	324286	6302991
05740006-4	Parcela 7 Chiñihue	307799	6268974
05740007-2	AS. San Carlos Cholqui (1)	303191	6260418
05740008-0	Pozo Industria Bata	297570	6271385
05733011-2	Rincon de los Molinos	319980	6339868
05716006-3	San Fco. Aculeo	326174	6248825

Pozos Región Libertador Bernardo O' Higgins

A continuación se presenta el registro histórico de niveles estáticos de 15 pozos.

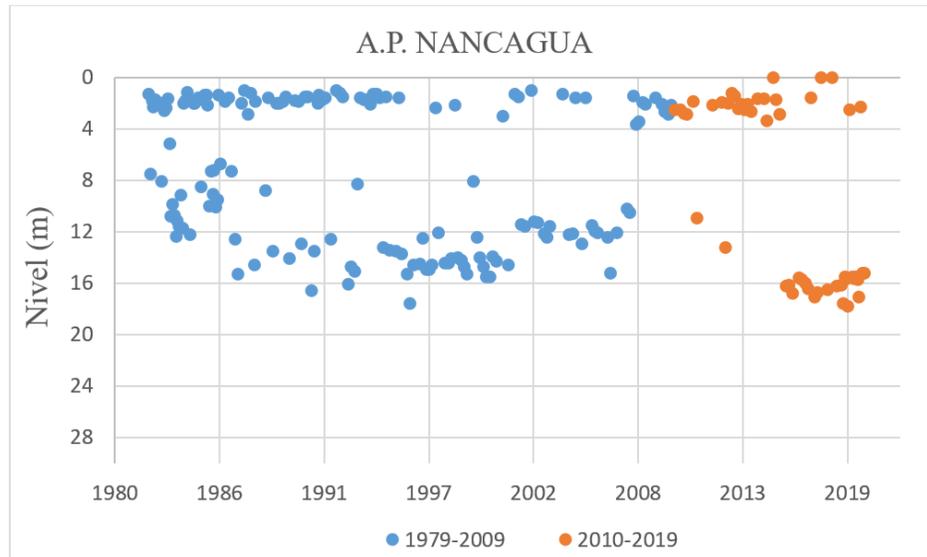


Figura 11.43: Pozo A.P. Nancagua.

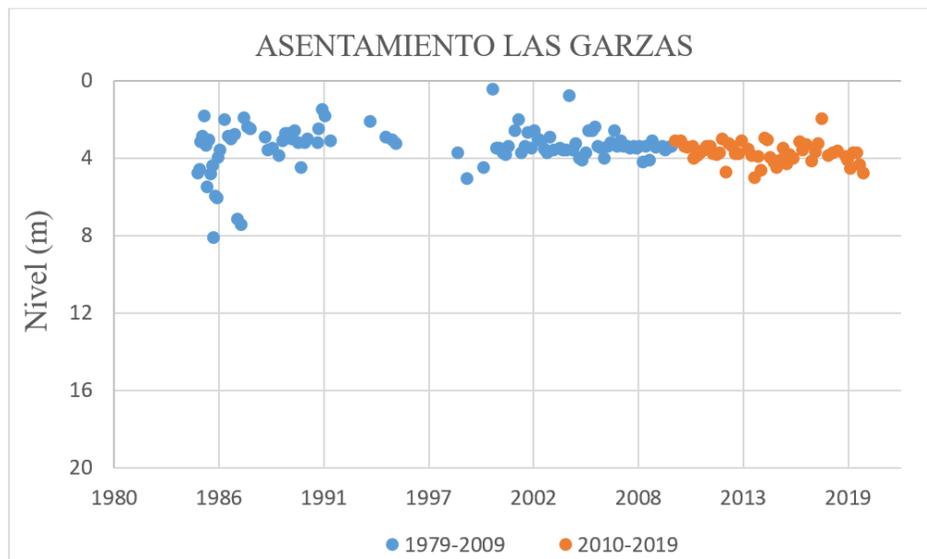


Figura 11.44: Pozo Asentamiento Las Garzas.

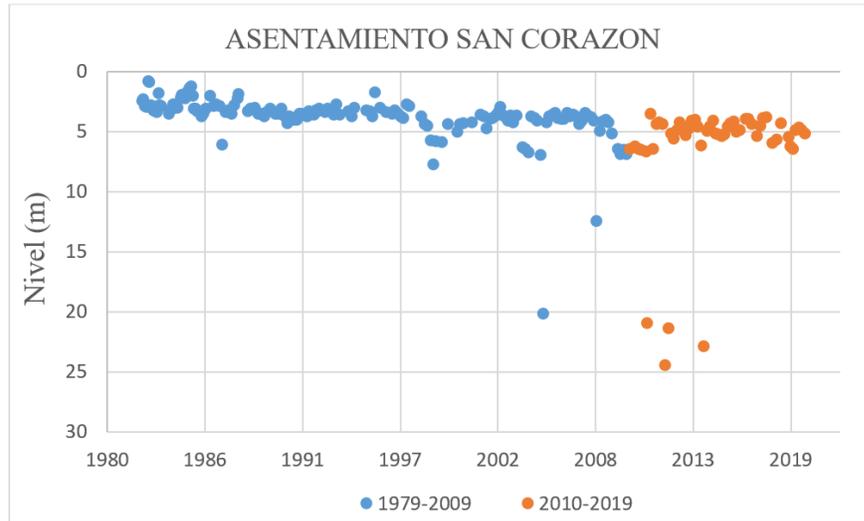


Figura 11.45: Pozo Asentamiento San Corazon.

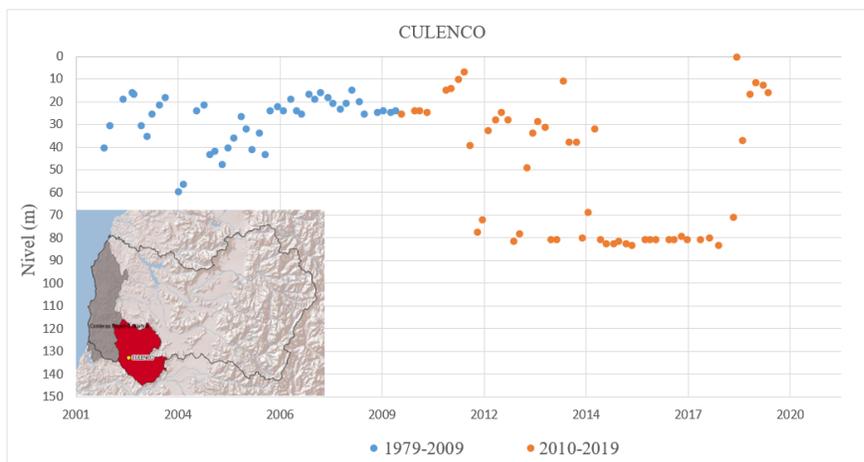


Figura 11.46: Pozo Culenco.

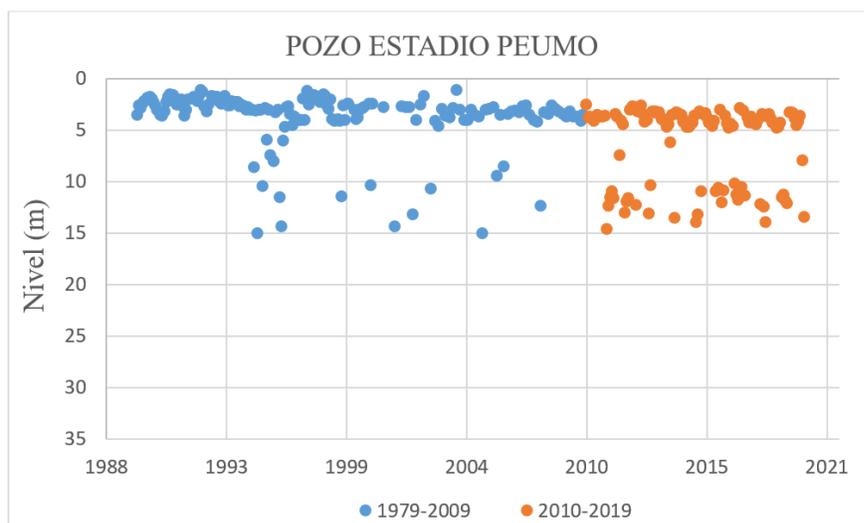


Figura 11.47: Pozo Estadio Peumo

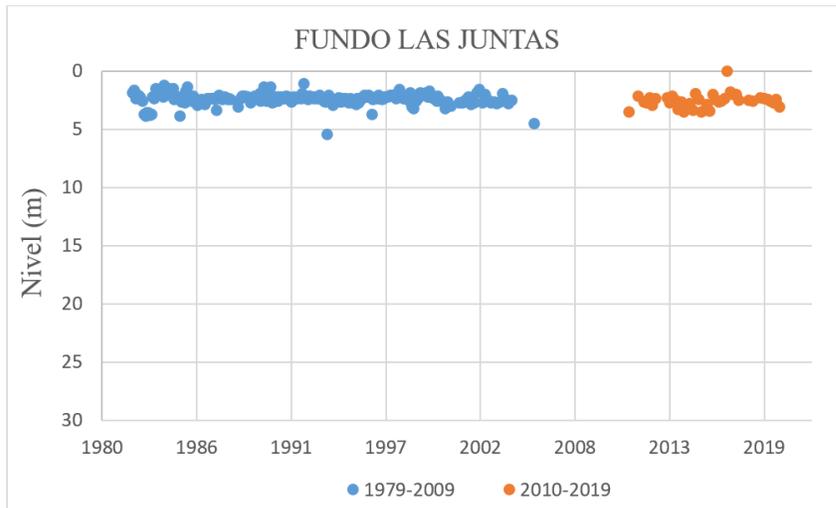


Figura 11.48: Pozo Fundo Las Juntas

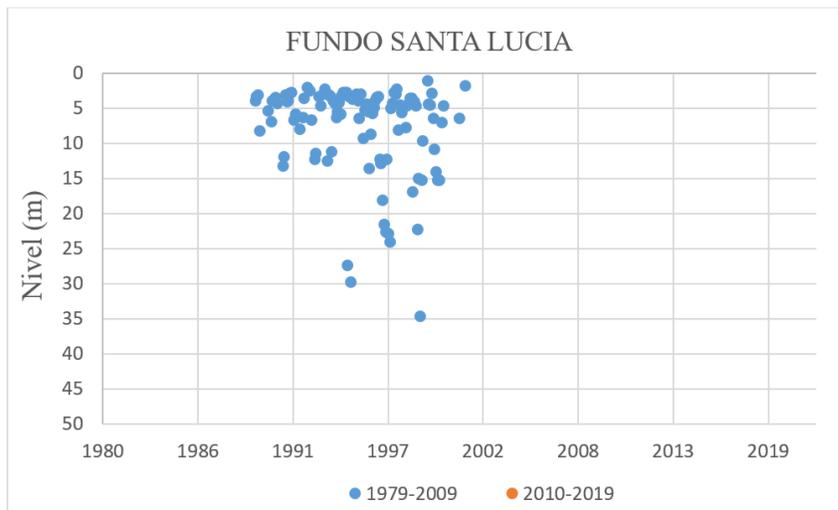


Figura 11.49: Pozo Fundo Santa Lucia

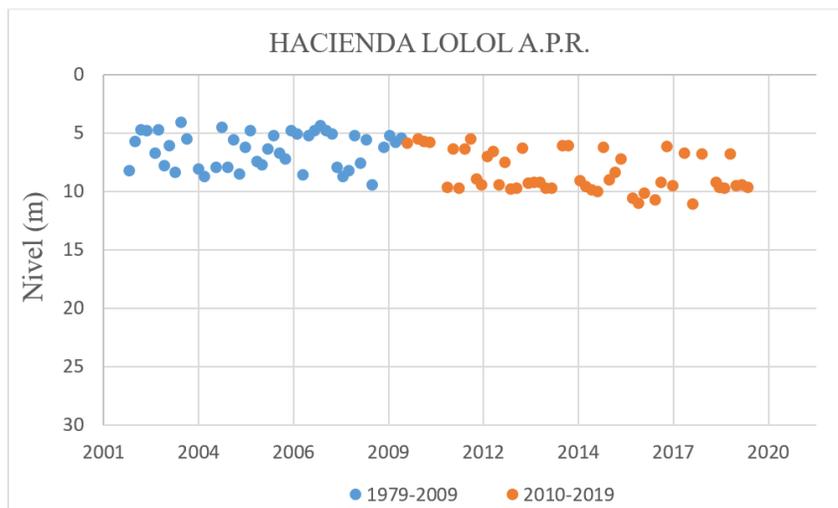


Figura 11.50: Pozo Hacienda Lolol A.P.R.

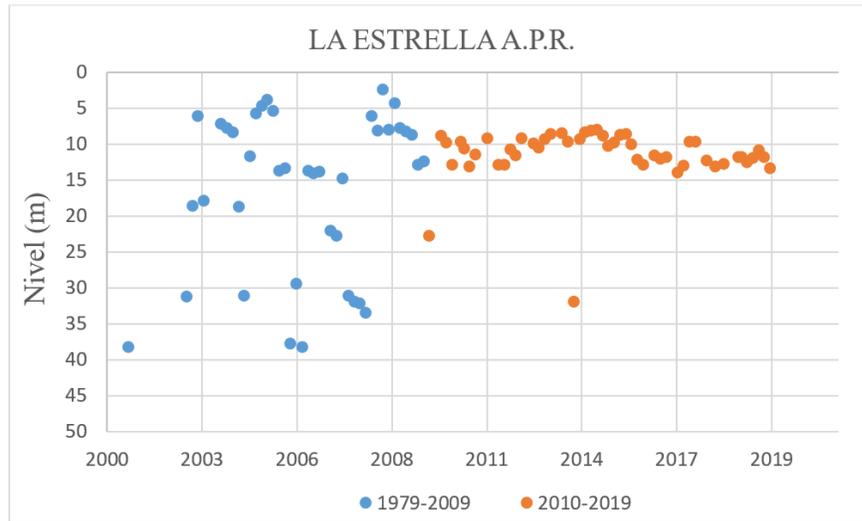


Figura 11.51: Pozo La Estrella A.P.R

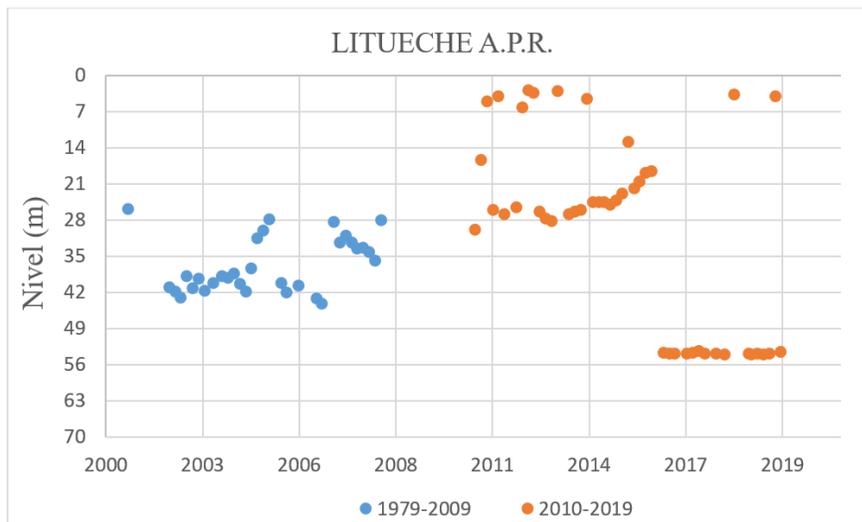


Figura 11.52: Pozo Litueche

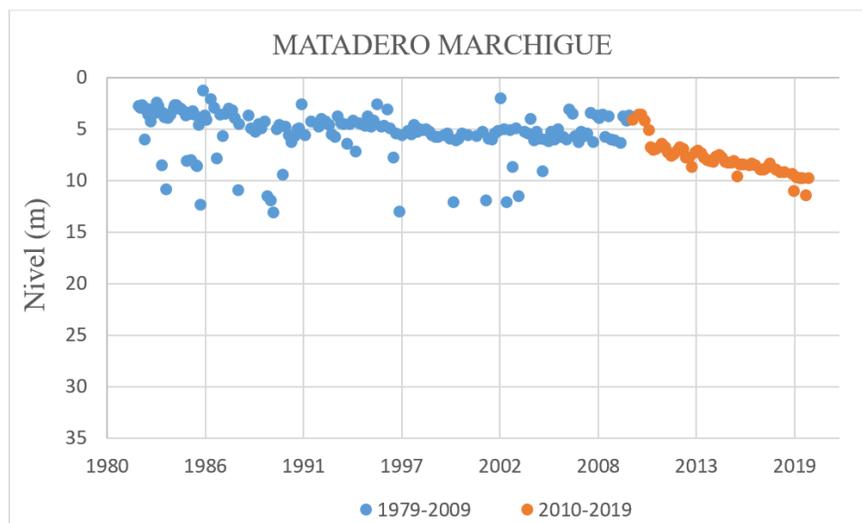


Figura 11.53: Pozo Matadero Marchigue

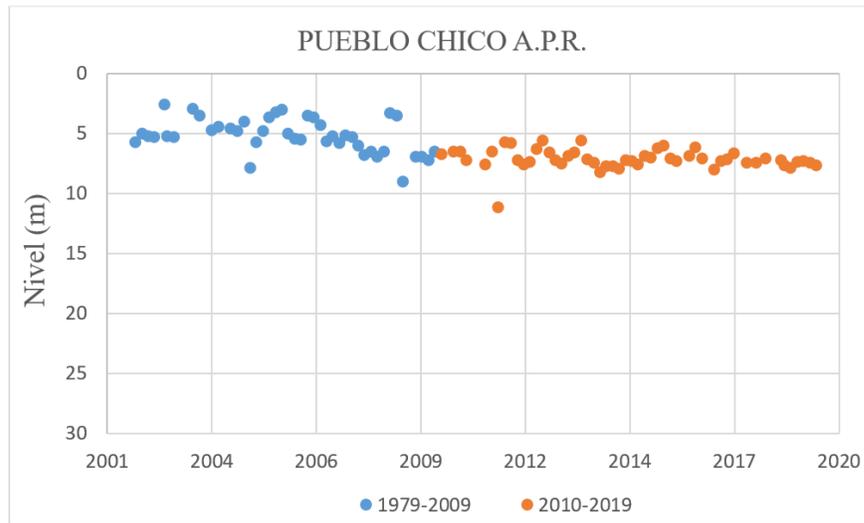


Figura 11.54: Pozo Pueblo Chico A.P.R

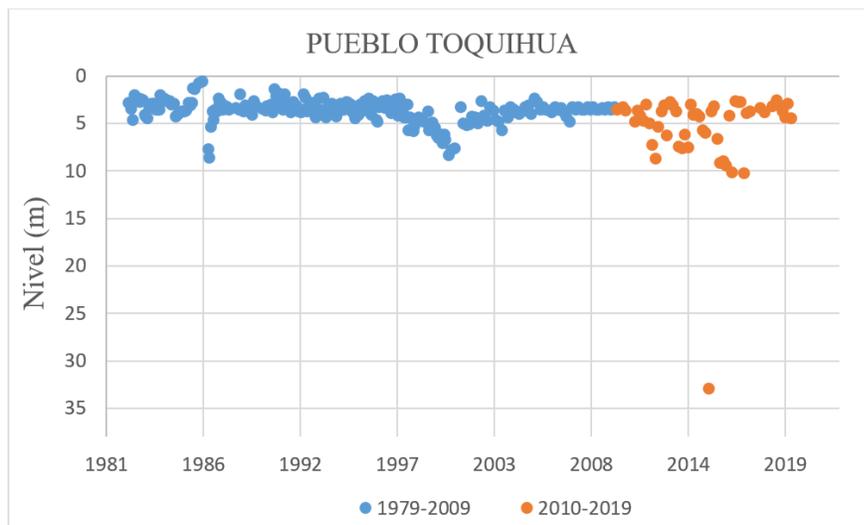


Figura 11.55: Pozo Pueblo Toquihua

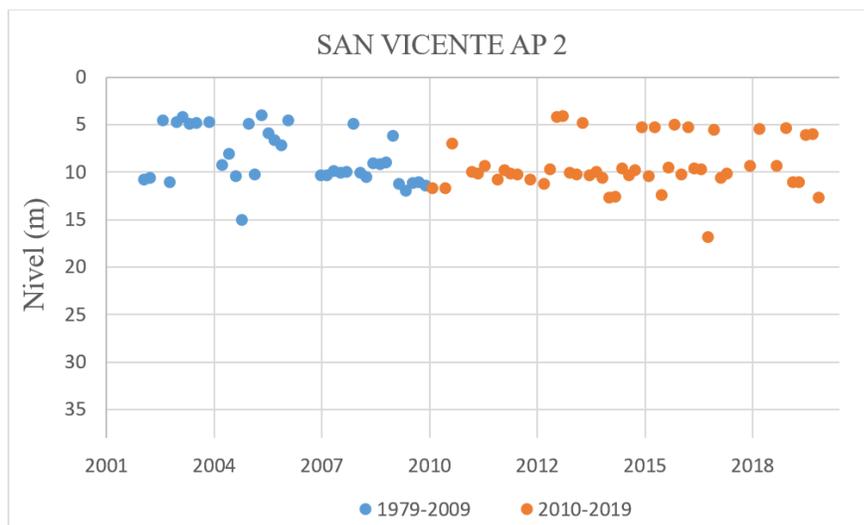


Figura 11.56: Pozo San Vicente AP 2

Tabla 11.6: Estaciones de niveles estáticos situadas en la Cordillera de la Costa de la Región del Libertador Bernardo O´Higgins.

Código BNA	Nombre estación	Este	Norte
06130004-K	Casa Silva 1	252606	6147801
06132004-0	Pumanque 1 APR	256593	6167480
06132003-2	Pueblo Chico A.P.R.	248899	6161330
06036002-2	A.P. Chepica	292382	6154029
06019013-5	A.P. Las Cabras	288337	6202001
06031001-7	A.P. Nancagua	299676	6163822
06035005-1	Asentamiento Las Garzas	280739	6176316
06037010-9	Asentamiento San Corazon	275876	6178458
06051007-5	Criadero de Aves	261482	6195071
06130006-6	Culenco	253034	6144499
06019014-3	Fundo Las Juntas	278290	6203312
06043003-9	Fundo Santa Lucia	286291	6227202
06131001-0	Hacienda Lolol A.P.R.	261861	6155953
06052004-6	La Estrella A.P.R.	256404	6210662
06055005-0	Litueche A.P.R	248195	6222031
06051006-7	Matadero Marchigue	259210	6191033
06019007-0	Estadio Peumo	301232	6191907
06015019-2	Pueblo Toquihua	304837	6194492
06018018-0	San Vicente AP 2	310001	6187102

Tabla 11.7: Estaciones de niveles estáticos situadas en la Cordillera de la Costa de la Región del Maule.

Código BNA	Nombre estación	Este	Norte
07121005-7	Estadio de Huaquén	253838	6111444

Anexo C

Precipitaciones

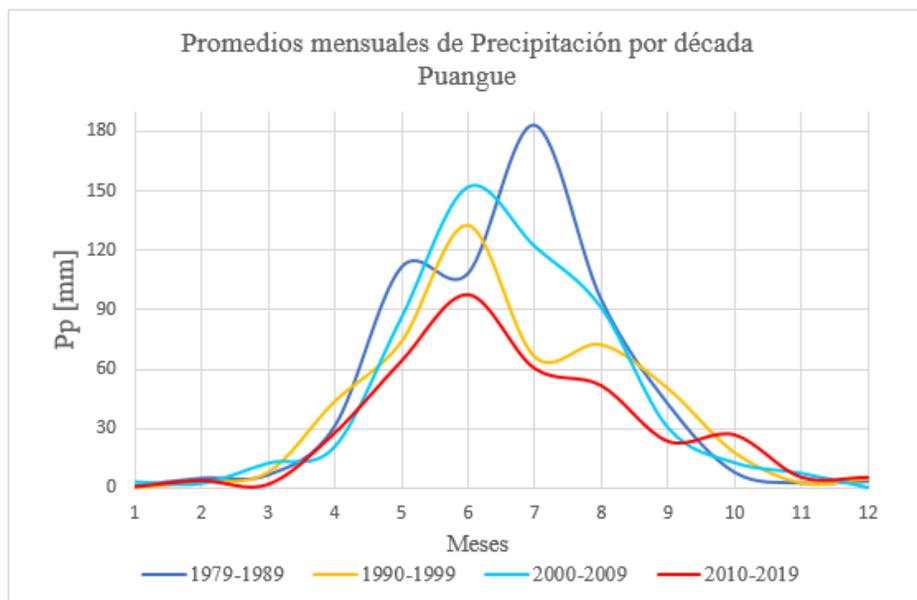


Figura 11.57: Promedios mensuales de Precipitación por década Puangue. Elaboración propia

Tabla 11.8: Promedios Mensuales de precipitación por década, Cuenca Puangue.

Meses	1979-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Enero	1.24	0.54	3.14	0.84
Febrero	5.09	3.14	2.23	3.90
Marzo	6.68	8.12	12.52	1.94
Abril	31.13	43.73	20.75	27.76
Mayo	111.20	73.66	85.84	63.90
Junio	108.06	132.46	152.01	97.46
Julio	182.80	66.34	122.25	60.39
Agosto	95.12	72.39	91.24	51.74
Septiembre	42.53	50.34	30.60	23.71
Octubre	8.08	18.13	12.77	26.97
Noviembre	2.64	2.82	7.46	5.62
Diciembre	3.51	4.98	0.26	5.52

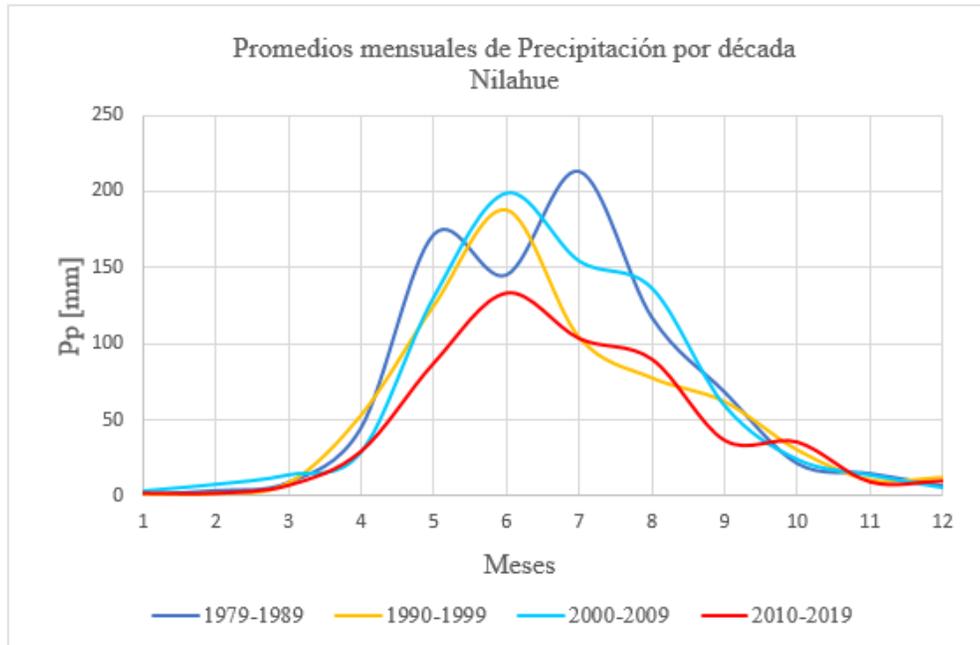


Figura 11.58: Promedios mensuales de Precipitación por década Nilahue

Tabla 11.9: Promedios Mensuales de precipitación por década, Cuenca Nilahue.

Meses	1979-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Enero	1.34	1.34	3.17	2.36
Febrero	3.82	1.83	7.49	2.32
Marzo	9.10	8.57	13.70	7.40
Abril	44.85	53.04	28.61	29.71
Mayo	171.79	124.86	130.57	87.60
Junio	145.28	187.74	199.03	133.65
Julio	213.24	104.06	154.38	103.78
Agosto	117.28	77.57	136.46	90.19
Septiembre	68.33	61.97	59.10	36.92
Octubre	21.56	30.28	23.78	35.82
Noviembre	14.98	10.76	13.61	9.69
Diciembre	6.86	12.48	5.34	10.35

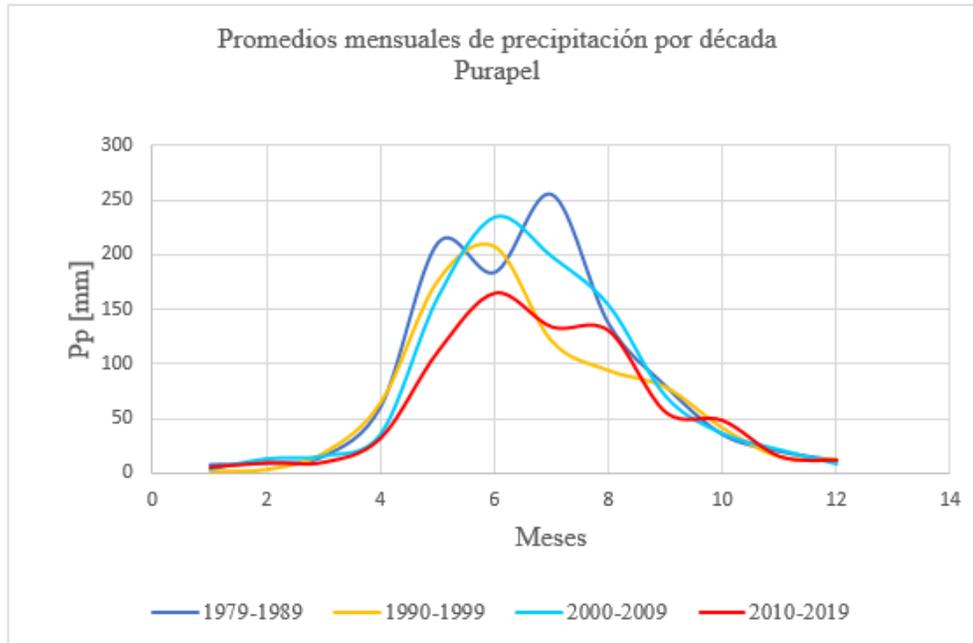


Figura 11.59: Promedios mensuales de Precipitación por década Purapel.

Tabla 11.10: Promedios Mensuales de precipitación por década, Cuenca Purapel.

Meses	1979-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Enero	7.43	2.44	3.97	5.38
Febrero	8.82	4.16	13.50	9.60
Marzo	15.34	19.43	16.10	10.03
Abril	61.26	65.76	36.73	32.54
Mayo	211.16	176.53	161.87	111.72
Junio	184.00	207.19	235.17	165.25
Julio	255.40	120.95	198.89	134.15
Agosto	136.48	94.37	154.09	130.57
Septiembre	79.44	79.12	70.60	55.88
Octubre	35.00	41.88	36.51	48.32
Noviembre	19.61	15.62	21.71	15.39
Diciembre	11.42	13.30	8.81	12.00



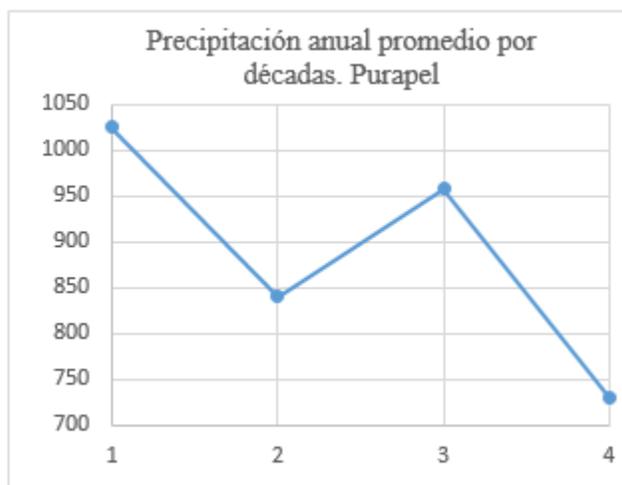
Décadas	promedio anual
1979-1989	598.0857859
1990-1999	476.6675227
2000-2009	541.0857927
2010-2019	369.7492733

Figura 11.60: Promedios anuales de Precipitación por década Puangue



Décadas	promedio anual
1979-1989	818.413118
1990-1999	674.5246944
2000-2009	775.2564517
2010-2019	549.7907779

Figura 11.61: Promedios anuales de Precipitación por década Nilahue



Décadas	promedio anual
1979-1989	1025.353053
1990-1999	840.7453274
2000-2009	957.9405626
2010-2019	730.8330056

Figura 11.62: Promedios anuales de Precipitación por década Purapel

Tabla 11.11: Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Puangue para los meses de enero a junio.

Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1979	0	0	0	19.7	24.38	0
1980	0.9	24.88	0	199.06	115.76	119.76
1981	0	10.79	2.41	26.48	220.65	34.27
1982	0	0	13.76	0	181.8	444.23
1983	7.97	3.29	0	9.03	76.5	154.33
1984	0	0	12.13	4.83	141.62	87.39
1985	4.01	0	18.75	0.3	31.05	42.52
1986	0	10.96	0	56.39	232.07	208.15
1987	0	6.1	17.81	6.55	152.34	37.37
1988	0	0	4.71	2.41	12.05	14.84
1989	0.77	0	3.91	17.7	34.94	45.84
1990	0	0.02	13.23	21.33	30.62	3.69
1991	0	0	0	43.96	100.03	209.31
1992	0	9.77	23.21	72.94	160.91	236.05
1993	3.27	0	0	90.49	120.45	73.39
1994	0	0	12	39.94	62.77	46.38
1995	0.03	0.87	0	27.11	1.61	103.5
1996	0	0	0	20.96	6.86	60.73
1997	0	0	11.8	13.4	180.73	453.1
1998	0	20.79	9.35	75.37	39.81	64.14
1999	2.12	0	11.58	31.82	32.84	74.27
2000	0	10.15	0	46.65	41.44	473.78
2001	0	0	22.45	37.81	102.04	9.62
2002	0	0	5.99	5.64	253.62	257.64
2003	22.6	0	0	5.92	95.07	86.8
2004	3.39	0	32.62	75.25	17.52	50.83
2005	5.18	0	12.92	8.21	103	200.04
2006	0	0.01	0	3.71	22.27	92.2
2007	0.26	12.15	24.69	0.14	22.52	122.66
2008	0	0	26.57	24.15	190.9	92.56
2009	0	0	0	0	10.05	134.01
2010	0	0	0	6.43	60.21	138.95
2011	0.13	8.64	4.73	8.78	6.16	125.99
2012	0	0	0	38.98	122.99	167.3
2013	1.49	2.7	5.5	0	134.55	36.6
2014	0	3.66	2.05	0	26.25	121.44
2015	0	12.88	2.02	0	0	0
2016	6.5	0	0	203.85	60.22	77.38
2017	0	11.14	0	6.82	149.89	140.59
2018	0	0	0	0	41.02	88.59
2019	0.32	0	5.1	12.75	37.74	77.79
Promedio	1.44	3.63	7.3	30.85	84.32	122.15

Tabla 11.12: Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Puangue para los meses de julio a diciembre

Años	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1979	162.85	69.53	37.97	0	1.55	25.16
1980	149.94	41.87	51.05	3.91	0	0
1981	38.06	57	13.87	10.76	0	0
1982	166.49	95.09	136.43	17.62	0	0
1983	187.66	125.44	37.22	0.4	0	0
1984	463.23	71.17	89.25	3.87	16.22	3.27
1985	103.17	0	22.08	10.21	0.81	0
1986	6.28	93.83	5.2	1.34	2.57	0
1987	509.29	272.49	27.87	40.71	0	0
1988	59.49	100.9	21.14	0	7.85	10.22
1989	164.35	119.05	25.72	0	0	0
1990	63.1	48.22	70.26	12.81	0	0.01
1991	145.1	18.57	72.71	22.84	1.27	35.22
1992	14.72	135.18	25.98	0	19.29	0
1993	63.16	27.86	15.67	2.08	2.06	2.17
1994	144.7	11.58	16.36	12.92	0	0
1995	90.88	55.87	15.41	0.71	0	0
1996	54.09	124.45	9.35	8.06	0	5.22
1997	64.12	188.83	141.79	88.13	5.46	6.68
1998	0	0	19.92	0	0	0
1999	23.49	113.36	115.99	33.79	0.15	0.55
2000	20.76	28.09	125.37	23	18.85	0
2001	318.07	97.31	19.57	5.03	0	0.46
2002	140.97	163.69	21.26	0.97	0	2.16
2003	87.53	8.45	11.56	0	13.63	0
2004	123.64	78.88	38.22	3.41	29.41	0
2005	59.4	198.04	27.92	23.85	12.45	0
2006	281.26	53.11	6.66	60.07	0.25	0
2007	82.82	38.78	0	0	0.01	0
2008	87.5	128.71	8.29	0	0	0
2009	20.57	117.35	47.2	11.35	0	0
2010	60.13	16.21	31.12	17.27	24.47	0
2011	63.88	53.04	0.42	11.14	0	0
2012	3.2	76.14	0.16	45.2	1.25	19.8
2013	16.11	29.76	3.37	0.8	0	0.25
2014	54.94	67.98	56.52	0	7.08	2.67
2015	79.97	176.62	67.32	77.99	13.85	0
2016	140.63	0	0	69.5	0	21.15
2017	40.7	60.68	25.15	34.49	6.1	0
2018	129.13	36.94	46.53	6.74	3.36	8.51
2019	15.22	0	6.47	6.56	0.06	2.8
Promedio	109.77	78.05	36.94	16.28	4.59	3.57

Tabla 11.13: Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Nilahue para los meses de enero a junio.

Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1979	0	11.03	0	15.02	75.33	10
1980	0	16.26	1.22	217.87	237.09	166.54
1981	1.63	9.01	3.43	51.39	392.05	74.47
1982	3.85	0	13.21	9.88	279.62	422.67
1983	6.59	0	0	18.46	103.06	184.41
1984	0.26	1.38	1.89	21.68	226.89	124.95
1985	2.31	0	13.02	18.4	129.05	98.43
1986	0.03	0.73	10.86	122.5	307.31	260.28
1987	0	3.65	32.54	13.76	88.88	59.23
1988	0	0	16.64	4.43	24.75	113.38
1989	0.02	0	7.25	0	25.7	83.69
1990	0.28	1.18	51.49	24.86	58.65	30.61
1991	6.84	0	0	61.7	249.26	208.99
1992	0	4.14	17.21	46.11	339.6	340.19
1993	2.38	0	0	82.48	189.84	219.56
1994	0	0	2.14	73.97	101.19	136.76
1995	0	0.07	0	90.35	16.04	165.64
1996	0.44	3.48	5.79	26.82	38.96	153.33
1997	3.45	1.2	0	60.67	139.05	384.96
1998	0	4.8	2.2	47.49	59.61	57.03
1999	0.02	3.43	6.84	15.93	56.43	180.36
2000	0	27.39	0	17.56	36.66	558.69
2001	11.39	0	0	42.09	172.01	46.03
2002	0	10.59	54.5	33.63	253.28	127.28
2003	17.01	0	0.51	6.93	120.65	184.79
2004	2.52	0	41.08	91.35	32.23	99.01
2005	0.39	0	13.46	3.09	246.22	309.25
2006	0	6.49	0	31.39	85.7	249.5
2007	0.36	30.47	22.03	13.27	20.58	101.61
2008	0	0	5.46	46.8	265.93	124.34
2009	0	0	0	0	72.44	189.85
2010	0.97	0.88	0	0.15	52.69	179.42
2011	13.09	3.02	19.51	72.44	9.42	140.75
2012	0	9.47	0	13.81	162.29	224.36
2013	0.5	6.98	0	0	176.93	87
2014	0	0	20.02	11.56	141.92	203.65
2015	0	0	4.27	17.21	11.99	31.55
2016	3.07	0	0	121.36	60.95	19.09
2017	2.41	0.55	6.8	29.76	112.28	234.1
2018	0.01	2.2	18.5	23.5	52.72	90.53
2019	3.5	0.08	4.9	7.33	94.83	126.02
Media	2.03	3.86	9.68	39.19	129.76	165.91

Tabla 11.14: Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Nilahue para los meses de julio a diciembre

Años	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1979	316.29	138.87	110.99	0	53.79	34.61
1980	198.98	34.62	72.93	0	17.74	19.93
1981	82.65	92.15	34.45	15.05	1.45	0
1982	202.85	126.87	185.48	64.5	0.29	0
1983	185.45	131.25	48.86	0.78	0	0
1984	390.12	94.07	109.54	43.88	2.98	0
1985	156.8	2.1	41.21	39.65	8.48	0
1986	50.97	133.66	19.11	6.31	66.92	0.1
1987	475.83	233.82	70.22	48.12	1.05	1.32
1988	131.13	156.76	30.14	6.76	11.14	2.38
1989	154.55	145.88	28.7	12.1	0.88	17.08
1990	89.18	44.92	69.23	26.23	10.96	1.06
1991	168.54	25.81	69.27	43.08	10.91	65.06
1992	53.65	144.12	49.21	2.68	17.37	0
1993	81.11	41.36	0.97	26.22	14.89	28.46
1994	179.66	8.71	42.48	15.46	0	8.64
1995	215.37	98.15	21.34	26.57	0	0
1996	72.85	106.88	10.11	5.54	8.82	14.95
1997	116.52	140.84	117.22	138.54	38.48	0.5
1998	0	11.17	63.63	0	0	6.14
1999	63.77	153.79	176.26	18.54	6.19	0
2000	33.19	7.72	228.57	13.62	6.87	0
2001	406.57	166.41	14.01	4.79	0.94	0.12
2002	126.63	327.51	66.67	50.13	6.92	2.02
2003	80.8	38.29	46.01	18.64	43.57	3.01
2004	186.45	84.26	71.36	41.85	31.11	28.14
2005	118.57	199.42	35.23	15.77	25.8	5.27
2006	225.87	118.33	33.2	67.43	0	10.09
2007	138.42	95.83	11.18	1.37	2.6	1.85
2008	150.84	179.75	27.91	0.11	0	2.87
2009	76.44	147.11	56.9	24.09	18.32	0
2010	136.66	37.49	18.77	27.52	10.62	7.38
2011	102.78	159	15.85	2.11	6.44	0
2012	18.05	112.67	3.84	90.14	17.77	72.83
2013	142.2	69.84	21.39	15.09	0	0
2014	97.43	106.43	80.36	0.09	15.16	9.84
2015	175.09	189.54	69.8	95.01	5.23	0
2016	159.47	16.7	0.22	50.4	1.59	13.22
2017	77.81	164.09	47.45	37.26	21.41	0
2018	94.31	39.03	78.84	30.3	18.66	0
2019	34.03	7.09	32.73	10.29	0	0.27
Promedio	145.56	105.67	56.87	27.71	12.33	8.71

Tabla 11.15: Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Purapel para los meses de enero a junio.

Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1979	3.85	27.84	3.19	34.5	103.81	27.31
1980	0	24.9	3.23	231.95	313.09	290.55
1981	19.67	8.29	25.4	94.29	506.75	81.56
1982	13.86	5.52	9.18	16.46	298.22	317.59
1983	24.3	0	0	22.23	135.64	241.46
1984	6.77	8.58	8.57	27.53	297.91	170.57
1985	8.16	0	16.1	35.62	176.94	158.15
1986	2.31	13.82	24.32	168.02	269.63	297.08
1987	0	8.03	37.41	23.54	131.82	67.93
1988	2.82	0	21.71	19.72	62.07	197.04
1989	0	0	19.6	0	26.8	174.74
1990	0.02	8.09	108.61	49.29	73.82	32.3
1991	13.93	0	0	57.4	340.29	215.31
1992	0	6.3	27.28	69.37	571.04	286.2
1993	1.8	0	1.55	86.43	252.41	277.5
1994	0	3.65	20.63	94.93	112.13	208.59
1995	0	0	0	115.54	16.98	191.31
1996	2.08	4.25	21	28.19	63.63	143.75
1997	2.11	11.09	0.76	110.62	132.9	406.45
1998	0	3.1	4.37	28.91	103.38	81.78
1999	4.47	5.12	10.04	16.94	98.72	228.7
2000	0	40.7	0	19.37	58.73	627.52
2001	20.91	0	0.41	34.46	266.94	137.43
2002	0	55.38	76.22	29.39	245.66	159.43
2003	10.23	0	0.01	7.82	138.9	236.51
2004	0	3.12	55.37	95.61	52.5	147.03
2005	0.01	0	8.97	12.34	290.63	318.84
2006	4.04	5.67	0	36.84	89.27	296.66
2007	4.51	30.18	19.9	51.86	26.35	89.31
2008	0	0	0.16	75.53	347.83	111.15
2009	0	0	0	4.07	101.9	227.8
2010	3.53	20.33	0	2.98	56.13	192.8
2011	20.86	4.69	21.44	60.99	41.61	203.96
2012	3.06	40.09	0	3.59	167.39	256.57
2013	8.66	12.62	0.03	6.39	200.55	136.23
2014	5.53	3.3	29.39	51.07	128.59	263.66
2015	0	0	12.46	19.41	43.83	68.68
2016	4.65	0	0.09	99.32	86.39	5
2017	2.82	4.43	12.09	34.35	126.39	270.14
2018	0.91	7.2	24.45	46.06	58.83	80.24
2019	3.75	3.3	0.39	1.24	207.55	175.18
Media	4.87	9.01	15.23	49.37	166.44	197.56

Tabla 11.16: Precipitación mensual y anual en milímetros de la Cuenca Purapel para los meses de julio a diciembre.

Años	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1979	406.19	169.08	83.09	2.97	73.14	53.18
1980	229.89	77.58	89.59	0	29.39	26.68
1981	154.85	88.41	35.72	36.22	0	1.43
1982	289.57	157.28	187.04	89.46	1.03	0
1983	197.8	169.02	63.27	8.36	0	0
1984	366.04	106.38	132.57	76.41	3.27	0
1985	172.86	17.57	51.17	65.28	19.15	0
1986	70.91	144.95	39.93	14.83	75.63	4.14
1987	500.71	191.64	105.43	55.05	0.14	2.84
1988	211.56	236.25	60.52	7.43	13.58	2.91
1989	208.99	143.15	25.45	29.01	0.43	34.49
1990	91.12	80.47	100.69	40.5	25.73	1.94
1991	169.22	46.97	90.53	64.63	12.45	56.34
1992	63.35	133.19	66.19	3.09	19.21	8
1993	90.47	61.92	9.45	33.89	16.38	21.65
1994	178.6	4.8	92.78	27.17	0	22.03
1995	267.74	121.36	11.14	61.46	0.87	0
1996	102.84	131.03	16.29	18.43	16.69	14.83
1997	142.32	139.69	139.47	158.32	53.86	0
1998	17.92	26.21	55.87	0	0	4.83
1999	85.91	198.09	208.8	11.26	11.03	3.36
2000	38.75	41.86	217.19	14.23	11.09	7.7
2001	468.68	181.26	23.03	15.63	6.36	0
2002	156.86	357.19	103.37	96.67	23.75	3.79
2003	96.37	49.92	80.92	36.47	71.56	1.89
2004	264.64	97.97	85.75	54.7	31.97	27.68
2005	193.28	229.22	36.09	21.73	28.8	11.44
2006	288.34	168.63	33.66	64.25	0	22.72
2007	172.23	95.16	30.57	12.18	4.19	5.53
2008	181.38	155.03	45.11	8.11	2.26	7.33
2009	128.33	164.62	50.27	41.18	37.1	0.01
2010	165.77	93.16	21.88	48.94	14.41	10.84
2011	136.99	214.92	40.96	7.93	11.87	0
2012	16.63	155.7	5.42	55.34	53.6	71.29
2013	141.41	77.16	46	24.23	0.02	0
2014	174.82	152.16	111.94	10.33	4.26	13.04
2015	248.46	255.93	81.36	121.71	4.82	0
2016	178.86	36.08	16.36	75.52	6.48	21.28
2017	94.84	222.39	53.99	57.8	18.35	0.04
2018	126.31	60.97	115.55	61.21	38.32	1.67
2019	57.44	37.23	65.39	20.21	1.76	1.85
Promedio	179.25	129.06	71.46	40.3	18.12	11.38

Tabla 11.17: Probabilidad de excedencia de las cuencas de Puangue, Nilahue y Purapel, para el Periodo 1979 - 2019.

Años	Exc. Puangue [%]	Exc. Nilahue [%]	Exc. Purapel [%]
1979	76.17	44.37	39.82
1980	23.03	17.64	8.68
1981	63.99	45.65	31.15
1982	4.43	2.74	5.86
1983	34.96	58.55	59.08
1984	9.97	14.84	15.70
1985	91.13	84.43	79.84
1986	33.04	18.02	22.82
1987	4.10	14.04	22.93
1988	91.05	85.88	63.23
1989	64.33	88.32	86.66
1990	87.53	94.26	91.30
1991	29.17	24.95	29.37
1992	23.91	15.10	12.25
1993	66.31	57.14	60.43
1994	75.28	76.24	73.81
1995	83.07	66.07	70.74
1996	83.97	91.09	94.74
1997	2.63	7.59	9.65
1998	91.50	99.65	99.92
1999	59.65	58.09	55.87
2000	16.22	22.70	28.17
2001	33.60	30.34	19.93
2002	12.11	11.95	9.13
2003	77.69	77.54	78.59
2004	57.44	53.48	50.57
2005	28.94	18.58	20.29
2006	46.72	35.18	36.74
2007	81.90	91.84	95.88
2008	40.88	38.61	47.86
2009	76.27	73.79	75.23
2010	73.96	88.68	89.75
2011	84.92	79.80	73.68
2012	53.82	50.87	64.31
2013	91.32	83.10	87.62
2014	75.93	57.28	45.70
2015	61.22	71.53	59.93
2016	37.99	91.27	96.43
2017	53.73	49.46	53.49
2018	72.97	91.04	90.55
2019	96.92	98.44	94.00

Tabla 11.18: Periodo de retorno de las cuencas Puangue, Nilahue y Purapel para los años 1979 - 2019.

Años	T [años] Puangue	T [años] Nilahue	T [años] Purapel
1979	1.31	2.25	2.51
1980	4.34	5.67	11.52
1981	1.56	2.19	3.21
1982	22.56	36.55	17.07
1983	2.86	1.71	1.69
1984	10.03	6.74	6.37
1985	1.10	1.18	1.25
1986	3.03	5.55	4.38
1987	24.40	7.12	4.36
1988	1.10	1.16	1.58
1989	1.55	1.13	1.15
1990	1.14	1.06	1.10
1991	3.43	4.01	3.40
1992	4.18	6.62	8.17
1993	1.51	1.75	1.65
1994	1.33	1.31	1.35
1995	1.20	1.51	1.41
1996	1.19	1.10	1.06
1997	37.97	13.18	10.36
1998	1.09	1.00	1.00
1999	1.68	1.72	1.79
2000	6.17	4.41	3.55
2001	2.98	3.30	5.02
2002	8.26	8.37	10.95
2003	1.29	1.29	1.27
2004	1.74	1.87	1.98
2005	3.46	5.38	4.93
2006	2.14	2.84	2.72
2007	1.22	1.09	1.04
2008	2.45	2.59	2.09
2009	1.31	1.36	1.33
2010	1.35	1.13	1.11
2011	1.18	1.25	1.36
2012	1.86	1.97	1.56
2013	1.10	1.20	1.14
2014	1.32	1.75	2.19
2015	1.63	1.40	1.67
2016	2.63	1.10	1.04
2017	1.86	2.02	1.87
2018	1.37	1.10	1.10
2019	1.03	1.02	1.06

Anexo D

Gráficos con los valores mensuales de los componentes del balance hídrico. Cuenca Puangué.

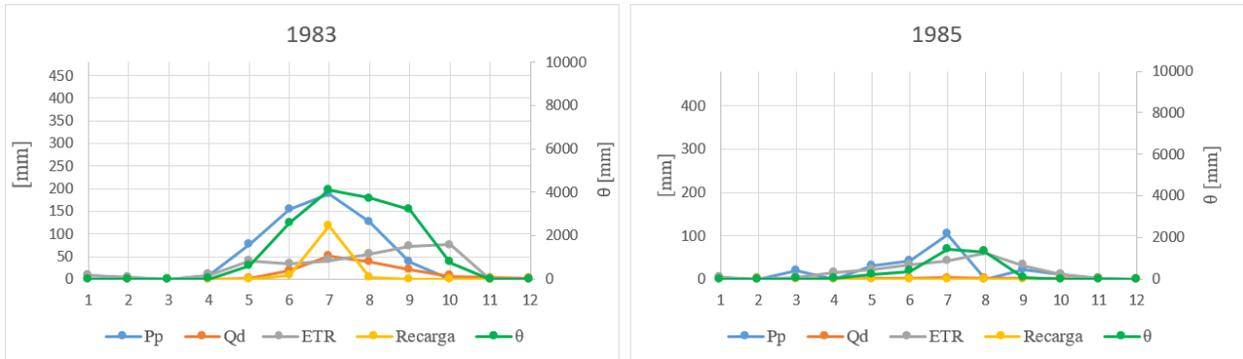


Figura 11.63: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangué, 1983 y 1985

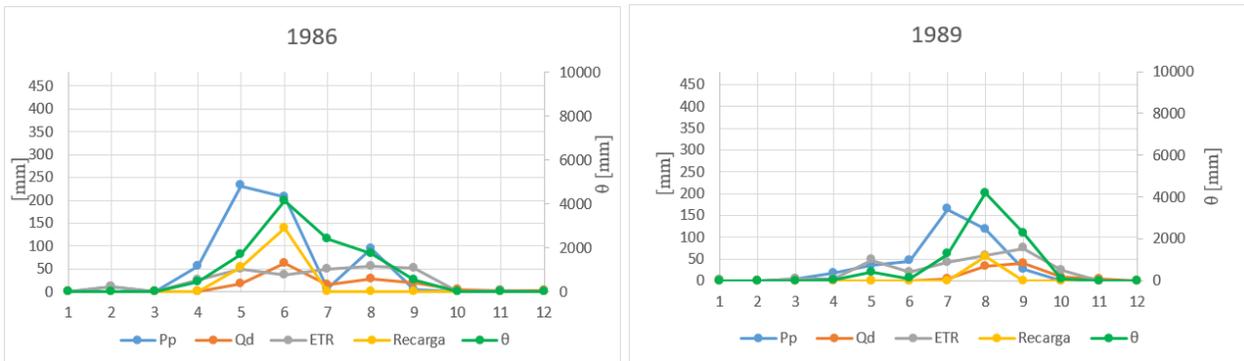


Figura 11.64: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangué, 1986 y 1989

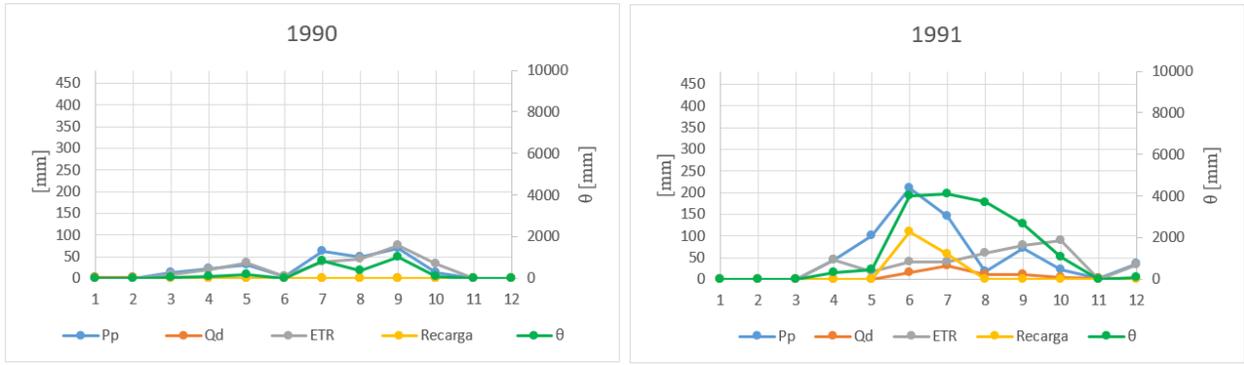


Figura 11.65: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1990 y 1991

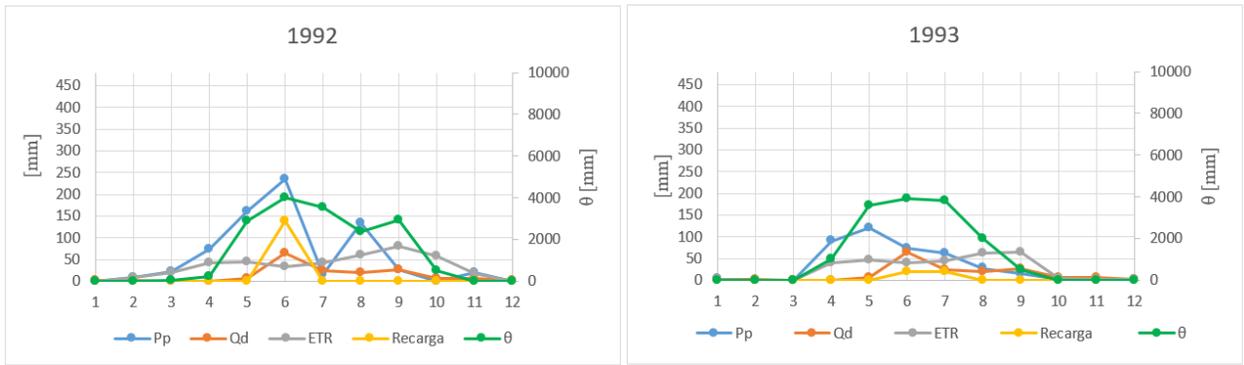


Figura 11.66: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1992 y 1993

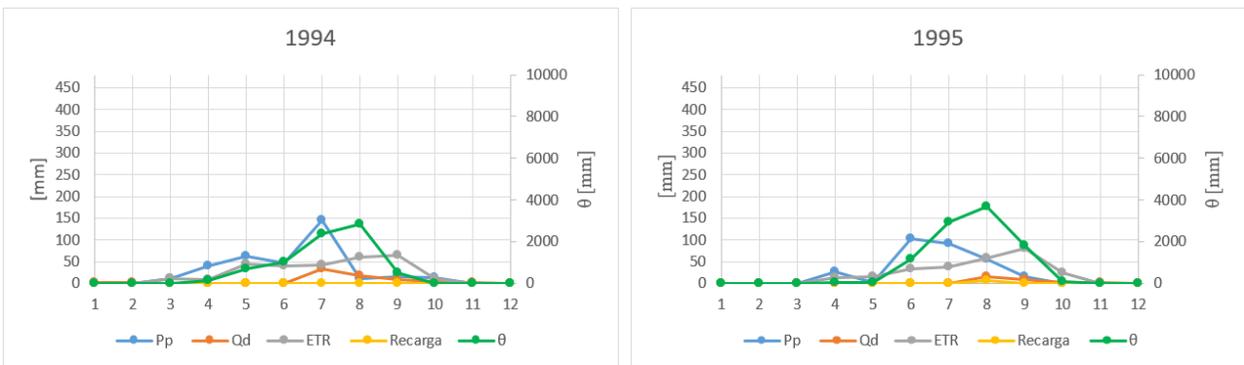


Figura 11.67: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1994 y 1995

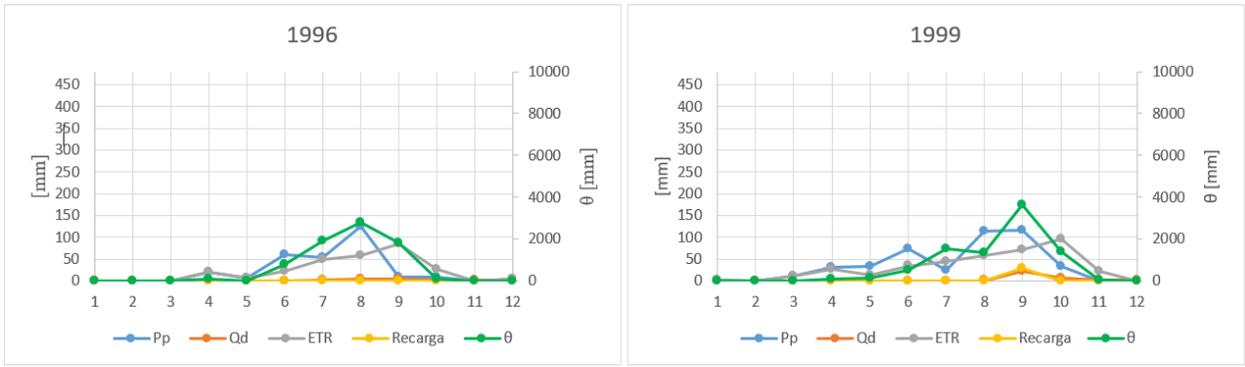


Figura 11.68: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 1996 y 1999

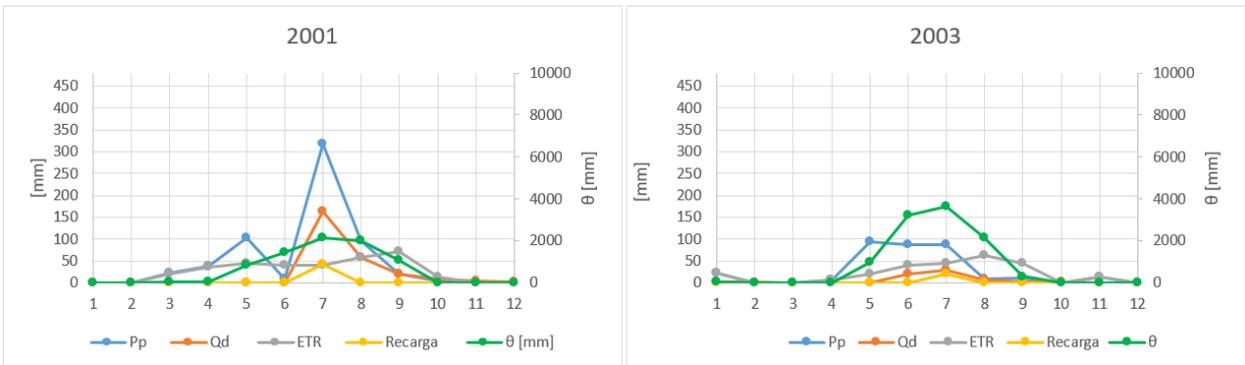


Figura 11.69: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 1986 y 2003

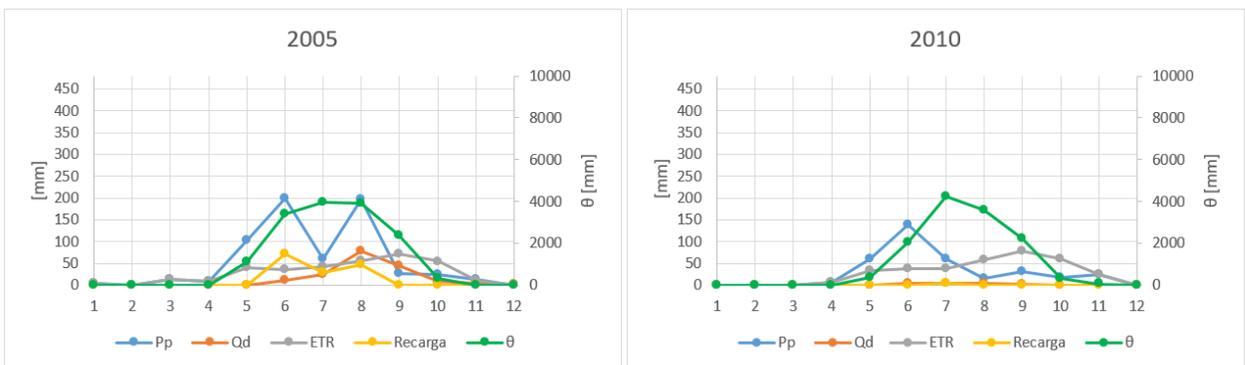


Figura 11.70: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 2005 y 2010

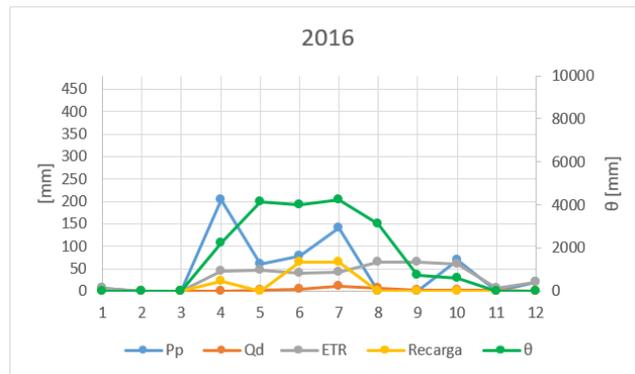


Figura 11.71: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Puangue, 2016.

Anexo E

Gráficos de valores mensuales de los componentes del balance hídrico. Cuenca Nilahue.

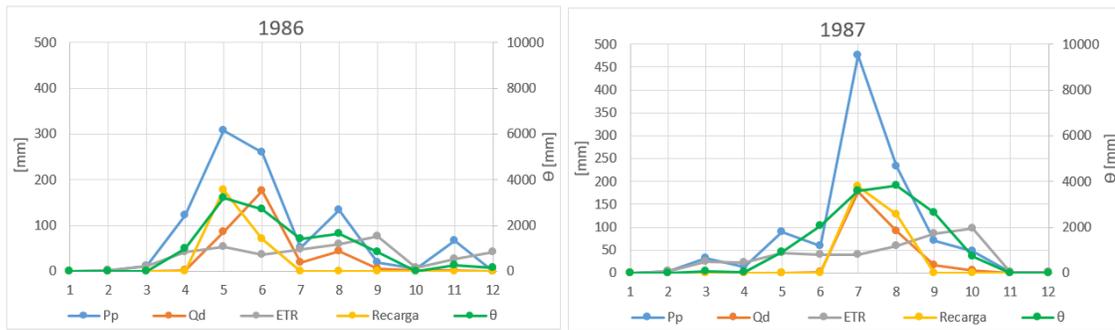


Figura 11.72: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 1986 y 1987.

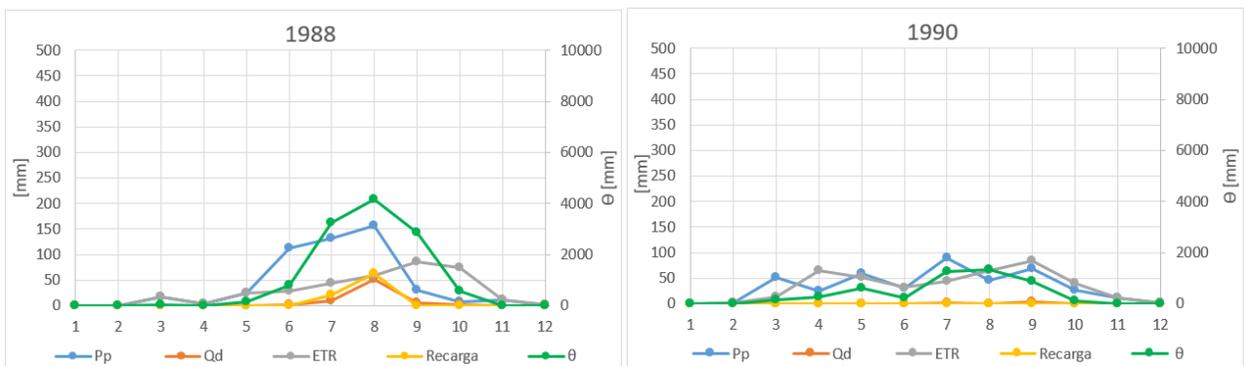


Figura 11.73: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 1988 y 1990.

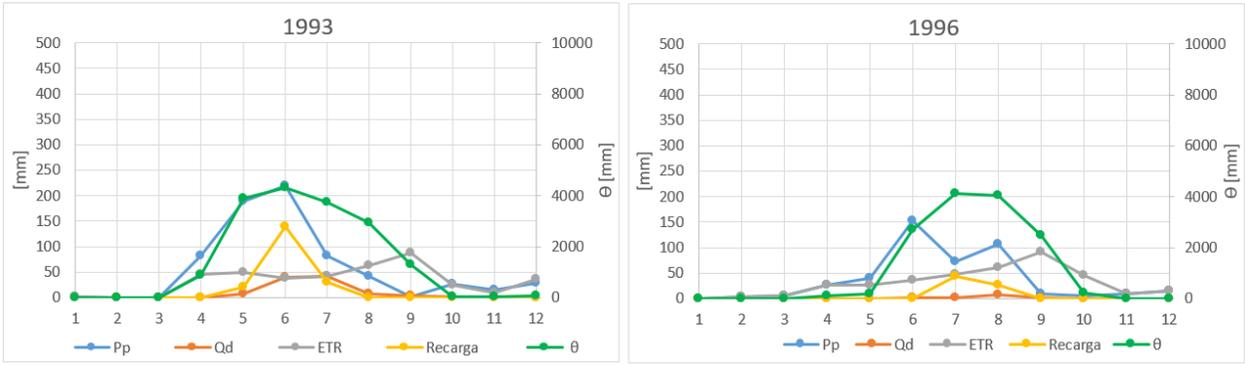


Figura 11.74: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 1993 y 1996.

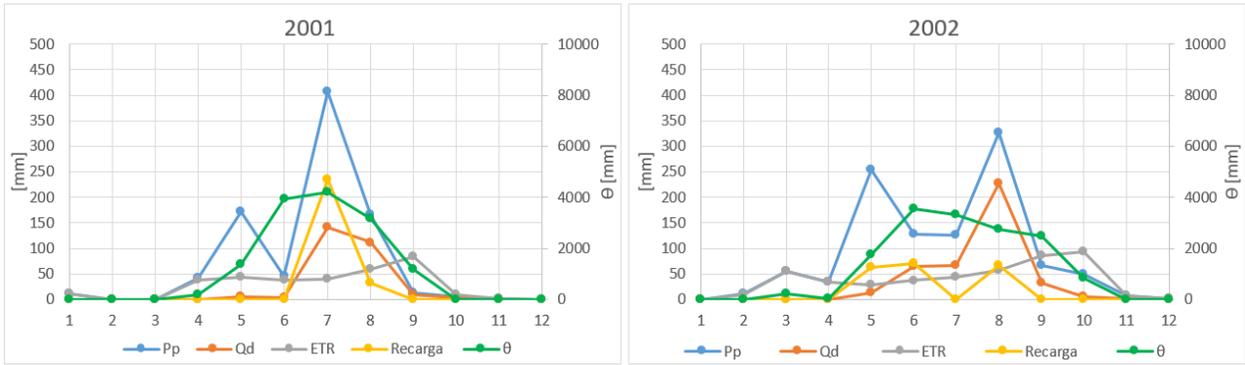


Figura 11.75: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2001 y 2002.

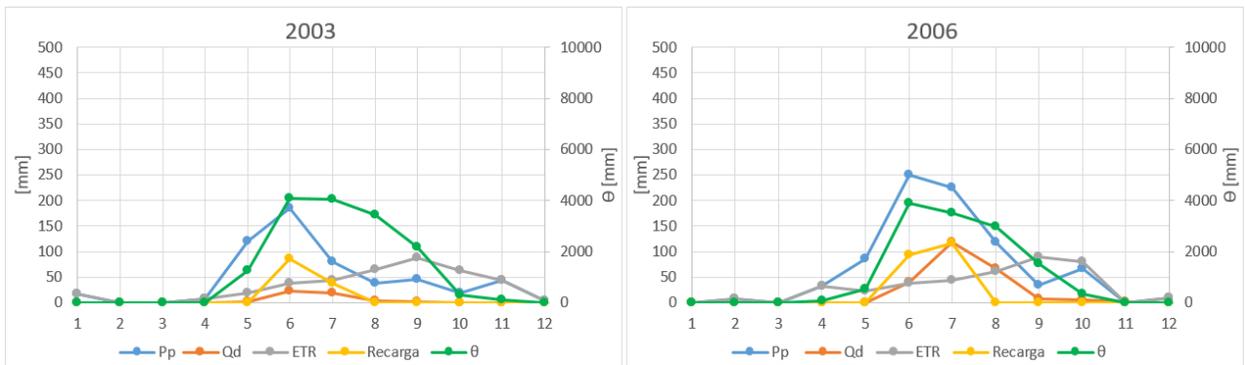


Figura 11.76: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2003 y 2006.

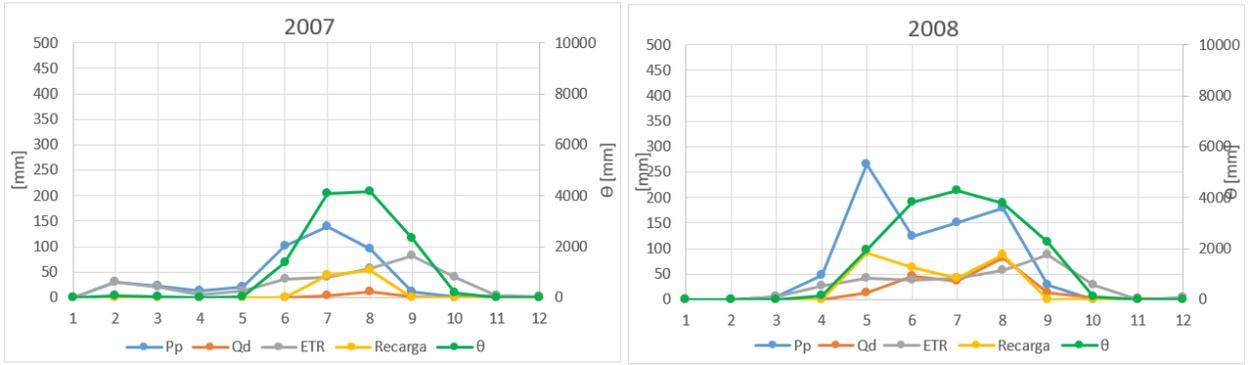


Figura 11.77: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2007 y 2008.

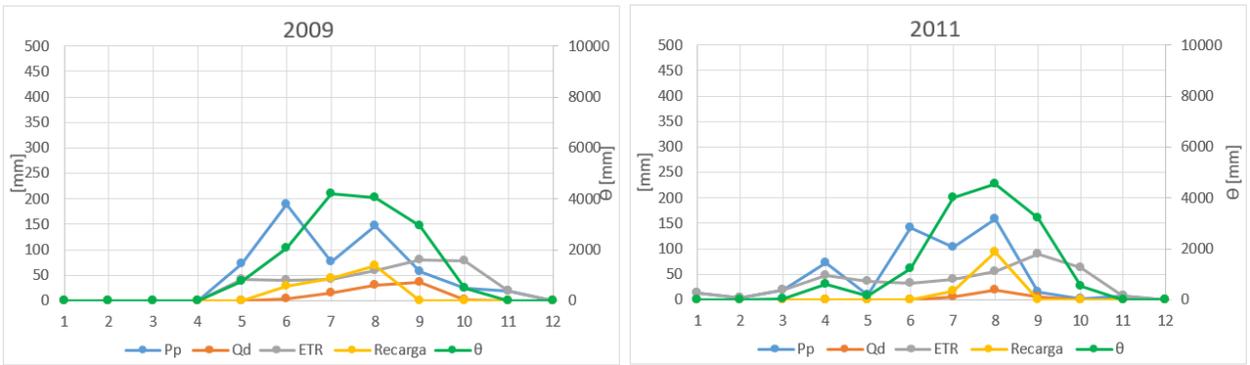


Figura 11.78: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2009 y 2011.

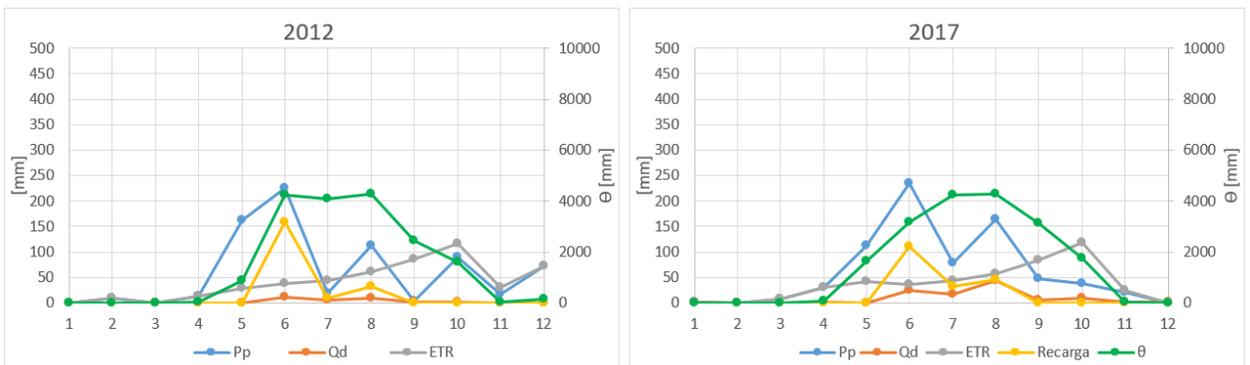


Figura 11.79: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2012 y 2017.

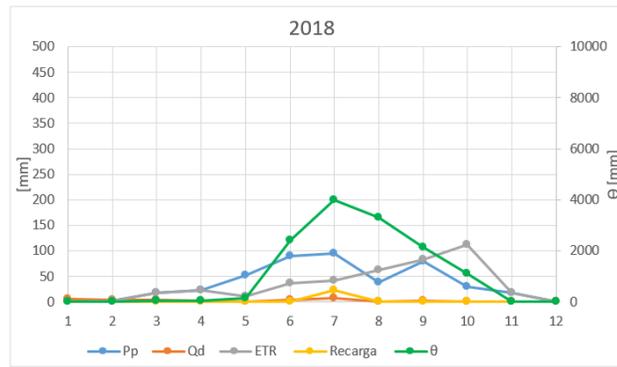


Figura 11.80: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Nilahue, 2018.

Anexo F

Gráficos de valores mensuales de los componentes del balance hídrico. Cuenca Purapel.

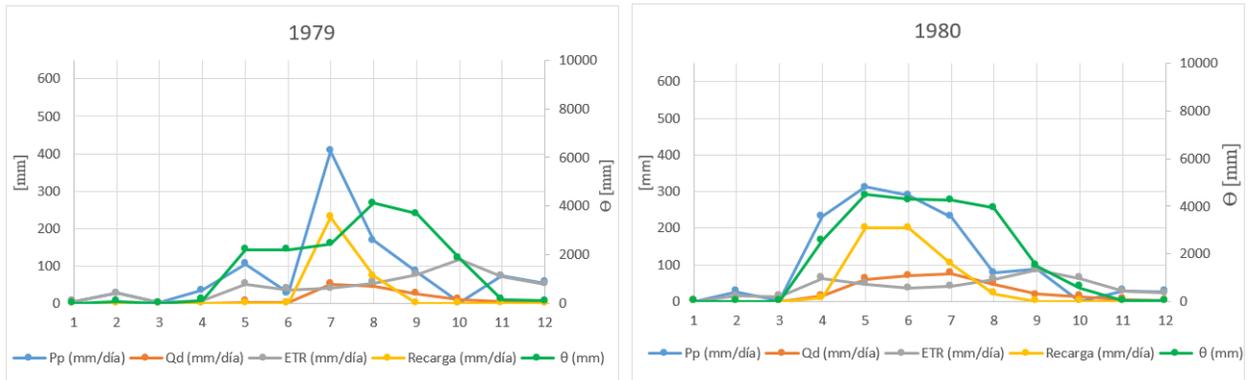


Figura 11.81: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1979 y 1980.

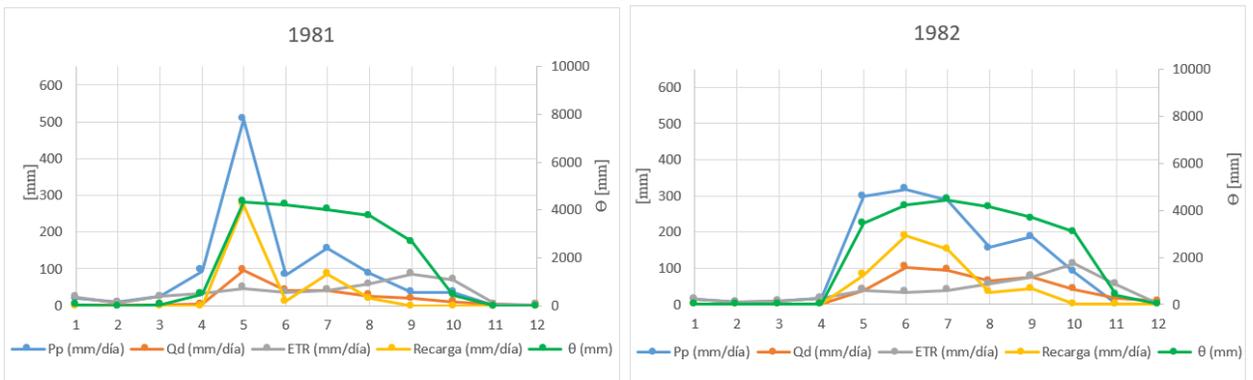


Figura 11.82: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1981 y 1982.

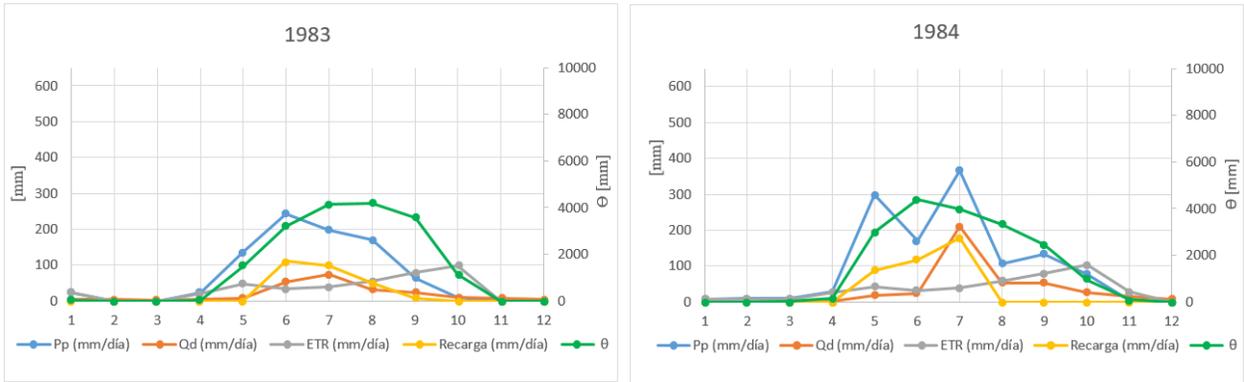


Figura 11.83: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1983 y 1984.

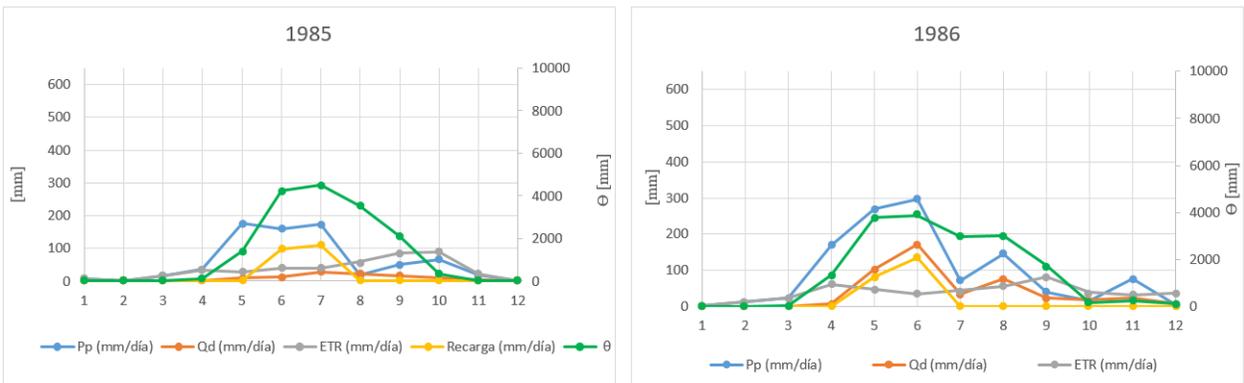


Figura 11.84: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1985 y 1986.

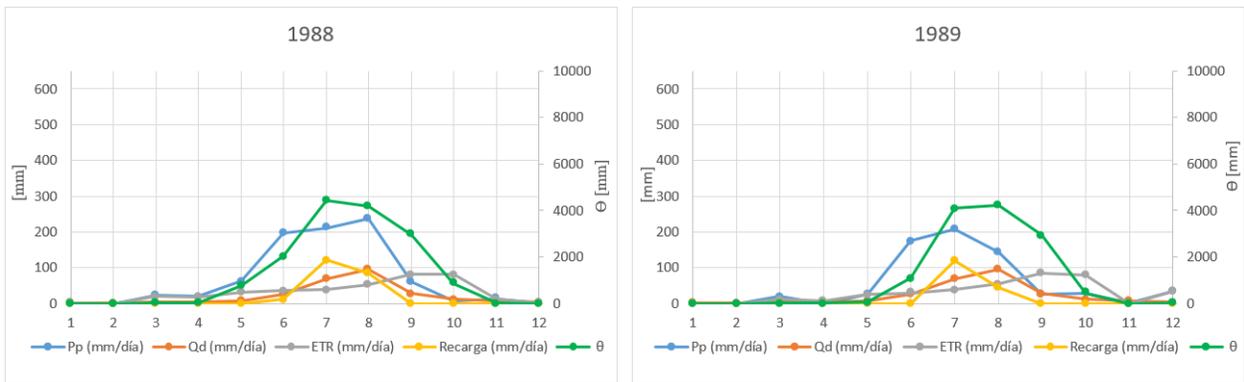


Figura 11.85: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1988 y 1989.

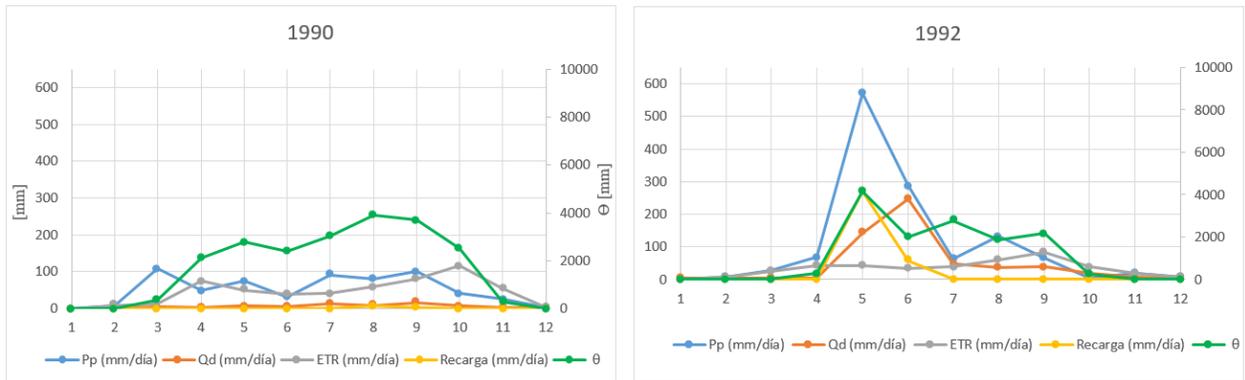


Figura 11.86: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1990 y 1992.

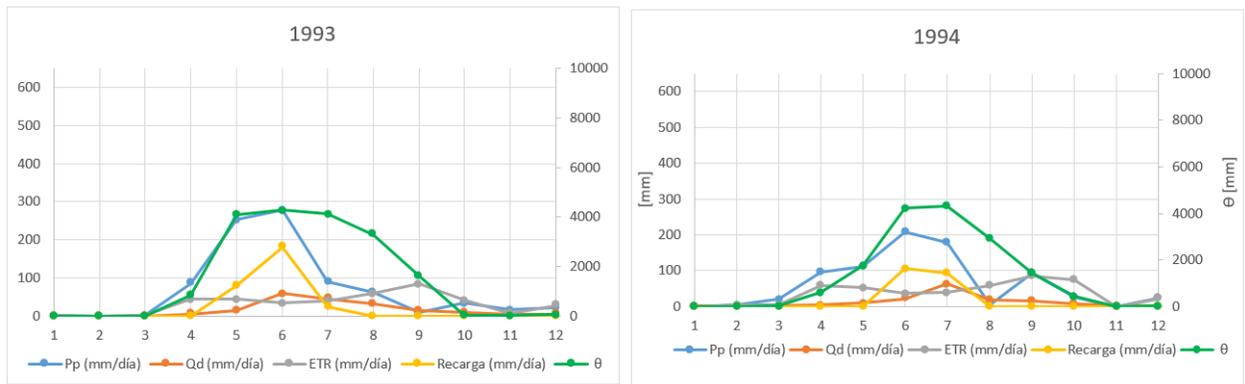


Figura 11.87: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1993 y 1994.

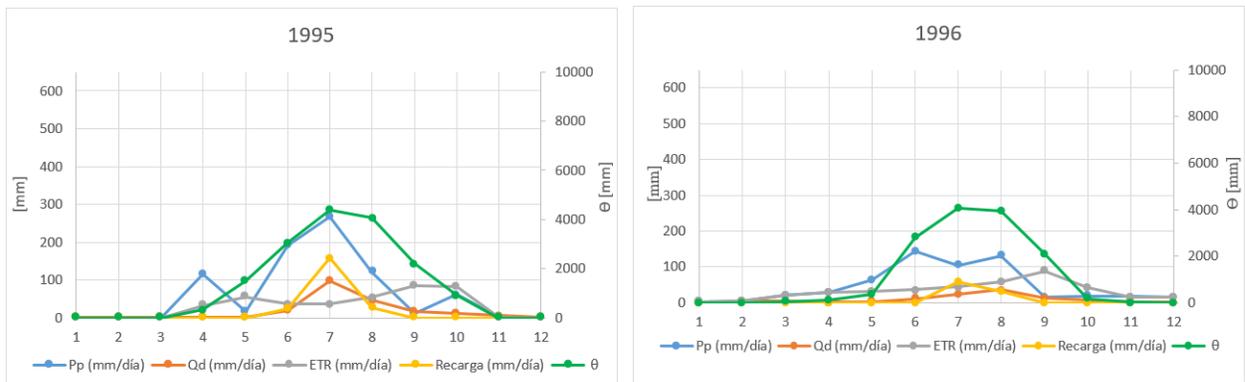


Figura 11.88: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1995 y 1996.

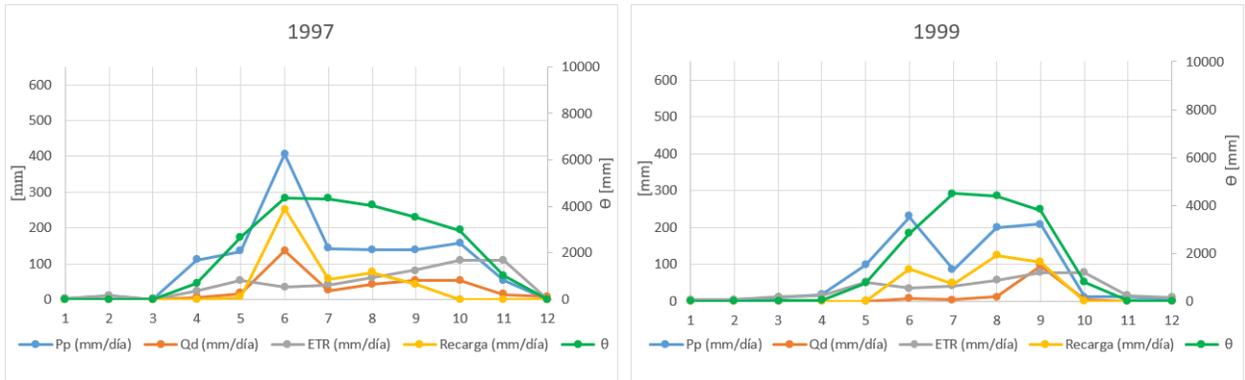


Figura 11.89: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 1997 y 1999.

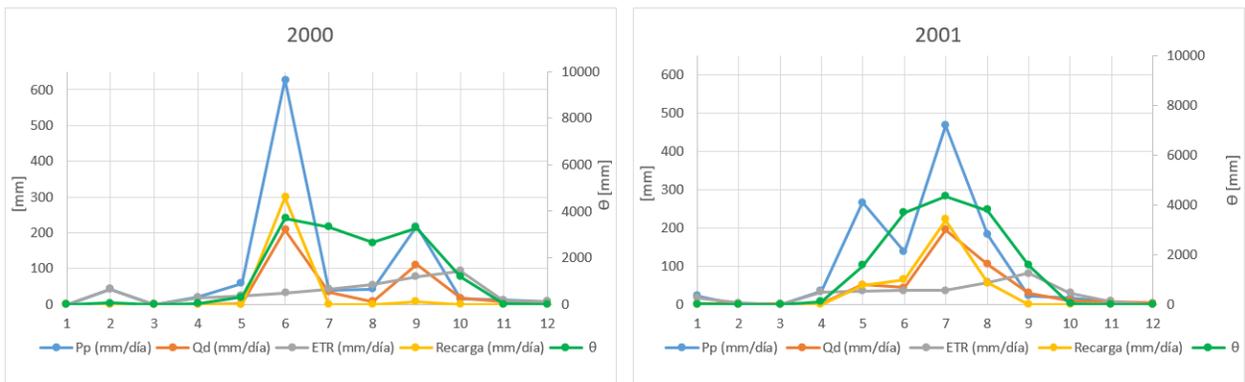


Figura 11.90: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 2000 y 2001.

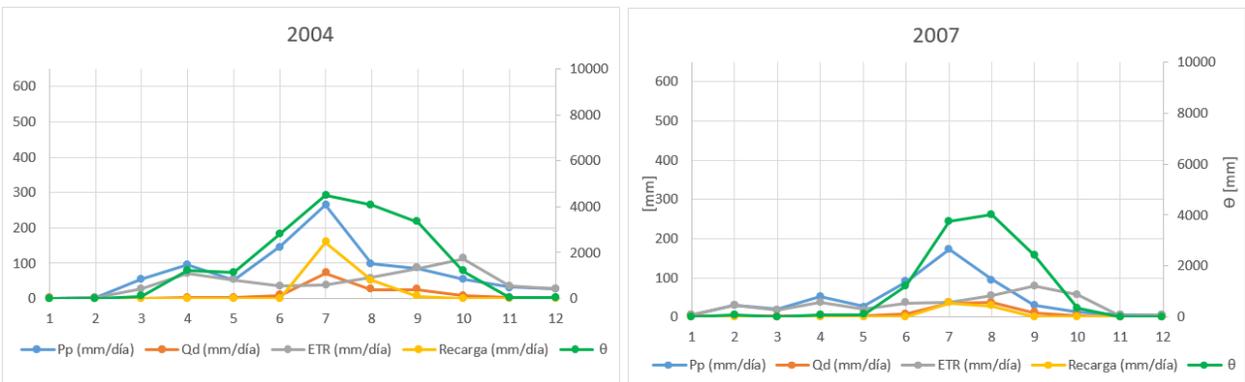


Figura 11.91: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 2004 y 2007.

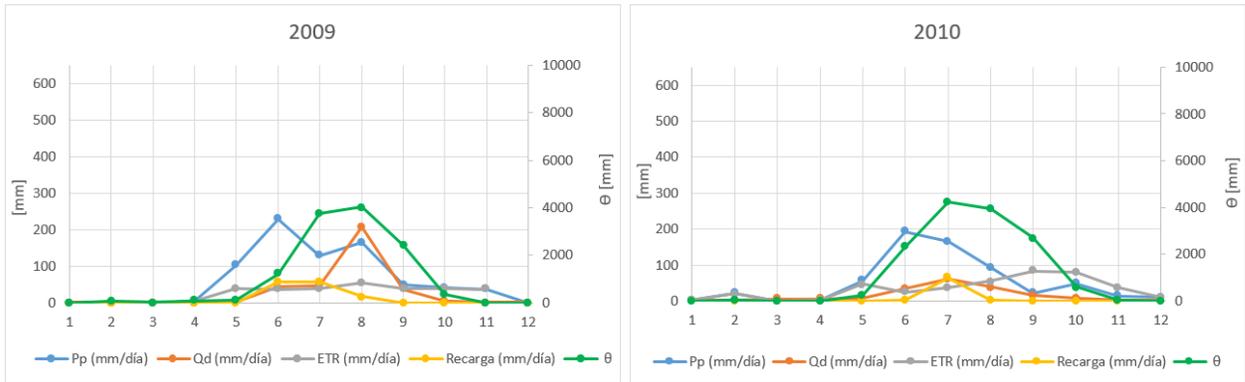


Figura 11.92: Valores mensuales de los componentes del balance hídrico de la Cuenca Purapel, 2009 y 2010.