



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE VULNERABILIDAD EN SISTEMAS DE AGUA POTABLE RURAL EN
TORNO A LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIDAS DE
MITIGACIÓN.

CASO DE ESTUDIO: REGIÓN DE LA ARAUCANÍA.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

LUCIANO PAVESI ROJAS

PROFESOR GUÍA:

FRANCO RICCHETTI CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

EDUARDO MUÑOZ CASTRO

MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL

POR: LUCIANO PAVESI ROJAS

FECHA: 2022

PROF.GUIA: FRANCO RICCHETTI

ESTUDIO DE VULNERABILIDAD EN SISTEMAS DE AGUA POTABLE RURAL EN TORNO A LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN.

CASO DE ESTUDIO: REGIÓN DE LA ARAUCANÍA.

El abastecimiento de agua potable en zonas rurales con población reducida se realiza a partir de sistemas de Agua Potable Rural, un conjunto de obras de captación, conducción y desinfección del recurso hídrico para asegurar el saneamiento de las comunidades beneficiadas. En ese marco, se estudia la vulnerabilidad de dichos sistemas APR frente al cambio climático en la Región de la Araucanía utilizando como referencia 5 comunidades distribuidas dentro de la región.

Para cuantificar esta vulnerabilidad, se utilizan las proyecciones realizadas en el balance hídrico nacional, la cual es localmente corregida para replicar los regímenes hidrológicos observados en las cuencas estudiadas. Los resultados sugieren una disminución promedio de 19% en los caudales medios anuales para el periodo proyectado. Calculando la demanda hídrica por cuenca es posible realizar un balance hídrico para las comunidades en estudio, reflejando un déficit hídrico futuro de los sistemas APR, en varios meses de déficit, para 3 de las 5 localidades, proponiendo y evaluando variadas medidas de mitigación para resolver aquellos casos.

Con el resultado de los balances hídricos mensuales de cada sistema APR se encuentran patrones de distribución espacial y características similares de las cuencas que presentan déficit, teniéndose una vulnerabilidad mayor en la zona costera de la región y menor en el sector cordillerano. A su vez, las medidas de mitigación que requieren de una inversión inicial representan una mejor alternativa que los camiones de aljibe para abastecer a los sistemas con déficit, con un Valor Actual Neto y el Costo Anual Equivalente promedio 615% mayor para las alternativas sin infraestructura.

Agradecimientos

A la familia y al fútbol, por siempre estar ahí.

Tabla de Contenido

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2.3. ALCANCES	3
1.2.4. ESTRUCTURA DEL INFORME.....	3
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. SISTEMAS APR	5
2.2. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	6
2.3. DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS.....	11
2.4. MODELOS CLIMÁTICOS DE CIRCULACIÓN GENERAL.....	15
2.5. BALANCE HÍDRICO	18
2.5.1. OFERTA HÍDRICA	18
2.5.2. DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS.....	19
2.5.3. DOTACIÓN DE AGUA POTABLE.....	21
2.5.4. CAUDAL ECOLÓGICO	21
2.6. OBRAS HIDRÁULICAS	22
2.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA	23
CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE TRABAJO	25
CAPITULO 4: MEMORIA DE CÁLCULO	31
CAPITULO 5: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	34
5.1. APR DE CURARREHUE.....	36
5.2. APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.....	38
5.3. APR DE PUTABLA	40
5.4. APR DE OÑOICO.....	43
5.5. APR EL COIHUE	46
5.6. RESUMEN DE CUENCAS	49
CAPITULO 6: RESULTADOS.....	51
6.1. CORRECCIÓN DE MODELOS GCM EN CUENCAS CONTROLADAS	51
6.1.1. CUENCA RÍO TRANCURA EN CURARREHUE	52
6.1.2. CUENCA RÍO ALLIPÉN EN MELIPEUCO.....	53
6.1.3. CUENCA RÍO CRUCES EN RUCACO	53
6.1.4. CUENCA RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA.....	54
6.2. SISTEMAS APR	55
6.2.1. APR DE CURARREHUE	55
6.2.2. APR DE SANTA MARÍA DE LLAIMA	59
6.2.3. APR DE PUTABLA.....	63
6.2.4. APR DE OÑOICO	66
6.2.5. APR EL COIHUE	69

6.3. BALANCE HÍDRICO	72
6.4. MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y COSTOS	75
6.4.1. APR PUTABLA	76
6.4.2. APR OÑOICO	79
6.4.3. APR EL COIHUE	81
6.4.4. RESUMEN DE COSTOS	84
CAPITULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
6.1. HIDROLOGÍA PROYECTADA.....	85
6.2. BALANCE HÍDRICO	85
6.3. CORRECCIONES APLICADAS.....	87
6.4. TENDENCIAS Y CORRELACIONES.....	88
6.5. MEDIDAS DE MITIGACIÓN	90
6.6. DISCUSIÓN	92
CAPITULO 8: CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA.....	96

Anexos

Anexo A: Detalles de corrección de modelos	98
Anexo B: Especificaciones del balance hídrico	103
Anexo C: Planillas de Costos	117
Anexo D: Análisis de factores y atributos	131
Anexo E: Otras variables climáticas y Transposición de Caudales.....	134

Índice de Ilustraciones

FIGURA 2.1: CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN (SUB-FIGURA B) Y EN LAS SEQUÍAS (SUB-FIGURA C) Y NIVEL DE ACUERDO PARA LAS DISTINTAS REGIONES DEL MUNDO. FUENTE: (IPCC, CLIMATE CHANGE 2021, THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, 2021).	9
FIGURA 2.2: PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN RCP 2.6 (FIGURAS A Y C) Y RCP 8.5 (FIGURAS B Y D) PARA EL TERRITORIO NACIONAL PARA LOS PERIODOS (2011-2030) Y (2031-2050). FUENTE: (MMA, PLAN NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO, 2014).	10
FIGURA 2.3: SERIE DE PRECIPITACIONES (RPI) DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE. FUENTE: (GARREAUD & BOISIER, THE CENTRAL CHILE MEGA DROUGHT (2010-2018) : A CLIMATE DYNAMICS PERSPECTIVE, 2019).11	
FIGURA 2.4: EVOLUCIÓN DE LA SEQUÍA EN LAS DISTINTAS REGIONES DE CHILE CENTRAL. FUENTE: (GARREAUD & BOISIER, THE 2010-2015	

MEGADROUGHT IN CENTRAL CHILE: IMPACTS ON REGIONAL HYDROCLIMATE AND VEGETATION, 2017).	13
FIGURA 2.5: RELACIÓN DE EVENTOS DE SEQUÍA EN PERIODO DE MEGA SEQUÍA CON FENÓMENOS DE EL NIÑO Y LA NIÑA. FUENTE: (GARREAUD & BOISIER, THE CENTRAL CHILE MEGA DROUGHT (2010-2018) : A CLIMATE DYNAMICS PERSPECTIVE, 2019).	14
FIGURA 2.6: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIONES EN EL TERRITORIO NACIONAL.	17
FIGURA 2.7: OUTPUT DEL RECORTE REALIZADO POR PROGRAMA EN MATLAB.	17
FIGURA 5.1: MAPA HIDROGEOLÓGICO DE LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA. FUENTE: (DGA, MAPA HIDROGEOLÓGICO DE CHILE, 1986).	34
FIGURA 5.2: MAPA CON LOS PRINCIPALES CUERPOS DE AGUA DE LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA. FUENTE: (RULAMAHUE, 2021).	35
FIGURA 5.3: LOCALIZACIÓN SISTEMA APR DE CURARREHUE. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2022	36
FIGURA 5.4: LOCALIZACIÓN CUENCA RIO TRANCURA EN CURARREHUE.	37
FIGURA 5.5: LOCALIZACIÓN SISTEMA APR DE SANTA MARÍA DE LLAIMA. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2022.	38
FIGURA 5.6: LOCALIZACIÓN CUENCA DEL SISTEMA APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	39
FIGURA 5.7: LOCALIZACIÓN CUENCA DEL SISTEMA APR SANTA MARÍA DE LLAIMA Y RIO ALLIPÉN EN MELIPEUCO.	40
FIGURA 5.8: LOCALIZACIÓN SISTEMA APR DE PUTABLA. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2022.	41
FIGURA 5.9: LOCALIZACIÓN CUENCA APR PUTABLA.	42
FIGURA 5.10: LOCALIZACIÓN CUENCA APR PUTABLA Y CUENCA RIO CRUCES EN RUCACO.	43
FIGURA 5.11: LOCALIZACIÓN SISTEMA APR DE OÑOICO. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2022.	44
FIGURA 5.12: LOCALIZACIÓN CUENCA DEL SISTEMA APR OÑOICO.	45
FIGURA 5.13: LOCALIZACIÓN CUENCA DEL SISTEMA APR OÑOICO Y RIO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA.	46
FIGURA 5.14: LOCALIZACIÓN SISTEMA APR EL COIHUE. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2022.	47
FIGURA 5.15: LOCALIZACIÓN CUENCA DEL SISTEMA APR EL COIHUE.	48
FIGURA 5.16: LOCALIZACIÓN CUENCA DEL SISTEMA APR EL COIHUE Y RIO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA.	49

FIGURA 6.1: LOCALIZACIÓN DE CUENCAS PARA CORRECCIÓN TIPO. .	51
FIGURA 6.2: CVE PARA MODELOS GCM, CORRIDA REGIONALIZACIÓN Y SERIE OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, RÍO TRANCURA EN CURARREHUE.	52
FIGURA 6.3: CVE PARA MODELOS GCM, CORRIDA REGIONALIZACIÓN Y SERIE OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, RÍO ALLIPÉN EN MELIPEUCO.	53
FIGURA 6.4: CVE PARA MODELOS GCM, CORRIDA REGIONALIZACIÓN Y SERIE OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, RÍO CRUCES EN RUCACO. .	54
FIGURA 6.5: CVE PARA MODELOS GCM, CORRIDA REGIONALIZACIÓN Y SERIE OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA.	55
FIGURA 6.6: CVE PERIODO LÍNEA BASE APR CURARREHUE.	56
FIGURA 6.7: FACTOR DE FORZAMIENTO DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA MODELOS GCM, APR CURARREHUE.....	57
FIGURA 6.8: CVE CORREGIDAS PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR CURARREHUE.....	57
FIGURA 6.9: CURVA MENSUAL DE DAA SUPERFICIALES TOTALES, APR CURARREHUE.....	58
FIGURA 6.10: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR CURARREHUE.....	58
FIGURA 6.11: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL ACTUAL Y PROYECTADA, APR CURARREHUE.	59
FIGURA 6.12: CVE PERIODO LÍNEA BASE APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	60
FIGURA 6.13: FACTOR DE FORZAMIENTO DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA MODELOS GCM, APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	60
FIGURA 6.14: CVE CORREGIDAS PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	61
FIGURA 6.15: CURVA MENSUAL DE DAA SUPERFICIALES CONSUNTIVOS, APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	62
FIGURA 6.16: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	62
FIGURA 6.17: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL ACTUAL Y PROYECTADA, APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.....	62
FIGURA 6.18: CVE PERIODO LÍNEA BASE APR PUTABLA.	63

.....	64
FIGURA 6.19: FACTOR DE FORZAMIENTO DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA MODELOS GCM, APR PUTABLA.	64
FIGURA 6.20: CVE CORREGIDAS PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR PUTABLA.	64
FIGURA 6.21: CURVA MENSUAL DE DAA SUPERFICIALES CONSUNTIVOS, APR PUTABLA.	65
FIGURA 6.22: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR PUTABLA.	65
FIGURA 6.23: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL ACTUAL Y PROYECTADA, APR PUTABLA.....	66
FIGURA 6.24: CVE PERIODO LÍNEA BASE APR OÑOICO.....	67
.....	67
FIGURA 6.25: FACTOR DE FORZAMIENTO DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA MODELOS GCM, APR OÑOICO.	67
FIGURA 6.26: CVE CORREGIDAS PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR OÑOICO.	68
FIGURA 6.27: CURVA MENSUAL DE DAA SUPERFICIALES CONSUNTIVOS, APR OÑOICO.	68
FIGURA 6.28: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR OÑOICO.	69
FIGURA 6.29: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL ACTUAL Y PROYECTADA, APR OÑOICO.....	69
FIGURA 6.30: CVE PERIODO LÍNEA BASE APR EL COIHUE.	70
.....	70
FIGURA 6.31: FACTOR DE FORZAMIENTO DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA MODELOS GCM, APR EL COIHUE.	70
FIGURA 6.32: CVE CORREGIDAS PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR EL COIHUE.....	71
FIGURA 6.33: CURVA MENSUAL DE DAA SUPERFICIALES CONSUNTIVOS, APR EL COIHUE.	71
FIGURA 6.34: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR EL COIHUE.....	72
FIGURA 6.35: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL ACTUAL Y PROYECTADA, APR EL COIHUE.	72
FIGURA 6.36: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR CURARREHUE.....	73
FIGURA 6.37: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	73

FIGURA 6.38: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR PUTABLA.	74
FIGURA 6.39: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR OÑOICO.	74
FIGURA 6.40: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR EL COIHUE.	75
FIGURA 6.41: TRAZADO DE IMPULSIÓN DE AGUA ALTERNATIVA N°1 APR PUTABLA.	77
FIGURA 6.42: TRAZADO DE IMPULSIÓN DE AGUA ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO.	79
FIGURA 6.43: TRAZADO DE IMPULSIÓN DE AGUA ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE.	81
FIGURA A.1. (A): CVE RIO ALLIPÉN EN MELIPEUCO MODELOS GCM MIROC E IPSL PERIODO LÍNEA BASE Y PROYECTADO. (B): CVE RIO ALLIPÉN EN MELIPEUCO MODELOS GCM CSIRO Y CCSM4 PERIODO LÍNEA BASE Y PROYECTADO.	98
FIGURA A.2. (A): CVE RIO TRANCURA EN CURARREHUE MODELOS GCM MIROC E IPSL PERIODO LÍNEA BASE Y PROYECTADO. (B): CVE RIO TRANCURA EN CURARREHUE MODELOS GCM CSIRO Y CCSM4 PERIODO LÍNEA BASE Y PROYECTADO.	100
FIGURA A.3. (A): CVE RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA MODELOS GCM MIROC E IPSL PERIODO LÍNEA BASE Y PROYECTADO. (B): CVE RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA MODELOS GCM CSIRO Y CCSM4 PERIODO LÍNEA BASE Y PROYECTADO.	101
FIGURA A.4. (A): CVE RÍO CRUCES EN RUCACO MODELOS GCM MIROC E IPSL PERIODO LÍNEA BASE Y PROYECTADO. (B): CVE RÍO CRUCES EN RUCACO MODELOS GCM CSIRO Y CCSM4 PERIODO LÍNEA BASE Y PROYECTADO.	102
FIGURA B.1: CLASIFICACIÓN DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES, APR CURARREHUE.	104
.....	105
FIGURA B.2: CVE CORREGIDAS CON FACTORES DE FORZAMIENTO PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	105
FIGURA B.3: CLASIFICACIÓN DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES, APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	107
.....	108
FIGURA B.4: CVE CORREGIDAS CON FACTORES DE FORZAMIENTO PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR PUTABLA.	108
FIGURA B.5: CLASIFICACIÓN DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES, APR PUTABLA.	109
.....	110

FIGURA B.6: CVE CORREGIDAS CON FACTORES DE FORZAMIENTO PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR OÑOICO.....	110
FIGURA B.7: CLASIFICACIÓN DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES, APR OÑOICO.	112
.....	113
FIGURA B.8: CVE CORREGIDAS CON FACTORES DE FORZAMIENTO PERIODO PROYECTADO PARA MODELOS GCM, SERIE HISTÓRICA OBSERVADA EN PERIODO DE LÍNEA BASE, APR EL COIHUE.	113
FIGURA B.9: CLASIFICACIÓN DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES, APR EL COIHUE.....	114
FIGURA D.1: CORRELACIÓN ENTRE FACTORES DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA CUENCAS RÍO TRANCURA EN CURARREHUE Y APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	131
.....	131
FIGURA D.2: CORRELACIÓN ENTRE FACTORES DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA CUENCAS RÍO CRUCES EN RUCACO Y APR PUTABLA.....	131
.....	132
FIGURA D.3: CORRELACIÓN ENTRE FACTORES DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA CUENCAS RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA Y APR OÑOICO.	132
.....	132
FIGURA D.4: CORRELACIÓN ENTRE FACTORES DE CAMBIO CLIMÁTICO (F3) PARA CUENCAS RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA Y APR EL COIHUE.....	132
.....	133
FIGURA D.5: CORRELACIÓN ENTRE COBERTURA NIVAL DE LA CUENCA Y COEFICIENTES DE PARDÉ MENSUALES EN CUENCAS CONTROLADAS.....	133
.....	133
FIGURA D.6: CORRELACIÓN ENTRE COTA MEDIA DE LA CUENCA Y COEFICIENTES DE PARDÉ MENSUALES EN CUENCAS CONTROLADAS.....	133
.....	134
FIGURA D.7: CORRELACIÓN ENTRE LATITUD DE LA CUENCA Y COEFICIENTES DE PARDÉ MENSUALES EN CUENCAS CONTROLADAS.....	134
.....	134
FIGURA D.8: CORRELACIÓN ENTRE LONGITUD DE LA CUENCA Y COEFICIENTES DE PARDÉ MENSUALES EN CUENCAS CONTROLADAS.....	134
FIGURA E.1: CAUDALES MODELADO Y POR TRANSPOSICIÓN EN APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	135
.....	135

FIGURA E.2: CAUDALES MODELADO Y POR TRANSPOSICIÓN EN APR CURARREHUE.....	135
.....	136
FIGURA E.3: CAUDALES MODELADO Y POR TRANSPOSICIÓN EN APR PUTABLA.	136
.....	136
FIGURA E.4: CAUDALES MODELADO Y POR TRANSPOSICIÓN EN APR OÑOICO.	136
.....	137
FIGURA E.5: CAUDALES MODELADO Y POR TRANSPOSICIÓN EN APR EL COIHUE.....	137
.....	137
FIGURA E.6: COEFICIENTES DE PARDÉ MENSUALES EN CUENCAS CONTROLADAS.	137
.....	138
FIGURA E.7: TEMPERATURAS PROMEDIO MENSUALES EN CUENCAS CONTROLADAS.	138
.....	138
FIGURA E.8: PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUALES EN CUENCAS CONTROLADAS.	138

Índice de Tablas

TABLA 2.1: CARACTERÍSTICAS DE CADA ESCENARIO RCP. FUENTE: (IPCC, CAMBIO CLIMÁTICO: INFORME DE SÍNTESIS, 2014).	7
TABLA 5.1: RESUMEN DE ATRIBUTOS PRINCIPALES DE LAS CUENCAS CONTROLADAS UTILIZADAS PARA LA TRANSPOSICIÓN DE CAUDALES.	49
TABLA 5.2: RESUMEN DE ATRIBUTOS PRINCIPALES DE LAS CUENCAS CORRESPONDIENTES A LOS SISTEMAS APR ESTUDIADOS.	50
TABLA 6.1: COEFICIENTE DE PARDÉ EN CUENCA RÍO TRANCURA EN CURARREHUE.....	52
TABLA 6.2: COEFICIENTE F2 ANUAL EN CUENCA RÍO TRANCURA EN CURARREHUE.....	52
TABLA 6.3: COEFICIENTE DE PARDÉ EN CUENCA RÍO ALLIPÉN EN MELIPEUCO.	53
TABLA 6.4: COEFICIENTE F2 ANUAL EN CUENCA RÍO ALLIPÉN EN MELIPEUCO.	53

TABLA 6.5: COEFICIENTE DE PARDÉ EN CUENCA RÍO CRUCES EN RUCACO.	54
TABLA 6.6: COEFICIENTE F2 ANUAL EN CUENCA RÍO CRUCES EN RUCACO.	54
TABLA 6.7: COEFICIENTE DE PARDÉ EN CUENCA RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA.	55
TABLA 6.8: COEFICIENTE F2 ANUAL EN CUENCA RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA.	55
TABLA 6.9: RESUMEN BALANCES HÍDRICOS EN TODOS LOS SISTEMAS APR.	75
TABLA 6.10: CARACTERÍSTICAS BOMBA PARA ALTERNATIVA N°1 APR PUTABLA.	77
TABLA 6.11: CAPEX ALTERNATIVA N°1 APR PUTABLA.	77
TABLA 6.12: OPEX ALTERNATIVA N°1 APR PUTABLA.	78
TABLA 6.13: EVALUACIÓN ECONÓMICA ALTERNATIVA N°1 APR PUTABLA.	78
TABLA 6.14: OPEX ALTERNATIVA N°2 APR PUTABLA.	78
TABLA 6.15: EVALUACIÓN ECONÓMICA ALTERNATIVA N°2 APR PUTABLA.	79
TABLA 6.16: CARACTERÍSTICAS BOMBA PARA ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO.	80
TABLA 6.17: CAPEX ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO.	80
TABLA 6.18: OPEX ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO.	80
TABLA 6.19: EVALUACIÓN ECONÓMICA ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO.	80
TABLA 6.20: OPEX ALTERNATIVA N°2 APR OÑOICO.	81
TABLA 6.21: EVALUACIÓN ECONÓMICA ALTERNATIVA N°2 APR OÑOICO.	81
TABLA 6.22: CARACTERÍSTICAS BOMBA PARA ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE.	82
TABLA 6.23: CAPEX ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE.	82
TABLA 6.24: OPEX ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE.	82
TABLA 6.25: EVALUACIÓN ECONÓMICA ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE.	83
TABLA 6.26: OPEX ALTERNATIVA N°2 APR EL COIHUE.	83
TABLA 6.27: EVALUACIÓN ECONÓMICA ALTERNATIVA N°2 APR EL COIHUE.	83

TABLA 6.28: RESUMEN DE COSTOS PARA TODOS LOS CASOS Y ALTERNATIVAS.	84
TABLA 6.29: RESUMEN DE COSTOS POR ARRANQUE PARA TODOS LOS CASOS Y ALTERNATIVAS.	84
TABLA A.1: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE DE LA CUENCA RÍO ALLIPÉN EN MELIPEUCO.	98
TABLA A.2: CAUDALES MENSUALES PROYECTADOS DE LAS CVE OBTENIDAS DE LOS 4 MODELOS GCM EN LA CUENCA RÍO ALLIPÉN EN MELIPEUCO.	99
TABLA A.3: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE DE LA CUENCA RÍO TRANCURA EN CURARREHUE.	99
TABLA A.4: CAUDALES MENSUALES PROYECTADOS DE LAS CVE OBTENIDAS DE LOS 4 MODELOS GCM EN LA CUENCA RÍO TRANCURA EN CURARREHUE.	100
TABLA A.5: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE DE LA CUENCA RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA.	100
TABLA A.6: CAUDALES MENSUALES PROYECTADOS DE LAS CVE OBTENIDAS DE LOS 4 MODELOS GCM EN LA CUENCA RÍO MAHUIDANCHE EN SANTA ANA.	101
TABLA A.7: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE DE LA CUENCA RÍO CRUCES EN RUCACO.	102
TABLA A.8: CAUDALES MENSUALES PROYECTADOS DE LAS CVE OBTENIDAS DE LOS 4 MODELOS GCM EN LA CUENCA RÍO CRUCES EN RUCACO.	102
TABLA B.1: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE PERIODO LÍNEA BASE APR CURARREHUE.	103
TABLA B.2: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON FACTORES DE FORZAMIENTO, PERIODO PROYECTADO APR CURARREHUE.	103
TABLA B.3: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON COEFICIENTE DE PARDÉ, PERIODO PROYECTADO APR CURARREHUE.	104
TABLA B.4: DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES TOTALES APR CURARREHUE.	104
TABLA B.5: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR CURARREHUE.	104
TABLA B.6: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL APR CURARREHUE.	104
TABLA B.7: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE PERIODO LÍNEA BASE APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	106
TABLA B.8: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON FACTORES DE FORZAMIENTO, PERIODO PROYECTADO APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	106

TABLA B.9: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON COEFICIENTE DE PARDÉ, PERIODO PROYECTADO APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	106
TABLA B.10: DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES CONSUNTIVOS APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	107
TABLA B.11: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	107
TABLA B.12: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	107
TABLA B.13: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE PERIODO LÍNEA BASE APR PUTABLA.	108
TABLA B.14: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON FACTORES DE FORZAMIENTO, PERIODO PROYECTADO APR PUTABLA.	109
TABLA B.15: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON COEFICIENTE DE PARDÉ, PERIODO PROYECTADO APR PUTABLA.	109
TABLA B.16: DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES CONSUNTIVOS APR PUTABLA.....	109
TABLA B.17: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR PUTABLA.	109
TABLA B.18: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL APR PUTABLA.	110
TABLA B.19: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE PERIODO LÍNEA BASE APR OÑOICO.	111
TABLA B.20: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON FACTORES DE FORZAMIENTO, PERIODO PROYECTADO APR OÑOICO.	111
TABLA B.21: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON COEFICIENTE DE PARDÉ, PERIODO PROYECTADO APR OÑOICO.	111
TABLA B.22: DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES CONSUNTIVOS APR OÑOICO.....	112
TABLA B.23: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR OÑOICO.	112
TABLA B.24: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL APR OÑOICO..	112
TABLA B.25: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE PERIODO LÍNEA BASE APR EL COIHUE.	113
TABLA B.26: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON FACTORES DE FORZAMIENTO, PERIODO PROYECTADO APR EL COIHUE.	113
TABLA B.27: CAUDALES MENSUALES DE LAS CVE CORREGIDOS CON COEFICIENTE DE PARDÉ, PERIODO PROYECTADO APR EL COIHUE. ..	114
TABLA B.28: DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES CONSUNTIVOS APR EL COIHUE.	114
TABLA B.29: CAUDAL ECOLÓGICO MENSUAL APR EL COIHUE.	114

TABLA B.30: DEMANDA DE AGUA POTABLE MENSUAL APR EL COIHUE.	114
TABLA B.31: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR CURARREHUE.	115
TABLA B.32: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR SANTA MARÍA DE LLAIMA.	115
TABLA B.33: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR PUTABLA.	116
TABLA B.34: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR OÑOICO.	116
TABLA B.35: BALANCE HÍDRICO MENSUAL APR EL COIHUE.	116
TABLA C.1: DISEÑO DE ALTERNATIVA N°1 APR PUTABLA.	117
TABLA C.2: DISEÑO DE ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO.	118
TABLA C.3: DISEÑO DE ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE.	119
*: SE CONSIDERA UNA CONVERSIÓN DE 1USD = 900 CLP DEL DÍA 22/06/2022.	119
TABLA C.4: COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX) ALTERNATIVA N°1 APR PUTABLA.	120
TABLA C.5: COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX) ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO.	121
TABLA C.6: COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX) ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO (CONTINUACIÓN).	122
TABLA C.7: COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX) ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE.	123
TABLA C.8: COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX) ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE (CONTINUACIÓN).	124
TABLA C.9: COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX) ALTERNATIVA N°1 APR PUTABLA.	124
TABLA C.10: COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX) ALTERNATIVA N°2 APR PUTABLA.	126
TABLA C.11: COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX) ALTERNATIVA N°1 APR OÑOICO.	127
TABLA C.12: COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX) ALTERNATIVA N°2 APR OÑOICO.	128
TABLA C.13: COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX) ALTERNATIVA N°1 APR EL COIHUE.	129
TABLA C.14: COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX) ALTERNATIVA N°2 APR EL COIHUE.	130

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los sistemas de Agua Potable Rural, de aquí en adelante nombrados APR, corresponden a un conjunto de infraestructura, sanitaria e hidráulica, cuyo objetivo es abastecer de agua potable las necesidades de consumo de alguna comunidad en una zona rural del país, mejorando así las condiciones sanitarias de sus habitantes. Estos sistemas APR son administrados, operados y mantenidos por las comunidades que se ven beneficiadas por el sistema, las cuales se organizan en un Comité de Agua Potable Rural, el cual corresponde a una cooperativa sin fines de lucro, la cual vela por su funcionamiento óptimo.

Los mencionados sistemas APR surgen del *Programa de Agua Potable Rural*, proporcionado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (MOP), que busca abastecer de agua potable a las localidades rurales. Este programa fue lanzado en el año 1964, y hasta el año 2019 se contabilizan cerca de 1.897 sistemas de APR en el país, abarcando hasta el 99% de la población rural objetivo según el *Tríptico de la Historia de los APR* (DOH D. d., Tríptico de la Historia de los APR, 2019).

Dentro de este contexto, se vuelve interesante estudiar los sistemas APR en torno a la disponibilidad de recursos hídricos futuros, puesto que representan la forma de abastecimiento de agua potable de un 11,4 % de la población nacional (INE, ine.cl, 2021). En ese sentido, las estrategias de diseño y operación y las necesidades de estos sistemas son completamente diferentes a aquellas de los sistemas de agua potable de los sectores urbanos, abarcando cantidades de población menores como también una menor densidad poblacional.

A partir de esto, se establece una zona de estudio correspondiente a la Región de la Araucanía, debido principalmente a su déficit hídrico en los últimos 12 años, siendo una de las regiones de la zona Sur del país que se ha visto más afectadas por condiciones de sequía asociadas al cambio climático. A su vez, existen tendencias que evidencian el avance del clima árido desde el norte hacia el sur en el país, por lo cual la región de la Araucanía representa un foco importante para el estudio de escasez hídrica.

Por otro lado, estudiar los impactos de la amenaza climática en sistemas de mayor sensibilidad, como lo son los sistemas APR en

comparación con la distribución urbana resulta relevante para conocer el real impacto de la crisis climática y la necesidad de invertir en nueva infraestructura para aumentar la resiliencia de dichos sistemas, asegurando la continuidad de operación y suministro de saneamiento básico a un porcentaje relevante de población rural.

Para el diseño de sistemas APR, se utiliza el *Manual de Proyectos de Agua Potable Rural* (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019) en el cual se definen 4 tipos de sistemas APR, según la clasificación asociada a la ley n°20.998, donde se presentan directrices para llevar a cabo los proyectos APR. Por otro lado, se detallan las actividades a realizar en el anteproyecto, las bases para calcular parámetros importantes como la dotación y población proyectadas, el tratamiento, regulación y almacenamiento necesarios para el proyecto, entre otros factores importantes para su realización.

El trabajo se desarrolla entonces en un marco de proyecciones de cambio climático a través de modelos climáticos de circulación general (GCM), elaborados por diferentes instituciones, los cuales corresponden a entradas de modelo hidrológico distribuido y de base física VIC (Variable Infiltration Capacity). El objetivo es cuantificar, temporal y espacialmente, los cambios en diversas variables hidrometeorológicas a nivel nacional. Estos modelos de circulación general toman una base común obtenida del proyecto *Actualización del balance hídrico nacional* (DGA, Actualización del Balance Hídrico Nacional, 2017) impulsado por la Dirección General de Aguas (DGA) en el año 2017 y se diferencian según la sensibilidad climática modelada.

1.2. Objetivos y Alcances

1.2.1. Objetivo general

Estudiar la vulnerabilidad en los sistemas APR en la región de la Araucanía en torno a la disponibilidad de recursos hídricos, proponer medidas de mitigación para resolver posibles situaciones de escasez y estimar los costos asociados de las propuestas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Cuantificar la disminución en la oferta hídrica de la zona a través de Curvas de Variación Estacional (CVE).
- Determinar la demanda de agua proyectada.
- Realizar el balance oferta-demanda hídrica.

- Evaluar la vulnerabilidad del sistema en torno al balance hídrico.
- Evaluar distintas medidas de mitigación posibles.
- Estimar los costos de inversión (CAPEX) de las propuestas.
- Estimar los costos de operación (OPEX) de las propuestas.
- Determinar la medida de mitigación óptima.

1.2.3. Alcances

- Estudiar la disponibilidad de recursos hídricos en la región de la Araucanía.
- Concentrarse en sistemas de Agua Potable Rural únicamente.
- Abarcar 5 sistemas APR dentro de la región con una distribución homogénea (costa, cordillera y zona central).
- Proponer medidas de mitigación acorde los resultados del balance.
- Evaluar medidas de mitigación propuestas según costos e indicadores económicos (CAPEX, OPEX, VAN, CAE).

1.2.4. Estructura del informe

El presente informe se divide en 8 Capítulos, las cuales se resumen brevemente a continuación.

En el 1^{er} capítulo se enuncian los antecedentes y motivación del Trabajo de Título, abarcando también los objetivos y alcances de este.

En el 2^{ndo} capítulo se detalla el marco teórico del trabajo en forma de Revisión Bibliográfica. Este consiste en la base conceptual necesaria para llevar a cabo la investigación.

En el 3^{er} capítulo se describe la metodología de trabajo utilizada para llevar a cabo las proyecciones y proceso de resultados, enunciando todos los pasos a seguir para analizar cada sistema APR estudiado.

En el 4^{to} capítulo se detalla la memoria de cálculo con las principales fórmulas y modelos utilizados en el trabajo.

En el 5^{to} capítulo se caracteriza de forma completa la zona de Estudio, tanto a niveles regionales como a escala de cada sistema APR involucrado.

En el 6^{to} capítulo se exponen los resultados de balance hídrico obtenidos para cada sistema estudiado, junto con la evaluación de las medidas de mitigación propuestas y sus costos respectivos.

En el 7^{mo} capítulo se analizan los resultados presentados en el capítulo anterior, junto con el desarrollo de tendencias y establecimiento del índice de vulnerabilidad.

Finalmente, en el 8^{vo} capítulo se presentan las conclusiones generales y específicas del trabajo. Además, se mencionan proyecciones para continuar y mejorar el estudio.

Se presentan al final del informe la Bibliografía utilizada y Anexos correspondientes.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas APR

En el contexto de la resolución obtenida en la decimosegunda Asamblea Mundial de la Salud realizada en 1959 y del acuerdo "Carta de Punta del Este" organizado en 1961 se crea el programa de Agua Potable Rural en el año 1964. Esta iniciativa surge a través del Plan Básico de Saneamiento Rural, originalmente dictado por el Ministerio de Salud, y tiene como objetivo principal mejorar las condiciones de salud y saneamiento de la población rural del país. Así, este plan es impulsado posteriormente por el Ministerio de Obras Públicas a través de la Dirección de Obras Hidráulicas y abarca más de 1.800 sistemas APR a nivel nacional, alcanzando a más de 1 millón 700 mil personas (DOH D. d., Tríptico de la Historia de los APR, 2019). Son consideradas como objetivo del programa la población rural concentrada (localidad que tiene entre 150 y 3.000 habitantes con 15 viviendas por kilómetro de calle a lo menos) y semiconcentrada (localidad de al menos 80 habitantes con 8 viviendas por kilómetro lineal) que carece de agua potable o bien el sistema de agua potable que la abastece no cumple la demanda necesaria (DOH D. d., Informe Final de Evaluación Programa Agua Potable Rural, 2007).

De esta forma, el Estado subsidia los estudios de ingeniería y la instalación de la infraestructura necesaria en cada sistema APR. Sin embargo, cada sistema APR está administrado, mantenido y operado por la comunidad beneficiada, siendo los costos requeridos para esto extraídos de la cobranza realizada a cada uno de los vecinos de la comunidad, agrupados en un Comité de Agua Potable Rural (DOH D. d., Informe Final de Evaluación Programa Agua Potable Rural, 2007).

En cuanto a las infraestructuras de los sistemas APR, se componen generalmente de obras de captación, conducción, tratamiento, almacenamiento y distribución del recurso hídrico, siendo estas de carácter colectivo para la comunidad beneficiada (DOH D. d., Informe Final de Evaluación Programa Agua Potable Rural, 2007). No obstante, existen múltiples sistemas de Agua Potable Rural que no logran abastecer a todos sus socios, presentando problemas de fuente por la disminución de caudales como también falencias graves de infraestructura. Por si fuera poco, aún existen viviendas que no tienen acceso al agua potable,

contabilizándose cerca de 380.000 censadas durante el año 2017 (INE, Censo, 2017), donde aún no se cuenta con proyectos APR.

Para la elaboración de un proyecto APR, se debe comenzar por un anteproyecto, en el cual se levantan los antecedentes generales de la zona que se quiere intervenir, tales como el clima, un catastro de viviendas, la existencia de algún sistema APR cercano, ubicación de la fuente de agua más cercana, respaldo hidrológico o hidrogeológico de esta, estudio de calidad de sus aguas y levantamiento topográfico, entre otros (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019). Así, se deben analizar tanto fuentes superficiales como subterráneas de agua, para evaluar en cantidad y calidad la mejor alternativa de abastecimiento específica para la localidad que se verá beneficiada con el proyecto.

Posteriormente, se procede a efectuar los cálculos necesarios para el diseño del sistema APR, considerando la población y densidad de habitantes para calcular un caudal de producción de agua potable necesario, considerando una dotación entre 120 y 150 [lts/habitante/día] (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019). Además, se deben proyectar estos parámetros por lo menos en 20 años, con el objetivo de asegurar el correcto funcionamiento del sistema hidráulico en un periodo de tiempo razonable. Con esta información, es posible definir el caudal, volúmenes y presiones requeridos en las obras hidráulicas, para realizar el diseño del sistema APR de manera óptima.

Considerando lo anterior, el estudio se focaliza en los sistemas de agua potable en las zonas rurales, puesto que dichos sistemas son menos resilientes al cambio climático y a la disminución de los caudales en sus respectivas fuentes de captación. Esto produce operación con restricciones, lo cual se traduce en escasez de agua para el consumo humano (Garreaud & Boisier, The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, 2017). Así, los efectos provocados por el cambio climático afectan de manera más severa, en comparación con los sistemas urbanos, a los sistemas rurales. Acorde a lo anterior, se deben asegurar distintas soluciones y estrategias a plantear a futuro en ambos casos, donde el objetivo común es hacer resiliente el sistema y asegurar la operación.

2.2. Escenarios de Cambio Climático

A lo largo de la historia, se han focalizado los intereses mundiales en el progreso de las civilizaciones, ignorando por muchos años las

consecuencias que conlleva aquel progreso en la Tierra. Así, existen estudios recientes que indican la causalidad de la actividad humana en el planeta sobre los efectos observables del cambio climático, manifestándose en términos de calentamiento de la atmósfera, suelos y océanos a lo largo del globo terrestre (IPCC, *Climate Change 2021, The Physical Science Basis*, 2021).

Para estudiar posibles escenarios futuros, el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) determinó el término RCP (*Representative Concentration Pathways*), el cual representa la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, comúnmente medidos en concentración (en partes por millón) equivalente de CO₂. Los gases de efecto invernadero se dividen en 2 categorías: directos e indirectos, en donde los primeros tienen un rol fundamental asociado al efecto invernadero y calentamiento global. Así, se cuenta con 6 gases de efecto invernadero directos: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (NO₂), los halocarbonos o compuestos halogenados, el vapor de agua (H₂O) y el ozono troposférico (O₃) (Benavides & León, 2007).

En ese contexto se definen 4 escenarios determinados por distintos valores de RCP, definidos según el forzamiento radiativo (FR), medido en Watts/m² que se tendría en el año 2100 según cada escenario. De esta manera, se cuenta con los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5. Cabe recalcar que el forzamiento radiativo corresponde a una alteración del flujo radiante en la atmósfera, debido a la absorción de radiación infrarroja terrestre (Santamaría, 2010) y está directamente relacionado con el aumento de temperatura en la superficie terrestre. Para efectos de simplificación de este estudio, se trabaja con el escenario RCP 8.5, puesto que representa el caso más desfavorable al cual el Planeta está expuesto, según las distintas modelaciones. En la Tabla 2.1 se muestra una pequeña descripción y características de cada escenario (IPCC, *Cambio Climático: Informe de Síntesis*, 2014).

Tabla 2.1: Características de cada escenario RCP. Fuente: (IPCC, Cambio Climático: Informe de Síntesis, 2014).

Escenario	Forzante Radiativa [W/m²]	Concentración CO2 [ppm]	Comportamiento
RCP 2.6	3 en el peak en el año 2050, luego descenso	490 en peak, luego descenso	Peak y luego disminución
RCP 4.5	4,5 hacia el año 2100	650 hacia el año 2100	Estabilización sin peak
RCP 6.0	6 hacia el año 2100	850 hacia el año 2100	Estabilización sin peak
RCP 8.5	> 8,5 hacia el año 2100	>1.370 en 2100	Creciente

Asimismo, los efectos del cambio climático pueden ser clasificados en múltiples categorías, las cuales están relacionadas directa e indirectamente entre ellas, afectando al gran ecosistema que forma el planeta Tierra. Así, uno de los principales efectos está asociado a la variabilidad de eventos y fenómenos naturales relacionados con los recursos hídricos, tales como intensas lluvias, sequías, aluviones y ciclones, entre otros. En ese sentido, se afirma que la frecuencia e intensidad de eventos de extrema precipitación ha aumentado desde el año 1950 en la mayor parte del planeta que cuenta con información observada suficiente, siendo la actividad humana la principal causa de este cambio (IPCC, Climate Change 2021, The Physical Science Basis, 2021). A su vez, las grandes sequías, tanto ecológicas como agrícolas también han ido en aumento debido al incremento de la evapotranspiración del suelo en múltiples zonas, siendo la causalidad humana medianamente compartida por la comunidad científica (IPCC, Climate Change 2021, The Physical Science Basis, 2021).

En términos particulares, las investigaciones formuladas en el informe del IPCC indican una falta de información y/o literatura para concluir sobre cambios en precipitación en la región centro-sur de Chile. Por otra parte, en relación con los cambios en las sequías se tiene un bajo acuerdo científico sobre el tipo de cambio que estas evidencian en la zona (IPCC, Climate Change 2021, The Physical Science Basis, 2021). Esta información es retratada en la Figura 2.1.

Analizando la sub-figura b contenida en la Figura 2.1 es posible observar que no existe ninguna zona en el mundo en la cual disminuya la intensidad de los eventos de precipitación extrema observados, siendo el hemisferio Norte líder en esta tendencia de incremento, principalmente en el sector de Europa y Asia. A su vez, destaca la falta de información o literatura en el hemisferio Sur, con excepción en ciertas zonas que si presentan datos de incremento en la intensidad de precipitaciones asociadas a las grandes crecidas e inundaciones. Por otra parte, la sub-

figura c expone el cambio en las sequías tanto agrícolas como ecológicas, en donde es posible observar una dominancia de la tendencia a incrementar dichos eventos, sobre todo en longitudes correspondientes al territorio africano. En ambas figuras es notorio el bajo acuerdo que existe con respecto a la contribución humana sobre ambos eventos, lo cual genera un grado de incertidumbre y oposición de ideas no menor en el marco de la investigación de eventos climatológicos extremos.

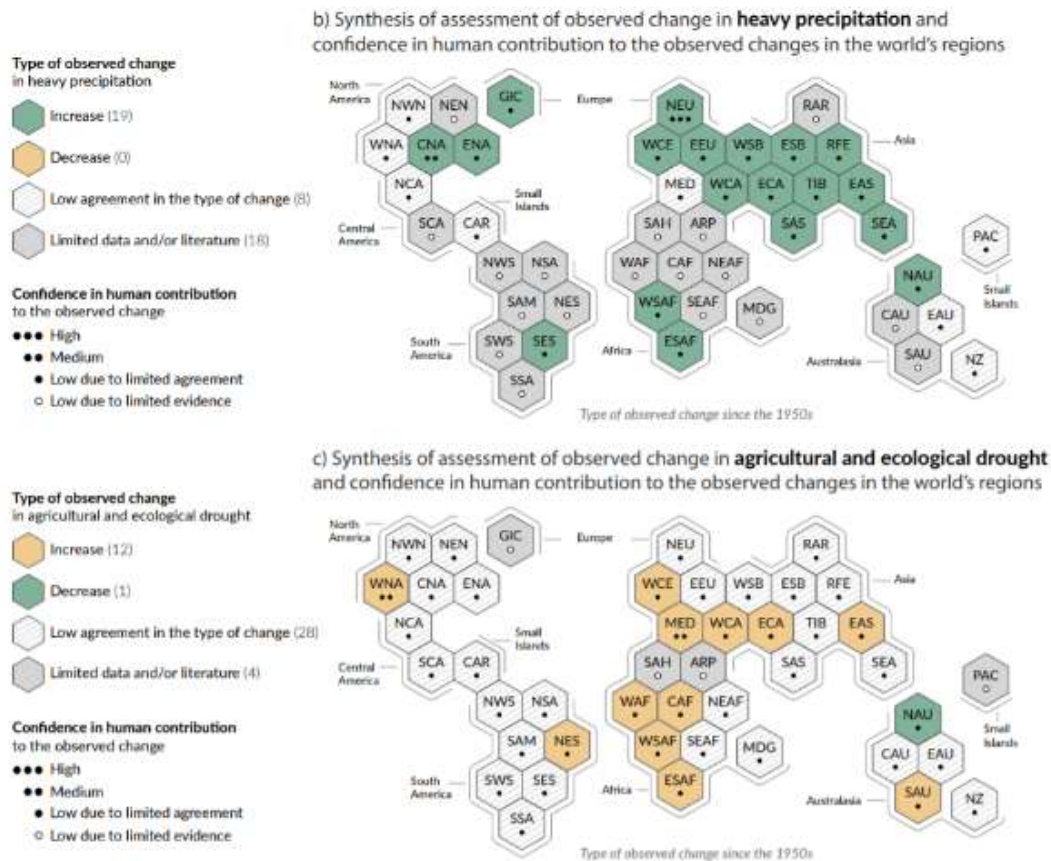


Figura 2.1: Cambios en la precipitación (sub-figura b) y en las sequías (sub-figura c) y nivel de acuerdo para las distintas regiones del mundo. Fuente: (IPCC, Climate Change 2021, The Physical Science Basis, 2021).

No obstante la literatura internacional, existen documentos elaborados dentro del País que evidencian una proyección de disminución en la precipitación para el periodo 2011-2050 en la zona centro-sur del país, en donde esta variable puede llegar a disminuir hasta un 30% en el escenario RCP 8.5 en la Región de la Araucanía, siendo una de las más afectadas a lo largo del país (MMA, Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, 2014). Se observan las proyecciones de variación de

precipitación para los escenarios RCP 2.5 y RCP 8.5 en la Figura 2.2, en donde es posible observar diferencias importantes entre ambos.

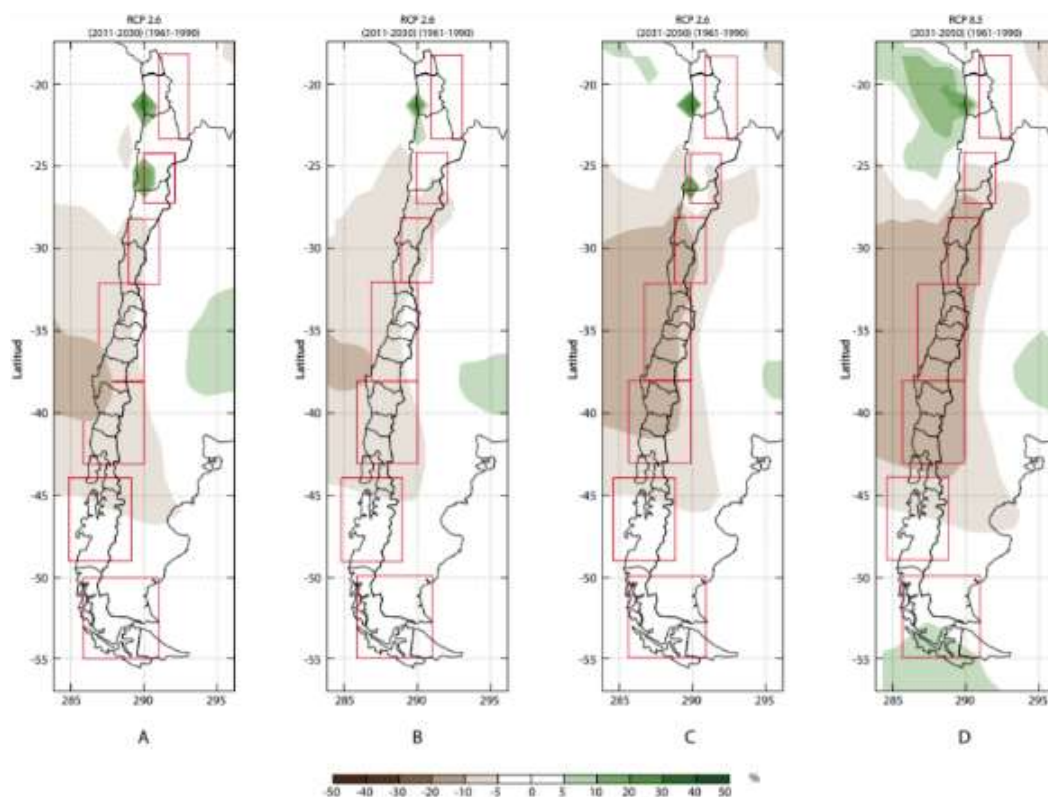


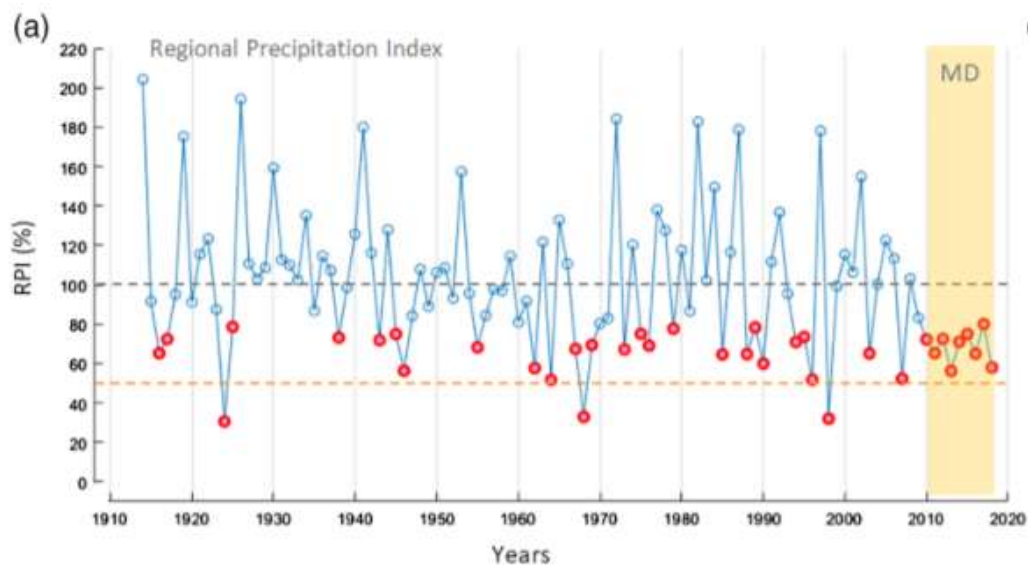
Figura 2.2: Proyecciones de precipitación RCP 2.6 (Figuras A y C) y RCP 8.5 (Figuras B y D) para el territorio nacional para los periodos (2011-2030) y (2031-2050). Fuente: (MMA, Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, 2014).

Analizando la información presentada en la Figura 2.2, es claro notar el incremento de colores marrón entre las Figuras A-C y B-D en la zona Central del país de forma general. Así, a pesar de que el escenario RCP 2.6 presenta mayores variaciones que el escenario RCP 8.5 en el periodo (2011-2030) (Figuras A y B respectivamente), el comportamiento se invierte con respecto al periodo de tiempo (2031-2050), en donde el escenario RCP 8.5 presenta mayores variabilidades a lo largo del territorio nacional (Figura D). Además, si bien existe una tendencia marcada de disminución en la precipitación de la zona central del país, es posible observar aumentos de este indicador en las zonas de latitud más cercanas al Ecuador y al Polo Sur, sobre todo considerando el escenario RCP 8.5 en el periodo más lejano (Figura D).

Es posible interpretar la información de la Figura 2.2 como un balance global negativo en términos de precipitación en la Zona de Estudio correspondiente a este trabajo, confirmando la necesidad de focalizar decisiones y estrategias en aquellas zonas más afectadas por el cambio climático.

2.3. Disponibilidad de recursos hídricos

Los efectos del cambio climático mencionados con anterioridad pueden reflejarse en un aumento en la frecuencia, duración e intensidad de las sequías en la zona central del país (Garreaud & Boisier, *The Central Chile mega drought (2010-2018) : A climate dynamics perspective*, 2019). Las sequías son caracterizadas por una disminución en la precipitación promedio de entre 20 y 40% en la última década o bien por un aumento considerable de la evapotranspiración asociada a suelo y cultivos. Se determina una mega sequía en Chile Central a partir del año 2010 (CR2 C. d., 2015). En la Figura 2.3 se observa la serie de precipitaciones medida a partir del índice regional de precipitación (RPI), en donde los puntos rojos representan los años con sequía meteorológica (RPI inferior a 80%), y la franja amarilla representa el periodo de la mega sequía.



*Figura 2.3: Serie de precipitaciones (RPI) de la zona central de Chile. Fuente: (Garreaud & Boisier, *The Central Chile mega drought (2010-2018) : A climate dynamics perspective*, 2019).*

En Chile Central, se cuenta con un clima mediterráneo caracterizado por tener precipitaciones medias anuales de entre 100 y 2.000 [mm]

concentradas entre los meses de mayo y septiembre. La variabilidad de las precipitaciones es alta, debido principalmente por el fenómeno de El Niño Southern Oscillation (ENSO) (Garreaud & Boisier, The Central Chile mega drought (2010-2018) : A climate dynamics perspective, 2019).

Los efectos que tiene la disminución en la precipitación van desde el derretimiento del manto nival en la zona, disminución en los volúmenes de embalses, aguas subterráneas y caudales en ríos hasta problemas ecosistémicos profundos en las desembocaduras de los ríos hacia el océano (Garreaud & Boisier, The Central Chile mega drought (2010-2018) : A climate dynamics perspective, 2019). Además, esta falta de precipitaciones provoca una disminución en la oferta de agua potable en la región, la que desencadena un desbalance oferta-demanda, necesitando por ende una inyección de agua potable mediante camiones de aljibe para satisfacer la demanda faltante. En la Figura 2.4 se observan diferentes parámetros asociados a 7 regiones del país, en donde el tamaño del círculo representa el déficit porcentual de precipitación, el número superior del círculo corresponde a la cantidad de veces que se declara escasez hídrica en el año, el número inferior corresponde a la cantidad de comunas con emergencia agrícola y el color del círculo corresponde a la cantidad de dinero invertido en camiones de agua, donde el extremo rojo corresponde a un gasto mayor.

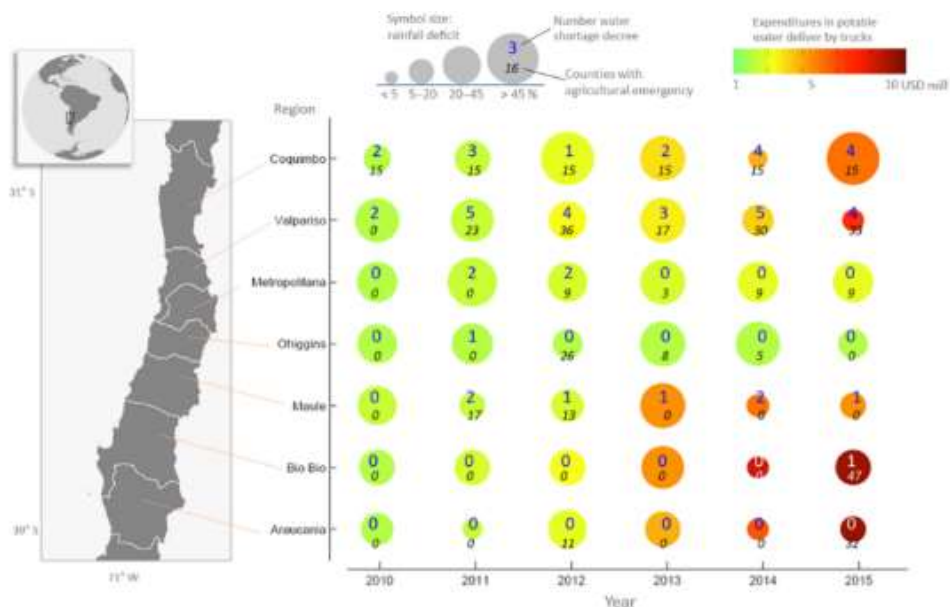


Figura 2.4: Evolución de la sequía en las distintas regiones de Chile central. Fuente: (Garreaud & Boisier, The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, 2017).

A partir de la información de la Figura 2.4, es observable la tendencia de disminución de tamaño y coloración rojiza del indicador para la Región de la Araucanía en el periodo (2010-2015). Lo anterior indica una disminución en el déficit de precipitación, pero un aumento en gastos de agua potable a través de camiones aljibe, junto con un considerable aumento en las comunas con emergencia agrícola. La disminución del déficit de precipitación puede ser un indicador del aumento de ocurrencia de eventos extremos mencionado en la sección de *Escenarios de Cambio Climático*.

La mega sequía entre los años 2010 y 2018 es la más larga secuencia de años secos desde que comenzaron las observaciones en 1914. Así, existen pocas (o ninguna) situaciones análogas en los últimos siglos. A diferencia de las sequías históricas, el período seco de la reciente se ha producido principalmente en condiciones ENSO-neutrales, a excepción de los inviernos de 2010 (La Niña) y 2015 (fuerte El Niño), disminuyendo así la capacidad de predecir el clima en cuanto a estos fenómenos (Garreaud & Boisier, The Central Chile mega drought (2010-2018) : A climate dynamics perspective, 2019). Es posible observar las sequías en condiciones ENSO-neutrales en la Figura 2.5.

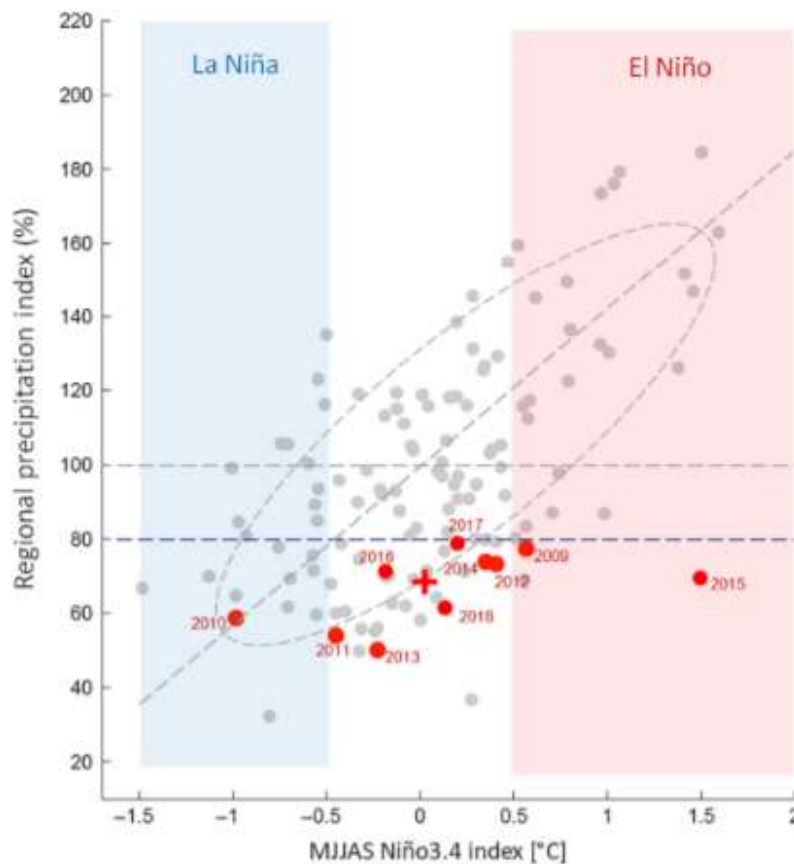


Figura 2.5: Relación de eventos de sequía en periodo de mega sequía con fenómenos de El Niño y La Niña. Fuente: (Garreaud & Boisier, The Central Chile mega drought (2010-2018) : A climate dynamics perspective, 2019).

Al considerar una distribución sintética de las anomalías de lluvia de 6 años, la probabilidad de un evento similar a la mega sequía es inferior al 0,5%, y su período de retorno estimado es de 200 años (Garreaud & Boisier, The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, 2017).

Se pueden distinguir 3 tipos de sequías, diferenciadas según la variable hidrometeorológica que se ve alterada. Así, se tienen sequías meteorológicas (falta en precipitación), sequías hidrológicas (disminución en almacenamiento y flujos de agua) y sequías agrícolas (falta de humedad en el suelo) (Vargas, 2020). Se concentran los estudios en sequías hidrológicas, donde la variable de interés son los caudales medios diarios, mensuales y anuales.

2.4. Modelos climáticos de circulación general

Para cuantificar la disponibilidad de recursos hídricos en la región y en el país en su totalidad, se utilizan bases de datos de 4 instituciones asociadas al *Coupled Model Intercomparison Project phase 5* (CMIP5), un marco de trabajo que agrupa diversos GCM desarrollados por distintos institutos climatológicos. A partir de estos modelos se puede extraer datos mensuales de variables meteorológicas de interés como temperatura, caudal, humedad relativa y precipitación. Estas variables se presentan en formato de hipercubo (elemento n-dimensional análogo a un cubo), para dos periodos de tiempo a estudiar: periodo histórico (1979-2015) y periodo proyectado (2016-2060). Así, como se mencionó anteriormente, estas bases de datos se encuentran para todo el territorio nacional, el que se divide en pixeles de 0,05 x 0,05 [°]de latitud y longitud (o bien 5,6 x 5,6 [km] en la zona de estudio), asociando un valor por píxel mensual para cada variable a lo largo del periodo correspondiente.

Los modelos climatológicos utilizados para este trabajo se diferencian según su sensibilidad climática y se detallan a continuación (DGA, Actualización del Balance Hídrico Nacional, 2017).

- Modelo CSIRO-Mk3-6-0 (Sensibilidad baja extrema).
- Modelo CCSM 4 (Sensibilidad baja moderada).
- Modelo MIROC-ESM (Sensibilidad alta moderada).
- Modelo IPSL-CM5A (Sensibilidad alta extrema).

De esta forma se tienen 4 modelos que representan la gama completa de sensibilidades climáticas, para así tener un estudio completo considerando los distintos escenarios posibles. El modelo hidrológico es previamente calibrado con datos de observaciones (corrida de regionalización) y luego es forzado con los resultados hidroclimatológicos provenientes de los modelos GCM. Entonces, se utilizaron los datos históricos de las estaciones meteorológicas registrados para posteriormente extrapolarlos espacialmente y obtener la distribución por pixeles a lo largo del territorio nacional. Por otra parte, los modelos GCM mantienen parámetros estadísticos como la varianza y el promedio de los datos en el periodo de línea base completo. La denominación de los modelos en el presente trabajo será en base a su primera sigla (CSIRO, CCSM4, MIROC, IPSL y regionalización).

Con el objetivo de trabajar y analizar los datos disponibles, se utiliza el software Matlab, complementando sus características con un conjunto

de bibliotecas de software llamado NetCDF (Network Common Data Form). Esta herramienta contiene múltiples funciones de alta utilidad, dentro de las cuales permite trabajar la información del balance hídrico mencionada anteriormente en términos de vectores y matrices, facilitando de esta forma su manejo y análisis al momento de leer las proyecciones y tendencias. De esta forma, se desarrolla un programa en Matlab en el cual se introduce un archivo de forma (tipo *shape*), correspondiente a la cuenca que se quiere analizar, para filtrar la información de la base de datos considerando únicamente los pixeles contenidos dentro de la superficie de la cuenca. Por consiguiente, se obtienen series temporales asociadas al periodo histórico como periodo futuro para las cuencas que se quiera analizar. En la Figura 2.6 es posible observar la base de datos graficada (con un poco de esfuerzo es notoria la superficie del territorio nacional continental modelada) mientras que en la Figura 2.7 se presenta un ejemplo de recorte de cuenca posterior al procesamiento a través del programa elaborado, donde los pixeles rojos denotan aquellos tomados en cuenta para la obtención de la esorrentía representativa.

Con respecto al balance leído, se incluyen en estas variables temporales y espaciales como latitud, longitud y tiempo, pero a su vez se cuenta con proyecciones de variables hidrometeorológicas como la humedad relativa, precipitación, temperatura, caudal, evapotranspiración y velocidad de viento, entre otras. Con estas, es posible correlacionar la información de diferentes variables para fundamentar posibles explicaciones y teorías a partir de los patrones de comportamiento en las diferentes localidades estudiadas.

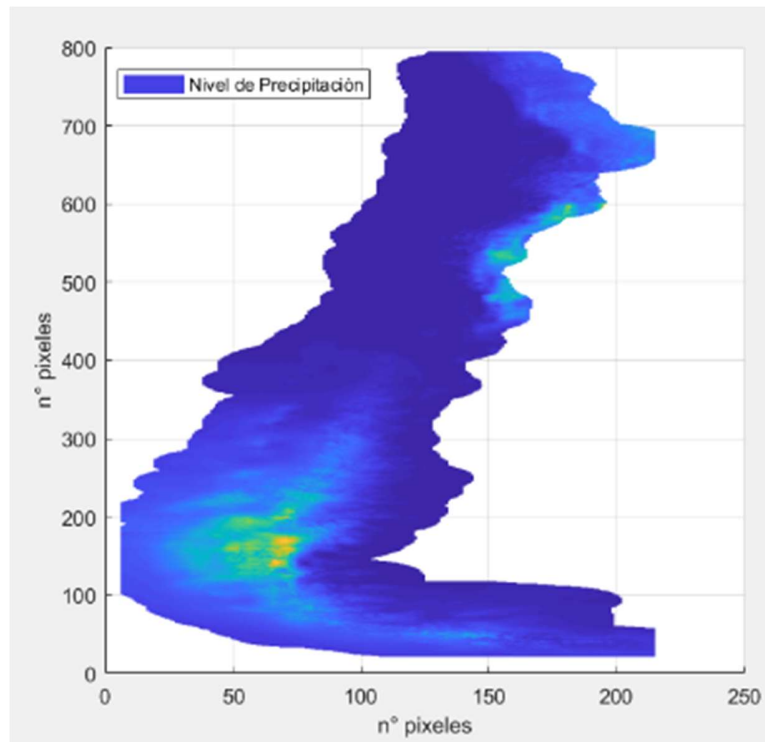


Figura 2.6: Distribución espacial de precipitaciones en el territorio nacional.

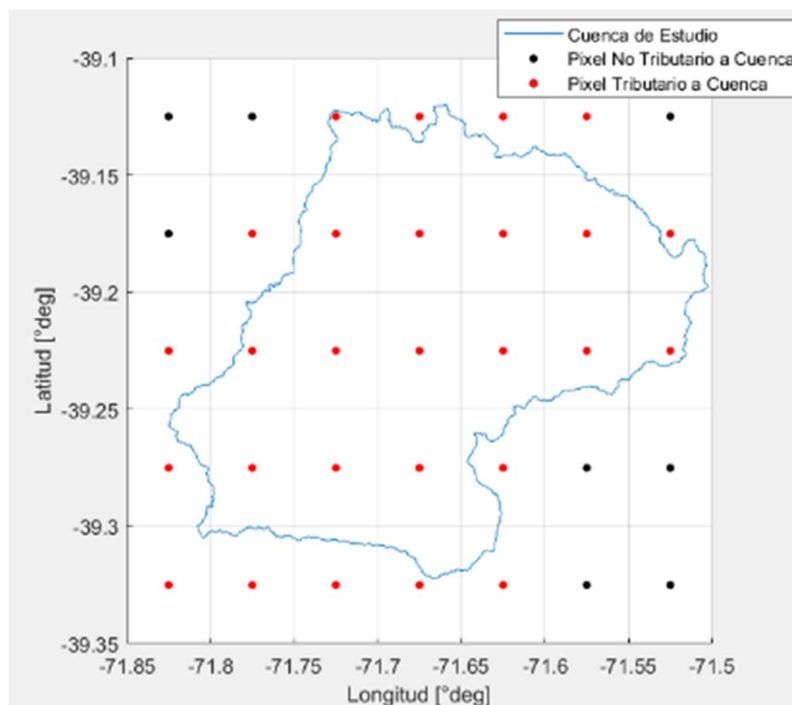


Figura 2.7: Output del recorte realizado por programa en Matlab.

2.5. Balance hídrico

Si bien la disponibilidad de recursos hídricos natural es un componente importante en el trabajo, no representa la totalidad de cada situación, debido a que existen consumos y utilización de agua a lo largo del territorio nacional. Así, se denomina *Balance Hídrico* a la diferencia entre la disponibilidad natural de agua (oferta hídrica) y los consumos de esta (demanda hídrica), ocurriendo una situación de escasez cuando las demandas son superiores a la oferta de la zona que se estudia.

2.5.1. Oferta hídrica

La oferta hídrica o disponibilidad de recursos hídricos viene dada en este caso por los modelos GCM mencionados con anterioridad, teniéndose valores de caudales medios mensuales para cada píxel. De esta forma, como la proyección de los modelos es meramente probabilística, no es correcto utilizar el valor correspondiente al último año del periodo futuro (2060) para cuantificar la disponibilidad en ese momento, por lo cual se debe analizar la serie proyectada completa para obtener resultados consistentes. Una buena manera de realizar esto último es llevando a cabo un análisis de frecuencia de caudales en el periodo futuro. Un análisis de frecuencia consiste básicamente en ordenar en orden decreciente para cada mes los caudales extraídos de los modelos GCM y asignarles probabilidades de excedencia (o no excedencia) según la serie de tiempo que se estudie (Lagos & Mendoza, 2020). Posteriormente, se procede a graficar los caudales en función de la probabilidad de no excedencia calculada junto con diferentes funciones de distribución de probabilidad teóricas, analíticas y continuas que utilizan múltiples parámetros estadísticos de la serie de datos analizada, para así comparar las diferentes curvas teóricas con las curvas empíricas y discretas, definida por el modelo.

En el caso particular de este trabajo, las funciones de distribución de probabilidad utilizadas son las siguientes:

- Distribución Normal.
- Distribución Log-Normal.
- Distribución Gamma.
- Distribución Pearson III.
- Distribución Gumbel.
- Distribución GEV (Generalized Extreme Value).

Para tener una confiabilidad alta de los resultados obtenidos, se trabaja con datos con probabilidad de no excedencia de 0,1 (o 10%), lo cual es equivalente a una probabilidad de excedencia de 90%. Esta decisión corresponde al lineamiento de diseño de captaciones superficiales para agua potable con el objetivo de asegurar el abastecimiento (Diario Oficial, Norma Chilena Oficial NCh 777/1 , 2008). En ese sentido, existen distintas pruebas de bondad de ajuste para escoger la función de distribución que mejor simule a los datos modelados, entre las cuales se utilizan el test de Chi-Cuadrado, test de Kolmogorov-Smirnov y el método gráfico (MOP, Manual de Carreteras Vol.3, sección 2.402.4, 2018). Los 2 test de bondad mencionados toman en cuenta el ajuste completo de probabilidades, sin embargo, para los efectos de este trabajo se prioriza un ajuste gráfico correcto para el sector de probabilidades de excedencia altas (sobre 90%). Así, considerando la curva teórica que mejor ajuste gráficamente la curva modelada en aquel rango y teniendo en cuenta los valores de los test de bondad se escoge mes a mes la distribución analítica que ajuste los datos empíricos de manera óptima. En términos generales, para aplicar los test de bondad se obtiene un parámetro calculado (Chi cuadrado o K-S) y un parámetro límite para ambos. En los dos casos, el cociente entre el parámetro calculado y el límite debe ser inferior a 1 para tener un ajuste aceptable.

Una vez realizado el análisis de frecuencia para todos los meses de forma independiente es posible construir las Curvas de Variación Estacional (MOP, Manual de Normas y Procedimientos para la administración de recursos hídricos, 2008) correspondientes a cada probabilidad de excedencia para cada modelo GCM. Con esto se obtiene la oferta hídrica utilizada en este trabajo. Vale la pena mencionar que se realiza en un primer lugar el análisis de frecuencia para el periodo de línea base (1979-2015) escogiendo la distribución que mejor se correlaciona con el modelo cada mes, para posteriormente realizar el análisis de frecuencia del periodo futuro (2016-2060) utilizando las mismas distribuciones que para la línea base según cada mes, para así evitar posibles errores de sesgo entre distintas distribuciones para la proyección de caudales.

2.5.2. Derechos de aprovechamiento de aguas

Para posibilitar la extracción de agua de los distintos cauces a nivel nacional se formó el Código de Aguas (MOP, 1981) en el cual se separaron la propiedad de la tierra con los derechos de aprovechamiento de las

aguas que la cruzasen (Aranda, 2013). Desde ese momento, se forma un mercado con derechos de aprovechamiento de aguas (DAA), el cual clasifica estos derechos según distintos criterios (MOP, 1981):

- **DAA Superficiales** y **DAA Subterráneos**: Se diferencian según la disposición natural de las aguas. Las aguas superficiales se definen como aquellas que se encuentran a la vista del humano.
- **DAA Consuntivos** y **DAA No Consuntivos**: Se diferencian en el uso que se le puede dar al agua extraída. Los derechos consuntivos pueden ser totalmente consumidos por su titular, mientras que los no consuntivos deben ser restituidos en el cauce del cual fueron extraídos.
- **DAA Permanentes** y **DAA Eventuales**: Se diferencian en la facultad que tiene el titular de extraer el recurso hídrico durante el año. Los derechos permanentes permiten su extracción de manera asegurada en la dotación que corresponda, mientras que para los derechos eventuales sólo está permitido extraerlos cuando existe un caudal sobrante después de extraídos los derechos permanentes y eventuales más antiguos, siempre y cuando circule al menos cierto caudal umbral en el río.
- **DAA Continuos** y **DAA Discontinuos**: Se diferencian en la periodicidad con la cual puede ser extraída el agua. Los derechos continuos pueden ser extraídos durante todo el año en cualquier horario, mientras que los derechos discontinuos están limitados periódicamente, por ejemplo, en los meses de mayor disponibilidad hídrica.

Además, el mercado de derechos de aprovechamiento de aguas está regulado por la Dirección General de Aguas, la cual registra todos DAA en un Catastro Público de Aguas, donde se reseñan los principales atributos de los derechos otorgados, en relación con el tipo de DAA descrito anteriormente. En particular, se detallan para cada derecho el código de expediente, nombre y Rut del solicitante, fecha de registro, tipo de derecho y valor de caudal otorgado, entre otras informaciones.

Para este trabajo, se consideraron únicamente los derechos de aprovechamiento de aguas de tipo consuntivo en la demanda hídrica de cada sistema APR, puesto que representan de mejor forma una demanda del recurso que no retorna a la fuente de origen directamente. Son considerados tanto derechos eventuales como permanentes, continuos y discontinuos para evaluar la situación de mayor demanda en cada caso.

2.5.3. Dotación de agua potable

Por otra parte, los comités de Agua Potable Rural adquieren derechos de aprovechamiento de aguas para el consumo de la población abastecida, la que va en aumento al pasar el tiempo, considerando sobre todo las situaciones en las cuales se amplían los límites de los sistemas APR para abastecer de agua potable a una mayor cantidad de personas que así lo requieren, como también el crecimiento intrínseco de la localidad. Según Estudios de proyección de Demanda de Agua Potable (Sanhueza, 2021), la dotación de agua potable en zonas rurales es menor a 150 [lts/habitante/día], mientras que en zonas urbanas se encuentra entre 150 y 250 [lts/habitante/día]. Así, como se trabaja únicamente con comunidades rurales pequeñas, se asume una dotación de 120 [lts/habitante/día] común para los sistemas APR estudiados en este trabajo.

Por consiguiente, la población de cada localidad rural va en aumento con el tiempo, por lo cual se debe estimar dicho crecimiento según las distintas metodologías de proyección de población existentes. A modo de simplificar el estudio se estima un crecimiento en la población constante de 4% entre cada año, desde el año 2022 hasta 2060, considerando una densidad promedio de 4 habitantes por vivienda, con lo cual es posible estimar el número de arranques en cada sistema APR si se conoce la población o bien de manera inversa. Es importante mencionar que, si se considera dentro del balance hídrico la dotación de agua potable del sistema APR estudiado, no se debe considerar aquel derecho de aprovechamiento que corresponde al comité APR para que este no se repita dentro del balance.

Cabe destacar que los parámetros seleccionados para definir la demanda de agua potable en las localidades estudiadas son consistentes con la información expuesta en el Manual de Proyectos de Agua Potable Rural.

2.5.4. Caudal ecológico

Otro aspecto fundamental que se debe considerar dentro de un balance hídrico es el concepto de caudal ecológico, el cual se define como el mínimo volumen y calidad de agua que se debe mantener en un río para conservar su funcionamiento ecológico y asegurar el ciclo de vida de los organismos que lo habitan (Aguilera & Pouilly, 2012). Así, se aprueba el

reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo (MMA, Reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo, 2012) en el cual se define este caudal como el 20% del caudal medio mensual de la fuente superficial extraída, con tope máximo el 20% del caudal medio anual.

En el caso particular de este trabajo, se adopta la utilización de los caudales medios mensuales con probabilidad de excedencia de 50% para la aplicación del criterio antes mencionado.

2.6. Obras hidráulicas

Como se mencionó anteriormente, los sistemas APR corresponden a un conjunto de obras hidráulicas que cumplen el objetivo de abastecer a una comunidad rural del servicio básico esencial. Así, se definen las distintas categorías y tipos de obras hidráulicas asociadas a esta función.

El sistema de tratamiento del agua extraída de la fuente debe ser un componente esencial del sistema APR y debe cumplir con la normativa de agua potable vigente (Diario Oficial, Norma Chilena Oficial NCh 409/1. Of 2005, 1984). Así pues, se establece en los sistemas APR la necesidad de un sistema de cloración que depende del caudal que se bombea en el sistema, pudiendo incorporar sistemas en base a hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio o incluso gas cloro, tomando las respectivas medidas de seguridad que requieren (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019).

Por otra parte, en relación con la regulación y almacenamiento del agua potable en el sistema APR, se deben considerar estanques de regulación para compensar la producción máxima diaria y el consumo máximo diario, teniendo en cuenta una reserva considerable constante. Así, para determinar el volumen del estanque se debe considerar la demanda en el día de máximo consumo, la cual se obtiene a través de la dotación y utilizando una curva de conducción primaria (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019). También es necesario considerar un volumen de incendio, dependiendo del tipo de sistema APR que se evalúe, el que debe ser incluido en el cálculo del volumen final del estanque.

En términos de los materiales que conforman los estanques, se tienen 2 tipos clásicos definidos por la DOH: estanques de hormigón armado y estanques metálicos. A su vez, la disposición del estanque asociado al sistema APR puede ser en elevación, en donde la altura de este depende

de la presión y caudal que se requiera en el sistema, o bien un estanque semienterrado con un sistema de presurización (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019).

Para la distribución del agua, se debe considerar el máximo caudal asociado al consumo máximo horario para una dotación proyectada a 20 años. Con respecto a la presión de servicio, se trabaja con un rango que considera como mínimo 15 metros de columna de agua (m.c.a) asociada a la presión dinámica y un máximo de 70 [m.c.a] asociada a la presión estática (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019). En torno a las tuberías de distribución, se debe considerar un diámetro mínimo mencionado en la normativa actual (Diario Oficial, Norma Chilena Oficial: NCh 691. Of 98, 1978), contemplando en grandes rasgos un diámetro mínimo de 110 mm, modificable según las ramificaciones que tenga el trazado (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019). Para los materiales de las tuberías, aquellas que se encuentren expuestas a la intemperie deben fabricarse de acero galvanizado, acero al carbono o bien HDPE (polietileno de alta densidad) (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019)

Por otra parte, ciertos sistemas APR son abastecidos mediante pozos de bombeo, los cuales pueden ser diferenciados entre sí según el método de perforación, profundidad, diámetro y materiales empleados en su construcción. Los métodos de perforación que se emplean en Chile son: perforación a percusión, perforación a rotación y perforación a rotopercusión (CNR, 2000), en donde los primeros 2 mencionados son más sencillos y de menor costo, mientras que el método a rotopercusión combina ambos métodos simples y se vuelve más costoso.

2.7. Evaluación económica

Con el objetivo de evaluar las medidas de mitigación a proponer, se realiza un análisis de costos asociados a las actividades necesarias para suplir la demanda de agua potable en los sistemas APR estudiados. Así, se clasifican los costos en 2 categorías: **CAPEX** y **OPEX**. Los costos CAPEX (*Capital Expenditure*) corresponden a los gastos en capital o bien la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto. Generalmente, el costo de inversión se lleva a cabo antes de la realización del proyecto, ya que corresponde a los bienes necesarios para ponerlo en marcha.

Por otra parte, se tienen los costos OPEX (*Operational Expenditures*) que son asociados a las operaciones necesarias para llevar a cabo el

proyecto, considerando la mantención de este también. De esta forma, los costos OPEX se desarrollan durante la duración completa del proyecto, por lo cual dependen directamente de la variable temporal asociada al proyecto que se evalué.

Así, los costos de operación asociados a un sistema APR se subdividen en al menos las siguientes categorías (DOH D. d., Manual de Proyectos de Agua Potable Rural, 2019)

- Costos de Administración: Asociados a los gastos que conllevan llevar los libros contables del sistema, hacer la medición y cobros del agua consumida mensualmente, trámites y viáticos, entre otros.
- Costos de Operación: Están asociados al consumo eléctrico del sistema APR al igual que al consumo de productos químicos para su mantención y desinfección. Además, existe remuneración a cierto personal y un muestreo y análisis requeridos por la Autoridad Sanitaria.
- Costos de Mantenimiento: Corresponden a las mantenciones preventivas y correcciones de fallas o problemas en el sistema APR con el objetivo de tener un funcionamiento óptimo.
- Costos de Reposición: Requerido para efectuar la renovación de equipos, redes, medidores e infraestructura en general del sistema.

Finalmente, se utilizan parámetros financieros para comparar las propuestas, como son el Valor Actual Neto (VAN) y Costo Anual Equivalente (CAE) asociados a cada medida de mitigación, para tener un análisis comparativo de mayor precisión y especificación. En este sentido, la evaluación económica de la operación de cada alternativa proyectada a 20 años se lleva al valor actual (año 0) utilizando una tasa de descuento de 6% anual. Se termina eligiendo la alternativa que represente un menor valor en estos parámetros, comparando también los valores unitarios por arranque según las distintas poblaciones.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE TRABAJO

Como primera actividad, se seleccionan 5 sistemas APR de interés en la región de la Araucanía, distribuidos a lo largo y ancho de la región. Así, se escogen dos localidades en la zona costera, una en la zona central y dos en la zona cordillerana de esta región, para tener una representatividad completa de la zona de estudio. Además, se requiere estudiar con detalle las fuentes de abastecimiento utilizadas en los sistemas APR seleccionados al igual que las posibles nuevas fuentes de extracción del recurso hídrico, para que el trabajo efectuado sea consecuente con el abastecimiento y disponibilidades del APR.

Se seleccionan 4 cuencas controladas, las cuales se utilizan como representativas de los sistemas APR seleccionados antes. Así, se escogen dos cuencas cordilleranas, una cuenca central y una cuenca costera para ser utilizadas, y se extrae de la plataforma CAMELS-CL (CAMELS-CL) el archivo de forma que define a cada cuenca. Cabe recalcar que únicamente se selecciona una cuenca controlada en el sector costero de la región debido a la falta de información y mediciones en las otras cuencas similares.

Después de definir las cuencas controladas es necesario definir cuencas correspondientes a cada sistema APR en particular, puesto que en múltiples casos la disponibilidad hídrica de la cuenca controlada no representa la situación efectiva del sistema APR, o bien no existe una cuenca controlada con información suficientemente completa como para utilizarla. Así, se consulta la información pública disponible en el servidor *Earthdata* proporcionado por la NASA en el cual es posible extraer imágenes satelitales con información de elevación en archivos matriciales tipo ráster llamados DEM (*Digital Elevation Model*). Con la ayuda del programa GRASS, se define, a partir de la información de las imágenes satelitales y el punto de salida, la cuenca correspondiente al sistema APR evaluado. Idealmente, las cuencas obtenidas después de este procedimiento deberían ser, en cada caso, una sub-cuenca de la cuenca controlada definida por la estación fluviométrica de la DGA extraída a partir de la plataforma CAMELS-CL. Sin embargo, también puede ocurrir que la cuenca definida para el sistema APR no coincida con la cuenca controlada que la representa, como es el caso de las cuencas costeras debido a la falta de información de cuencas controladas en esos casos. También puede ocurrir que una cuenca no controlada de un sistema APR

tenga mayores similitudes a una cuenca controlada aledaña pero que no sea parte de esta.

Luego, se realiza la extracción de información para cada cuenca controlada seleccionada. Esta tarea se resume en obtener la serie de caudales medios mensuales de todas las cuencas para los 4 modelos considerados en el Balance Hídrico Fase III y para la corrida de regionalización en las 2 series de tiempo: la línea base (1979-2015) y la del periodo futuro (2016-2060). En este punto, se debe notar que el número de años históricos y futuro es el mismo, a fin de evitar el sesgo por el tamaño de la muestra. A su vez, se extrae la información meteorológica en las cuencas (temperatura, humedad relativa y precipitación) para caracterizar cada cuenca y así establecer ciertas relaciones entre las variables meteorológicas extraídas para ver concordancias entre los diferentes modelos. Los datos que se utilizan como representativos de la cuenca corresponden a un promedio de los datos correspondientes a los pixeles filtrados por el programa, logrando la representatividad espacial de esta.

Se efectúa posteriormente el cálculo de la oferta hídrica de las cuencas controladas. Así, dicha oferta viene dada por las CVE, que grafican la disponibilidad de caudales en los distintos meses del año. Para obtener estos resultados, es necesario realizar un análisis de frecuencia de las series de caudales extraídas para el promedio de los pixeles de la cuenca. Para efectos de este trabajo se considera únicamente la probabilidad de excedencia de un 90% para las proyecciones y estimaciones de caudales. Luego, a través de pruebas estadísticas como Chi cuadrado y Kolmogorov-Smirnov (K-S), complementadas con el análisis gráfico de la concordancia entre el modelo y los datos del análisis de frecuencia, se escoge la distribución probabilística que mejor modela la información extraída de caudales. Esta elección es independiente para cada mes del año hidrológico. Una vez escogida la distribución de mejor ajuste en cada mes, se grafican los datos correspondientes a dicha distribución, con una probabilidad de excedencia del 90% y se obtiene la Curva de Variación Estacional requerida.

En forma paralela e independiente del procedimiento anterior, se extraen los datos de caudales medios mensuales de las cuencas controladas disponibles. A esta serie de caudales históricos se le aplica el mismo análisis de frecuencia que a las series de caudales extraídas de las bases de datos correspondientes a los modelos GCM y a la corrida de Regionalización, obteniéndose finalmente 6 CVE para cada cuenca: 4

curvas asociadas a cada GCM, una curva correspondiente a la corrida de Regionalización y una curva correspondiente a los datos observados en la estación fluviométrica.

A partir de esta información es posible comparar, en términos estadísticos, los datos históricos observados respecto a los modelados con los GCMs y la *Corrida de Regionalización* para evaluar potenciales diferencias y similitudes entre ellas. Así, para asegurar la coherencia entre los modelos GCM, el modelo regionalización y la serie de datos observada en la estación fluviométrica, se propone la estimación de coeficientes de corrección para el periodo histórico, con el objetivo de forzar la coherencia de las simulaciones respecto a los caudales ocurridos en la cuenca controlada. Lo anterior, a modo de proyectar caudales futuros con menor incertidumbre y con una señal hidrológica coherente en el periodo histórico que permita corregir sesgos sistemáticos en las proyecciones de cambio hidrológico.

Para definir la corrección se utilizan 3 factores de forzamiento, con el objetivo principal de replicar la serie de caudales históricos observada a partir de los caudales modelados. En términos prácticos, la aplicación de esta corrección sugiere un comportamiento similar en el periodo histórico y proyectado en torno a las diferencias entre los caudales modelados y observados, pudiendo heredarse así los factores del periodo histórico para corregir los caudales futuros.

- El factor n°1 corresponde al valor que se obtiene con el cociente del caudal medio anual modelado en la corrida de regionalización y el caudal medio anual observado en la estación fluviométrica. En otras palabras, el primer factor lleva el caudal del balance hídrico al caudal que se presenta realmente en el periodo histórico. De esta manera, para aquellas cuencas no controladas (sistemas APR) este factor de forzamiento es heredado de la cuenca controlada similar correspondiente.
- El factor n°2 está definido como el coeficiente de Pardé de la serie de caudales observados en las cuencas controladas. Este coeficiente es calculado para todos los meses del año hidrológico, y es heredado por las cuencas no controladas de la misma manera que el factor n°1.
- Por último, el factor n°3 corresponde al cociente entre los caudales modelados del periodo proyectado y el periodo histórico, y representa en términos generales el efecto del

cambio climático en el valor del caudal modelado. Este factor es calculado mensualmente y varía según los diferentes modelos GCM evaluados.

La corrección propuesta propone obtener series de caudales "observados" históricos para las cuencas no controladas, utilizando coeficientes de Pardé mensuales para evitar posibles errores en el cambio de estacionalidad entre casos controlados y no controlados. Así, el caudal "observado" calculado viene dado por la multiplicación del caudal medio anual de la corrida regionalización con el valor del coeficiente de Pardé (transferido de la cuenca controlada similar) del mes correspondiente y el valor del factor nº1 anual igualmente transferido de la cuenca similar controlada correspondiente. Es posible con esto obtener una serie de caudales "observados" históricos para las cuencas no controladas, para después aplicarle el factor nº3 descrito anteriormente para cada modelo y así obtener la serie de caudales proyectados corregidos.

Así se obtiene la oferta hídrica corregida para cada cuenca asociada a los sistemas APR estudiados.

Para la demanda asociada al balance hídrico, se utiliza una base de datos pública proporcionada por la Dirección General de Aguas sobre derechos de aprovechamiento de aguas (DDAA) georreferenciados en la región, tanto superficiales como subterráneos. Así, se extraen aquellos DAA que pertenezcan a la cuenca estudiada, considerando tanto los derechos consuntivos como no consuntivos, aquellos permanentes y eventuales que son continuos en el año o bien discontinuos en los diferentes meses. También se define el caudal ecológico de los ríos presentes en las cuencas estudiadas, para así considerarlo dentro de la demanda total, al igual que la dotación de agua potable necesaria en los sistemas APR con su respectiva proyección en el periodo futuro. Una vez obtenida la demanda y la oferta hídrica en las cuencas, es posible realizar el balance oferta-demanda a nivel mensual para cada una de ellas. El balance hídrico para cada sistema APR puede llevarse a cabo con la información histórica y con la información proyectada, para así ver las diferencias entre ambas situaciones.

Con el resultado de los balances hídricos, es posible cuantificar el déficit en la disponibilidad de agua en el futuro, el cual será modelado de manera mensual debido a la necesidad que se presenta en ciertos meses del año a causa de la baja precipitación o bajo caudal proveniente del deshielo según indique el régimen hidrológico característico de la cuenca.

Además, existen 2 casos para definir la necesidad hídrica de los sistemas APR que presenten un déficit en el estudio:

- Caso 1: corresponde a un déficit que se reparte entre todos los usuarios de agua de la cuenca, que es aquél en el cual se reparte proporcionalmente el agua disponible entre todos los consumidores según sus derechos de aprovechamiento pertenecientes, llevando a cabo un prorrateo. En este caso, no existiría una necesidad de abastecer el 100% de la demanda del APR en estudio si no que se debería abastecer el caudal faltante.
- Caso 2: caso aplicado en el presente estudio, corresponde a una situación real que se aplica dentro de las cuencas no controladas y sin asociación de regantes, en la cual aquellos derechos de aprovechamiento que extraen el recurso más aguas arriba le "ganan" a aquellos que extraen más aguas abajo, por lo cual el déficit de agua en el sistema APR sería total en caso de haber un déficit en la cuenca, debido a que esta última se define en torno a la localización del APR.

Una vez cuantificado el balance hídrico e identificada la escasez en la demanda de agua potable, se proponen diferentes medidas de mitigación para resolver las problemáticas presentadas en cada sistema APR. Así, se proponen distintas alternativas de obras hidráulicas como pozos o captaciones superficiales desde otros cauces (trasvasije), o bien soluciones alternativas como camiones de aljibe, para lograr satisfacer la demanda faltante proyectada. Como se mencionó anteriormente, en cada caso se define la factibilidad de las alternativas posibles en base a las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del sector de estudio. De esta forma, se determinan características de diseño asociadas a cada medida propuesta (por ejemplo, la profundidad de un pozo o el trazado de la tubería desde la captación de agua) necesarias para llevar a cabo la medida de mitigación evaluada, considerando en todos los casos una seguridad del 100% de abastecimiento del déficit hídrico presentado en cada caso.

Es posible a su vez determinar un índice de vulnerabilidad para los sistemas APR estudiados, el cual es útil para focalizar una toma de decisiones en un futuro, y también encontrar una distribución o tendencia en la vulnerabilidad según la localización y características en común de las cuencas que contienen los sistemas APR. Este índice de vulnerabilidad se define en torno a la disminución de la disponibilidad de recursos

hídricos, clasificando los 5 sistemas APR dentro de 3 rangos de vulnerabilidad: baja, media y alta.

Para cada medida propuesta se realiza una evaluación económica, la cual comienza con el cálculo de los costos asociados, que se distribuyen en CAPEX y OPEX. Así, se desglosan el CAPEX, o bien gasto capital fijo, y el OPEX o gasto operacional según el plan de mitigación a analizar. Además, para cada alternativa propuesta se calculan el VAN (Valor Actual Neto) y el CAE (Costo Anual Equivalente), indicadores económicos para analizar la factibilidad de cada propuesta. Se concluye el trabajo presentando la medida de mitigación óptima en cada caso.

CAPITULO 4: MEMORIA DE CÁLCULO

Se presentan en este capítulo las principales fórmulas y modelos utilizados en el desarrollo del trabajo, en las ecuaciones 1 a 11.

1. Análisis de frecuencia

Para la obtención de las Curvas de Variación Estacional se utilizaron 2 pruebas de bondad para seleccionar la distribución que mejor modela los datos dentro de las propuestas: El test Chi cuadrado (χ^2) (ecuación 1) y el test de Kolmogorov-Smirnov (ecuación 2).

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\text{observada}_i - \text{teórica}_i)^2}{\text{teórica}_i}; \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

observada_i : Caudal modelado de probabilidad de excedencia i [m^3/s].

teórica_i : Caudal de la distribución probabilística con probabilidad de excedencia i [m^3/s].

$$D_n = \max(F_n(x) - F(x)); F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1_{(-\infty, n)}(X_i), \text{ con } X_i = \begin{cases} 1; & \text{si } X_i \leq x \\ 0; & \sim \end{cases} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

F_n : Distribución probabilística testeada.

n : Tamaño de la muestra.

2. Corrección de modelos GCM

La fórmula de corrección utilizada para los modelos GCM para un mes i (ecuación 3), coeficiente de Pardé (ecuación 4) y factor de corrección de cambio climático f_3 (ecuación 5).

$$GCM_{i\text{corregido}} = \overline{BH}_{APR} \cdot f_{2\text{Anual heredado}} \cdot \text{Pardé}_i \cdot f_3; \text{ (Ecuación 3)}$$

$$\text{Pardé}_i = \frac{\text{Caudal}_{\text{Obs}_i\text{heredado}}}{\text{Caudal}_{\text{Obs}_{\text{heredado}}}}; \text{ (Ecuación 4)}$$

$$f_3 = \begin{cases} 1; & \text{si es período línea base} \\ \frac{GCM_{ifuturo}}{GCM_{ihistórico}}; & \sim \end{cases}; \quad (Ecuación 5)$$

Donde:

\overline{BH}_{APR} : Caudal promedio anual del balance hídrico en el APR [m³/s].

$Caudal_{Obs_{iheredado}}$: Caudal observado en la cuenca controlada similar para el mes i [m³/s].

$GCM_{ifuturo}$: Caudal modelado con el GCM respectivo en el periodo proyectado [m³/s].

$GCM_{ihistórico}$: Caudal modelado con el GCM respectivo en el periodo línea base [m³/s].

3. Crecimiento poblacional y proyección de arranques

Se utilizó una tasa de crecimiento poblacional anual constante de 4% (ecuación 6), mientras que para el crecimiento de los arranques por localidad se asumió un aumento correspondiente al 50% del crecimiento poblacional (ecuación 7).

$$Pob_{proyectada} = 1.04^n \cdot Pob_{inicial}; \quad (Ecuación 6)$$

$$N^{\circ}arranques_{proyectado} = N^{\circ}arranques_{inicial} \cdot \left(1 + \frac{\left(\frac{Pob_{proyectada} - Pob_{inicial}}{Pob_{inicial}} \right)}{2} \right);$$

(Ecuación 7)

Donde:

$Pob_{proyectada}$: Población proyectada a 2060 [habitantes].

n : Periodo proyectado [años].

$Pob_{inicial}$: Población actual de la localidad [habitantes].

4. Caudal ecológico

El caudal ecológico se calcula con caudales de una probabilidad de excedencia del 50% para cada mes i considerando 2 casos (ecuación 8):

$$Q_{eco_i} = \min \begin{cases} 0.2 \cdot Q_{"Obs" calculado_i}; \\ 0.2 \cdot Q_{medio\ anual} \end{cases}; \quad (Ecuación 8)$$

Donde:

Q_{eco_i} : Caudal ecológico para el mes i [m^3/s].

$Q_{"Obs" calculado}$: Caudal calculado con la corrección planteada con 50% de probabilidad de excedencia [m^3/s].

5. Balance hídrico

El balance hídrico planteado en este trabajo se resume en una diferencia entre la oferta y demanda hídrica (ecuación 9).

$$B_h = Oferta - Demanda = Q_{proy90\%} - Q_{eco} - Demanda_{Agua Potable} - DDAA^*; \quad (Ecuación 9)$$

Donde:

$Q_{proy90\%}$: Caudal disponible con un 90% de probabilidad de excedencia [m^3/s].

Q_{eco} : Caudal ecológico [m^3/s].

$DDAA$: Derechos de aprovechamiento de aguas de la cuenca estudiada [m^3/s].

**: No se consideran los derechos de aprovechamiento de aguas correspondientes al sistema APR en estudio para no considerarlo nuevamente en la demanda de agua potable.*

6. Costos e Indicadores económicos

Los costos operacionales (OPEX) y los costos de inversión (CAPEX) se traducen y analizan a partir de los indicadores de Valor Actual Neto (VAN) (ecuación 10) y el Costo Anual Equivalente (CAE) (ecuación 11) de las medidas propuestas.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t}; \quad (Ecuación 10)$$

$$CAE = VAN \cdot FRC = VAN \cdot \frac{tasa_{int} \cdot (1+tasa_{int})^n}{(1+tasa_{int})^{n-1}}; \quad (Ecuación 11)$$

Donde:

I_0 : Inversión inicial necesaria [CLP].

n : Horizonte temporal de evaluación [años].

F_t : Flujo anual [CLP].

k : Tasa de interés [-].

CAPITULO 5: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Región de la Araucanía se ubica entre las latitudes $39,7^{\circ}$ S y $40,6^{\circ}$ S en la Zona Sur del país y se caracteriza por tener un clima templado oceánico lluvioso (BCN B. N., 2021). Las precipitaciones varían entre 1.500 [mm] y 2.500 [mm] anuales y se tiene una temperatura mínima promedio de 2° C y máxima de 23° C (BCN, 2021). En la Figura 5.1 se observa la sección de la carta hidrogeológica del territorio nacional (DGA, Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986) correspondiente a la Región de la Araucanía, en la cual se observa una muy baja a nula importancia hidrogeológica en las zonas costera y de cordillera con formaciones de rocas volcánicas y metamórficas, mientras que en la zona central se presenta una importancia hidrogeológica alta a media, con una productividad de los pozos alta a media.

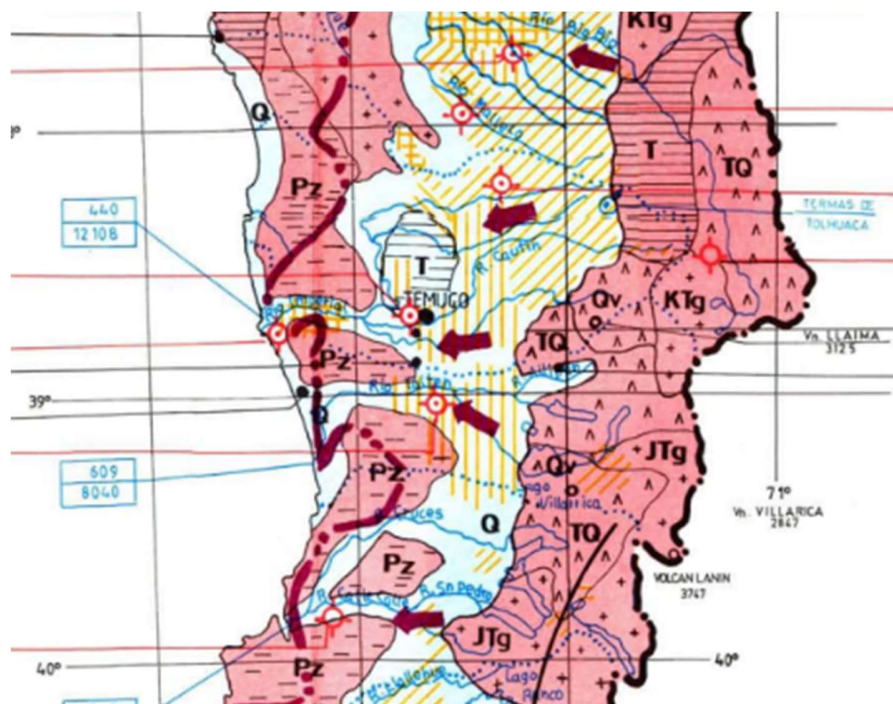


Figura 5.1: Mapa hidrogeológico de la Región de la Araucanía.
Fuente: (DGA, Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986).

5.1. APR de Curarrehue

La localidad de Curarrehue se ubica a unos 36 kilómetros hacia la cordillera desde la ciudad de Pucón, con coordenadas geográficas aproximadas de 39°21' Latitud Sur y 71°35' Longitud Oeste. En la Figura 5.3 se observa la ubicación de la localidad de Curarrehue.

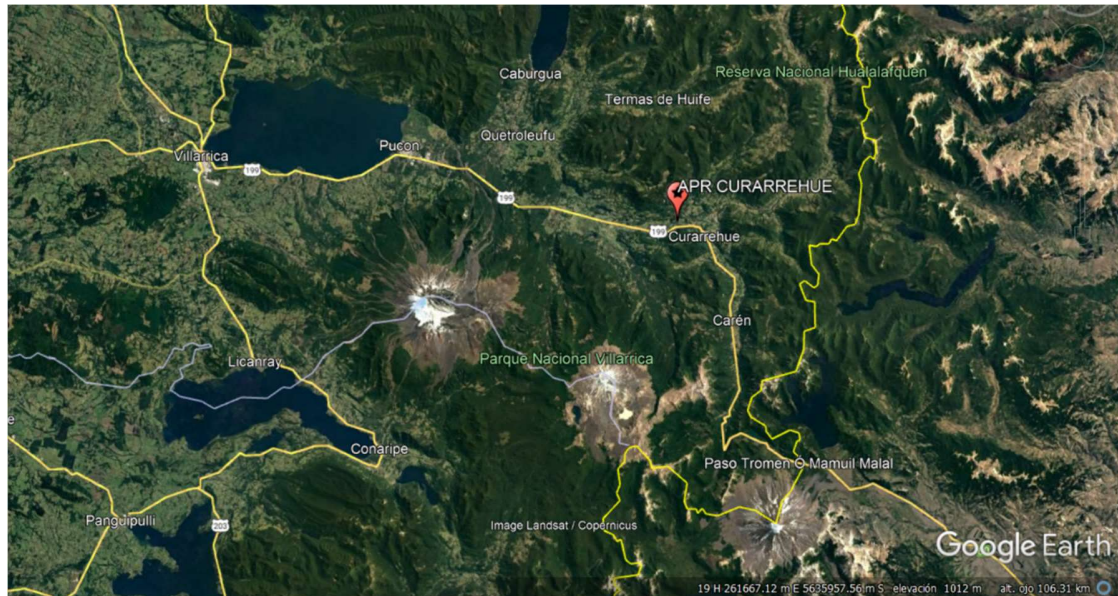


Figura 5.3: Localización sistema APR de Curarrehue. Fuente: Google Earth, 2022.

Esta comunidad se encuentra en una zona con un clima Templado Lluvioso con Influencia Mediterránea, una temperatura media cercana a los 12 [°C] y una precipitación media anual aproximada de 2.500 [mm]. Por otra parte, la Carta Hidrogeológica (DGA, Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986) muestra la ubicación de la localidad de Curarrehue entre dos sectores hidrogeológicos diferentes, en los cuales la importancia hidrogeológica es media y baja/nula respectivamente, por lo que existen zonas posibles para la extracción de aguas subterráneas. Adicionalmente, existen captaciones superficiales en los cuerpos de agua aledaños al Río Trancura que presenta su cauce en la zona.

En esta localidad existe un sistema APR que contabiliza un total de 761 beneficiarios distribuidos en 190 arranques, en donde se tienen 3 fuentes de agua utilizables. La primera fuente de agua corresponde a una captación superficial de un Estero Sin Nombre, en la cual se tienen DAA de 10 [l/s] del tipo Permanente/Consuntivo/Continuo, con Expediente NR-0902-971. La segunda fuente corresponde a un pozo profundo a orillas

del Río Trancura, con DAA de 3 [l/s] del tipo Permanente/Consuntivo/Continuo y la tercera fuente corresponde a otra captación superficial del Estero Llafán con DAA de 10 [l/s] del tipo Eventual/Consuntivo/Continuo (Geolambda, Estudio Hidrogeológico APR Curarrehue, 2021). Se cuenta con un estanque de hormigón semienterrado de 100 [m³] de volumen al cual le llega agua después de pasar por un filtro y un sistema de cloración.

La cuenca controlada que contiene al sistema APR corresponde a la cuenca definida por la estación fluviométrica Río Trancura en Curarrehue, numerada por la DGA, Código BNA 9412001. A su vez, la cuenca que define el mismo sistema APR prácticamente coincide con la cuenca mencionada anteriormente, puesto que la ubicación del sistema APR de Curarrehue corresponde con la del punto de salida de la cuenca Río Trancura en Curarrehue. Las características principales de esta cuenca son un área de 357 [km²], precipitación media anual de 3.251 [mm] y un índice de aridez de 0.3, con cotas que van desde los 382 [m.s.n.m] hasta los 3.746 [m.s.n.m] (CAMELS-CL). Así, esta cuenca corresponde a una zona cordillerana, observado por su cota máxima y su localización, la que se retrata en la Figura 5.4.

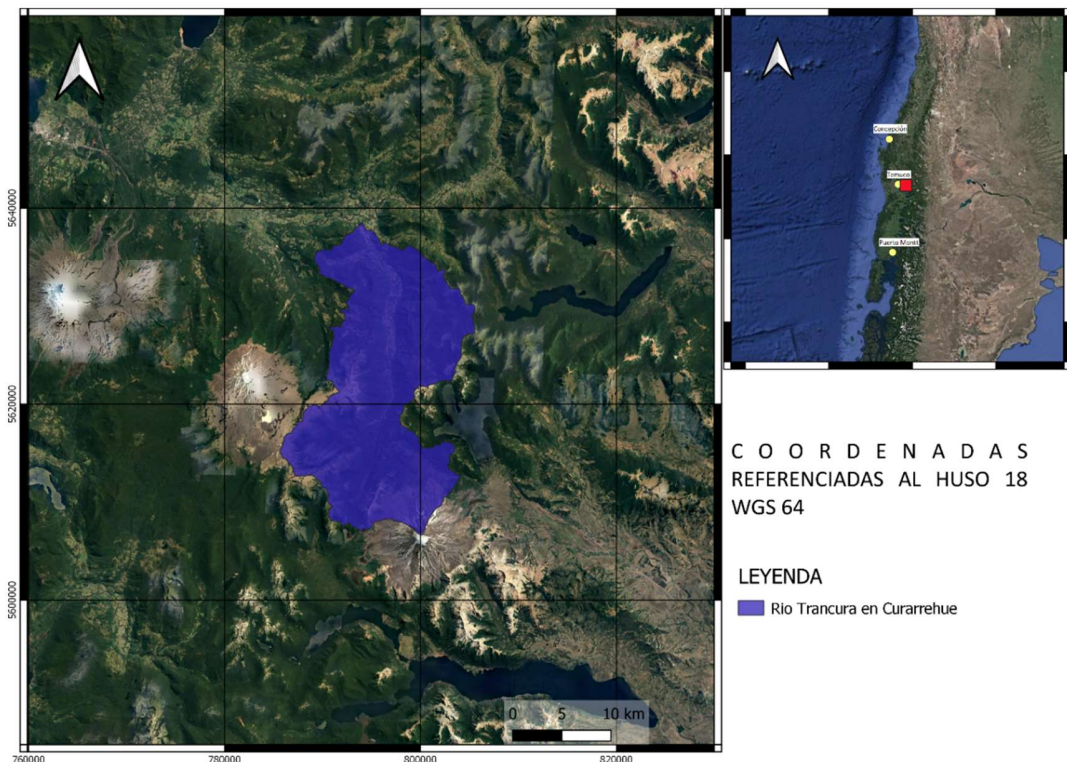
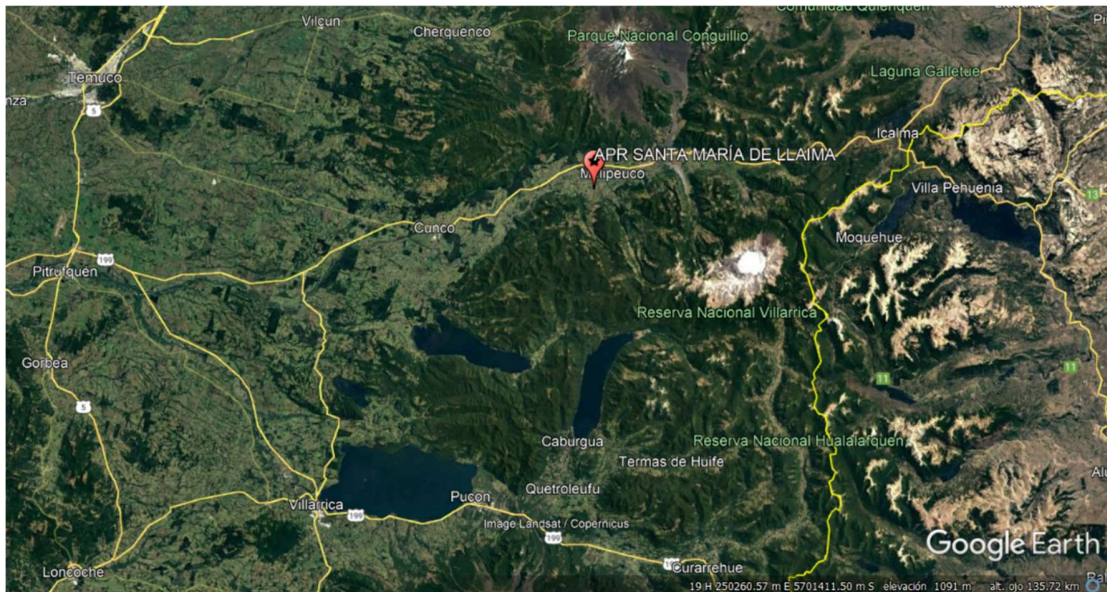


Figura 5.4: Localización cuenca Río Trancura en Curarrehue.

5.2. APR Santa María de Llaima

La localidad de Santa María de Llaima se ubica aproximadamente a 15 km al oriente de Cunco, región de Melipeuco. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 38°52' Latitud Sur y 71°47' Longitud Oeste. En la Figura 5.5 se presenta la ubicación de la localidad de Santa María de Llaima.



*Figura 5.5: Localización sistema APR de Santa María de Llaima.
Fuente: Google Earth, 2022.*

Esta comunidad se encuentra en una zona con un clima Templado Frío Lluvioso, una temperatura media cercana a los 11 [°C] y una precipitación media anual varía entre los 4.500 y 5.000 [mm]. Por otra parte, la Carta Hidrogeológica (DGA, Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986) muestra que la ubicación de la localidad de Santa María de Llaima está en un sector de importancia hidrogeológica alta a media, por lo que la extracción de aguas subterráneas es una fuente de abastecimiento importante en la zona. Adicionalmente, existen captaciones superficiales en los cuerpos de agua aledaños al Rio Allipén que presenta su cauce en la zona.

Esta localidad tiene un sistema APR que cuenta con 2 captaciones superficiales que rellenan un estanque semienterrado de 100 [m³] con previo paso por tratamiento de cloración y filtro, para abastecer a una comunidad de más de 1.800 beneficiarios distribuidos en 465 arranques. Además, se adquirieron DAA superficiales equivalentes a 10 [l/s] del tipo Consuntivo/Permanente/Continuo en el Estero Palainilahue, cauce

diferente a las captaciones del sistema actuales, por lo que se propone utilizarlo como fuente de abastecimiento del sistema APR (Sayca Ingeniería, Estudio Hidrogeológico localidad Santa María de Llaima, 2021).

La cuenca controlada a la que pertenece el sistema APR de Santa María de Llaima corresponde a la definida por la estación Río Allipén en Los Laureles Código BNA 9404001. Si bien geográficamente el sistema APR se encuentra dentro de esta cuenca, tiene una ubicación cercana al punto de salida de la cuenca Río Allipén en Melipeuco Código BNA 9402001, por lo cual se utiliza esta última para relacionar las características de la cuenca para el sistema APR de Putabla. Así, se obtiene una cuenca para el APR Putabla colindante a la cuenca Río Allipén en Melipeuco, y sus características principales son un área de 23,8 [km², con cotas que van desde los 879 [m.s.n.m] hasta los 1.887 [m.s.n.m]. Así, esta cuenca corresponde a una zona más bien cordillerana, observado por su cota máxima y su localización, la que se retrata en las Figuras 5.6 y 5.7.

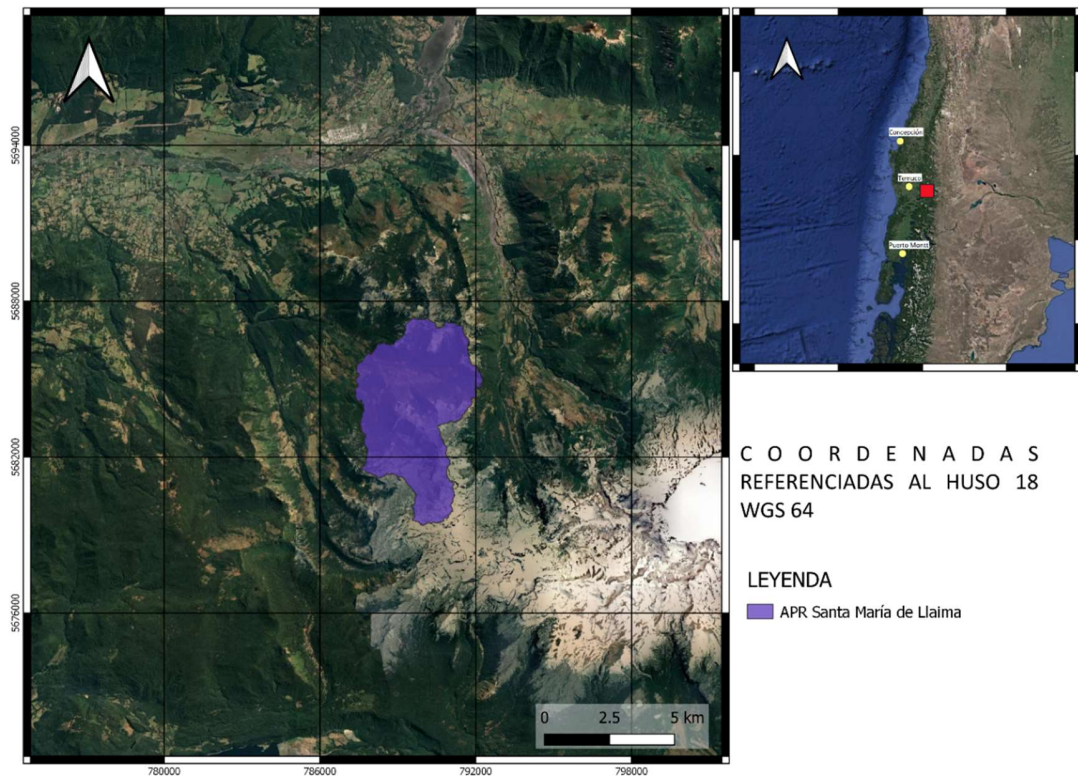


Figura 5.6: Localización cuenca del sistema APR Santa María de Llaima.

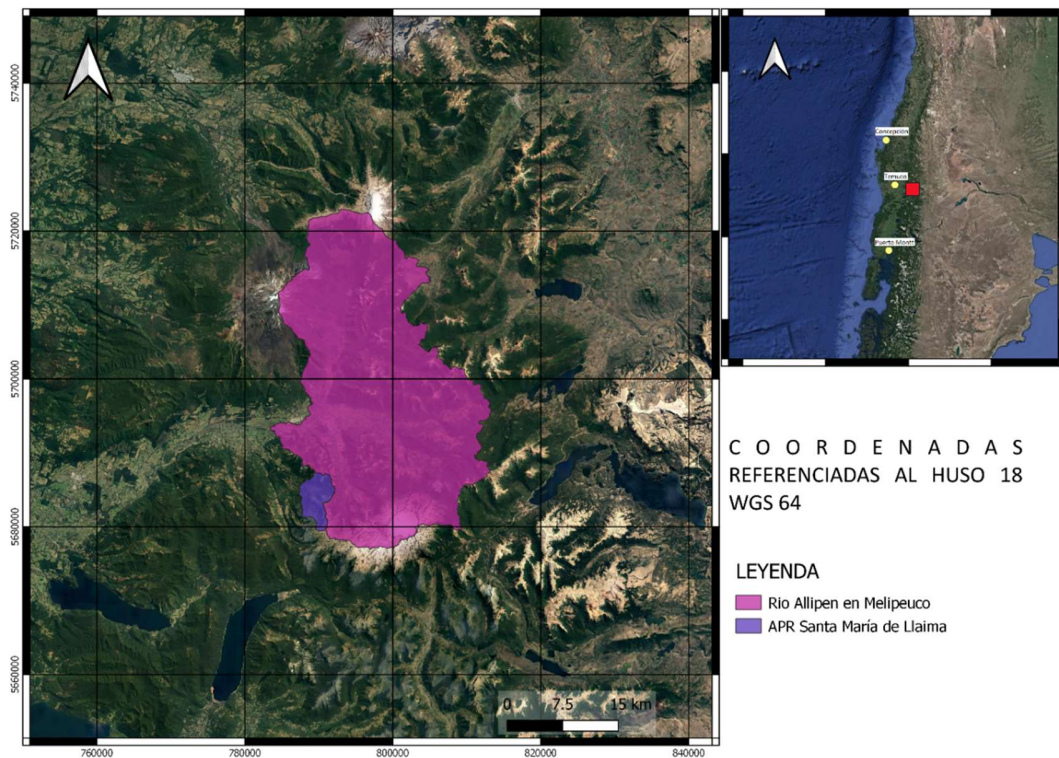


Figura 5.7: Localización cuenca del sistema APR Santa María de Llaima y Rio Allipén en Melipeuco.

5.3. APR de Putbla

La localidad de Putbla se encuentra colindante al sector Norte de la ciudad de Licanray, a unos 22 kilómetros de Villarrica, con coordenadas geográficas aproximadas de 39°28' Latitud Sur y 72°10' Longitud Oeste. En la Figura 5.8 se presenta la ubicación de la localidad de Putbla.

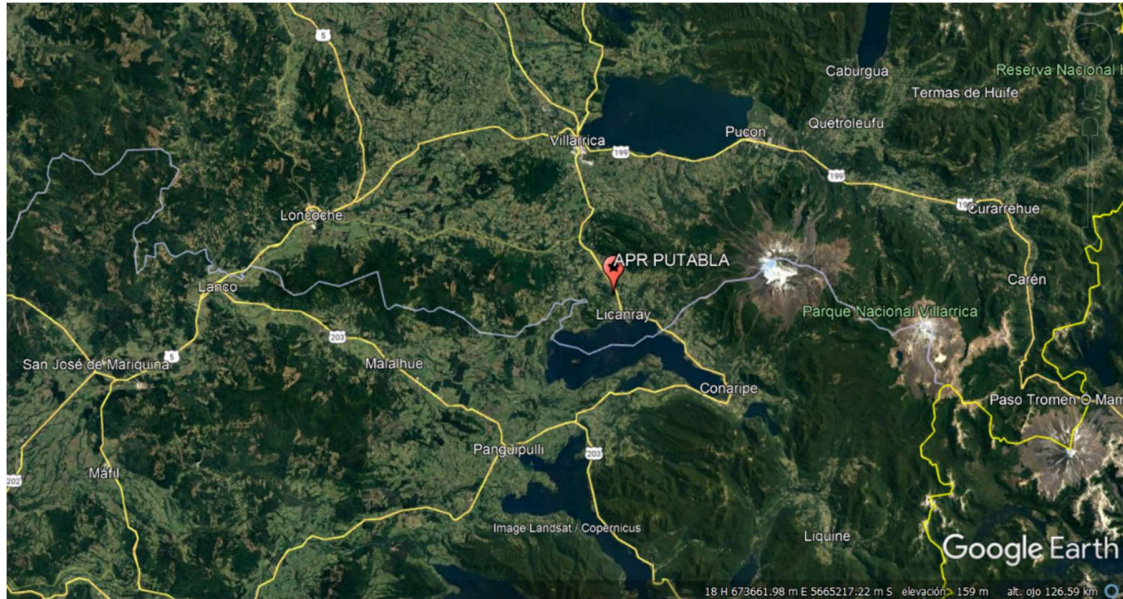


Figura 5.8: Localización sistema APR de Putabla. Fuente: Google Earth, 2022.

Esta comunidad se encuentra en una zona con un clima Templado Frío Lluvioso, una temperatura media cercana a los 11 [°C] y una precipitación media anual aproximada de 2.300 [mm]. Por otra parte, la Carta Hidrogeológica (DGA, Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986) muestra que la ubicación de la localidad de Putabla está en un sector de importancia hidrogeológica alta a media, por lo que la extracción de aguas subterráneas es una fuente de abastecimiento importante en la zona. Sin embargo, la zona limita con múltiples sectores de importancia hidrogeológica nula debido a la correspondencia de suelos rocosos. Adicionalmente, la localidad de Putabla se emplaza cerca de una cadena de lagos entre los cuales destacan el Lago Calafquén, Lago Panguipulli y Lago Riñihue, pero no existe información sobre fuentes de agua superficial disponibles para una posible extracción en la zona.

En esta localidad existe un sistema APR que contabiliza 226 arranques para beneficiar aproximadamente 900 beneficiarios, teniéndose en lista de espera otros 220 nuevos beneficiarios y 144 nuevos arranques del sector de comité de APR Rayenco Melilahuen, llegando así a una necesidad total de 590 arranques (Sayca Ingeniería, Estudio Hidrogeológico Putabla, 2021). Así, el sistema APR cuenta con DAA superficiales de un valor total de 15 [l/s], separados en 3 derechos independientes:

- Caudal de 5 [l/s] con expedientes; ND-0902-801544 y ND-0902-801545.

- Caudal de 6 [l/s] con expediente; ND-0902-801581.
- Caudal de 4 [l/s] expediente; ND-0902-800865.

La cuenca controlada a la cual pertenece el sistema APR de Putabla corresponde a la que define la estación Río San Pedro En Desagüe Lago Riñihue, pero corresponde a una cuenca que contiene múltiples lagos en serie, por lo cual no es correctamente representativa de la situación de la localidad de Putabla. Así, se selecciona la cuenca Río Cruces en Rucaco, Código BNA 10134001 para utilizar sus características, puesto que prácticamente colinda con el sistema APR en estudio. Luego, para la definición de la cuenca no controlada que corresponde al sistema APR de Putabla, se seleccionó como punto de salida la captación superficial que abastece al sistema APR, obteniéndose una cuenca colindante a la definida por la estación Río Cruces en Rucaco. Las características principales de esta cuenca son un área de 7,1 [km²], con cotas que van desde los 296 [m.s.n.m] hasta los 772 [m.s.n.m] y pendientes que van desde 0 [%] hasta 78 [%]. Así, esta cuenca corresponde a una zona intermedia, inferido por su cota máxima y su localización, la que se retrata en las Figuras 5.9 y 5.10.

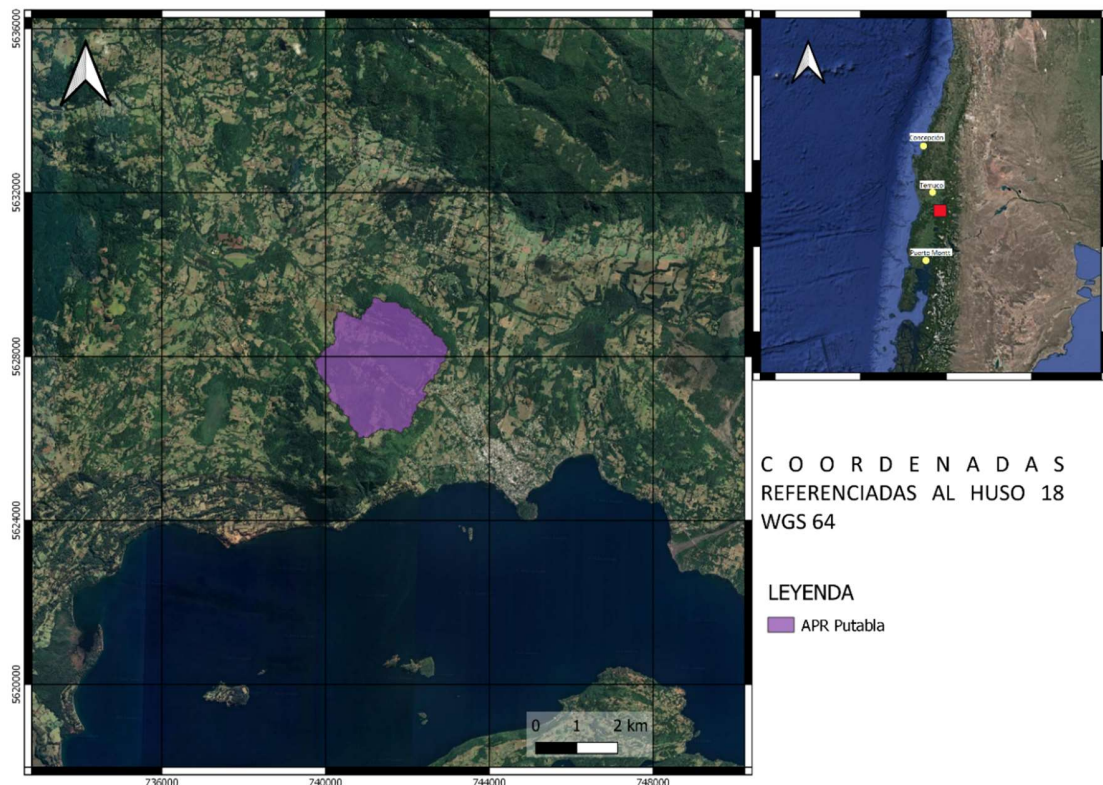


Figura 5.9: Localización cuenca APR Putabla.

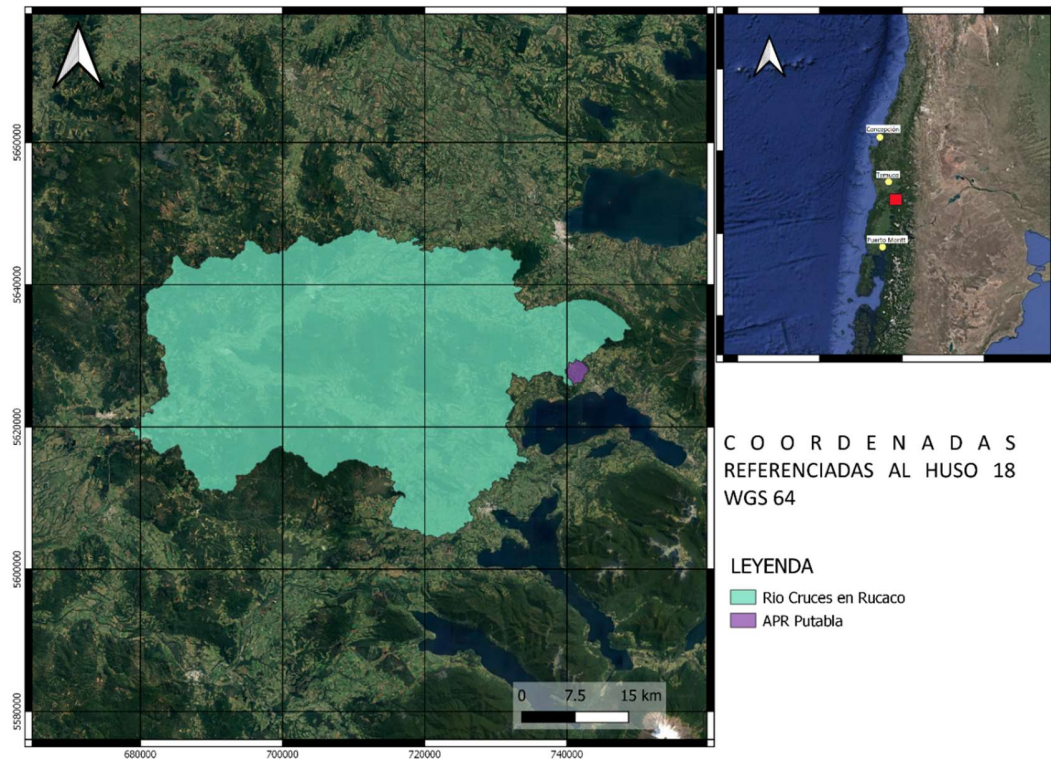


Figura 5.10: Localización cuenca APR Putabla y cuenca Rio Cruces en Rucaco.

5.4. APR de Oñico

La comunidad de Oñico se ubica en la zona costera de la Región de la Araucanía, específicamente en la comuna de Saavedra aproximadamente a unos 10 kilómetros al oeste de la ciudad de Carahue. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 38°44' Latitud Sur y 73°15' Longitud Oeste. En la Figura 5.11 se presenta la ubicación de la localidad de Oñico.

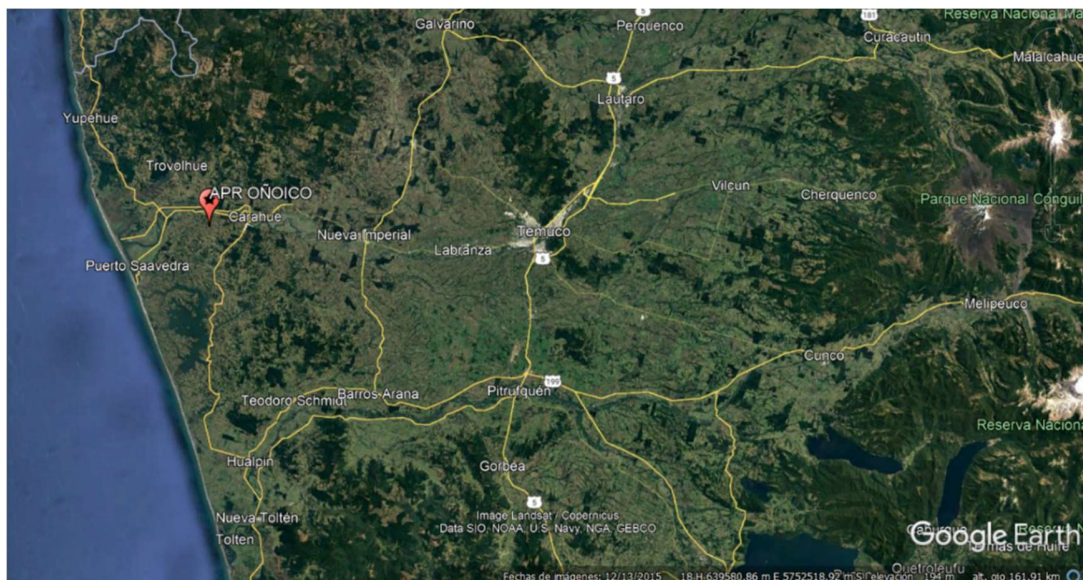


Figura 5.11: Localización sistema APR de Oñico. Fuente: Google Earth, 2022.

Esta comunidad se encuentra en una zona con un clima Templado Cálido con Lluvia suficiente, una temperatura media cercana a los 12,4 [°C] y una precipitación media anual de aproximadamente 1.000 [mm]. Por otra parte, la Carta Hidrogeológica (DGA, Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986) muestra que la ubicación de la localidad de Oñico está en un sector de importancia hidrogeológica nula, por lo que la extracción de aguas subterráneas es imposible en la zona debido a la formación de suelos con roca metamórfica y sedimentaria principalmente. Adicionalmente, existen captaciones superficiales en los cuerpos de agua aledaños al Río Imperial que presenta su cauce en la zona. Cabe recalcar que se debe tomar en consideración una alta concentración de cloruros en el Río Imperial para determinar una ubicación pertinente de alguna nueva captación superficial.

El comité APR de Oñico cuenta con un total de 50 arranques beneficiando así a aproximadamente 200 habitantes de la localidad. Además, disponen de un caudal de 1 [L/s] con expediente ND-0902-2940 del tipo Consuntivo/Permanente/Continuo (Geolambda, Estudio hidrogeológico Oñico, 2021). En este caso, no existe alguna cuenca controlada que contenga al sistema APR de Oñico, por lo cual se utiliza la cuenca definida por la estación Río Mahuidanche en Santa Ana Código BNA 9436001 como característica de este sistema APR. Así, la cuenca correspondiente al sistema APR de Oñico se define con el punto de captación con las coordenadas mencionadas en el comienzo de la sección.

Las Figuras 5.12 y 5.13 retratan la ubicación de la cuenca definida para el sistema APR de Oñoico y la ubicación de la cuenca controlada representativa de esta respectivamente.

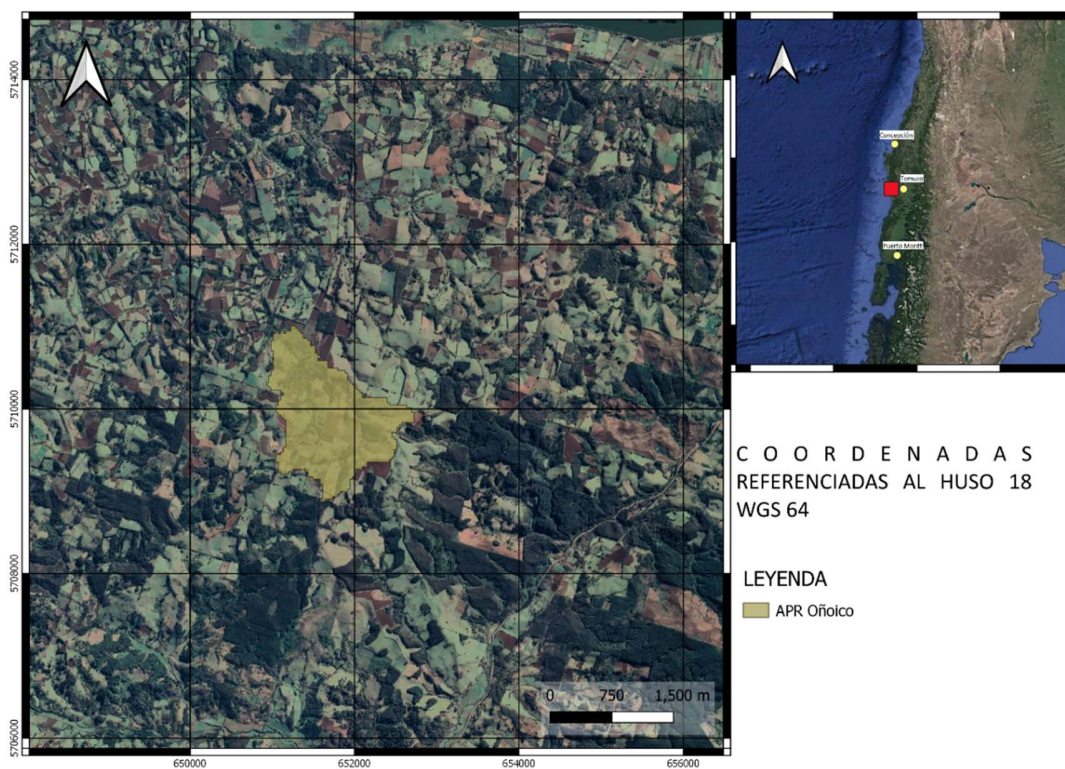


Figura 5.12: Localización cuenca del sistema APR Oñoico.

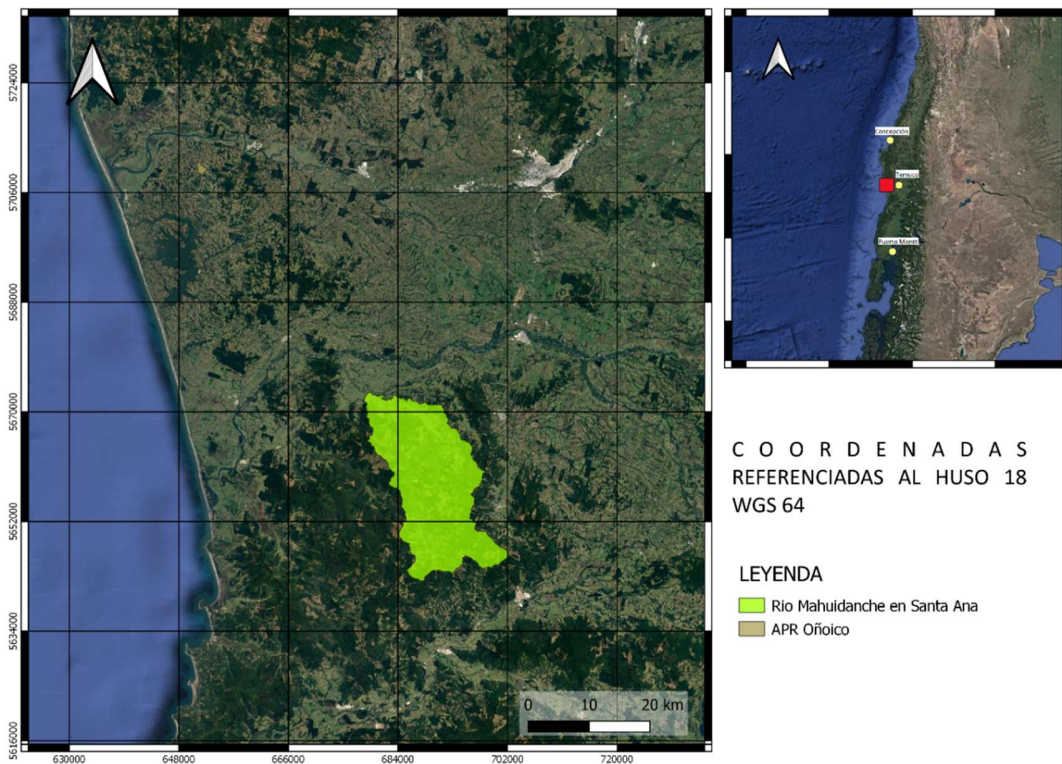


Figura 5.13: Localización cuenca del sistema APR Oñico y Rio Mahuidanche en Santa Ana.

5.5. APR El Coihue

La comunidad del Coihue también se ubica en la zona costera de la Región de la Araucanía, aproximadamente a 8 km al Este del APR de Oñico, comuna de Carahue. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 38°43' Latitud Sur y 73°10' Longitud Oeste. En la Figura 5.14 se presenta la ubicación de la localidad del Coihue.

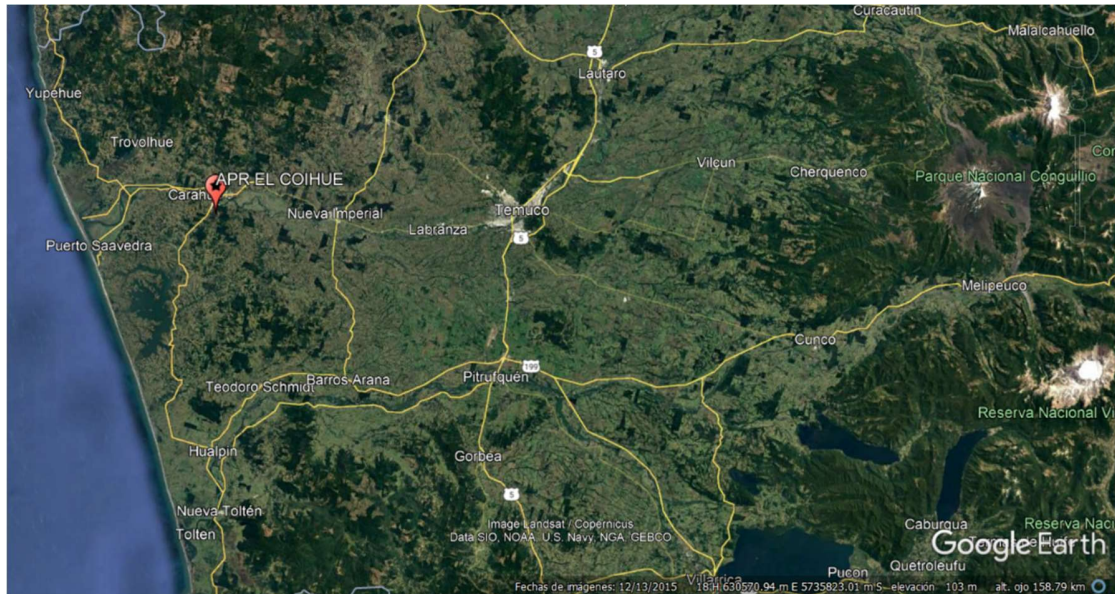


Figura 5.14: Localización sistema APR el Coihue. Fuente: Google Earth, 2022.

Esta comunidad se encuentra en una zona con un clima Templado Cálido con Lluvia suficiente, una temperatura media cercana a los 12,4 [°C] y una precipitación media anual de aproximadamente 1.000 [mm]. Por otra parte, la Carta Hidrogeológica (DGA, Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986) muestra que la ubicación de la localidad del Coihue está en un sector de importancia hidrogeológica nula, por lo que la extracción de aguas subterráneas es imposible en la zona debido a la formación de suelos con roca metamórfica y sedimentaria principalmente. Adicionalmente, existen captaciones superficiales en los cuerpos de agua aledaños al Rio Imperial que presenta su cauce en la zona. Cabe recalcar que se debe tomar en consideración las mismas precauciones de calidad de aguas asociadas al Rio Imperial que las mencionadas anteriormente para el APR de Oñico.

El comité de APR el Coihue cuenta con 93 arranques (DOH D. d., 2021). Por la ubicación de esta localidad, se utiliza la cuenca definida por la estación Rio Mahuidanche en Santa Ana Código BNA 9436001 como característica al igual que el sistema APR de Oñico. Así, la cuenca correspondiente al sistema APR El Coihue se define con el punto de captación con las coordenadas mencionadas en el comienzo de la sección. Las Figuras 5.15 y 5.16 retratan la ubicación de la cuenca definida para el sistema APR El Coihue y la ubicación de la cuenca controlada representativa de esta respectivamente.

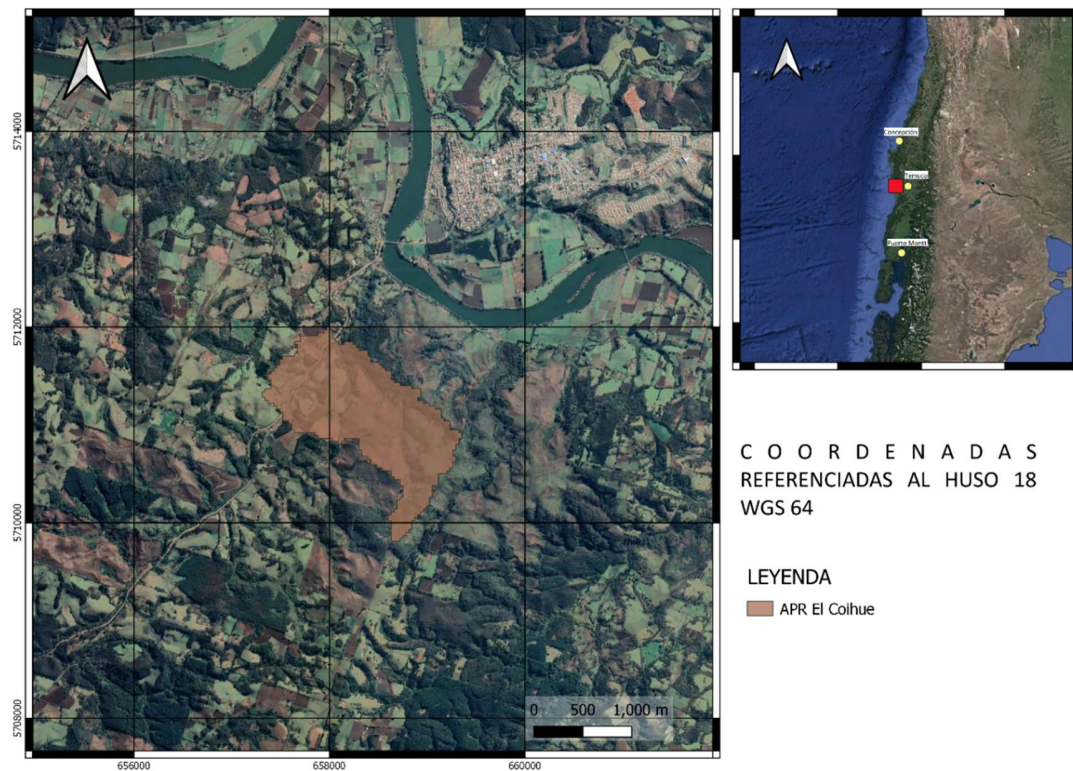


Figura 5.15: Localización cuenca del sistema APR El Coihue.

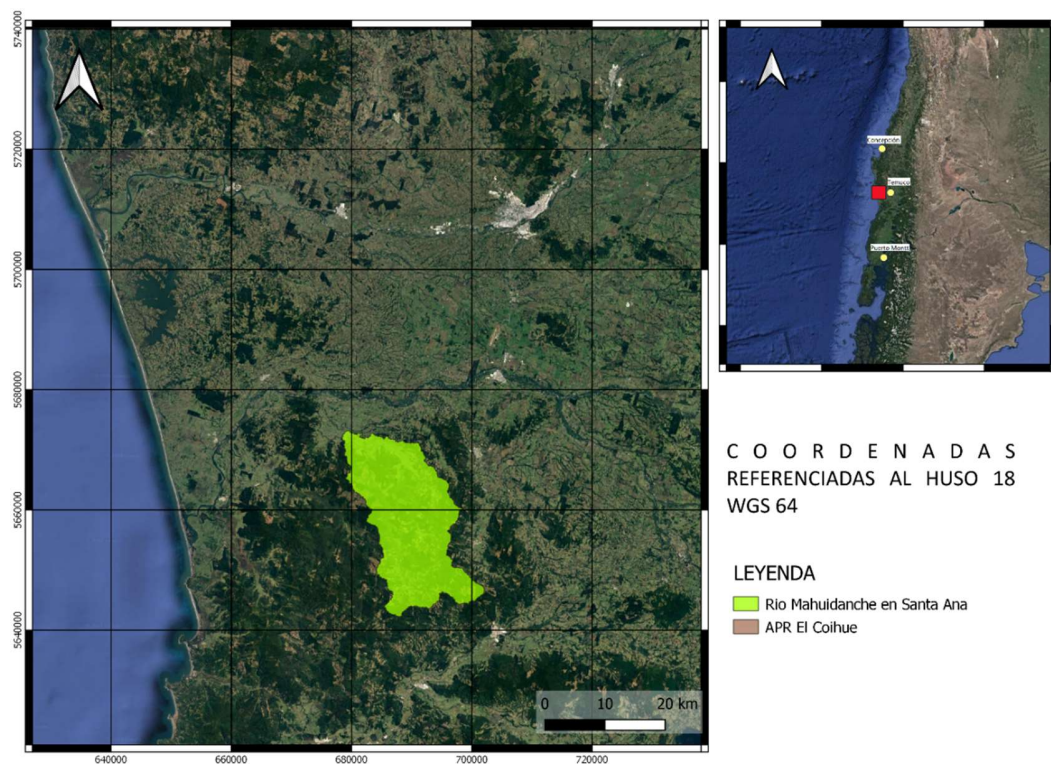


Figura 5.16: Localización cuenca del sistema APR El Coihue y Río Mahuidanche en Santa Ana.

5.6. Resumen de cuencas

A continuación, se presenta en las Tablas 5.1 y 5.2 un resumen de los atributos principales de las cuencas estudiadas, tanto controladas como para los sistemas APR, respectivamente.

Tabla 5.1: Resumen de atributos principales de las cuencas controladas estudiadas.

Cuenca	Código BNA	Área [km²]	Pp. media anual [mm]	Índice aridez [-]	Cota máx. [msnm]	Cota mín. [msnm]	Cota media [msnm]	Cota salida [msnm]	Cobert. nival [%]	Pdte. media [%]
Río Trancura en Curarrehue	9412001	357	3.251	0,3	3.746	369	1.195	382	0,5	21,5
Río Allipén en Melipeuco	9402001	830	2.372	0,4	3.069	437	1.293	440	1,9	20,4
Río Cruces en Rucaco	10134001	1.803	2.108	0,5	1.190	4	282	14	0	11,4
Río Mahuidanche en Santa Ana	9436001	384	1.806	0,6	637	7	189	26	0	13,6

Tabla 5.2: Resumen de atributos principales de las cuencas correspondientes a los sistemas APR estudiados.

Cuenca	Área [km²]	Cota máx. [m.s.n.m]	Cota min [m.s.n.m]	Cota media [m.s.n.m]	Pendiente media [%]
APR Curarrehue	357	3.746	369	1.195	21,5
APR Santa María de Llaima	23,8	1.887	879	1.286	38,8
APR Putabla	7,1	772	296	455	26,7
APR Oñoico	1,93	254	137	204	18,7
APR El Coihue	1,85	279	101	189	10,9

CAPITULO 6: RESULTADOS

6.1. Corrección de modelos GCM en Cuencas Controladas

Como se mencionó en el *Capítulo 3: Metodología de Trabajo*, se realizaron correcciones a las CVE obtenidas de los modelos GCM a partir de las curvas observadas y de la corrida de regionalización del BH3. De esta forma, se obtuvieron factores de corrección para proyectar los caudales según los criterios establecidos en cada caso. Las cuencas utilizadas para llevar a cabo la corrección son escogidas de tal forma que se tenga una distribución homogénea en la Región, con series de caudales históricos completas. Las cuencas seleccionadas son las siguientes, las cuales poseen firmas hidrológicas similares a los sistemas APR estudiados:

- Río Trancura en Curarrehue (Código BNA 9412001)
- Río Allipén en Melipeuco (Código BNA 9402001)
- Río Mahuidanche en Santa Ana (Código BNA 9436001)
- Río Cruces en Rucaco (Código BNA 10134001)

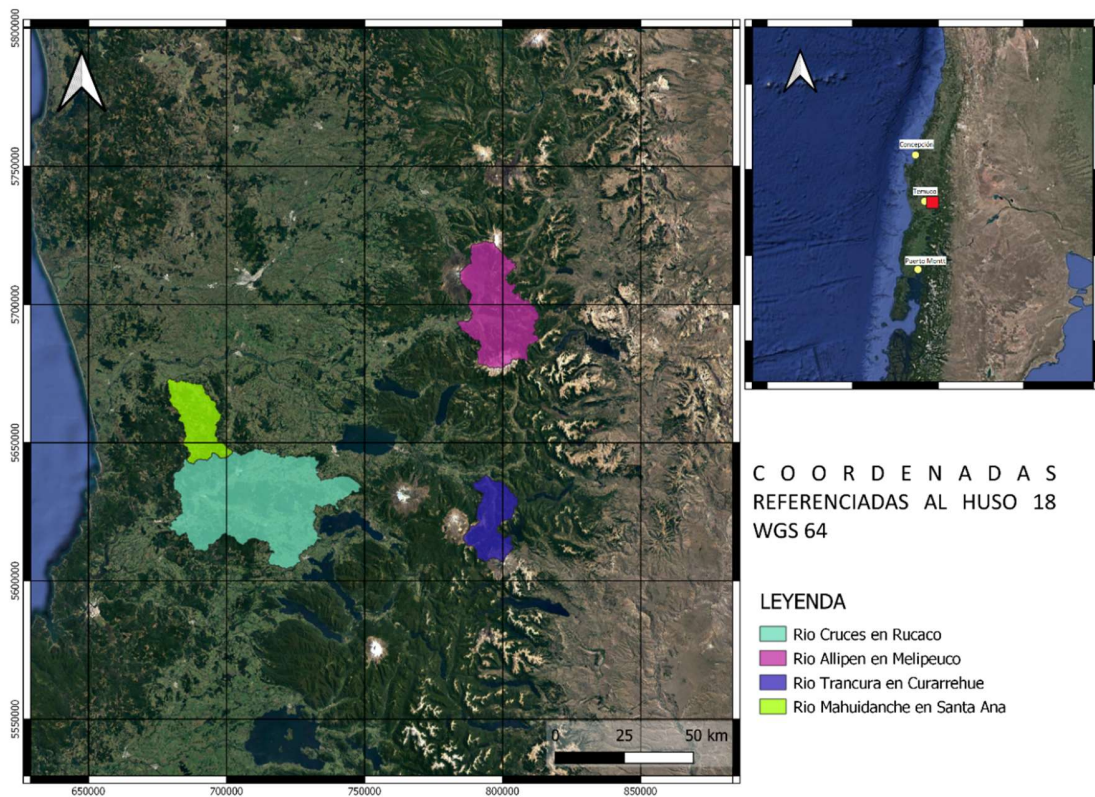


Figura 6.1: Localización de cuencas para corrección tipo.

Se detallan a continuación los principales resultados de la corrección de modelos, mientras que el detalle de estos se presenta en el Anexo A.

6.1.1. Cuenca Río Trancura en Curarrehue

Se obtuvieron en un comienzo las CVE de los 4 modelos CGM, la corrida regionalización y la serie de datos observada para el periodo de tiempo de línea base como se menciona en la Metodología. La Figura 6.2 presenta las CVE obtenidas para la cuenca Rio Trancura en Curarrehue.

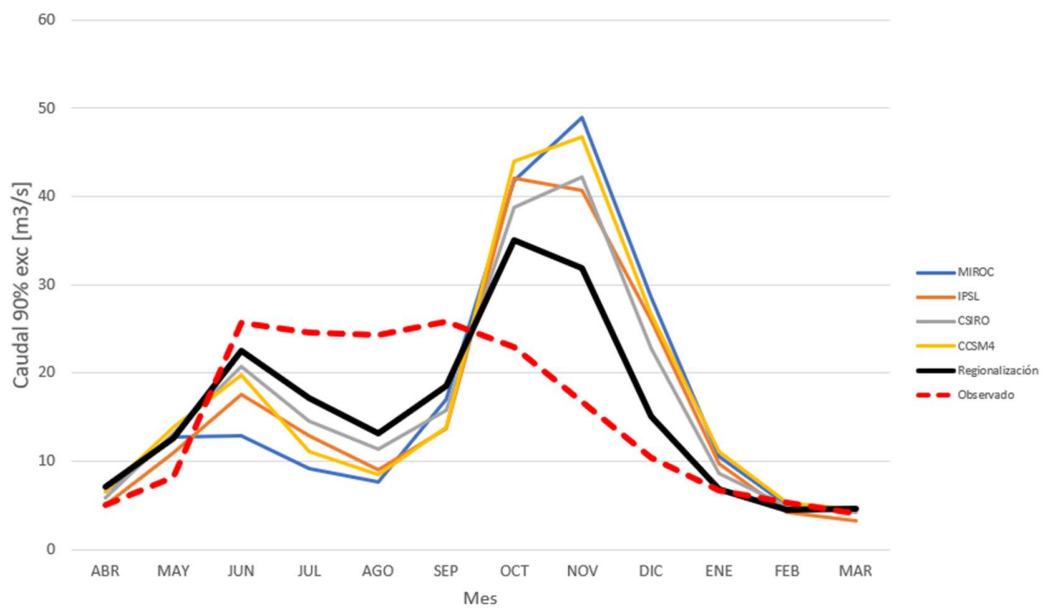


Figura 6.2: CVE para modelos GCM, corrida regionalización y serie observada en periodo de línea base, Río Trancura en Curarrehue.

Con estos resultados, es posible calcular coeficientes de Pardé mensuales de los datos observados y el factor de forzamiento f2 anual.

Tabla 6.1: Coeficiente de Pardé en Cuenca Río Trancura en Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Coef. Pardé	0,33	0,55	1,72	1,64	1,62	1,72	1,53	1,12	0,69	0,45	0,35	0,27

Tabla 6.2: Coeficiente f2 anual en Cuenca Río Trancura en Curarrehue.

Coeficiente f2 (anual)	0,9
-------------------------------	-----

6.1.2. Cuenca Río Allipén en Melipeuco

Se obtuvieron en un comienzo las CVE de los 4 modelos CGM, la corrida regionalización y la serie de datos observada para el periodo de tiempo de línea base como se menciona en la Metodología. La Figura 6.3 presenta las CVE obtenidas para la cuenca Río Allipén en Melipeuco.

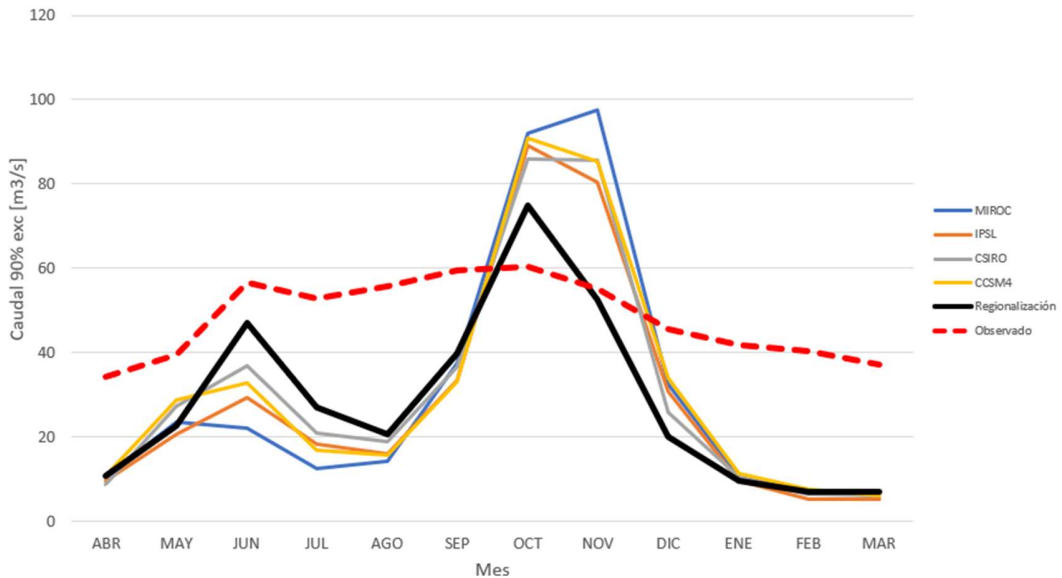


Figura 6.3: CVE para modelos GCM, corrida regionalización y serie observada en periodo de línea base, Río Allipén en Melipeuco.

Con estos resultados, es posible calcular coeficientes de Pardé mensuales de los datos observados y el factor de forzamiento f_2 anual.

Tabla 6.3: Coeficiente de Pardé en Cuenca Río Allipén en Melipeuco.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Coef. Pardé	0,71	0,82	1,17	1,09	1,15	1,23	1,25	1,14	0,95	0,86	0,84	0,77

Tabla 6.4: Coeficiente f_2 anual en Cuenca Río Allipén en Melipeuco.

Coeficiente f_2 (anual)	1,4
---------------------------------------------	-----

6.1.3. Cuenca Río Cruces en Rucaco

Se obtuvieron en un comienzo las CVE de los 4 modelos CGM, la corrida regionalización y la serie de datos observada para el periodo de

tiempo de línea base como se menciona en la Metodología. La Figura 6.4 presenta las CVE obtenidas para la cuenca Río Cruces en Rucaco.

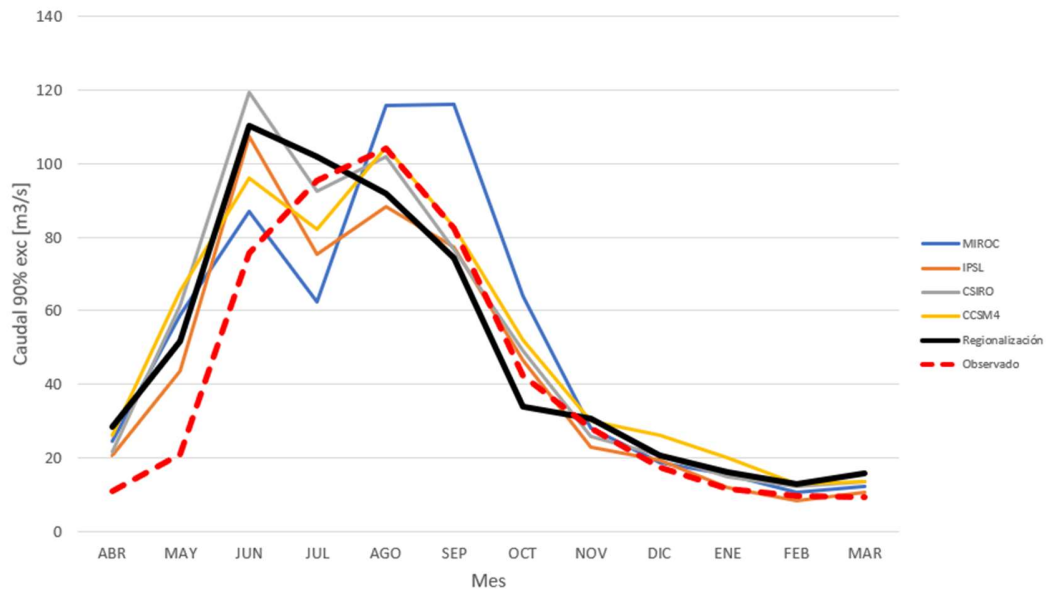


Figura 6.4: CVE para modelos GCM, corrida regionalización y serie observada en periodo de línea base, Río Cruces en Rucaco.

Con estos resultados, es posible calcular coeficientes de Pardé mensuales de los datos observados y el factor de forzamiento f2 anual.

Tabla 6.5: Coeficiente de Pardé en Cuenca Río Cruces en Rucaco.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Coef. Pardé	0,26	0,49	1,79	2,25	2,47	1,95	1,00	0,66	0,41	0,27	0,22	0,22

Tabla 6.6: Coeficiente f2 anual en Cuenca Río Cruces en Rucaco.

Coeficiente f2 (anual)	0,7
-------------------------------	-----

6.1.4. Cuenca Río Mahuidanche en Santa Ana

Se obtuvieron en un comienzo las CVE de los 4 modelos CGM, la corrida regionalización y la serie de datos observada para el periodo de tiempo de línea base como se menciona en la Metodología. La Figura 6.5 presenta las CVE obtenidas para la cuenca Río Mahuidanche en Santa Ana.

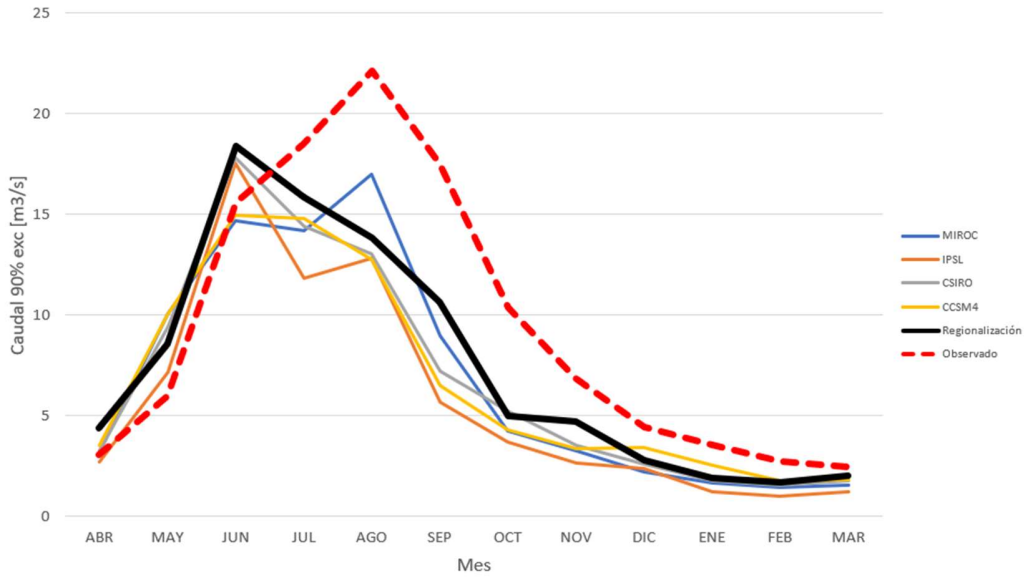


Figura 6.5: CVE para modelos GCM, corrida regionalización y serie observada en periodo de línea base, Río Mahuidanche en Santa Ana.

Con estos resultados, es posible calcular coeficientes de Pardé mensuales de los datos observados y el factor de forzamiento f_2 anual.

Tabla 6.7: Coeficiente de Pardé en Cuenca Río Mahuidanche en Santa Ana.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Coef. Pardé	0,32	0,63	1,65	1,96	2,35	1,86	1,10	0,73	0,47	0,38	0,29	0,26

Tabla 6.8: Coeficiente f_2 anual en Cuenca Río Mahuidanche en Santa Ana.

Coeficiente f_2 (anual)	1,1
---------------------------------------------	-----

6.2. Sistemas APR

Se presentan a continuación los resultados de oferta y demanda hídrica para los 5 sistemas APR estudiados. La oferta hídrica se presenta en forma de Curva de Variación estacional, mientras que la demanda hídrica se compone de derechos de aprovechamiento de aguas, caudal ecológico y dotación de agua potable de los sistemas APR.

6.2.1. APR de Curarrehue

En la Figura 6.6 se presentan las CVE del periodo línea base para el APR de Curarrehue. En esta se observan las curvas de los 4 modelos GCM, la corrida regionalización y la curva observada, ya que en este caso la localidad de Curarrehue define la cuenca controlada Rio Trancura en Curarrehue. La Figura 6.7 muestra los coeficientes f_3 para cada modelo, mientras que la Figura 6.8 presenta la curva futura corregida calculada según la metodología propuesta.

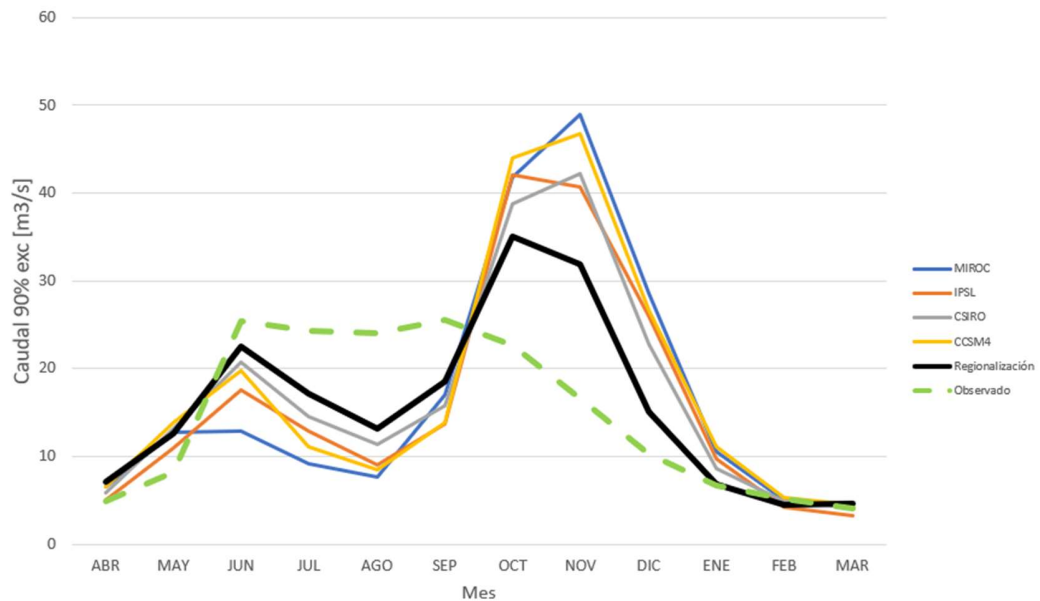


Figura 6.6: CVE periodo línea base APR Curarrehue.

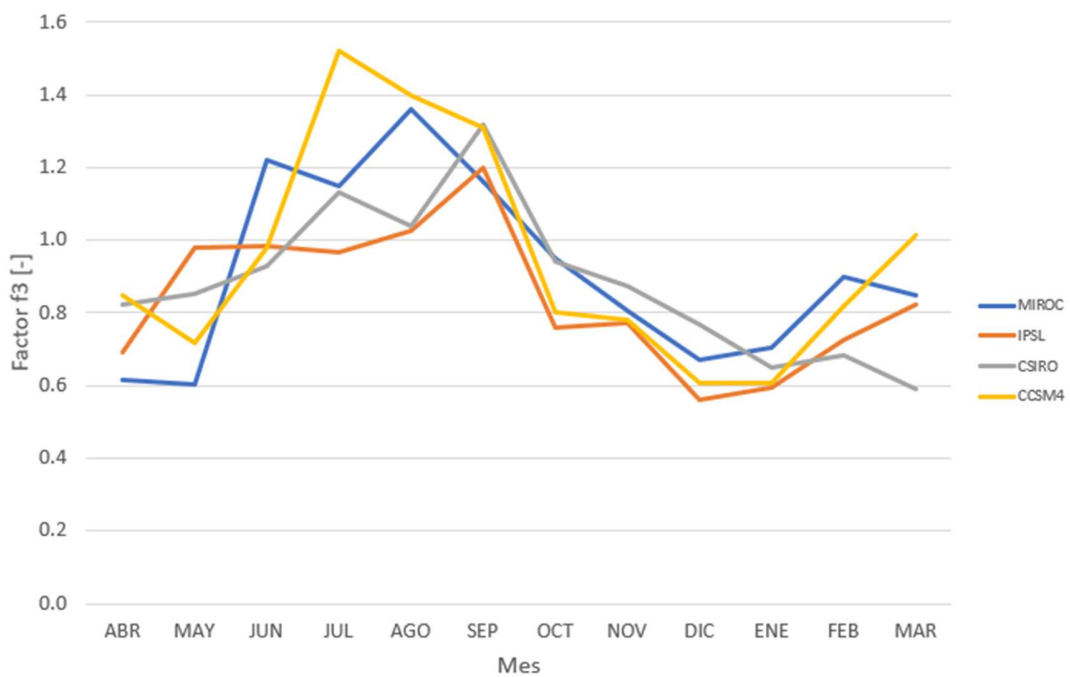


Figura 6.7: Factor de forzamiento de cambio climático (f3) para modelos GCM, APR Curarrehue.

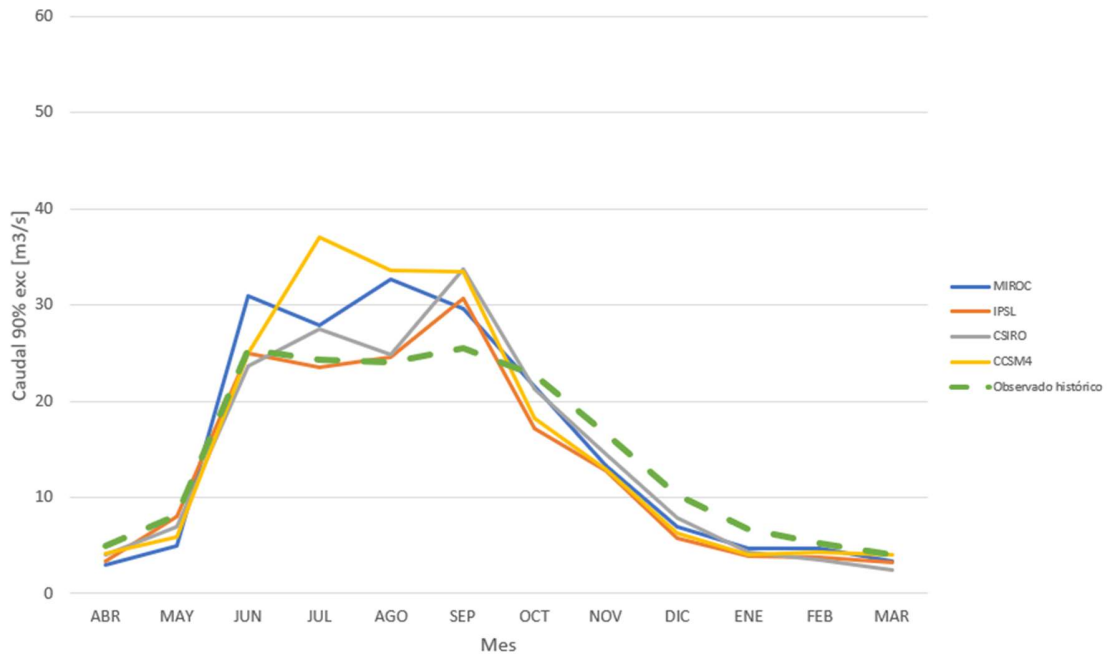


Figura 6.8: CVE corregidas periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR Curarrehue.

A su vez, los derechos de aprovechamiento de aguas mensuales de la cuenca son retratados en la Figura 6.9, mientras que el caudal ecológico de la cuenca modelada se presenta en la Figura 6.10.

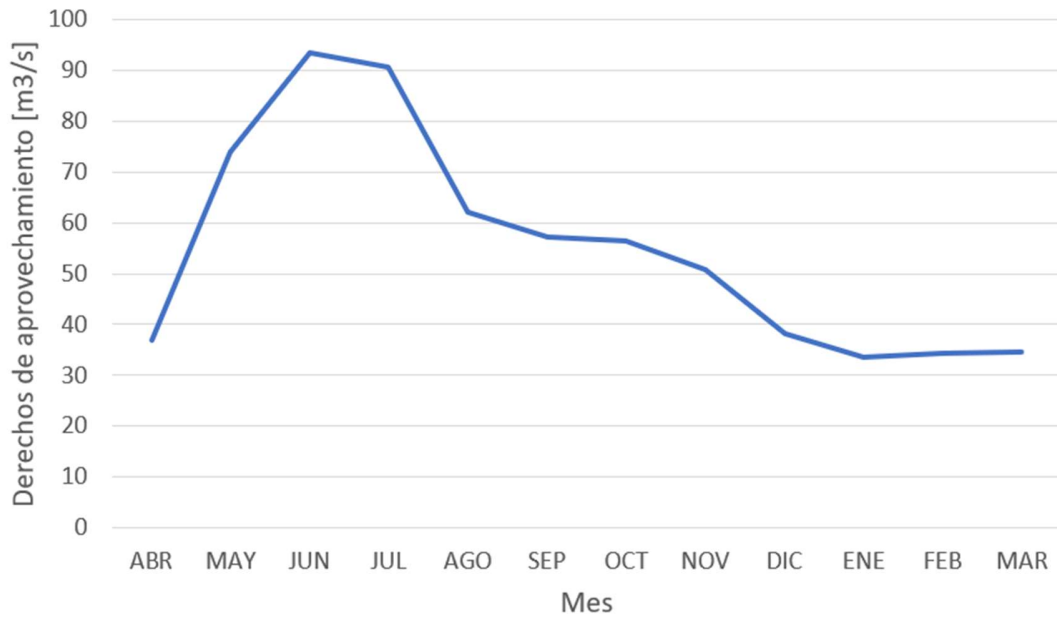


Figura 6.9: Curva mensual de DAA superficiales totales, APR Curarrehue.

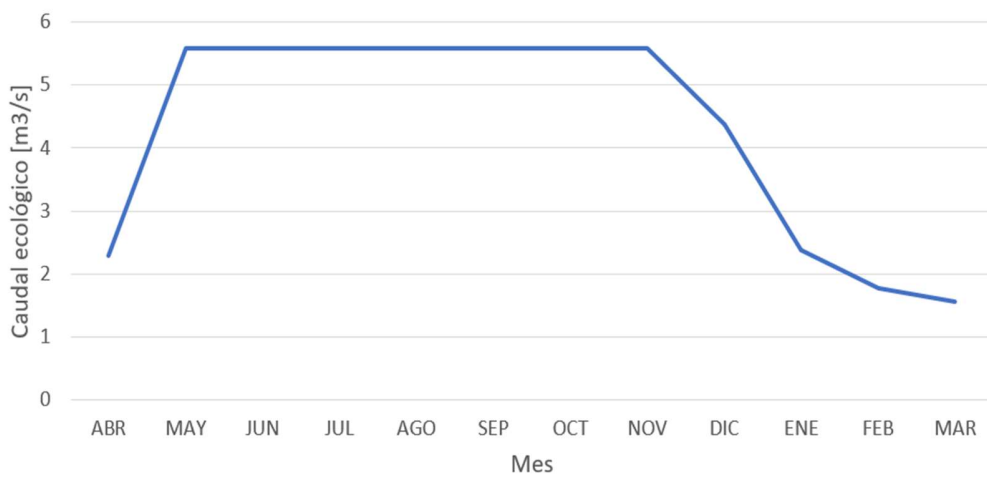


Figura 6.10: Caudal ecológico mensual APR Curarrehue.

Finalmente, se presenta la demanda de agua potable del comité presente y proyectada al año 2060 en la Figura 6.11.

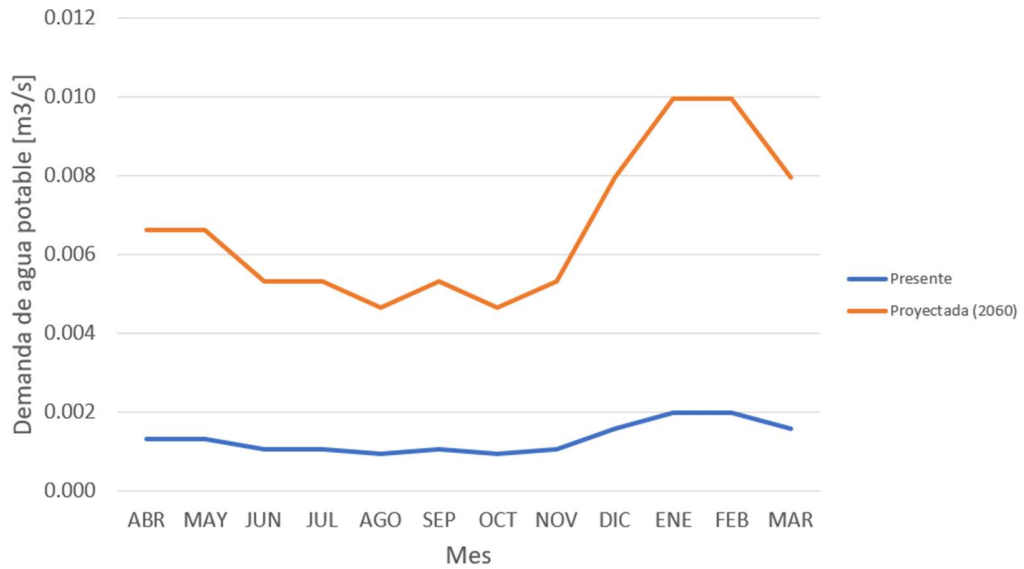


Figura 6.11: Demanda de agua potable mensual actual y proyectada, APR Curarrehue.

6.2.2. APR de Santa María de Llaima

En la Figura 6.12 se presentan las CVE del periodo línea base para el APR de Santa María de Llaima. En esta se observan las curvas de los 4 modelos GCM, la corrida regionalización y la curva "observada" calculada como se mencionó en la metodología. La Figura 6.13 muestra los coeficientes f_3 para cada modelo, mientras que la Figura 6.14 presenta la curva futura corregida calculada según la metodología propuesta.

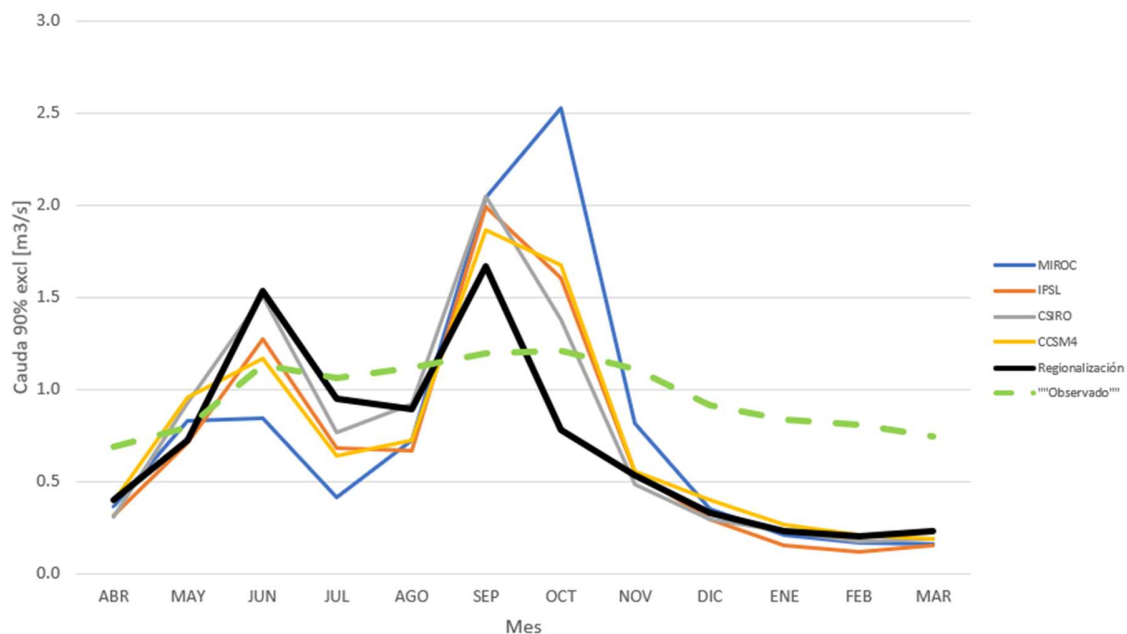


Figura 6.12: CVE periodo línea base APR Santa María de Llaima.

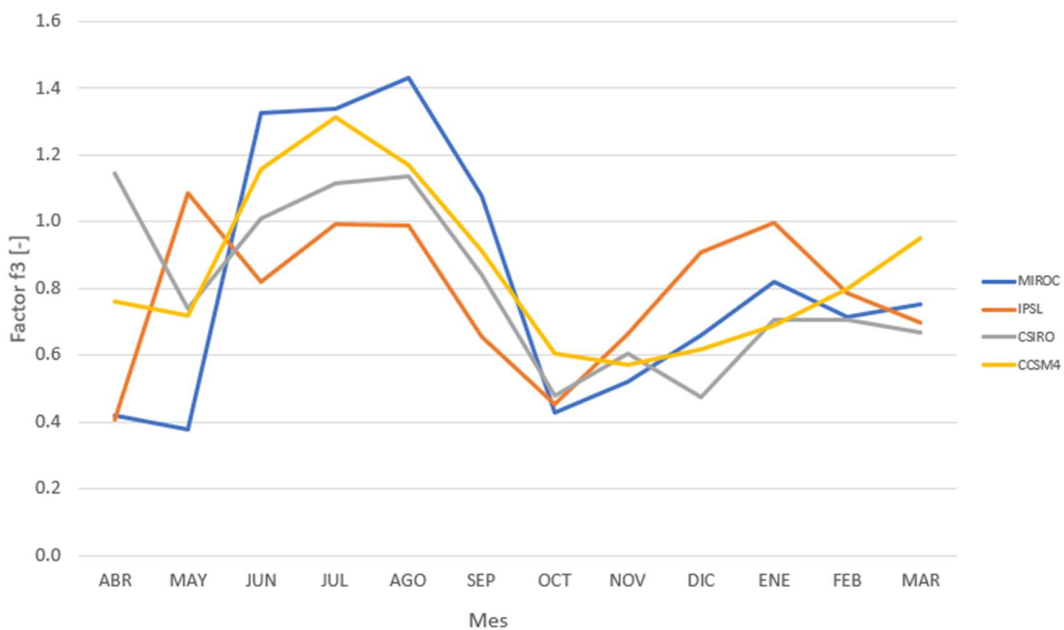


Figura 6.13: Factor de forzamiento de cambio climático (f3) para modelos GCM, APR Santa María de Llaima.

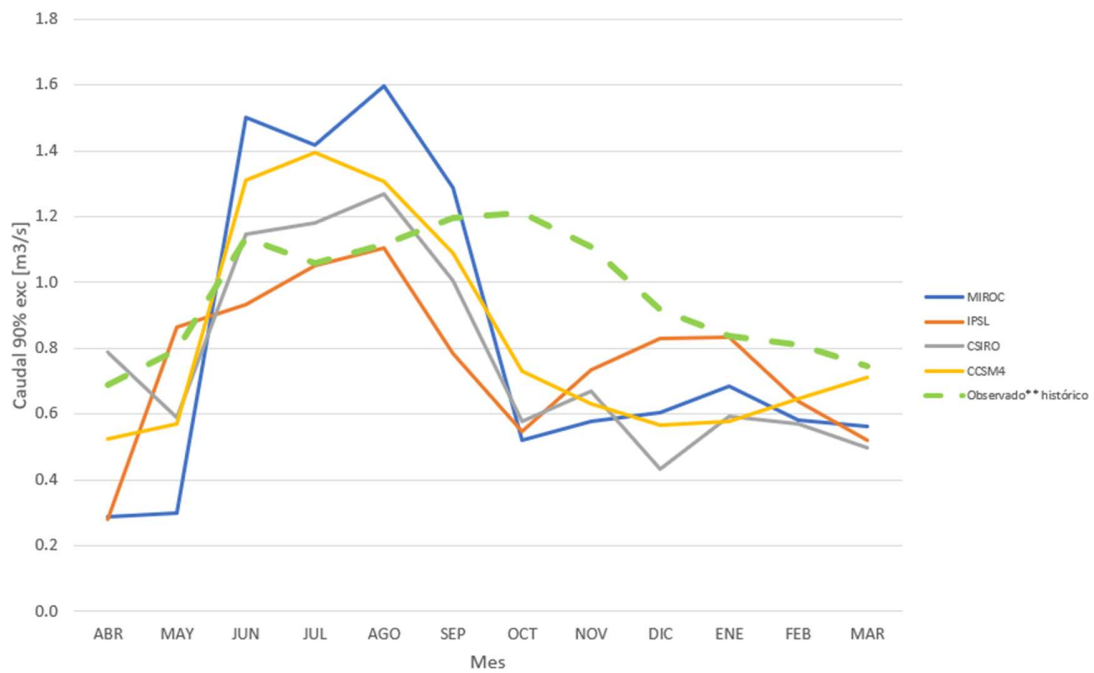


Figura 6.14: CVE corregidas periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR Santa María de Llaima.

A su vez, los derechos de aprovechamiento de aguas mensuales de la cuenca son retratados en la Figura 6.15, mientras que el caudal ecológico de la cuenca modelada se presenta en la Figura 6.16.

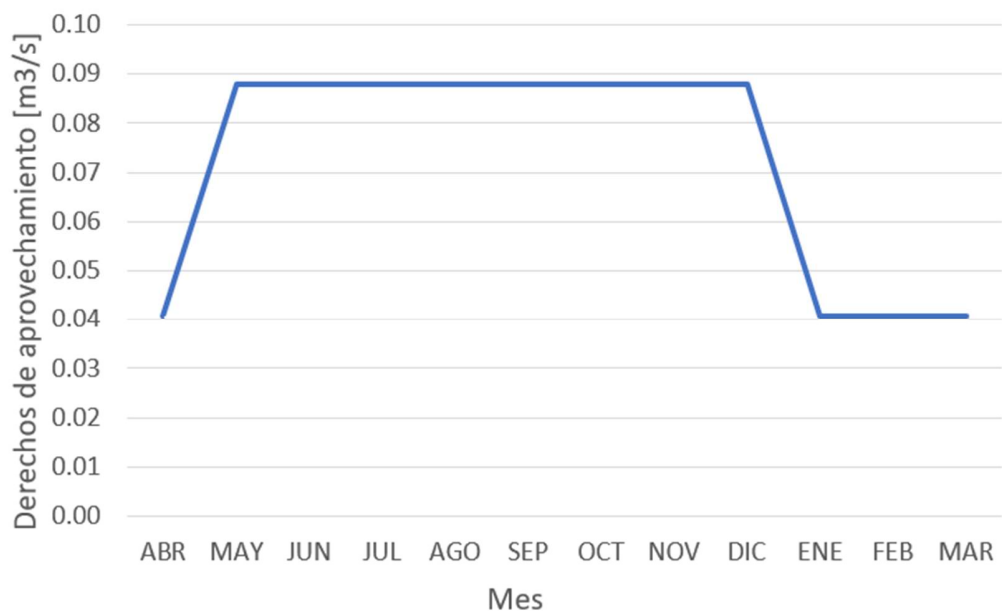


Figura 6.15: Curva mensual de DAA superficiales consuntivos, APR Santa María de Llaima.

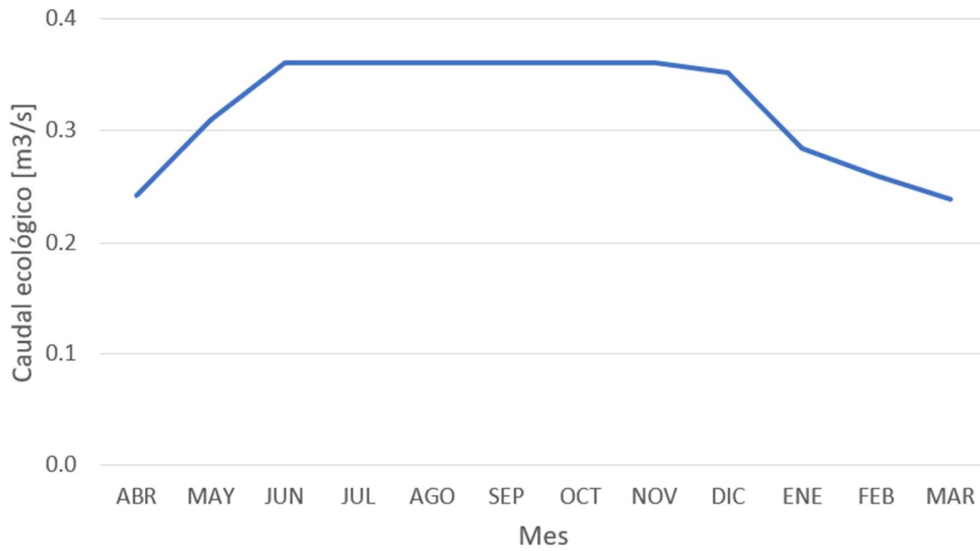


Figura 6.16: Caudal ecológico mensual APR Santa María de Llaima.

Finalmente, se presenta la demanda de agua potable del comité presente y proyectada al año 2060 en la Figura 6.17.

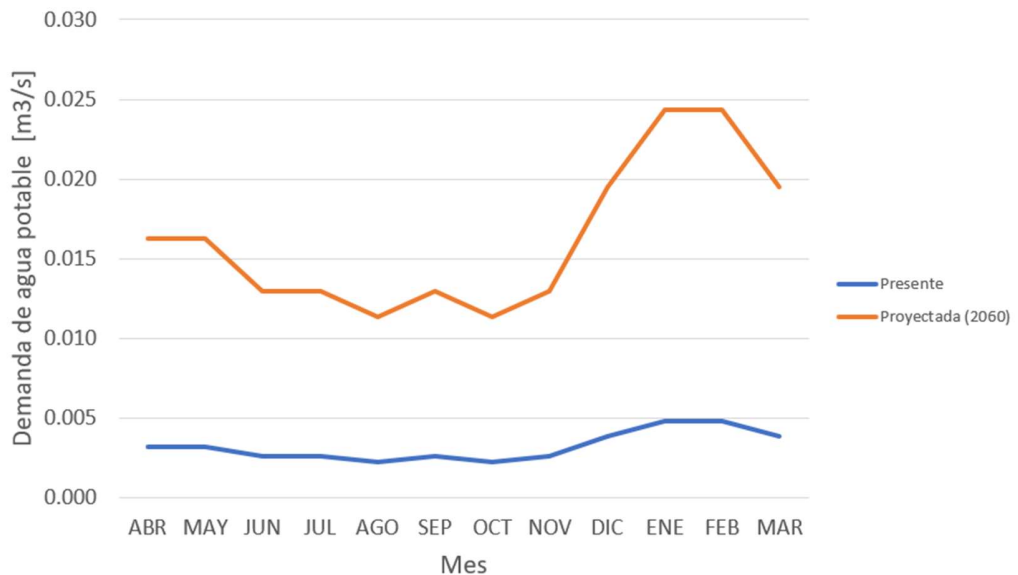


Figura 6.17: Demanda de agua potable mensual actual y proyectada, APR Santa María de Llaima.

6.2.3. APR de Putabla

En la Figura 6.18 se presentan las CVE del periodo línea base para el APR de Putabla. En esta se observan las curvas de los 4 modelos GCM, la corrida regionalización y la curva "observada" calculada como se mencionó en la metodología. La Figura 6.19 muestra los coeficientes f_3 para cada modelo, mientras que la Figura 6.20 presenta la curva futura corregida calculada según la metodología propuesta.

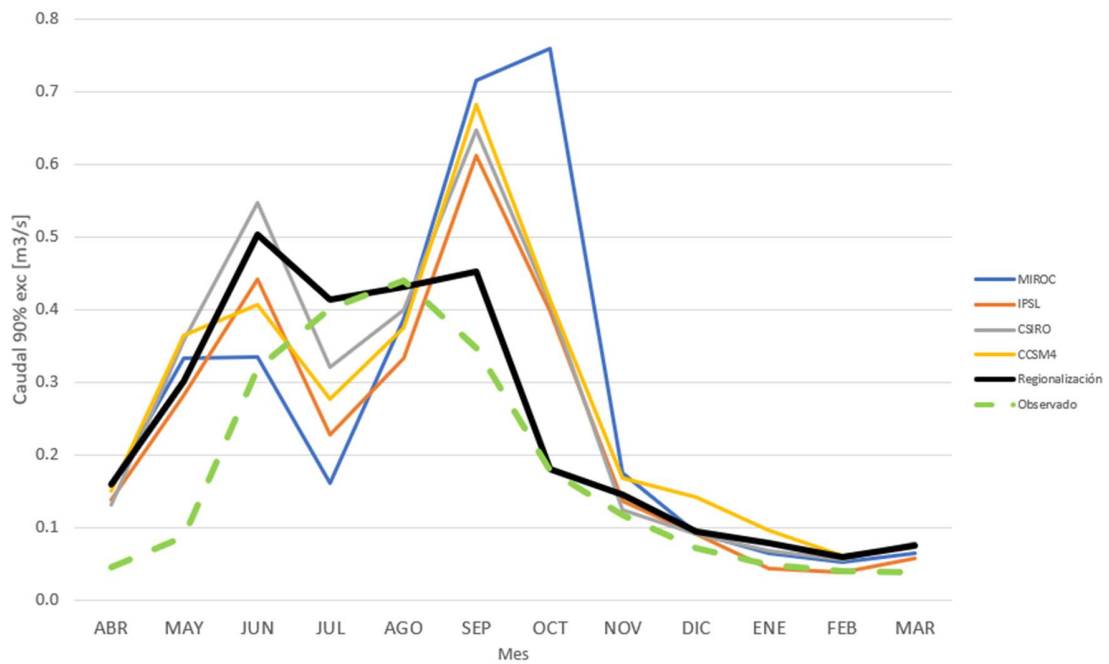


Figura 6.18: CVE periodo línea base APR Putabla.

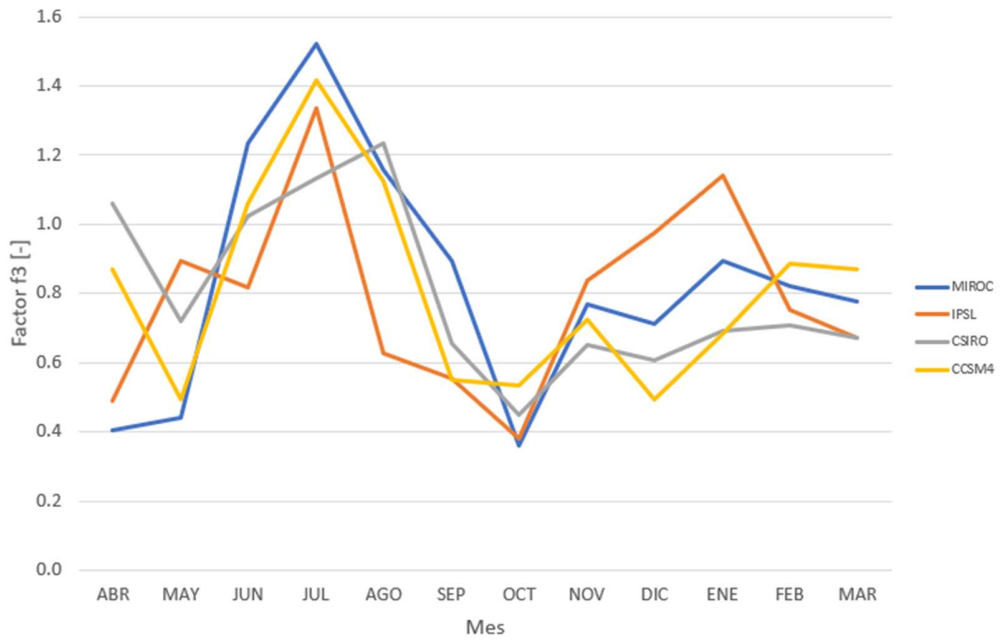


Figura 6.19: Factor de forzamiento de cambio climático (f3) para modelos GCM, APR Putabla.

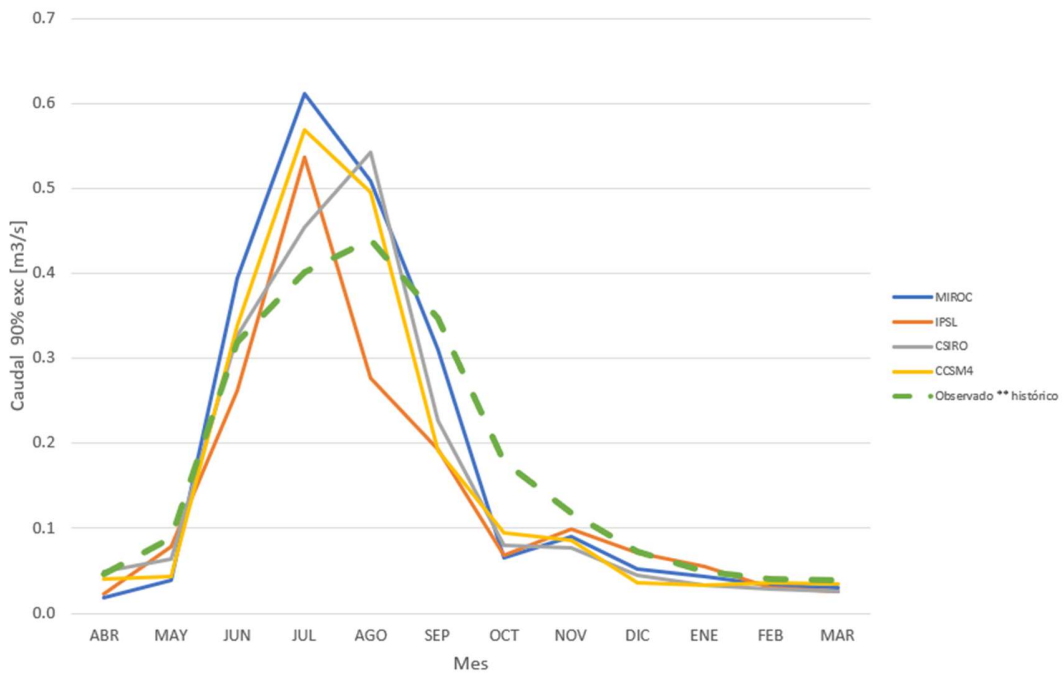


Figura 6.20: CVE corregidas periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR Putabla.

A su vez, los derechos de aprovechamiento de aguas mensuales de la cuenca son retratados en la Figura 6.21, mientras que el caudal ecológico de la cuenca modelada se presenta en la Figura 6.22.

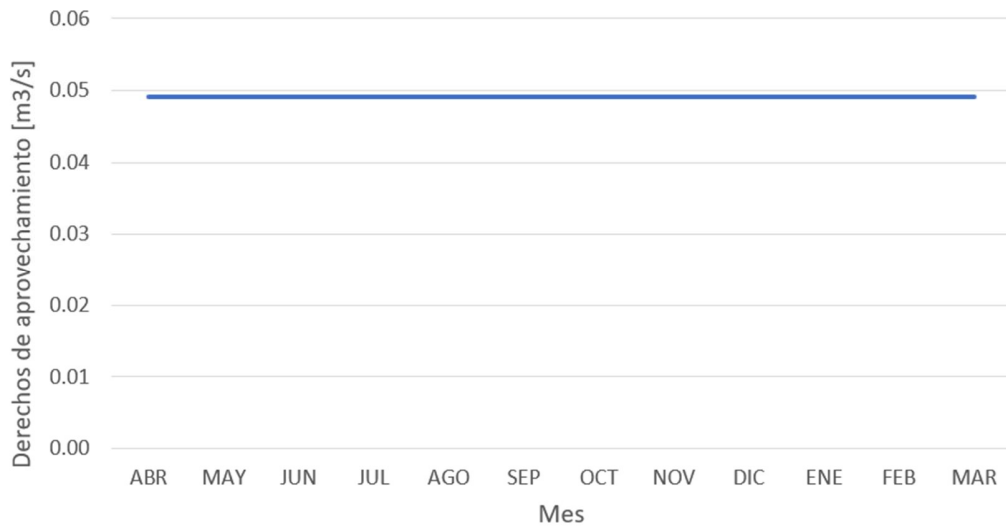


Figura 6.21: Curva mensual de DAA superficiales consuntivos, APR Putabla.

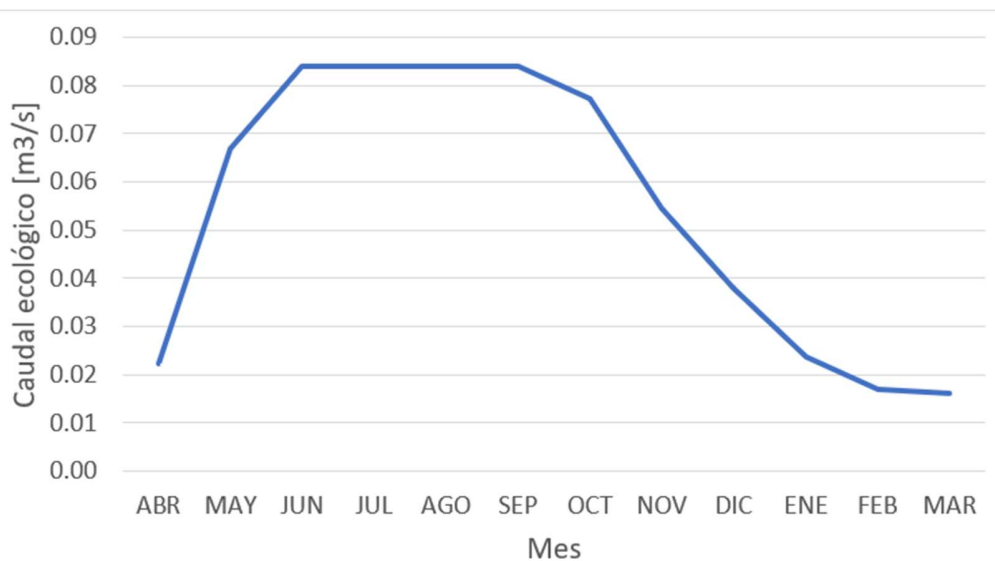


Figura 6.22: Caudal ecológico mensual APR Putabla.

Finalmente, se presenta la demanda de agua potable del comité presente y proyectada al año 2060 en la Figura 6.23.

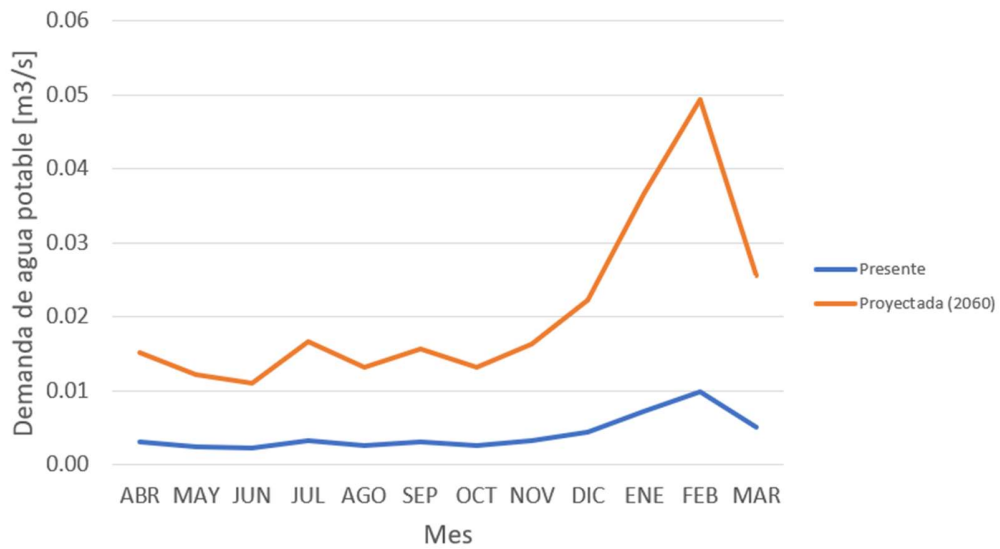


Figura 6.23: Demanda de agua potable mensual actual y proyectada, APR Putabla.

6.2.4. APR de Oñoico

En la Figura 6.24 se presentan las CVE del periodo línea base para el APR de Oñoico. En esta se observan las curvas de los 4 modelos GCM, la corrida regionalización y la curva "observada" calculada como se mencionó en la metodología. La Figura 6.25 muestra los coeficientes f_3 para cada modelo, mientras que la Figura 6.26 presenta la curva futura corregida calculada según la metodología propuesta.

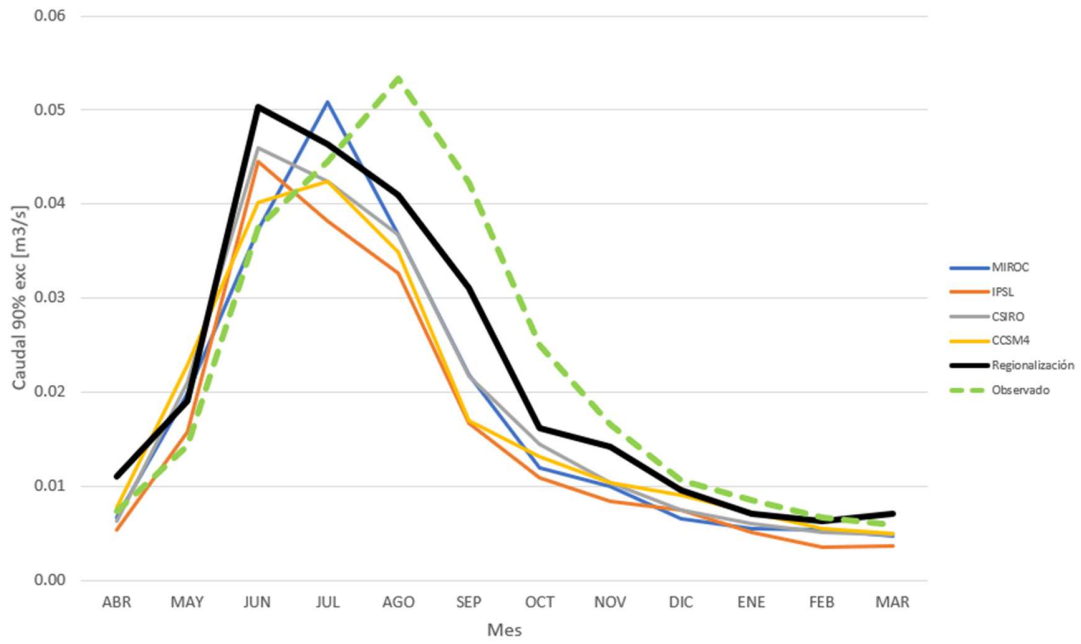


Figura 6.24: CVE periodo línea base APR Oñico.

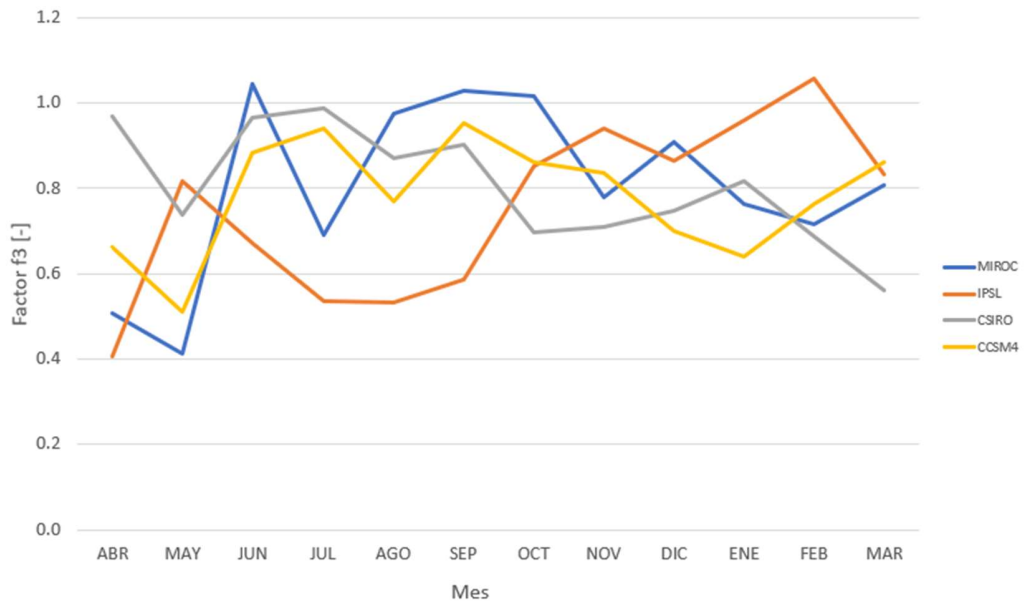


Figura 6.25: Factor de forzamiento de cambio climático (f_3) para modelos GCM, APR Oñico.

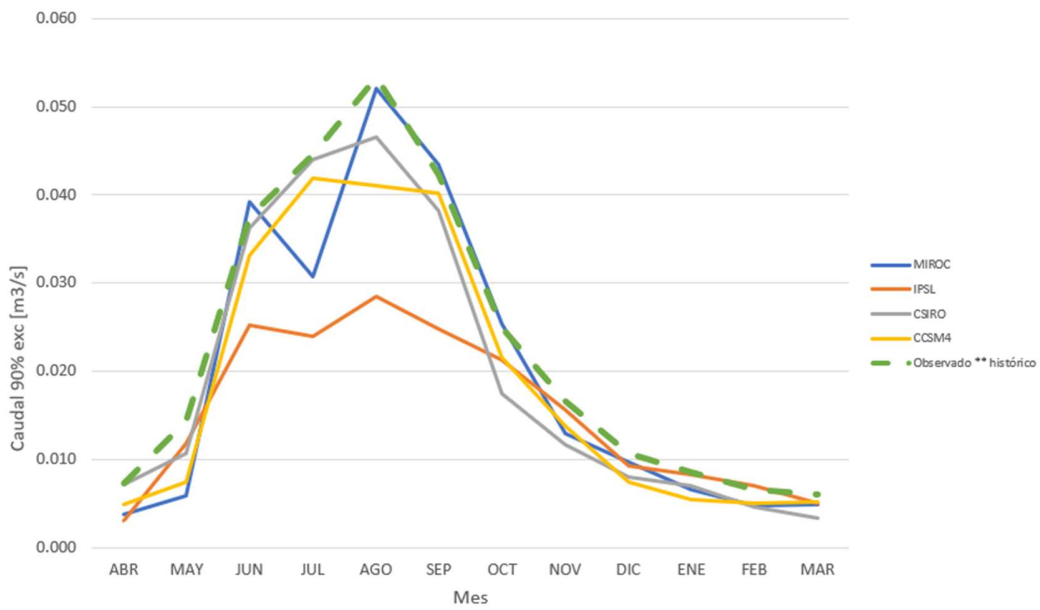


Figura 6.26: CVE corregidas periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR Oñico.

A su vez, los derechos de aprovechamiento de aguas mensuales de la cuenca son retratados en la Figura 6.27, mientras que el caudal ecológico de la cuenca modelada se presenta en la Figura 6.28.

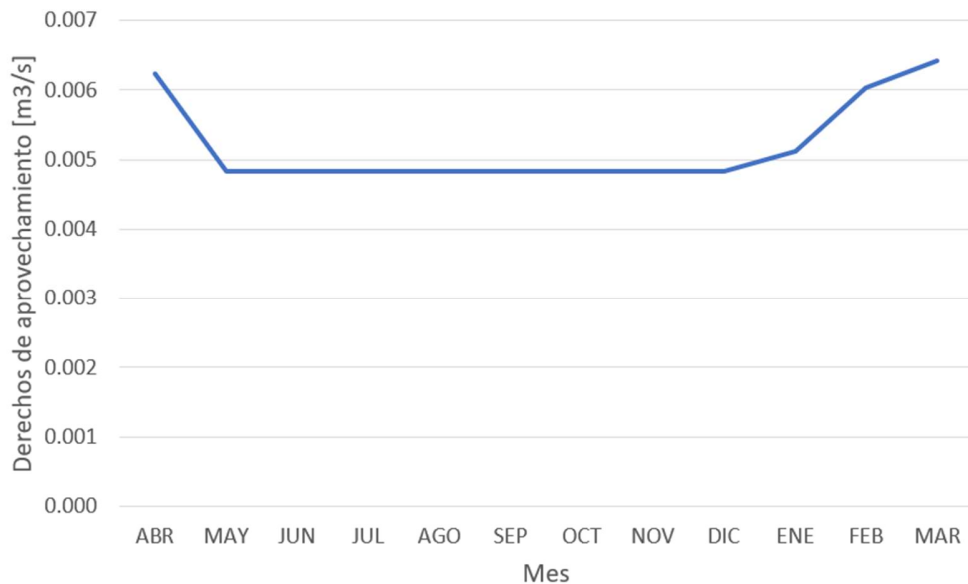


Figura 6.27: Curva mensual de DAA superficiales consuntivos, APR Oñico.

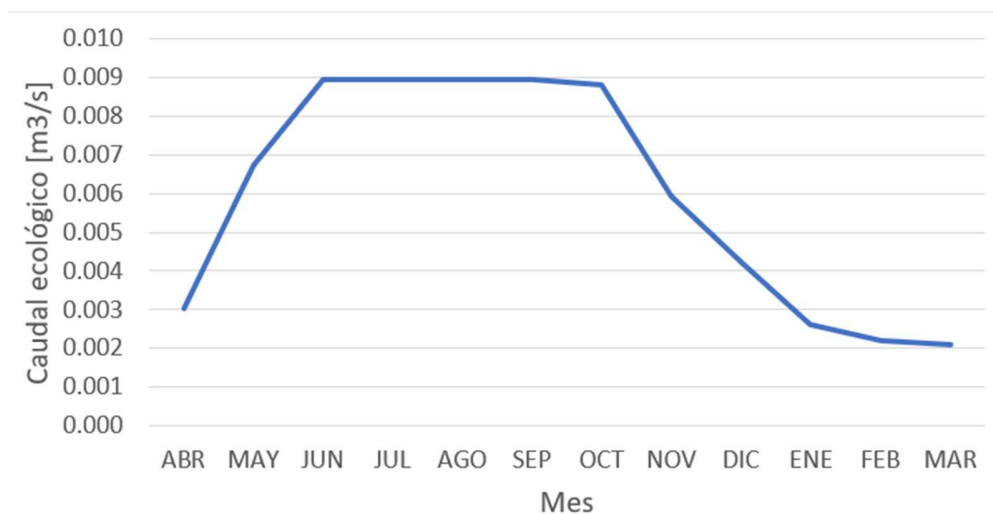


Figura 6.28: Caudal ecológico mensual APR Oñico.

Finalmente, se presenta la demanda de agua potable del comité presente y proyectada al año 2060 en la Figura 6.29.

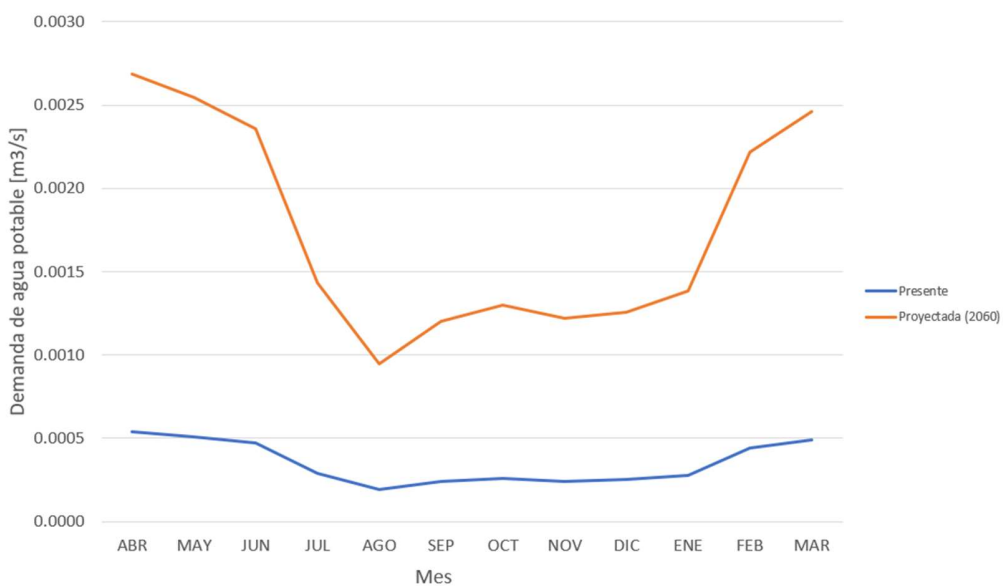


Figura 6.29: Demanda de agua potable mensual actual y proyectada, APR Oñico.

6.2.5. APR el Coihue

En la Figura 6.30 se presentan las CVE del periodo línea base para el APR del Coihue. En esta se observan las curvas de los 4 modelos GCM,

la corrida regionalización y la curva "observada" calculada como se mencionó en la metodología. La Figura 6.31 muestra los coeficientes f_3 para cada modelo, mientras que la Figura 6.32 presenta la curva futura corregida calculada según la metodología propuesta.

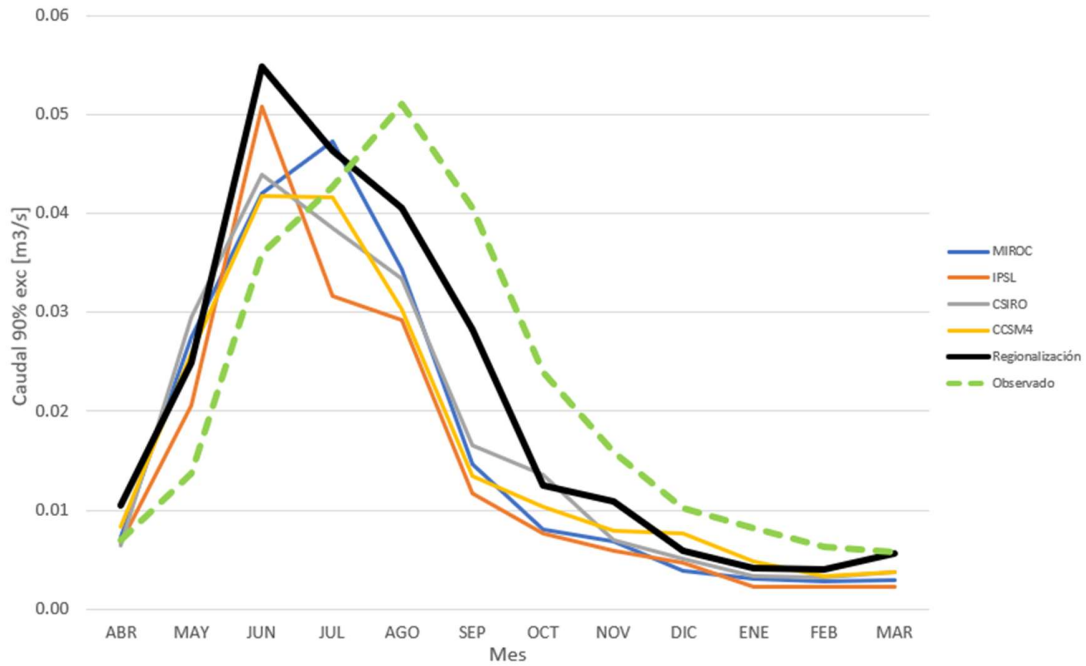


Figura 6.30: CVE periodo línea base APR El Coihue.

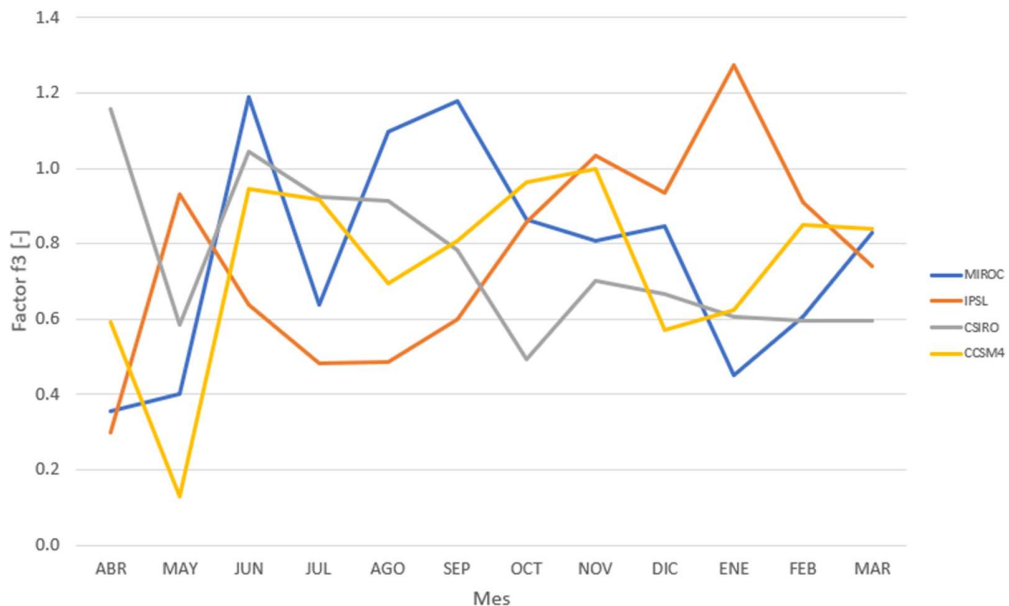


Figura 6.31: Factor de forzamiento de cambio climático (f_3) para modelos GCM, APR el Coihue.

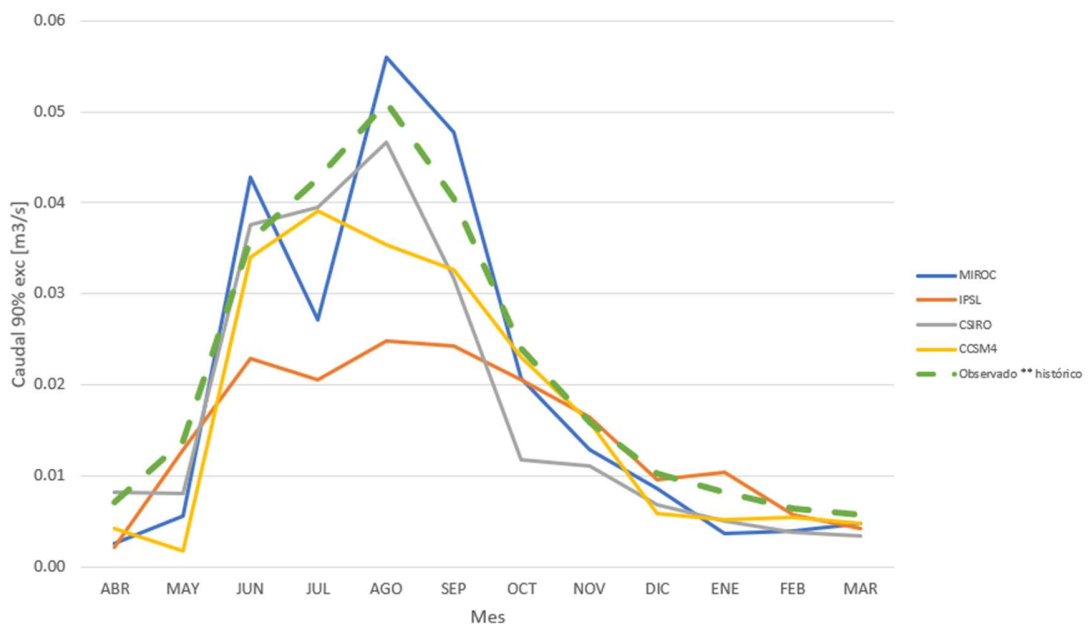


Figura 6.32: CVE corregidas periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR El Cihue.

A su vez, los derechos de aprovechamiento de aguas mensuales de la cuenca son retratados en la Figura 6.33, mientras que el caudal ecológico de la cuenca modelada se presenta en la Figura 6.34.

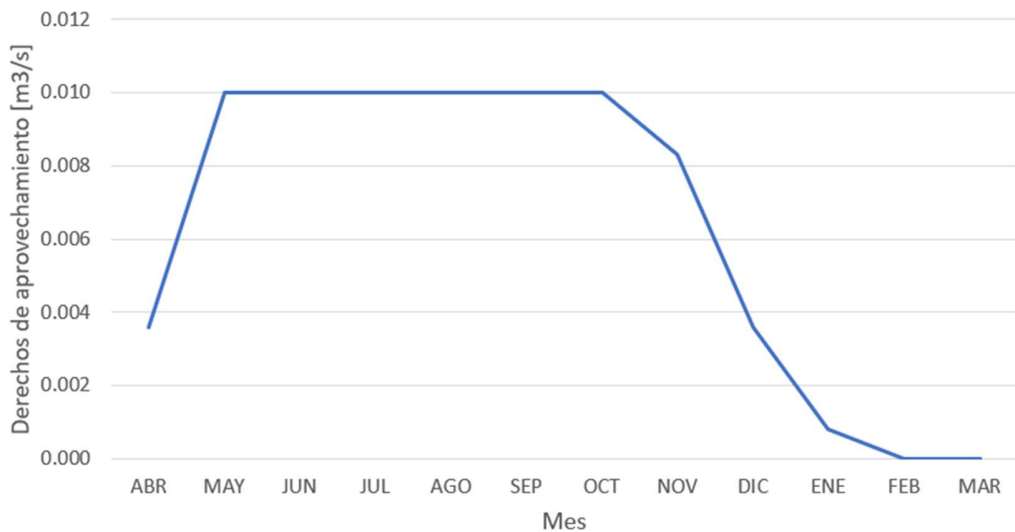


Figura 6.33: Curva mensual de DAA superficiales consuntivos, APR El Cihue.

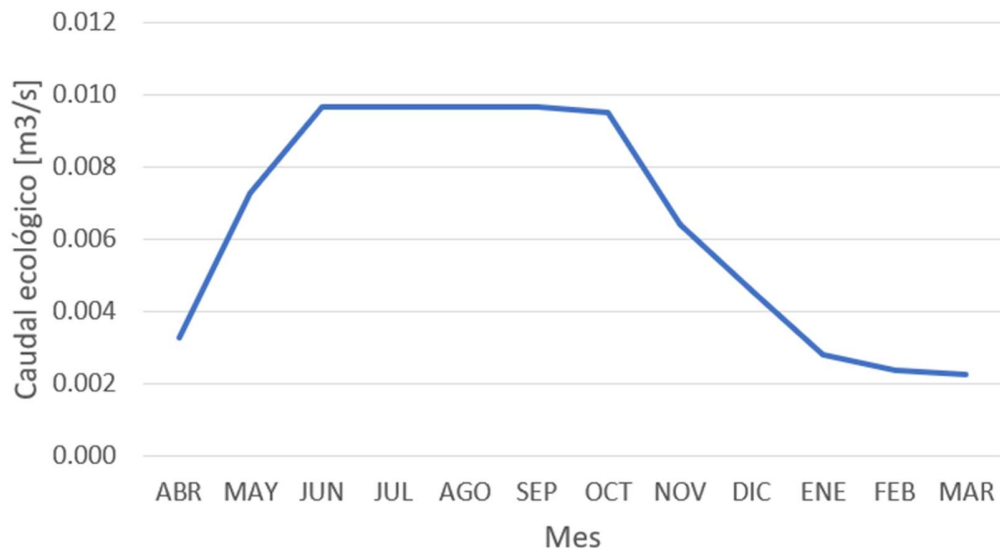


Figura 6.34: Caudal ecológico mensual APR El Coihue.

Finalmente, se presenta la demanda de agua potable del comité presente y proyectada al año 2060 en la Figura 6.35.

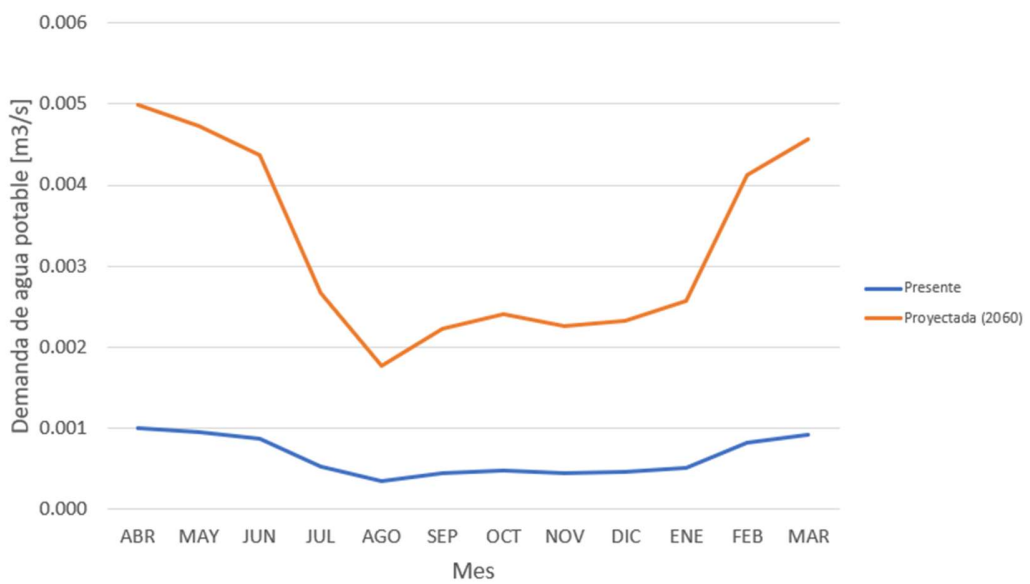


Figura 6.35: Demanda de agua potable mensual actual y proyectada, APR El Coihue.

6.3. Balance hídrico

A continuación, se presentan en las Figuras 6.36 a 6.40 los resultados del balance hídrico mensual para los 5 APR estudiados. Para estos balances, se asume que los déficits se traspasan directamente al sistema APR involucrado, el cual da el cierre a la cuenca en su punto de desfogue. A su vez, no existe prorrato entre los diferentes usuarios de agua en las cuencas.

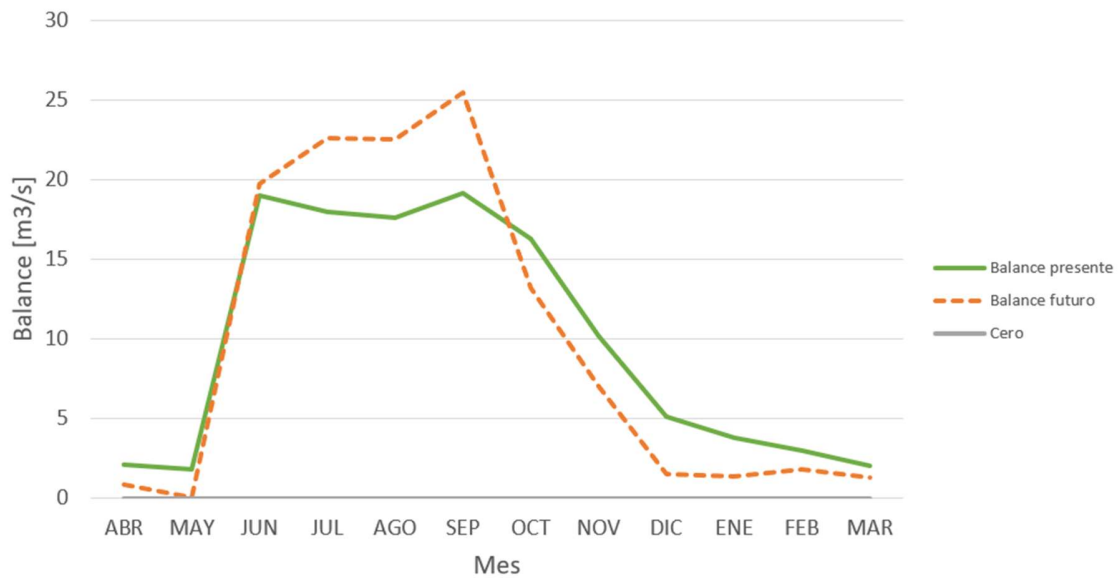


Figura 6.36: Balance hídrico mensual APR Curarrehue.

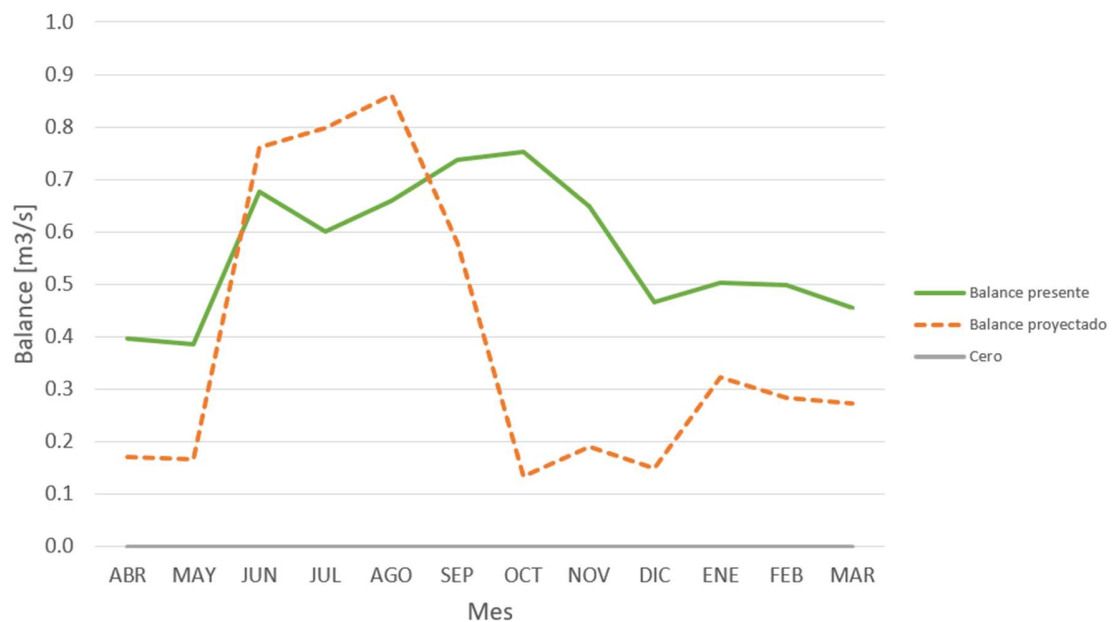


Figura 6.37: Balance hídrico mensual APR Santa María de Llaima.

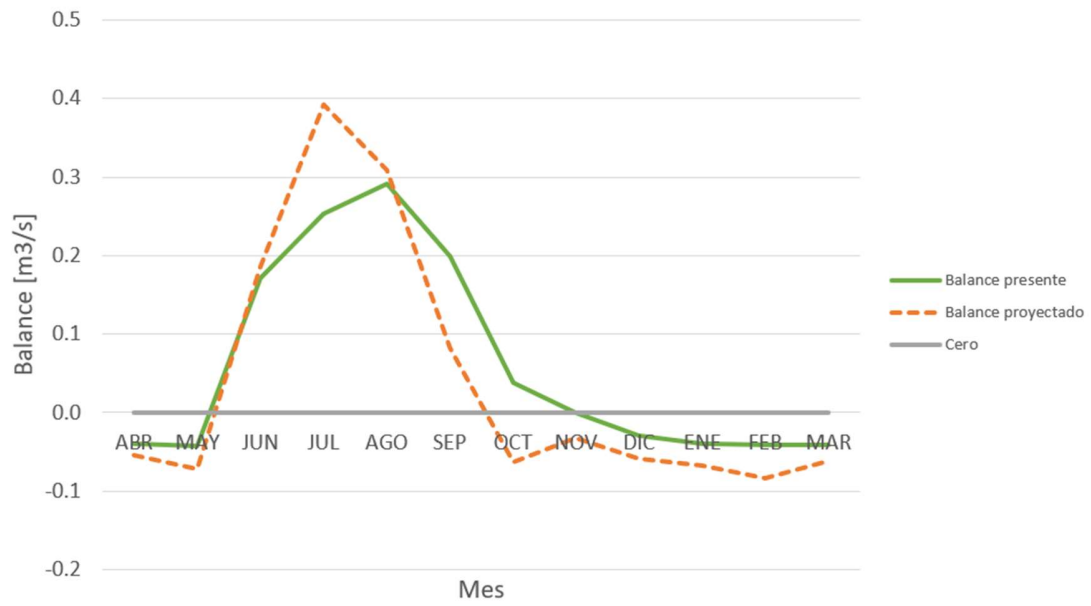


Figura 6.38: Balance hídrico mensual APR Putabla.

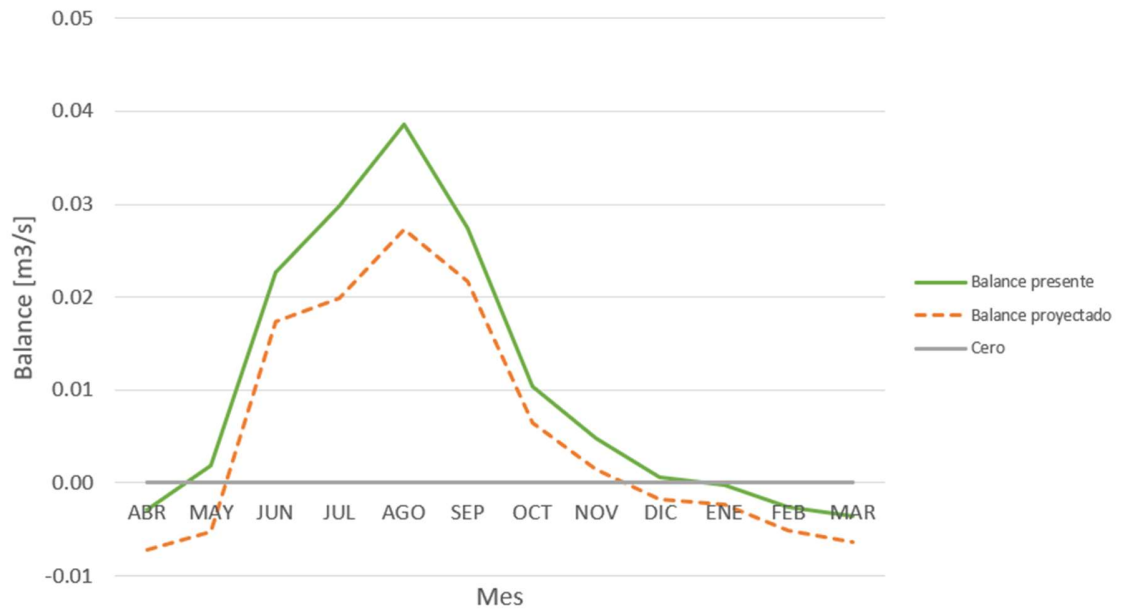


Figura 6.39: Balance hídrico mensual APR Oñico.

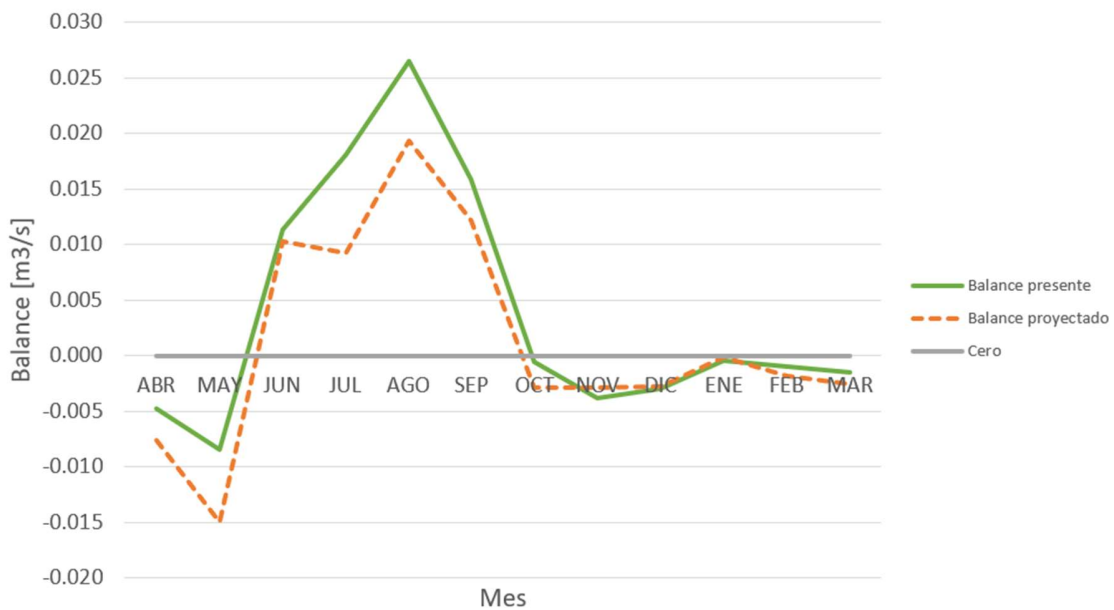


Figura 6.40: Balance hídrico mensual APR El Coihue.

Tabla 6.9: Resumen balances hídricos en todos los sistemas APR.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
APR Curarrehue	0,88	0,07	19,78	22,62	22,56	25,50	13,21	7,03	1,53	1,38	1,84	1,28
APR Santa María de Llaima	0,17	0,17	0,76	0,80	0,86	0,58	0,13	0,19	0,15	0,32	0,28	0,27
APR Putabla	-0,05	-0,07	0,19	0,39	0,31	0,08	-0,06	-0,03	-0,06	-0,07	-0,08	-0,06
APR Oñico	-0,01	-0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01
APR El Coihue	-0,01	-0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

6.4. Medidas de mitigación y Costos

Del balance hídrico realizado anteriormente se da cuenta que los sistemas APR de la zona cordillerana (i.e. APR de Curarrehue y APR Santa María de Llaima) no presentan déficit hídrico en el periodo proyectado ni actual, viéndose reflejado en valores positivos de balance en todos los meses del año hidrológico. Por otra parte, los sistemas APR de las zonas

central y costera presentan déficit hídrico en los meses de menor disponibilidad correspondientes a la época de verano.

Se presentan a continuación las medidas de mitigación propuestas en cada caso, para los sistemas APR que presentan déficit hídrico: APR Putabla, APR Oñoico y APR el Coihue. Así, los resultados expuestos corresponden al resumen de los costos de inversión, costos de operación y valores de VAN y CAE para cada alternativa propuesta. El detalle de la evaluación económica y el diseño de alternativas se presentan en el Anexo C.

El sistema APR de Putabla ubicado en la zona central de la región no presenta ninguna fuente de agua superficial extraíble para el abastecimiento del déficit hídrico presentado en el balance (Sayca Ingeniería, Estudio Hidrogeológico Putabla, 2021), siendo la primera alternativa en este caso la extracción de agua subterránea en las cercanías del sistema APR. La segunda alternativa corresponde al abastecimiento de la demanda de agua potable mediante camiones de aljibe.

Por otra parte, en los casos de cuencas costeras (APR Oñoico y APR EL Coihue) se propone una primera alternativa de captación superficial en el Río Imperial aguas arriba de la ciudad de Carahue, debido a que esta fuente presenta una alta concentración de cloruros aguas debajo de esta ciudad (Geolambda, Estudio hidrogeológico Oñoico, 2021). La segunda alternativa representa a su vez el abastecimiento del déficit con camiones de aljibe.

Cabe destacar que para las alternativas correspondientes a camiones de aljibe se considera en cada caso un déficit correspondiente a la demanda de agua potable y no al déficit máximo de la cuenca.

6.4.1. APR Putabla

El comité APR de Putabla presenta un déficit hídrico de 49,3 [L/s] en su caso más desfavorable (febrero).

1. Sondaje en cercanías de estero Mulpún

La alternativa consiste en la construcción de un pozo profundo de extracción de aguas subterráneas ubicado aproximadamente a 3,4 [km] de la localidad de Putabla según se muestra en la Figura 6.41. La profundidad óptima del pozo es de 90 metros según el estudio

hidrogeológico realizado, con un diámetro interno de 100 [mm] y tuberías de acero. Con esta información, considerando las pérdidas friccionales y singulares junto con las cotas de interés, es posible determinar una bomba que cumpla con los requisitos de altura y caudal necesarios. Una vez seleccionada la bomba es posible cotizar su precio de mercado.

Figura 6.41: Trazado de impulsión de agua alternativa n°1 APR Putabla.

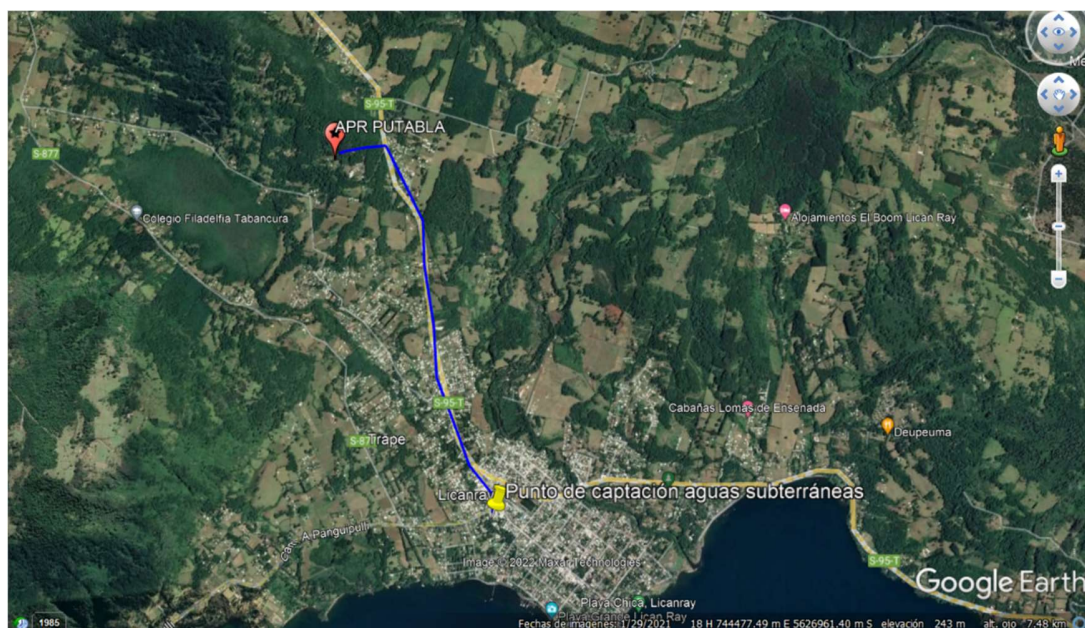


Tabla 6.10: Características bomba para alternativa n°1 APR Putabla.

Modelo Bomba	Potencia [kW]	Altura dinámica [m]	Caudal [L/s]	Precio [USD*]
UPA 250C - 150-8 + UMA 250D 190/21	180	259	49,3	18.671

*: Se considera una conversión de 1USD = 900 CLP del día 22/06/2022.

Luego, es posible calcular los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX) de esta alternativa.

Tabla 6.11: CAPEX alternativa n°1 APR Putabla.

Sección	Costo [CLP]
Capítulo I: Sondaje	119.677.500
Capítulo II: Cañería de impulsión	616.010.121
Capítulo III: Actividades finales	5.000.000
Subtotal neto	740.687.621
Impuesto al Valor Agregado (IVA)	140.730.648
Total mejoramiento proyecto sistema APR Putabla – Alternativa n°1	881.418.269

Tabla 6.12: OPEX alternativa n°1 APR Putabla.

Año	Población	Caudal medio	Caudal medio	Consumo Eléctrico	Consumo Eléctrico	Reposición	Mantenimiento	Total
		anual	anual	Potencia	Energía	equipos	Equipos	
	[hab.]	[L/s]	[m3/año]	[CLP]	[CLP]	[CLP]	[CLP]	[CLP]
2022	2.360	23,85						
...
2032	3.493	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2033	3.633	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	23.525.460	2.222.063	77.557.311
...
2060	10476	23,85	494,556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
TOTAL			18.793.111	464.760.673	1.504.011.274	70.576.380	84.438.389	2.123.786.715

Con estos costos es posible realizar la evaluación económica de esta alternativa y calcular el VAN y CAE respectivos.

Tabla 6.13: Evaluación económica alternativa n°1 APR Putabla.

Indicador económico	Valor [CLP]
Valor Actual Neto (VAN)	1.295.838.313
Valor Actual Neto (VAN)/arranque	1.340.060
Costo Anual Equivalente (CAE)	112.977.089
CAE/arranque	116.833

2. Camiones de aljibe

La alternativa consiste en abastecer la demanda de agua potable de la población a través de camiones de aljibe. Para esto, se utiliza un costo de 2,3 [CLP/L], que incluye el abastecimiento completo del recurso a través de este medio. Además, esta propuesta no tiene una inversión inicial, por lo que el CAPEX es nulo. Se presentan a continuación los resultados del OPEX y la evaluación económica para esta alternativa.

Tabla 6.14: OPEX alternativa n°2 APR Putabla.

Año	Población	Caudal medio	Caudal medio	Costos camiones
		anual	anual	de aljibe
	[hab.]	[L/s]	[m3/año]	[CLP]
2022	2.360	23,85		
2023	2.360	23,85	494,556	1.137.477.749
...
2060	10476	23,85	494,556	1.137.477.749
TOTAL			18.793.111	43.224.154.457

Tabla 6.15: Evaluación económica alternativa n°2 APR Putabla.

Indicador económico	Valor [CLP]
Valor Actual Neto (VAN)	13.072.466.811
Valor Actual Neto (VAN)/arranque	13.518.580
Costo Anual Equivalente (CAE)	1.139.717.227
CAE/arranque	1.178.611

6.4.2. APR Oñico

El comité APR de Oñico presenta un déficit hídrico de 2,7 [L/s] en su caso más desfavorable (abril).

1. Impulsión desde Río Imperial

La alternativa consiste en la implementación de una captación superficial en el Río Imperial aguas arriba de la ciudad de Carahue, aproximadamente a 10 [km] de la comunidad de Oñico, como se presenta en la figura 6.42. La impulsión de agua se realiza en una tubería de 90 [mm] de diámetro y de material HDPE. Con esta información, considerando las pérdidas friccionales y singulares junto con las cotas de interés, es posible determinar una bomba que cumpla con los requisitos de altura y caudal necesarios. Una vez seleccionada la bomba es posible cotizar su precio de mercado.

Figura 6.42: Trazado de impulsión de agua alternativa n°1 APR Oñico.

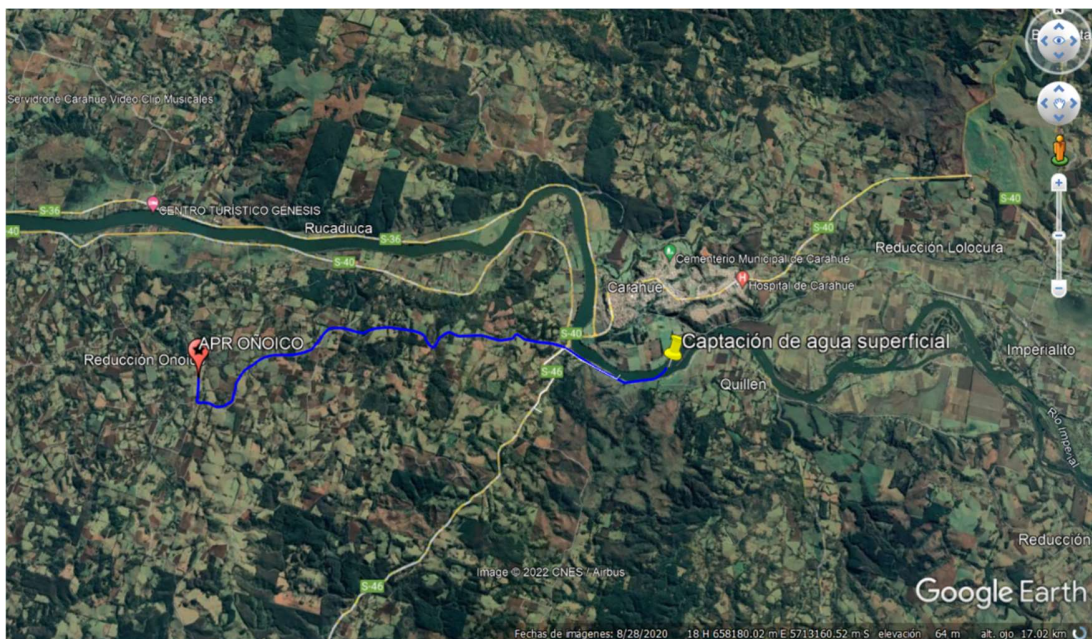


Tabla 6.16: Características bomba para alternativa n°1 APR Oñico.

Modelo Bomba	Potencia [kW]	Altura dinámica [m]	Caudal [L/s]	Precio [USD*]
UPA 200-11-12 + UMA 150E 37/22	35	260	2,7	9.276

*: Se considera una conversión de 1USD = 900 CLP del día 22/06/2022.

Luego, es posible calcular los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX) de esta alternativa.

Tabla 6.17: CAPEX alternativa n°1 APR Oñico.

Resumen de CAPEX [CLP]	
Capítulo I: Recinto de captación	100.111.154
Capítulo II: Cañería de impulsión	338.354.731
Capítulo III: Actividades finales	5.000.000
Subtotal neto	443.465.885
Impuesto al Valor Agregado (IVA)	84.258.518
Total mejoramiento proyecto sistema APR Oñico – Alternativa n°1	527.724.403

Tabla 6.18: OPEX alternativa n°1 APR Oñico.

Año	Población	Caudal medio	Caudal medio	Consumo Eléctrico	Consumo Eléctrico	Reposició n	Mantenció n	Total
		anual	anual	Potencia	Energía	equipos	Equipos	
	[hab.]	[L/s]	[m3/año]	[CLP]	[CLP]	[CLP]	[CLP]	[CLP]
2022	200	2,09						
2023	208	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
...
2033	308	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	11.687.760	1.330.398	18.021.064
...
2060	888	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
TOTAL			1.235.760	91.117.346	98.993.078	35.063.280	50.555.111	275.728.815

Con estos costos es posible realizar la evaluación económica de esta alternativa y calcular el VAN y CAE respectivos.

Tabla 6.19: Evaluación económica alternativa n°1 APR Oñico.

Indicador económico	Valor [CLP]
Valor Actual Neto (VAN)	476.173.757
Valor Actual Neto (VAN)/arranque	5.806.997
Costo Anual Equivalente (CAE)	41.514.998
CAE/arranque	506.280

2. Camiones de aljibe

Las especificaciones de esta alternativa son las mismas que para el sistema APR anterior.

Tabla 6.20: OPEX alternativa n°2 APR Oñico.

Año	Población	Caudal medio	Caudal medio	Costos camiones
		anual	anual	de aljibe
	[hab.]	[L/s]	[m3/año]	[CLP]
2022	200	2,09		
2023	208	2,09	32.520	74.796.000
...
2060	888	2,09	32.520	74.796.000
TOTAL			1.235.760	2.842.248.000

Tabla 6.21: Evaluación económica alternativa n°2 APR Oñico.

Indicador económico	Valor [CLP]
Valor Actual Neto (VAN)	857.904.227
Valor Actual Neto (VAN)/arranque	10.462.247
Costo Anual Equivalente (CAE)	74.796.000
CAE/arranque	912.146

6.4.3. APR El Coihue

El comité APR del Coihue presenta un déficit hídrico de 5 [L/s] en su caso más desfavorable (abril).

1. Impulsión desde Río Imperial

La alternativa consiste en la implementación de una captación superficial en el Río Imperial aguas arriba de la ciudad de Carahue, aproximadamente a 3 [km] de la comunidad del Coihue, como se presenta en la figura 6.43. La impulsión de agua se realiza en una tubería de 110 [mm] de diámetro y de material HDPE. Con esta información, considerando las pérdidas friccionales y singulares junto con las cotas de interés, es posible determinar una bomba que cumpla con los requisitos de altura y caudal necesarios. Una vez seleccionada la bomba es posible cotizar su precio de mercado.

Figura 6.43: Trazado de impulsión de agua alternativa n°1 APR El Coihue.

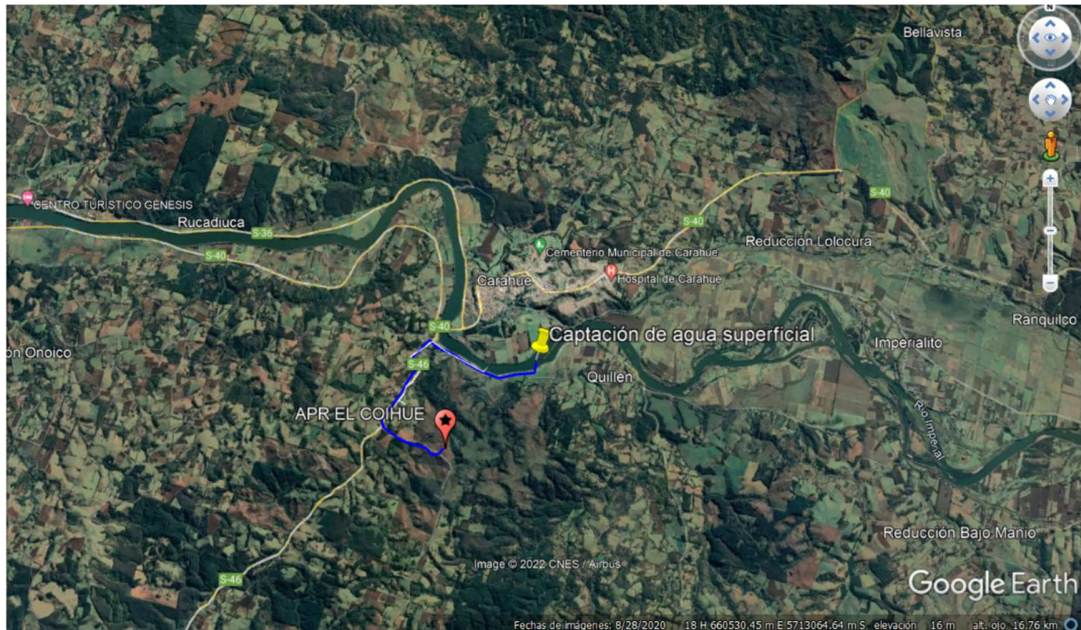


Tabla 6.22: Características bomba para alternativa n°1 APR El Coihue.

Modelo Bomba	Potencia [kW]	Altura dinámica [m]	Caudal [L/s]	Precio [USD*]
UPA 200-11-10 + UMA 150E 30/21	29	213	5	8.377

*: Se considera una conversión de 1USD = 900 CLP del día 22/06/2022.

Luego, es posible calcular los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX) de esta alternativa.

Tabla 6.23: CAPEX alternativa n°1 APR El Coihue.

Resumen de CAPEX [CLP]	
Capítulo I: Recinto de captación	100.111.154
Capítulo II: Cañería de impulsión	119.086.720
Capítulo III: Actividades finales	5.000.000
Subtotal neto	224.197.874
Impuesto al Valor Agregado (IVA)	42.597.596
Total mejoramiento proyecto sistema APR El Coihue – Alternativa n°1	266.795.470

Tabla 6.24: OPEX alternativa n°1 APR El Coihue.

Año	Población	Caudal medio	Caudal medio	Consumo Eléctrico	Consumo Eléctrico	Reposición	Mantención	Total
		anual	anual	Potencia	Energía	equipos	Equipos	
	[hab.]	[L/s]	[m3/año]	[CLP]	[CLP]	[CLP]	[CLP]	[CLP]
2022	372	3,5						
2023	387	3,5	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
...
2033	573	3,5	72.495	1.990.954	4.761.974	10.555.020	672.594	17.980.541
...
2060	1651	3,5	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
TOTAL			2.754.826	75.656.243	180.955.009	31.665.060	25.558.558	313.834.870

Con estos costos es posible realizar la evaluación económica de esta alternativa y calcular el VAN y CAE respectivos.

Tabla 6.25: Evaluación económica alternativa n°1 APR El Coihue.

Indicador económico	Valor [CLP]
Valor Actual Neto (VAN)	291.626.286
Valor Actual Neto (VAN)/arranque	1.918.594
Costo Anual Equivalente (CAE)	25.425.309
CAE/arranque	167.272

2. Camiones de aljibe

Las especificaciones de esta alternativa son las mismas que para los sistemas APR anteriores.

Tabla 6.26: OPEX alternativa n°2 APR El Coihue.

Año	Población	Caudal medio	Caudal medio	Costos camiones
		anual	anual	de aljibe
	[hab.]	[L/s]	[m3/año]	[CLP]
2022	372	3,5		
2023	387	3,5	72.495	166.739.486
...
2060	1651	3,5	72.495	166.739.486
TOTAL			2.754.826	6.336.100.457

Tabla 6.27: Evaluación económica alternativa n°2 APR El Coihue.

Indicador económico	Valor [CLP]
Valor Actual Neto (VAN)	1.912.488.765
Valor Actual Neto (VAN)/arranque	12.582.163
Costo Anual Equivalente (CAE)	166.739.486
CAE/arranque	1.096.970

6.4.4. Resumen de Costos

Tabla 6.28: Resumen de costos para todos los casos y alternativas.

APR	Alternativa	Costo Inversión [CLP]	Costo Operación (2060) [CLP]	Costo total [CLP]	Valor Actual Neto (VAN) [CLP]	Costo Anual Equivalente (CAE) [CLP]
Putabla	Sondaje	\$881.418.269	\$2.123.786.715	\$3.005.204.984	\$1.295.838.313	\$112.977.089
	Camión de aljibe	-	\$43.224.154.457	\$43.224.154.457	\$13.072.466.811	\$1.139.717.227
Oñoico	Captación superficial	\$527.724.403	\$275.728.815	\$803.453.218	\$476.173.757	\$41.514.998
	Camión de aljibe	-	\$2.842.248.000	\$2.842.248.000	\$857.904.227	\$74.796.000
El Coihue	Captación superficial	\$266.795.470	\$313.834.870	\$580.630.340	\$291.626.286	\$25.425.309
	Camión de aljibe	-	\$6.336.100.457	\$6.336.100.457	\$1.912.488.765	\$166.739.486

Tabla 6.29: Resumen de costos por arranque para todos los casos y alternativas.

APR	Alternativa	Costo Inversión [CLP]	Costo Operación (2060) [CLP]	Costo total [CLP]	Valor Actual Neto (VAN) [CLP]	Costo Anual Equivalente (CAE) [CLP]
Putabla	Sondaje	\$1.493.929	\$3.599.639	\$5.093.568	\$2.196.336	\$191.487
	Camión de aljibe	-	\$73.261.279	\$73.261.279	\$22.156.723	\$1.931.724
Oñoico	Captación superficial	\$10.554.488	\$5.514.576	\$16.069.064	\$9.523.475	\$830.300
	Camión de aljibe	-	\$56.844.960	\$56.844.960	\$17.158.085	\$1.495.920
El Coihue	Captación superficial	\$2.868.768	\$3.374.568	\$6.243.337	\$3.135.767	\$273.390
	Camión de aljibe	-	\$68.130.112	\$68.130.112	\$20.564.395	\$1.792.898

CAPITULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados del balance hídrico obtenido para los 5 sistemas APR estudiados, se realiza una comparación de factores de corrección y se encuentran ciertas correlaciones de vulnerabilidad según los distintos atributos de las cuencas comparadas. Se examinan también los costos y evaluación económica de las medidas de mitigación propuestas, identificando la óptima desde el punto técnico-económico en cada caso.

6.1. Hidrología Proyectada

En relación a la hidrología proyectada de los modelos GCM considerando el cambio climático en el periodo proyectado es posible afirmar que en todas las cuencas controladas estudiadas se obtuvieron variaciones promedio negativas entre los periodos futuro e histórico. Así, se presentan disminuciones de entre 9% y 22% en la oferta de recursos hídricos reflejada en caudales medios mensuales con probabilidad de excedencia 90%, siendo los casos de mayor disminución las cuencas de la zona costera (Río Mahuidanche en Santa Ana) y de la zona central (Río Cruces en Rucaco).

El régimen hidrológico de las cuencas estudiadas sufre ciertas modificaciones con las proyecciones de cambio climático, viéndose desplazado el peak desde el mes de agosto hacia el mes de julio en el caso de la cuenca del Río Cruces en Rucaco y modificándose por completo por la corrección como es el caso de las cuencas cordilleranas.

En términos generales, se presenta una tendencia de aumento de caudales en relación a los históricos en los meses de mayor disponibilidad hídrica, mientras que ocurre el caso contrario en los meses de menor disponibilidad. Así, los meses más afectados por las proyecciones del cambio climático corresponden a los situados entre los meses de noviembre y marzo, con un promedio de disminución de 14% de los caudales medios mensuales en este periodo.

6.2. Balance hídrico

En un primer lugar, es posible notar que 3 de las 5 localidades estudiadas presentan un déficit hídrico para el periodo proyectado hacia el año 2060, siendo estas los sistemas APR de Putabla, Oñoico y El Coihue.

La primera tendencia que llama la atención es la ubicación de las localidades, ya que dichas localidades representan a la parte costera y central de la región, mientras que la zona cordillerana se ve reflejada con 2 cuencas que no presentan déficit hídrico en este periodo.

Más específicamente, en el balance del APR de Curarrehue de la Figura 6.36 es posible observar que las curvas de balance presente y futura mantienen aproximadamente la misma forma, teniéndose una menor disponibilidad de agua en el periodo proyectado entre los meses de octubre y mayo, siendo la tendencia contraria en el resto del año. Además, vale la pena recalcar que el balance hídrico en el mes de mayo es muy cercano a los 0 [m³/s], por lo que, a pesar de no haber un déficit concreto en este trabajo, sería necesario considerar el caso en algún futuro. Se tiene una disminución promedio de disponibilidad entre ambos periodos de aproximadamente 27% para el APR de Curarrehue.

Luego, el APR de Santa María de Llaima presenta dos curvas de balance bastante diferentes. Mientras la curva de balance presente no presenta grandes variaciones en su valor a lo largo del año, la curva proyectada varía considerablemente, sobre todo entre los meses de mayo-junio y septiembre-octubre. A su vez, la tendencia de un balance de mayor valor en los meses de invierno se mantiene en relación al caso anterior, al igual que el promedio de disminución de disponibilidad entre el periodo futuro y presente, que para este APR corresponde aproximadamente a 33%.

Posteriormente, el sistema APR de Putabla que caracteriza la zona central de la región presenta déficit hídrico en 8 meses consecutivos del año, entre los meses de octubre y mayo. A pesar de esto, las curvas de balance entre ambos periodos mantienen la misma tendencia teniéndose una mayor disponibilidad de recursos hídricos en la estación de invierno en el periodo proyectado. Así, la disminución promedio del balance en esta localidad es mayor a los casos anteriores, siendo su valor de 325% entre ambas series temporales.

Con respecto a las localidades representativas al sector costero de la zona de estudio, el APR de Oñico presenta déficit en 6 meses consecutivos del año, entre diciembre y mayo. Nuevamente, las curvas correspondientes a ambos periodos no presentan cambios significativos en su forma, no obstante, en el caso de esta localidad se presenta una disminución en la disponibilidad en todos los meses del año, tanto invierno como verano. Para este caso, la disminución promedio del valor del balance es de 206%, siendo este valor mayor a las cuencas cordilleranas pero inferior a la cuenca central.

Por otro lado, el APR de El Coihue presenta un déficit hídrico en 8 meses consecutivos, correspondidos entre octubre y mayo, siendo este último mes marcado por el mayor déficit. Así, las curvas de ambos periodos son similares al igual que el caso anterior, pero presenta ciertos meses en los cuales la variación del balance es ligeramente positiva, como es el caso de los meses de noviembre y diciembre. La disminución promedio del valor de este balance para el APR del Coihue es de 58%, siendo este valor bastante inferior al caso correspondiente a la otra localidad costera.

6.3. Correcciones aplicadas

Es posible comparar las curvas de variación estacional crudas de cada cuenca controlada antes de ser corregidas para notar que existen ciertas tendencias en las diferencias que tienen las curvas modeladas y observadas. Así, las cuencas cordilleranas de Río Trancura y Río Allipén presentan un régimen hidrológico mixto, presentando dos "*peak*" en los meses de julio y septiembre/octubre respectivamente, mientras que la modelación del balance hídrico y los modelos GCM las categoriza con un régimen nivo-pluvial, con un peak de mayor caudal en el mes de octubre. Aquí es posible analizar una de las limitaciones que tiene el modelo, puesto que simula de manera poco precisa el régimen hidrológico de dichas cuencas. Particularmente, el caudal del periodo de deshielo en estas cuencas se ve sobreestimado con respecto al observado, mientras que en el periodo pluvial es lo contrario, cuando en realidad ambos valores de caudal deberían ser similares. Así, se puede inferir un problema en la modelación de la acumulación de agua en forma de nieve, lo cual da paso a la sobreestimación mencionada en estos casos. Posiblemente, esto se debe a una subestimación en las temperaturas del modelo, favoreciendo las áreas nivales y consistentemente disminuyendo la escorrentía en los meses pluviales.

Por otra parte, la cuenca definida por la estación Río Cruces en Rucaco muestra un régimen hidrológico pluvial en su serie de datos observada, con un peak en el mes de agosto. Asimismo, la serie de datos modelada en el balance hídrico también presenta un régimen pluvial, pero con un peak adelantado en el mes de junio. Por su parte, los modelos GCM simulan un régimen mixto con 2 peak, el primero que coincide con el peak del balance hídrico y el segundo que coincide con el peak de la serie observada. Este comportamiento de retardo o adelanto en el peak de caudal medio puede indicar una diferencia en la capacidad de

almacenamiento o *buffer* de agua de la cuenca en estudio, teniendo así una menor capacidad de retención si el peak se adelanta o bien una mayor capacidad de retención en el caso contrario.

Finalmente, la cuenca costera definida por la estación Río Mahuidanche en Santa Ana presenta un régimen hidrológico pluvial tanto en la serie de datos observada como en la modelada por el balance hídrico y modelos GCM. No obstante, el peak medido en la estación se presenta en el mes de agosto, mientras que el peak del balance hídrico y de los modelos ocurre en junio.

Analizando los factores de forzamiento n°2 de caudales medios anuales para forzar el balance hídrico hacia la serie de datos observada es posible identificar una similitud en los valores de caudal observado y modelado, traducida en valores de factores de forzamiento cercanos a 1. Esto puede indicar una buena representatividad anual de los modelos con respecto a la serie observada. No es posible establecer una correlación con respecto a la localización de las cuencas y el valor de estos factores. También es posible notar la representatividad del régimen hidrológico en los coeficientes de Pardé en cada caso, tomando valores altos en los peak respectivos.

Como conclusión final entonces, de los 4 casos observados, se puede decir que el régimen hidrológico modelado en el balance hídrico corresponde con el observado en las cuencas de régimen pluvial, mientras que las cuencas de régimen mixto presentan una diferencia importante en los caudales de deshielo. Este comportamiento puede explicarse a través del fenómeno de acumulación de agua en forma de nieve y hielo en las cuencas cordilleranas, obteniéndose caudales sobreestimados con un promedio de 45% en la época de deshielo, siendo este un buen punto de observación para próximas correcciones del modelo.

6.4. Tendencias y correlaciones

La primera tendencia que se nota en los resultados del balance hídrico es que el déficit de agua se presenta en las cuencas costeras y central, quedando las cuencas cordilleranas con suficiente disponibilidad del recurso en la proyección realizada. Así, una localización cercana a la cordillera indicaría un menor impacto del cambio climático en torno a la disponibilidad de recursos hídricos, mientras que las zonas centrales y costeras se verían afectadas de manera similar. En relación a los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados en la región, es posible afirmar

que se reparten de manera equitativa en la región, lo cual llama la atención siendo que la zona cordillerana presenta disponibilidades hídricas mayores que la zona central y costera.

En torno a la correlación entre los factores de corrección de cambio climático (factor nº3) presentada en el Anexo D es posible notar pequeñas correlaciones entre los pares similares de cuencas controladas y no controladas, siendo el mayor factor de correlación de 74% en el caso de las cuencas centrales. Con esto, no es posible determinar una relación directa entre estos factores de cambio climático por el bajo nivel de confianza de la regresión lineal, pero si vale la pena recalcar una correlación considerablemente menor en el caso de las cuencas cordilleranas, mientras que en los otros dos casos se tiene una correlación media a alta. Esta información nos indica que no es del todo correcto extrapolar las proyecciones climáticas entre cuencas similares, puesto que pueden existir condiciones y microclimas que diferencien ambas cuencas, pudiendo diferenciarse también sus disponibilidades hídricas futuras.

Por otra parte, el análisis de atributos característicos de las cuencas en torno a sus coeficientes de Pardé mensuales muestra ciertas tendencias interesantes presentadas en el Anexo D. Así, se destaca la tendencia por porcentaje de cobertura nival de la cuenca, la cual al aumentar su valor se disminuye la variabilidad del coeficiente de Pardé respectivo a esa cuenca. Esto se puede traducir en que las cuencas de la cordillera presentan una variación menor en torno a este coeficiente, lo cual se ve reflejado en caudales que no varían mucho del promedio anual a lo largo de este. Esta tendencia se replica en el caso del análisis de la cota media de las cuencas en relación al coeficiente de Pardé, la explicación de esta tendencia es la expuesta en el caso anterior. Por último, la ubicación en la vertical (latitud) de la cuenca con respecto al coeficiente de Pardé muestra una tendencia contraria a los casos anteriores, teniéndose una disminución de la variabilidad de este coeficiente en cuencas con una mayor latitud. Esto se traduce en una mayor constancia en los caudales con respecto al promedio anual en cuencas de la zona norte de la región, teniéndose coeficientes de Pardé mayores en las cuencas sureñas, sin embargo, deberían compararse estos resultados con cuencas de otras regiones para que estos sean significativos. Existe una tendencia similar, pero menos marcada, en torno a la ubicación longitudinal de la cuenca, presentándose una mayor variabilidad en las cuencas costeras que en las de la zona cordillerana, reflejando así la misma tendencia que las primeras correlaciones expuestas en este párrafo. Esta tendencia se explica en

base a los regímenes hidrológicos de las cuencas costeras, presentando caudales con un peak marcado en el año, dando lugar a diferencias de caudal considerables a lo largo de este, mientras que el régimen mixto de las cuencas cordilleranas incide en una menor desviación estándar de los caudales y por ende una menor variabilidad del coeficiente de Pardé.

Si se analiza la serie promedio mensual de temperatura, precipitación y coeficiente de Pardé de las cuencas controladas es posible establecer ciertas relaciones. Primero, las cuencas cordilleranas marcan una diferencia en torno a las temperaturas bajas con respecto a las otras cuencas, al igual que en la variación del coeficiente de Pardé a lo largo del año, evidenciándose así lo analizado en la parte anterior. Luego, si se analiza la serie de precipitaciones medias anuales, es posible notar un pequeño crecimiento en el mes de agosto, el cual puede dar explicación al error presentado en la modelación del régimen hidrológico de las cuencas cordilleranas, acumulando una gran cantidad de nieve en lugar de entregarla en forma de escurrimiento directo en aquellos meses. En términos generales, las series correspondientes a estas variables meteorológicas siguen un patrón correcto en torno a la localización de las cuencas y sus características, por lo que los resultados del balance hídrico y estimación de caudales cuentan con un respaldo consistente en la información climática disponible.

Finalmente, se establece un índice de vulnerabilidad con 3 categorías según el porcentaje de disminución en la oferta hídrica: Vulnerabilidad Baja (0 a 10%), Vulnerabilidad Media (11 a 20%) y Vulnerabilidad Alta (>21%). De esta forma, la cuenca del Río Trancura en Curarrehue representativa de este mismo APR se encuentra dentro de la categoría con vulnerabilidad baja, con una disminución promedio de 11% en la disponibilidad de agua del año hidrológico. Al mismo tiempo, las cuencas de los APR de Santa María de Llaima y Putabla se encuentran dentro de la categoría de vulnerabilidad media con porcentajes de disminución de 18% y 19% respectivamente. Luego, las comunidades ubicadas en las zonas costeras de la región tienen un índice de vulnerabilidad alto, ya que presentan actualmente problemas de abastecimiento de agua en algunos meses del año, teniendo las proyecciones modeladas una disminución de 21% y 24% en las localidades de Oñoico y El Coihue respectivamente.

6.5. Medidas de mitigación

En relación a las medidas de mitigación propuestas en este trabajo, es posible analizar las diferencias que existen entre las alternativas que

requieren de una inversión inicial importante y aquella que sólo considera un costo operacional cada año. De esta manera, observando la tabla resumen de costos de las medidas de mitigación (Tabla 6.27), es posible afirmar que los costos totales de la implementación de camiones de aljibe para satisfacer la demanda faltante son de un orden de magnitud mayor en comparación a las propuestas de sistemas de impulsión y sondaje.

Además, estudiando el desglose de los costos presentado en el Anexo C, se puede generalizar que, en torno a los costos de inversión CAPEX de las alternativas propuestas, la mayor parte de la inversión se realiza en la componente de construcción de las cañerías de impulsión desde la captación hacia el sistema APR, representando un promedio de 70% de los costos de inversión. Dentro de este costo, dos elementos tienen mayor peso que el resto: el movimiento de tierras (y respectivo relleno) y el suministro de cañerías de HDPE. Así, dependiendo de la distancia que se tenga que trazar en tuberías y el diámetro diseñado de estas se tienen distintos en los cuales los costos de uno son mayores o menores al otro. Como la alternativa de camiones de aljibe no presenta costos de inversión no hay duda de que la implementación de las captaciones propuestas presenta una mayor dificultad de realizarse en caso de no tener recursos monetarios para la inversión.

Luego, en relación a los costos operacionales OPEX de las alternativas propuestas, es común en todas las medidas de impulsión de agua que la mayor parte de este costo se concentre en consumo eléctrico necesario para esta. Como promedio de los 3 casos, se tiene que el 81% del costo operacional de las alternativas de impulsión corresponde a consumo eléctrico. Esta afirmación puede considerarse para una proyección en torno a la reducción de costos para este tipo de proyectos, con la utilización de energías renovables para abastecer la necesidad de muchas personas, al menor costo posible. Por el otro lado, el gasto en entregar un litro de agua con un camión de aljibe es de 2,3 [CLP/L], sin embargo, sólo un 21% de este costo corresponde efectivamente al recurso hídrico, mientras que la diferencia se reparte entre personal, camiones y arriendo, entre otros.

Es interesante analizar el cuadro temporal en el cual se realizan las proyecciones de este trabajo, ya que, al ser un periodo de bastante lejanía, puede tener involucrado un sesgo temporal en los costos, por lo que vale la pena estudiar los casos en el corto plazo. Así, es posible determinar que se requiere de un promedio de 4 años de operación de camiones de aljibe para pagar el costo de inversión de una medida de

impulsión de agua en las zonas costeras, mientras que en la zona central del APR de Putabla este tiempo de pago es de tan solo 1 año. Además, entre las 2 comunidades costeras estudiadas existe una diferencia notoria en los costos de inversión de la alternativa de impulsión, debido principalmente a la distancia que debe tener el trazado de dicha impulsión hasta llegar al APR. En términos de costos de inversión del sondaje y de la captación superficial, es posible afirmar que tienen órdenes de magnitud similares para los casos estudiados.

Finalmente, es posible observar los valores de los indicadores económicos calculados para los 3 sistemas APR evaluados, teniéndose diferencias consistentes a los costos según lo mencionado anteriormente. Tanto el VAN como el CAE en las medidas de mitigación que requieren una inversión inicial son un 27% del VAN y CAE de la alternativa de abastecimiento con camión de aljibe, lo que indica directamente una conveniencia en la determinación de optar por las alternativas de impulsión de agua en los 3 casos, significando un ahorro de más de 48 mil millones de pesos en comparación a las alternativas de abastecimiento con camiones.

De todas, formas, el cambio climático supone que existirá un aumento de tarifa, la cual en el caso más desfavorable será de un 50% en el periodo proyectado en este trabajo, teniéndose así una variación considerable en el precio de la implementación de estas alternativas y del consumo de agua potable. Así, este aumento en la tarifa puede llevar a una disminución en el promedio de dotación de agua potable por habitante que se tiene en la actualidad, reduciendo el consumo a menores niveles y generando una mayor consciencia sobre la utilización del recurso hídrico.

La implementación de la alternativa optima supone que el litro de agua tiene un valor de 340 pesos, lo cual representa un costo unitario de aproximadamente el 15% con respecto al camión aljibe.

6.6. Discusión

Una vez obtenidos los resultados de caudales modelados por el balance hídrico, es necesario darse el tiempo de analizar los alcances y limitaciones que presenta el producto del cual se extrajeron y procesaron los datos. Así, la primera limitación viene dada en la modelación de los regímenes hidrológicos tanto en el balance hídrico como en los modelos GCM, ya que presenta diferencias considerables en torno a la serie de

caudales observados en la estación fluviométrica, sobre todo en el caso de las cuencas cordilleranas. Esta limitación conlleva a una dependencia a tener información observada completa para obtener información en alguna zona que no se encuentre controlada, lo cual resulta ser difícil en ciertas zonas del país en donde la red hidrométrica nacional no tiene la densidad adecuada. Este es el caso de las cuencas norteñas del país, caracterizadas por su falta de agua en los meses secos, en las cuales sería útil realizar una proyección de este estilo.

Además, durante el trabajo se plantea una primera corrección intuitiva para el ajuste que se requería de datos, presentada en el Anexo B. Esta corrección entrega buenos resultados para ciertos casos, como el de las localidades de la costa, pero tiene tendencias que llaman la atención en las cuencas centrales y de la cordillera, ya que presentan diferencias de caudales entre meses consecutivos que no son representativas de la realidad que se conoce hasta el momento. Esta diferencia viene dada por la definición de uno de los factores de forzamiento planteado, ya que se transfiere una corrección de la cuenca controlada similar a la estudiada. Esto provoca una dependencia de mensualidad y régimen de la cuenca del APR con respecto a la cuenca controlada, que se ve reflejada en una falsa corrección para el sistema APR en un mes que no presenta mucha diferencia de entre caudales modelados y observados debido a la diferencia que presenta la cuenca controlada similar en aquel mes. Por este motivo se plantea la segunda corrección, para evitar traspasos de régimen hidrológico inapropiados.

CAPITULO 8: CONCLUSIONES

Finalizando el trabajo, vale la pena remontarse hasta los objetivos iniciales de esta memoria para definir las conclusiones de mayor relevancia. Con esto, es posible afirmar en un primer lugar que la disminución de recursos hídricos en la época de estiaje es notoria en la zona, siendo los sectores más afectados aquellos de la costa y de la zona central de la región. A su vez, es importante destacar que, según la información enunciada en la Revisión Bibliográfica y los datos del balance hídrico calculados, existen múltiples localidades que presentan hoy en día desabastecimiento de agua potable en algunos meses del año, viéndose directamente afectado el saneamiento básico y, por ende, su calidad de vida. En particular, se espera un descenso entre un 11% y 24% para los caudales medios anuales de las cuencas estudiadas, donde los meses de menor disponibilidad presentan un déficit de entre un 37% y un 57%.

Además, después de este estudio es claro que los sistemas de Agua Potable Rural son vulnerables al cambio climático, puesto que hasta el mejor de los casos evaluados tiene una disminución considerable en su disponibilidad de recursos hídricos. No obstante, es imperativo mencionar que cada caso estudiado es único, debido a que las diferentes localidades de la región y del país presentan diferentes condiciones geomorfológicas y de disponibilidad de agua, por lo cual no existe un plan transversal que aplique en todos los casos si no que se deben concentrar los estudios en las distintas zonas y condiciones, para así abordar el problema de una manera óptima. Las medidas de mitigación dependerán de la capacidad que se tenga de realizar trasvasijos de agua como también de la hidrogeología del sector, condicionando por estos factores los costos de mitigación asociados al cambio climático.

Para solucionar los problemas de déficit se cuenta con diferentes alternativas, que se diferencian principalmente en la forma en la cual se aplican. Así, medidas de mitigación instantáneas como la utilización de camiones de aljibe no solamente satisfacen momentáneamente una escasez, sino que también implican un costo promedio 75% mayor a lo largo del tiempo, prefiriéndose en cualquier caso una solución diseñada a medida de mayor beneficio final, con un costo unitario del litro de agua de la alternativa óptima de tan sólo un 15% del costo de la alternativa sin inversión inicial. Asimismo, el gran aporte que genera la conciencia sobre el consumo hídrico a nivel nacional es indispensable para evitar casos de déficit, con el objetivo de optimizar el uso de agua para el consumo de

todos. En definitiva, el cambio climático afecta sin lugar a duda en múltiples aspectos de la vida cotidiana de las personas, llegando incluso a comprometer el consumo de un bien indispensable para la vida como es el agua. Con esto, se espera aportar de alguna forma en uno de los grandes desafíos que presenta la humanidad para su subsistencia en el planeta azul.

Bibliografía

- Aguilera & Pouilly, A. &. (2012). *Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina.*
- Aranda, P. A. (2013). *Los derechos de aprovechamiento de aguas en Chile y su marco regulatorio.*
- BCN, B. d. (2021). *Clima y Vegetación Región de la Araucanía.*
- Benavides & León. (2007). *Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y Cambio Climático.*
- CNR, C. N. (2000). *Pozos profundos.*
- CR2. (s.f.). *CAMELS-CL.*
- CR2, C. d. (2015). *Report to the Nation: The Central Chile Mega-Drought. Technical report from the Center for Climate and Resilience Research.*
- DGA, D. G. (1986). *Mapa Hidrogeológico de Chile.*
- DGA, D. G. (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional.*
- Diario Oficial, D. O. (1978). *Norma Chilena Oficial: NCh 691. Of 98.*
- Diario Oficial, D. O. (1984). *Norma Chilena Oficial NCh 409/1. Of 2005.*
- DOH, D. d. (2007). *Informe Final de Evaluación Programa Agua Potable Rural.*
- DOH, D. d. (2019). *Manual de Proyectos de Agua Potable Rural.*
- DOH, D. d. (2019). *Tríptico de la Historia de los APR.*
- DOH, D. d. (2021). *Informe Técnico Servicio Sanitario Rural El Coigue – Comuna de Carahue.*
- Garreaud & Boisier. (2017). *The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation.*
- Garreaud & Boisier. (2019). *The Central Chile mega drought (2010-2018) : A climate dynamics perspective.*
- Geolambda. (2021). *Estudio Hidrogeológico APR Curarrehue.*
- Geolambda. (2021). *Estudio hidrogeológico Oñico.*

INE, I. N. (2017). *Censo*.

INE, I. N. (2021). *ine.cl*. Obtenido de [https://www.ine.cl/prensa/2021/09/13/conozca-cu%C3%A1les-son-las-comunas-100-urbanas-y-100-rurales-del-pa%C3%ADs#:~:text=Respecto%20a%20la%20evoluci%C3%B3n%20a,\(18.831.623%20habitantes\)](https://www.ine.cl/prensa/2021/09/13/conozca-cu%C3%A1les-son-las-comunas-100-urbanas-y-100-rurales-del-pa%C3%ADs#:~:text=Respecto%20a%20la%20evoluci%C3%B3n%20a,(18.831.623%20habitantes).).

IPCC, I. P. (2014). *Cambio Climático: Informe de Síntesis*.

IPCC, I. P. (2021). *Climate Change 2021, The Physical Science Basis*.

Lagos & Mendoza, M. L. (2020). *CI5101: Hidrología*.

MMA, M. d. (2012). *Reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo*.

MMA, M. d. (2014). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*.

MOP, M. d. (1981). *Código de Aguas*.

Niemeyer, H. (1980). *Hoyas Hidrográficas de Chile, Novena Región*.

Rulamahue, C. (2021). *Región de la Araucanía*.

Sanhueza, J. C. (2021). *CI6103: Proyectos de Sistemas Hidráulicos/Sanitarios/Ambiental*.

Santamaría. (2010). *Forzamiento Radiativo y cambios químicos en la atmósfera*.

Sayca Ingeniería. (2021). *Estudio Hidrogeológico localidad Santa María de Llaima*.

Sayca Ingeniería. (2021). *Estudio Hidrogeológico Putabla*.

Vargas. (2020). *Hidrología*.

Anexos

Anexo A: Detalles de corrección de modelos

En las Tablas A.1 a A.8, se presentan los valores de los de caudales mensuales históricos y proyectados para las 4 cuencas controladas estudiadas. Las Figuras A.1 a A.4 presentan la diferencia de caudales históricos y proyectados de los 4 modelos GCM para las 4 cuencas.

Río Allipén en Melipeuco

Tabla A.1: Caudales mensuales de las CVE de la cuenca Río Allipén en Melipeuco.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	10,6	23,6	22,1	12,5	14,4	37,5	92,0	97,5	32,5	10,6	7,2	6,3	42,5
IPSL	9,7	20,7	29,4	18,4	16,0	33,5	89,1	80,4	30,9	9,7	5,4	5,3	40,1
CSIRO	8,8	27,5	37,0	20,9	18,9	36,7	85,9	85,6	25,9	10,6	6,6	6,2	40,4
CCSM4	11,0	28,9	32,9	16,8	15,9	33,1	91,0	85,3	33,9	11,5	7,5	6,2	44,0
regionalización	10,9	22,8	47,1	27,2	20,7	39,8	74,8	52,7	20,1	9,5	7,2	7,0	40,2
observado	34,3	39,6	56,5	52,8	55,7	59,6	60,4	55,2	45,6	41,7	40,4	37,1	55,1

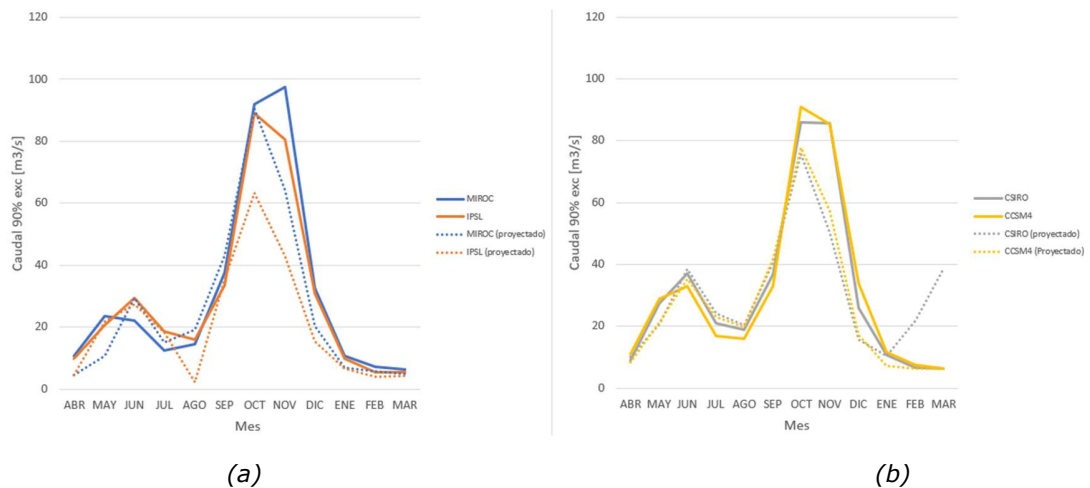


Figura A.1. (a): CVE Rio Allipén en Melipeuco modelos GCM MIROC e IPSL periodo línea base y proyectado. (b): CVE Rio Allipén en Melipeuco modelos GCM CSIRO y CCSM4 periodo línea base y proyectado.

Tabla A.2: Caudales mensuales proyectados de las CVE obtenidas de los 4 modelos GCM en la cuenca Río Allipén en Melipeuco.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	4,4	10,6	29,3	14,9	19,0	43,2	90,5	64,2	20,4	6,8	5,7	4,7	36,2
IPSL	4,4	21,8	27,2	18,3	2,2	35,6	63,3	42,8	15,3	6,6	4,0	4,1	30,9
CSIRO	10,1	20,8	38,4	24,3	20,4	40,7	75,8	50,2	15,6	10,4	21,7	38,4	46,5
CCSM4	8,4	21,2	35,4	22,9	19,8	41,6	77,7	57,3	17,1	7,2	6,2	6,3	38,5

Río Trancura en Curarrehue

Tabla A.3: Caudales mensuales de las CVE de la cuenca Río Trancura en Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	6,6	12,7	12,9	9,1	7,7	16,9	41,7	48,9	28,5	10,6	5,1	4,5	22,7
IPSL	5,0	11,0	17,6	12,9	9,1	13,8	42,1	40,7	26,0	9,7	4,3	3,3	21,3
CSIRO	5,8	13,2	20,8	14,6	11,4	15,8	38,7	42,2	22,8	8,7	4,9	4,3	21,5
CCSM4	6,5	13,9	19,7	11,1	8,4	13,8	44,0	46,7	26,7	11,0	5,3	4,4	23,6
regionalización	7,1	12,6	22,6	17,1	13,1	18,6	35,1	31,8	15,1	6,9	4,4	4,6	21,8
observado	5,0	8,3	25,7	24,6	24,3	25,9	22,9	16,8	10,4	6,7	5,3	4,1	20,5

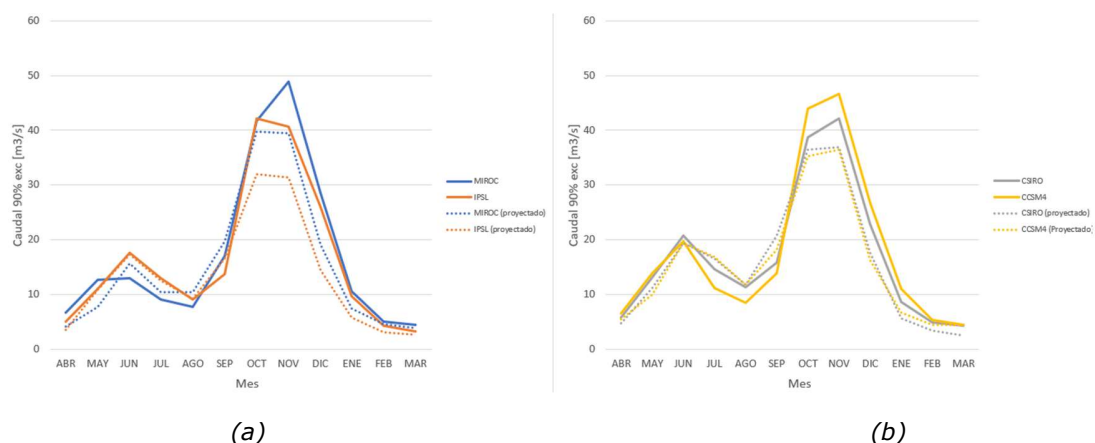


Figura A.2. (a): CVE Río Trancura en Curarrehue modelos GCM MIROC e IPSL periodo línea base y proyectado. (b): CVE Río Trancura en Curarrehue modelos GCM CSIRO y CCSM4 periodo línea base y proyectado.

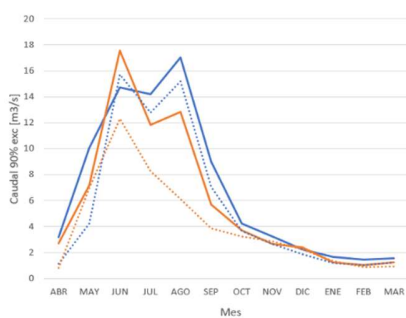
Tabla A.4: Caudales mensuales proyectados de las CVE obtenidas de los 4 modelos GCM en la cuenca Río Trancura en Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	4,1	7,7	15,7	10,4	10,4	19,7	39,7	39,4	19,2	7,5	4,6	3,8	20,4
IPSL	3,5	10,8	17,3	12,4	9,3	16,5	31,9	31,4	14,5	5,7	3,1	2,7	17,3
CSIRO	4,8	11,2	19,3	16,5	11,8	20,8	36,4	36,9	17,6	5,6	3,4	2,5	21,3
CCSM4	5,5	10,0	19,4	16,9	11,8	18,2	35,3	36,5	16,2	6,7	4,4	4,5	20,3

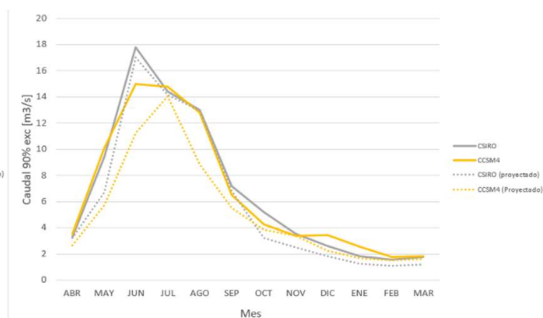
Río Mahuidanche en Santa Ana

Tabla A.5: Caudales mensuales de las CVE de la cuenca Río Mahuidanche en Santa Ana.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	3,2	10,1	14,7	14,2	17,0	9,0	4,3	3,3	2,2	1,7	1,5	1,6	11,4
IPSL	2,7	7,2	17,6	11,8	12,8	5,7	3,7	2,7	2,4	1,2	1,0	1,2	10,1
CSIRO	3,3	9,4	17,8	14,4	13,0	7,2	5,2	3,5	2,6	1,8	1,6	1,8	10,3
CCSM4	3,5	10,1	15,0	14,8	12,8	6,5	4,3	3,4	3,4	2,5	1,8	1,8	11,4
region alizaci ón	4,4	8,5	18,4	15,8	13,8	10,6	5,0	4,7	2,8	1,9	1,7	2,0	11,6
observ ado	3,0	6,0	15,6	18,5	22,1	17,5	10,4	6,9	4,4	3,5	2,7	2,5	12,1



(a)



(b)

Figura A.3. (a): CVE Río Mahuidanche en Santa Ana modelos GCM MIROC e IPSL periodo línea base y proyectado. (b): CVE Río Mahuidanche en Santa Ana modelos GCM CSIRO y CCSM4 periodo línea base y proyectado.

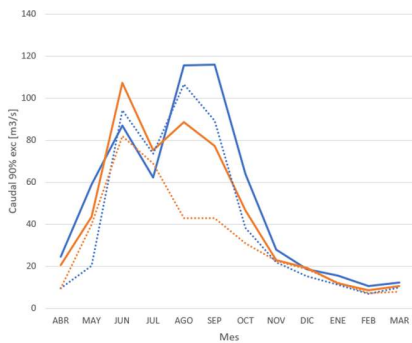
Tabla A.6: Caudales mensuales proyectados de las CVE obtenidas de los 4 modelos GCM en la cuenca Río Mahuidanche en Santa Ana.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	1,2	4,2	15,7	12,8	15,2	7,1	3,6	2,7	1,9	1,2	1,0	1,3	9,6
IPSL	0,8	7,0	12,3	8,3	6,1	3,9	3,3	2,8	2,2	1,4	0,9	0,9	7,4
CSIRO	3,2	6,7	17,0	14,2	13,0	6,8	3,2	2,5	1,8	1,3	1,1	1,2	10,1
CCSM4	2,7	5,7	11,2	14,0	8,8	5,5	3,8	3,4	2,3	1,7	1,5	1,6	9,6

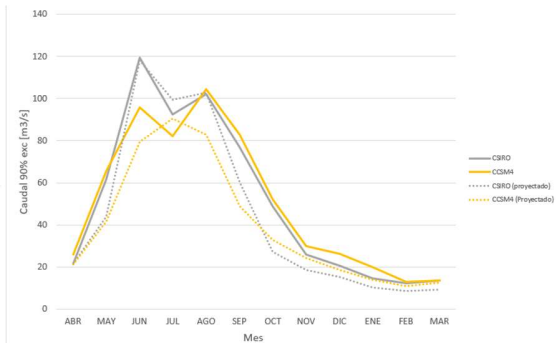
Río Cruces en Rucaco

Tabla A.7: Caudales mensuales de las CVE de la cuenca Río Cruces en Rucaco.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	24,5	58,9	86,9	62,3	115,8	116,0	63,8	27,9	18,6	15,4	10,7	12,3	78,8
IPSL	20,6	43,5	107,3	75,4	88,4	77,4	46,6	23,0	19,3	11,9	8,5	10,5	70,9
CSIRO	21,5	61,4	119,4	92,5	102,0	76,7	49,0	25,8	20,5	14,7	12,1	13,6	71,5
CCSM4	26,0	65,4	95,9	82,3	104,4	82,7	52,1	29,9	26,3	20,0	12,8	13,5	78,7
regionalización	28,4	51,5	110,4	102,0	92,0	74,4	34,0	30,7	20,7	16,1	12,9	15,7	73,0
observado	11,0	20,9	75,7	95,3	104,3	82,4	42,4	27,9	17,2	11,5	9,5	9,2	53,9



(a)



(b)

Figura A.4. (a): CVE Río Cruces en Rucaco modelos GCM MIROC e IPSL periodo línea base y proyectado. (b): CVE Río Cruces en Rucaco modelos GCM CSIRO y CCSM4 periodo línea base y proyectado.

Tabla A.8: Caudales mensuales proyectados de las CVE obtenidas de los 4 modelos GCM en la cuenca Río Cruces en Rucaco.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	9,4	20,1	94,2	73,4	106,5	89,4	38,1	21,8	15,3	11,3	6,7	9,9	67,9
IPSL	9,4	39,7	82,0	68,9	42,8	43,0	30,9	22,5	18,4	12,2	7,1	7,8	51,0
CSIRO	21,7	43,8	118,0	99,6	102,7	60,3	27,4	18,5	15,2	10,4	8,6	9,3	67,7
CCSM4	21,3	41,7	79,7	90,6	82,7	48,7	32,9	24,4	18,5	13,9	11,0	12,7	64,0

Anexo B: Especificaciones del balance hídrico

APR Curarrehue

En la Tabla B.1 se presentan los caudales mensuales históricos del APR, las Tablas B.2 y B.3 presentan los caudales proyectados corregidos con ambas metodologías y las Tablas B.4 a B.6 presentan los valores de demanda hídrica del APR. En la Figura B.1 se presenta la clasificación de los derechos de aprovechamiento de aguas de esta cuenca.

Tabla B.1: Caudales mensuales de las CVE periodo línea base APR Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUA L
MIRO C	6,6	12,7	12,9	9,1	7,7	16,9	41,7	48,9	28,5	10,6	5,1	4,5	22,7
IPSL	5,0	11,0	17,6	12,9	9,1	13,8	42,1	40,7	26,0	9,7	4,3	3,3	21,3
CSIRO	5,8	13,2	20,8	14,6	11,4	15,8	38,7	42,2	22,8	8,7	4,9	4,3	21,5
CCSM 4	6,5	13,9	19,7	11,1	8,4	13,8	44,0	46,7	26,7	11,0	5,3	4,4	23,6
regio naliza ción	7,1	12,6	22,6	17,1	13,1	18,6	35,1	31,8	15,1	6,9	4,4	4,6	21,8
obser vado	5,0	8,3	25,7	24,6	24,3	25,9	22,9	16,8	10,4	6,7	5,3	4,1	20,5
obser vado* *	4,9	8,2	25,4	24,3	24,0	25,5	22,7	16,6	10,3	6,7	5,2	4,0	-

Tabla B.2: Caudales mensuales de las CVE corregidos con factores de forzamiento, periodo proyectado APR Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIRO C	3,1	5,0	31,3	28,3	33,1	30,0	21,8	13,5	7,0	4,8	4,7	3,5
IPSL	3,5	8,1	25,3	23,8	24,9	31,0	17,4	12,9	5,8	4,0	3,8	3,3
CSIRO	4,1	7,0	23,9	27,8	25,2	34,1	21,6	14,7	8,0	4,4	3,6	2,4
CCSM 4	4,2	5,9	25,2	37,5	33,9	33,9	18,4	13,1	6,3	4,1	4,3	4,1

Tabla B.3: Caudales mensuales de las CVE corregidos con coeficiente de Pardé, periodo proyectado APR Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIRO C	3,0	4,9	31,0	27,9	32,7	29,6	21,6	13,3	6,9	4,7	4,7	3,4
IPSL	3,4	8,0	25,0	23,5	24,6	30,7	17,2	12,8	5,7	4,0	3,8	3,3
CSIRO	4,1	7,0	23,6	27,5	24,9	33,7	21,3	14,5	7,9	4,3	3,6	2,4
CCSM 4	4,2	5,9	24,9	37,0	33,5	33,5	18,2	12,9	6,2	4,0	4,3	4,1



Figura B.1: Clasificación de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, APR Curarrehue.

Tabla B.4: Derechos de Aprovechamiento de aguas superficiales totales APR Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Total DAA [m3/s]	36,8	74,0	93,4	90,7	62,2	57,3	56,4	50,8	38,1	33,7	34,4	34,5

Tabla B.5: Caudal ecológico mensual APR Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Caudal Ecológico [m3/s]	2,3	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	4,4	2,4	1,8	1,6

Tabla B.6: Demanda de agua potable mensual APR Curarrehue.

Demanda de agua potable [m ³ /s]	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
2022	0,0013	0,0013	0,0011	0,0011	0,0009	0,0011	0,0009	0,0011	0,0016	0,0020	0,0020	0,0016
2060	0,0066	0,0066	0,0053	0,0053	0,0046	0,0053	0,0046	0,0053	0,0080	0,0100	0,0100	0,0080

APR Santa María de Llaima

En la Tabla B.7 se presentan los caudales mensuales históricos del APR, las Tablas B.8 y B.9 presentan los caudales proyectados corregidos con ambas metodologías y las Tablas B.10 a B.12 presentan los valores de demanda hídrica del APR. En la Figura B.2 se muestran las CVE corregidas con la metodología descartada, mientras que la Figura B.3 presenta la clasificación de los derechos de aprovechamiento de aguas de esta cuenca.

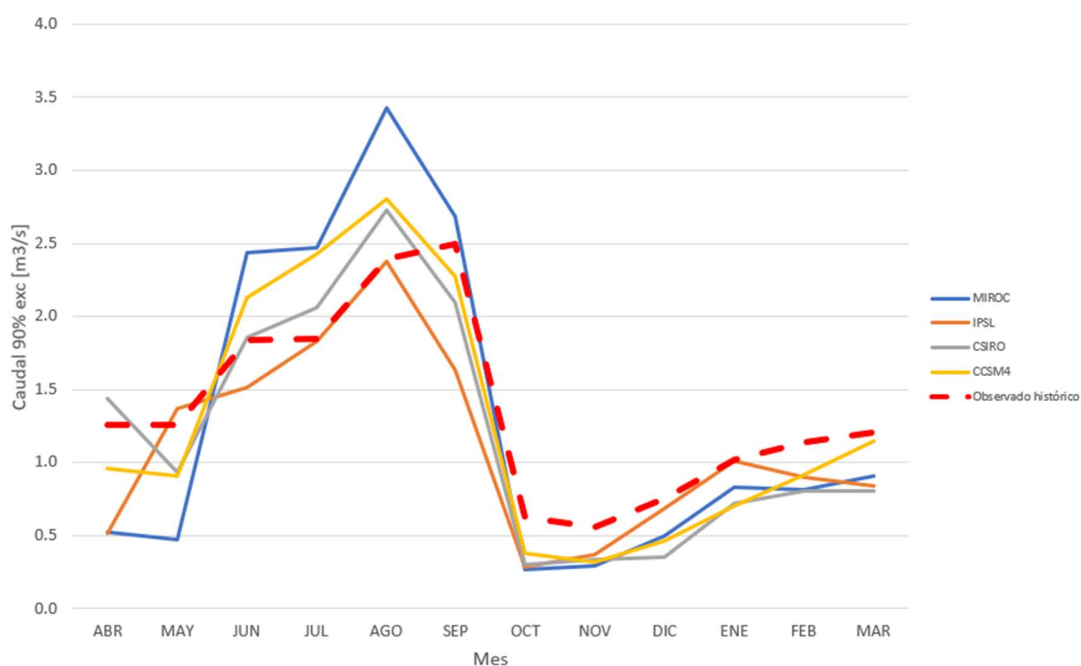


Figura B.2: CVE corregidas con factores de forzamiento periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR Santa María de Llaima.

Tabla B.7: Caudales mensuales de las CVE periodo línea base APR Santa María de Llaima.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	0,4	0,8	0,8	0,4	0,7	2,0	2,5	0,8	0,3	0,2	0,2	0,2	1,2
IPSL	0,3	0,7	1,3	0,7	0,7	2,0	1,6	0,5	0,3	0,2	0,1	0,2	1,1
CSIRO	0,3	0,9	1,5	0,8	0,9	2,0	1,4	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	1,1
CCSM4	0,4	1,0	1,2	0,6	0,7	1,9	1,7	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	1,3
regionalización	0,4	0,7	1,5	0,9	0,9	1,7	0,8	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	1,2
observado	1,3	1,3	1,8	1,8	2,4	2,5	0,6	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	-
observado2	0,7	0,8	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	-

Tabla B.8: Caudales mensuales de las CVE corregidos con factores de forzamiento, periodo proyectado APR Santa María de Llaima.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIROC	0,5	0,5	2,4	2,5	3,4	2,7	0,3	0,3	0,5	0,8	0,8	0,9
IPSL	0,5	1,4	1,5	1,8	2,4	1,6	0,3	0,4	0,7	1,0	0,9	0,8
CSIRO	1,4	0,9	1,9	2,1	2,7	2,1	0,3	0,3	0,4	0,7	0,8	0,8
CCSM4	1,0	0,9	2,1	2,4	2,8	2,3	0,4	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2

Tabla B.9: Caudales mensuales de las CVE corregidos con coeficiente de Pardé, periodo proyectado APR Santa María de Llaima.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIROC	0,3	0,3	1,5	1,4	1,6	1,3	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6
IPSL	0,3	0,9	0,9	1,1	1,1	0,8	0,5	0,7	0,8	0,8	0,6	0,5
CSIRO	0,8	0,6	1,1	1,2	1,3	1,0	0,6	0,7	0,4	0,6	0,6	0,5
CCSM4	0,5	0,6	1,3	1,4	1,3	1,1	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7



Figura B.3: Clasificación de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, APR Santa María de Llaima.

Tabla B.10: Derechos de Aprovechamiento de aguas superficiales consuntivos APR Santa María de Llaima.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
DAA Consuntivos [m3/s]	0,04	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,04	0,04	0,04

Tabla B.11: Caudal ecológico mensual APR Santa María de Llaima.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Caudal Ecológico [m3/s]	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2

Tabla B.12: Demanda de agua potable mensual APR Santa María de Llaima.

Demanda de agua potable [m3/s]	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
2022	0,0032	0,0032	0,0026	0,0026	0,0023	0,0026	0,0023	0,0026	0,0039	0,0048	0,0048	0,0039
2060	0,0162	0,0162	0,0130	0,0130	0,0114	0,0130	0,0114	0,0130	0,0195	0,0244	0,0244	0,0195

APR Putabla

En la Tabla B.13 se presentan los caudales mensuales históricos del APR, las Tablas B.14 y B.15 presentan los caudales proyectados corregidos con ambas metodologías y las Tablas B.16 a B.18 presentan los valores de demanda hídrica del APR. En la Figura B.4 se muestran las CVE corregidas con la metodología descartada, mientras que la Figura B.5 presenta la clasificación de los derechos de aprovechamiento de aguas de esta cuenca.

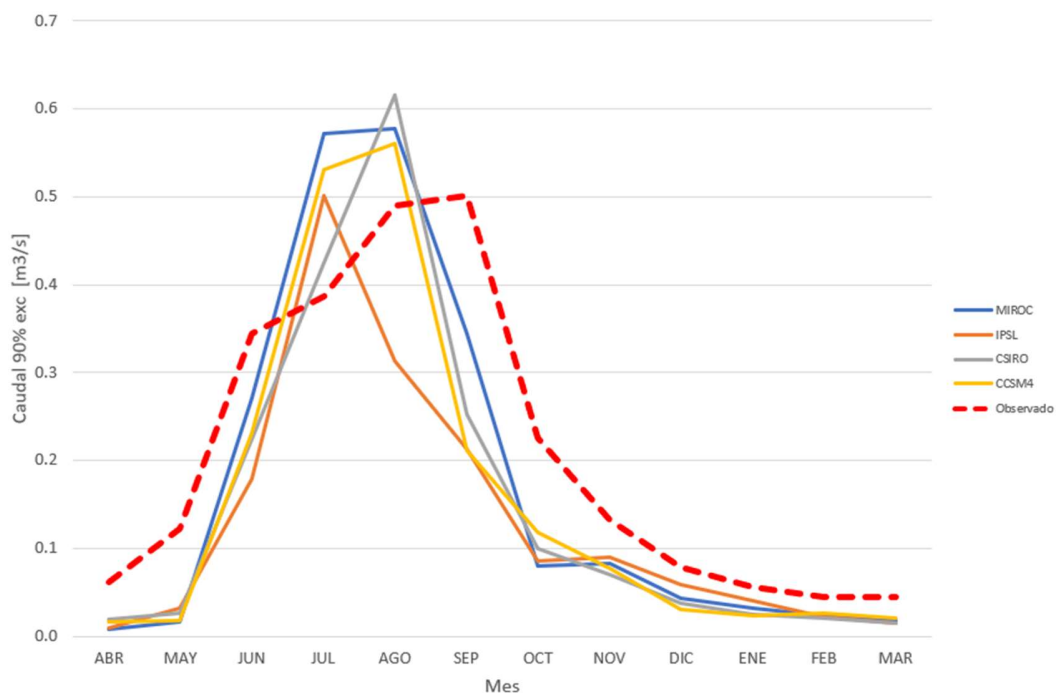


Figura B.4: CVE corregidas con factores de forzamiento periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR Putabla.

Tabla B.13: Caudales mensuales de las CVE periodo línea base APR Putabla.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUA L
MIRO C	0,16	0,33	0,33	0,16	0,39	0,71	0,76	0,17	0,09	0,07	0,05	0,06	0,43
IPSL	0,14	0,28	0,44	0,23	0,33	0,61	0,40	0,14	0,09	0,04	0,04	0,06	0,40
CSIR O	0,13	0,36	0,55	0,32	0,40	0,65	0,41	0,12	0,09	0,07	0,06	0,08	0,41
CCS M4	0,15	0,36	0,41	0,28	0,38	0,68	0,41	0,17	0,14	0,10	0,06	0,07	0,44
regio naliza ción	0,16	0,30	0,50	0,41	0,43	0,45	0,18	0,14	0,09	0,08	0,06	0,08	0,41
obser vado	0,06	0,12	0,34	0,39	0,49	0,50	0,23	0,13	0,08	0,06	0,04	0,04	-
obser vado 2	0,05	0,09	0,32	0,40	0,44	0,35	0,18	0,12	0,07	0,05	0,04	0,04	-

Tabla B.14: Caudales mensuales de las CVE corregidos con factores de forzamiento, periodo proyectado APR Putabla.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIRO C	0,03	0,05	0,43	0,59	0,57	0,45	0,08	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
IPSL	0,03	0,11	0,28	0,52	0,31	0,28	0,09	0,11	0,08	0,06	0,03	0,03
CSIRO	0,07	0,09	0,35	0,44	0,60	0,33	0,10	0,09	0,05	0,04	0,03	0,03
CCSM 4	0,05	0,06	0,36	0,55	0,55	0,28	0,12	0,10	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabla B.15: Caudales mensuales de las CVE corregidos con coeficiente de Pardé, periodo proyectado APR Putabla.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIRO C	0,02	0,04	0,39	0,61	0,51	0,31	0,06	0,09	0,05	0,04	0,03	0,03
IPSL	0,02	0,08	0,26	0,54	0,28	0,19	0,07	0,10	0,07	0,06	0,03	0,03
CSIRO	0,05	0,06	0,33	0,45	0,54	0,23	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03
CCSM 4	0,04	0,04	0,34	0,57	0,49	0,19	0,10	0,09	0,04	0,03	0,04	0,03



Figura B.5: Clasificación de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, APR Putabla.

Tabla B.16: Derechos de Aprovechamiento de aguas superficiales consuntivos APR Putabla.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
DAA Consuntivos [m3/s]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabla B.17: Caudal ecológico mensual APR Putabla.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Caudal Ecológico [m3/s]	0,02	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02

Tabla B.18: Demanda de agua potable mensual APR Putabla.

Demanda de agua potable [m3/s]	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
2022	0,0030	0,0024	0,0022	0,0033	0,0026	0,0031	0,0026	0,0033	0,0044	0,0073	0,0098	0,0051
2060	0,0152	0,0122	0,0110	0,0166	0,0132	0,0157	0,0132	0,0164	0,0223	0,0366	0,0493	0,0256

APR Oñico

En la Tabla B.19 se presentan los caudales mensuales históricos del APR, las Tablas B.20 y B.21 presentan los caudales proyectados corregidos con ambas metodologías y las Tablas B.22 a B.24 presentan los valores de demanda hídrica del APR. En la Figura B.6 se muestran las CVE corregidas con la metodología descartada, mientras que la Figura B.7 presenta la clasificación de los derechos de aprovechamiento de aguas de esta cuenca.

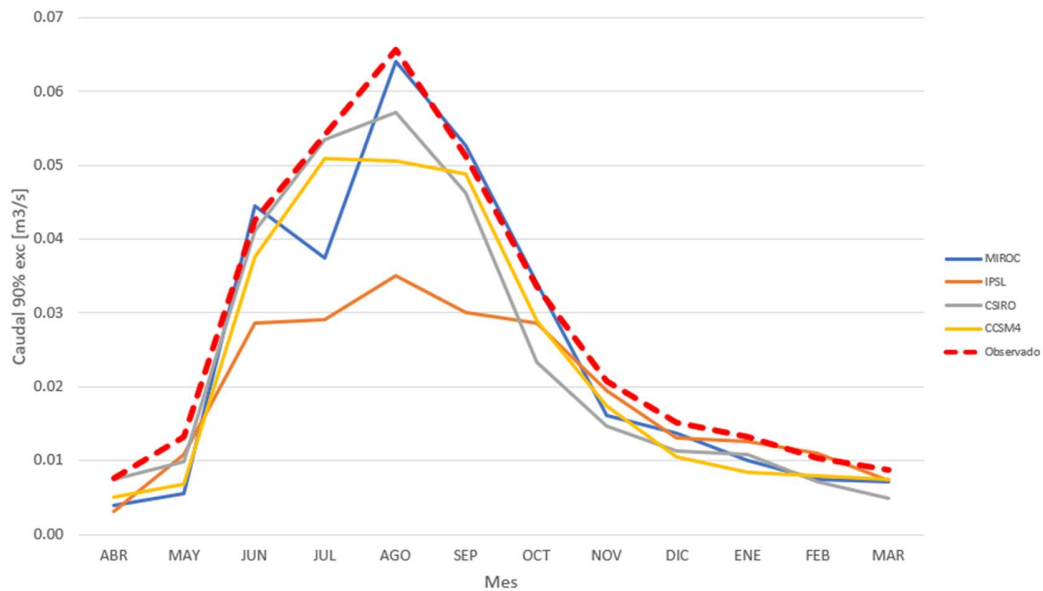


Figura B.6: CVE corregidas con factores de forzamiento periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR Oñico.

Tabla B.19: Caudales mensuales de las CVE periodo línea base APR Oñoico.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIRO C	0,00 7	0,02 0	0,03 7	0,05 1	0,03 7	0,02 2	0,01 2	0,01 0	0,00 7	0,00 6	0,00 5	0,00 5	0,02 9
IPSL	0,00 5	0,01 6	0,04 5	0,03 8	0,03 3	0,01 7	0,01 1	0,00 8	0,00 7	0,00 5	0,00 4	0,00 4	0,02 6
CSIR O	0,00 6	0,02 1	0,04 6	0,04 2	0,03 7	0,02 2	0,01 5	0,01 0	0,00 8	0,00 6	0,00 5	0,00 5	0,02 6
CCS M4	0,00 8	0,02 3	0,04 0	0,04 2	0,03 5	0,01 7	0,01 3	0,01 0	0,00 9	0,00 7	0,00 6	0,00 5	0,02 9
regio naliz ación	0,01 1	0,01 9	0,05 0	0,04 6	0,04 1	0,03 1	0,01 6	0,01 4	0,01 0	0,00 7	0,00 6	0,00 7	0,03 1
obser vado	0,00 8	0,01 3	0,04 3	0,05 4	0,06 6	0,05 1	0,03 4	0,02 1	0,01 5	0,01 3	0,01 0	0,00 9	-
obser vado **	0,00 7	0,01 4	0,03 8	0,04 5	0,05 3	0,04 2	0,02 5	0,01 7	0,01 1	0,00 9	0,00 7	0,00 6	-

Tabla B.20: Caudales mensuales de las CVE corregidos con factores de forzamiento, periodo proyectado APR Oñoico.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIRO C	0,004	0,005	0,045	0,037	0,064	0,053	0,034	0,016	0,014	0,010	0,007	0,007
IPSL	0,003	0,011	0,029	0,029	0,035	0,030	0,029	0,019	0,013	0,013	0,011	0,007
CSIR O	0,007	0,010	0,041	0,053	0,057	0,046	0,023	0,015	0,011	0,011	0,007	0,005
CCSM 4	0,005	0,007	0,038	0,051	0,051	0,049	0,029	0,017	0,011	0,008	0,008	0,008

Tabla B.21: Caudales mensuales de las CVE corregidos con coeficiente de Pardé, periodo proyectado APR Oñoico.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIRO C	0,004	0,006	0,039	0,031	0,052	0,043	0,025	0,013	0,010	0,007	0,005	0,005
IPSL	0,003	0,012	0,025	0,024	0,028	0,025	0,021	0,016	0,009	0,008	0,007	0,005
CSIR O	0,007	0,011	0,036	0,044	0,046	0,038	0,017	0,012	0,008	0,007	0,005	0,003
CCSM 4	0,005	0,007	0,033	0,042	0,041	0,040	0,022	0,014	0,007	0,005	0,005	0,005



Figura B.7: Clasificación de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, APR Oñoico.

Tabla B.22: Derechos de Aprovechamiento de aguas superficiales consuntivos APR Oñoico.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
DAA Consuntivos [m3/s]	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006

Tabla B.23: Caudal ecológico mensual APR Oñoico.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Caudal Ecológico [m3/s]	0,003	0,007	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002

Tabla B.24: Demanda de agua potable mensual APR Oñoico.

Demanda de agua potable [m3/s]	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
2022	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0005
2060	0,0027	0,0025	0,0024	0,0014	0,0009	0,0012	0,0013	0,0012	0,0013	0,0014	0,0022	0,0025

APR el Coihue

En la Tabla B.25 se presentan los caudales mensuales históricos del APR, las Tablas B.26 y B.27 presentan los caudales proyectados corregidos con ambas metodologías y las Tablas B.28 a B.30 presentan los valores de demanda hídrica del APR. En la Figura B.8 se muestran las CVE corregidas con la metodología descartada, mientras que la Figura B.9 presenta la clasificación de los derechos de aprovechamiento de aguas de esta cuenca.

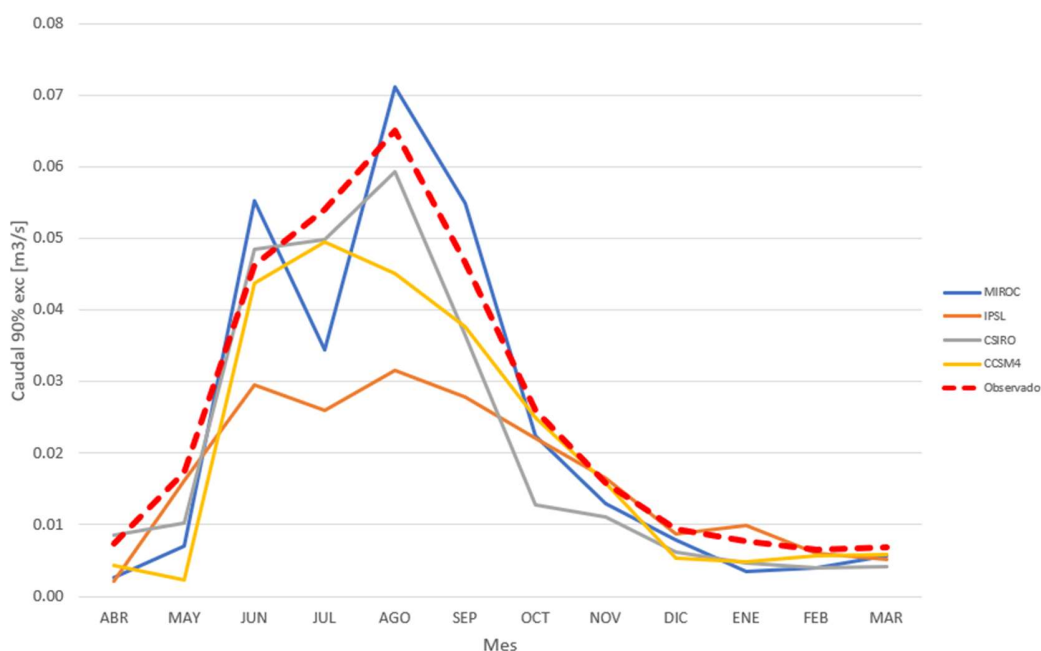


Figura B.8: CVE corregidas con factores de forzamiento periodo proyectado para modelos GCM, serie histórica observada en periodo de línea base, APR El Coihue.

Tabla B.25: Caudales mensuales de las CVE periodo línea base APR El Coihue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
MIROC	0,007	0,027	0,042	0,047	0,034	0,015	0,008	0,007	0,004	0,003	0,003	0,003	0,032
IPSL	0,007	0,021	0,051	0,032	0,029	0,012	0,008	0,006	0,005	0,002	0,002	0,002	0,028
CSIRO	0,006	0,030	0,044	0,039	0,033	0,017	0,014	0,007	0,005	0,003	0,003	0,004	0,028
CCSM4	0,008	0,026	0,042	0,042	0,030	0,013	0,010	0,008	0,008	0,005	0,003	0,004	0,031
regionalización	0,011	0,025	0,055	0,046	0,041	0,028	0,013	0,011	0,006	0,004	0,004	0,006	0,034
observado	0,007	0,017	0,046	0,054	0,065	0,047	0,026	0,016	0,009	0,008	0,007	0,007	-
observado**	0,007	0,014	0,036	0,043	0,051	0,041	0,024	0,016	0,010	0,008	0,006	0,006	-

Tabla B.26: Caudales mensuales de las CVE corregidos con factores de forzamiento, periodo proyectado APR El Coihue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIRO C	0,003	0,007	0,055	0,034	0,071	0,055	0,022	0,013	0,008	0,004	0,004	0,006
IPSL	0,002	0,016	0,030	0,026	0,032	0,028	0,022	0,016	0,009	0,010	0,006	0,005
CSIR O	0,008	0,010	0,048	0,050	0,059	0,036	0,013	0,011	0,006	0,005	0,004	0,004
CCSM 4	0,004	0,002	0,044	0,049	0,045	0,038	0,025	0,016	0,005	0,005	0,006	0,006

Tabla B.27: Caudales mensuales de las CVE corregidos con coeficiente de Pardé, periodo proyectado APR El Coihue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
MIRO C	0,003	0,006	0,043	0,027	0,056	0,048	0,021	0,013	0,009	0,004	0,004	0,005
IPSL	0,002	0,013	0,023	0,021	0,025	0,024	0,020	0,016	0,010	0,010	0,006	0,004
CSIR O	0,008	0,008	0,038	0,039	0,047	0,032	0,012	0,011	0,007	0,005	0,004	0,003
CCSM 4	0,004	0,002	0,034	0,039	0,035	0,033	0,023	0,016	0,006	0,005	0,005	0,005



Figura B.9: Clasificación de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, APR El Coihue.

Tabla B.28: Derechos de Aprovechamiento de aguas superficiales consuntivos APR El Coihue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
DAA Consuntivos [m3/s]	0,004	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,008	0,004	0,001	0,000	0,000

Tabla B.29: Caudal ecológico mensual APR El Coihue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Caudal Ecológico [m3/s]	0,003	0,007	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,006	0,005	0,003	0,002	0,002

Tabla B.30: Demanda de agua potable mensual APR El Coihue.

Demanda de agua potable [m3/s]	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
2022	0,0010	0,0009	0,0009	0,0005	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0008	0,0009
2060	0,0050	0,0047	0,0044	0,0027	0,0018	0,0022	0,0024	0,0023	0,0023	0,0026	0,0041	0,0046

Balance hídrico

En las Tablas B.31 a B.36 se presentan los valores del balance hídrico mensual de los 5 sistemas APR estudiados.

Tabla B.31: Balance hídrico mensual APR Curarrehue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Balace presente [m3/s]	2,1	1,8	19,0	18,0	17,6	19,2	16,3	10,2	5,1	3,8	3,0	2,0
Balace futuro [m3/s]	0,9	0,1	19,8	22,6	22,6	25,5	13,2	7,0	1,5	1,4	1,8	1,3

Tabla B.32: Balance hídrico mensual APR Santa María de Llaima.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Balace presente [m3/s]	0,4	0,4	0,7	0,6	0,7	0,7	0,8	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Balace futuro [m3/s]	0,2	0,2	0,8	0,8	0,9	0,6	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3

Tabla B.33: Balance hídrico mensual APR Putabla.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Balan ce prese nte [m3/s]	- 0,040	- 0,043	0,171	0,253	0,291	0,199	0,037	- 0,001	- 0,030	- 0,039	- 0,041	- 0,042
Balan ce futuro [m3/s]	- 0,054	- 0,072	0,186	0,393	0,309	0,081	- 0,063	- 0,032	- 0,059	- 0,068	- 0,084	- 0,062

Tabla B.34: Balance hídrico mensual APR Oñico.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Balan ce prese nte [m3/s]	- 0,003	0,002	0,023	0,030	0,039	0,027	0,010	0,005	0,001	0,000	- 0,003	- 0,004
Balan ce futuro [m3/s]	- 0,007	- 0,005	0,017	0,020	0,027	0,022	0,006	0,002	- 0,002	- 0,002	- 0,005	- 0,006

Tabla B.35: Balance hídrico mensual APR El Coihue.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Balanc e presen te [m3/s]	-0,005	-0,009	0,011	0,018	0,026	0,016	-0,001	-0,004	-0,003	0,000	-0,001	-0,002
Balanc e futuro [m3/s]	-0,008	-0,015	0,010	0,009	0,019	0,012	-0,003	-0,003	-0,003	0,000	-0,002	-0,003

Anexo C: Planillas de Costos

En las Tablas C.1 a C.3 se presentan las especificaciones del diseño de la alternativa de impulsión de agua (N°1) para los 3 sistemas APR con déficit hídrico y en las Tablas C.4 a C.6 se presentan el detalle de los costos de inversión (CAPEX) asociados a estas alternativas. Por otra parte, las Tablas C.7 a C.12 presentan el detalle de los costos de operación (OPEX) de las alternativas planteadas en cada caso.

Tabla C.1: Diseño de Alternativa n°1 APR Putabla

		Parámetro	Línea de Impulsión	Unidad
		Cota Terreno Estanque	305	m
		Altura Estanque	20	m
		Cota Entrada Estanque	325	m
		Cota Terreno Sondaje	228	m
		Profundidad Succión	90	m
		Cota succión sondaje	138	
		Altura Geométrica Tramo1	187	m
		Largo de la Impulsión HDPE Tramo 1	3.410	m
		Largo Tuberías del Pozo	90	
		Materialidad Tubería Impulsión	HDPE PE100 PN10/25	-
		Materialidad Tubería Pozo	Acero	-
		Caudal	49,3	lt/seg
Sondaje - APR Putabla	Acero	Diámetro Nominal de la Impulsión	114,3	mm
		Diámetro Interior	102,26	mm
		Área transversal	0,0082	m ²
		Velocidad del flujo	6,00	m/seg
		Coefficiente HW	100	-
		J	0,540	m/m
		Pérdida Friccional	48,63	m
		Pérdida Singular	4,86	m
		Pérdida Total	53,49	m
	HDPE PE100 PN10	Diámetro Nominal de Impulsión	315	mm
		Diámetro Interior	228,8	mm
		Área transversal	0,0411	m ²
		Velocidad del flujo	1,20	m/seg
		Coefficiente HW	150	-
		J	0,005	m/m
		Pérdida Friccional	17,23	m
		Pérdida Singular	1,72	m
		Pérdida Total	18,96	m
	Total	Pérdida Friccional Total	65,86	m
		Perdida Singular Total	6,59	m
		Pérdida Total	72,45	m
		Altura dinámica Tramo1	259,45	m
		Modelo Bomba	Potencia [kW]	Precio [USD*]
		UPA 250C - 150-8 + UMA 250D 190/21	180	18.671

*: Se considera una conversión de 1USD = 900 CLP del día 22/06/2022.

Tabla C.2: Diseño de Alternativa n°1 APR Oñico

		Parámetro	Línea de Impulsión	Unidad
		Cota Terreno Estanque	140	m
		Altura Estanque	20	m
		Cota Entrada Estanque	160	m
		Cota Terreno Sondaje	14	m
		Profundidad Succión	2	m
		Cota succión sondaje	12	
		Altura Geométrica Tramo2	148	m
		Largo de la Impulsión HDPE Tramo 2	9.730	m
		Largo Tuberías del Pozo	0	
		Materialidad Tubería Impulsión	HDPE PE100 PN25	-
		Materialidad Tubería Pozo	Acero	-
		Caudal	2,7	lt/seg
Captación Superficial - APR Oñico	HDPE PE100 PN25	Diámetro Nominal de Impulsión	90	mm
		Diámetro Interior	65,4	mm
		Área transversal	0,0034	m ²
		Velocidad del flujo	0,80	m/seg
		Coeficiente HW	150	-
		J	0,010	m/m
		Perdida Friccional	101,55	m
		Perdida Singular	10,15	m
		Pérdida Total	111,70	m
		Altura dinámica Tramo2	259,70	m
		Modelo Bomba	Potencia [kW]	Precio [USD*]
		UPA 200-11-12 + UMA 150E 37/22	35	9.276

*: Se considera una conversión de 1USD = 900 CLP del día 22/06/2022.

Tabla C.3: Diseño de Alternativa n°1 APR el Coihue.

		Parámetro	Línea de Impulsión	Unidad
		Cota Terreno Estanque	166	m
		Altura Estanque	20	m
		Cota Entrada Estanque	186	m
		Cota Terreno Sondaje	14	m
		Profundidad Succión	2	m
		Cota succión sondaje	12	
		Altura Geométrica Tramo2	174	m
		Largo de la Impulsión HDPE Tramo 2	2.860	m
		Largo Tuberías del Pozo	0	
		Materialidad Tubería Impulsión	HDPE PE100 PN25	-
		Materialidad Tubería Pozo	Acero	-
		Caudal	5	lt/seg
Captación Superficial APR El Coihue	HDPE PE100 PN25	Diámetro Nominal de Impulsión	110	mm
		Diámetro Interior	79,8	mm
		Área transversal	0,0050	m ²
		Velocidad del flujo	1,00	m/seg
		Coefficiente HW	150	-
		J	0,012	m/m
		Perdida Friccional	35,41	m
		Perdida Singular	3,54	m
		Pérdida Total	38,95	m
		Altura dinámica Tramo2	212,95	m
		Modelo Bomba	Potencia [kW]	Precio [USD*]
		UPA 200-11-10 + UMA 150E 30/21	29	8.377

*: Se considera una conversión de 1USD = 900 CLP del día 22/06/2022.

Tabla C.4: Costos de Inversión (CAPEX) alternativa n°1 APR Putabla.

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO Unitario (\$)	PRECIO Total (\$)
	CAPITULO I: SONDAJE				
1.1.-	Perforación y Proposición Sistema Captante				
1.1.1	Perforación del Sonda D= 16"	m	110	495.000	54.450.000
1.1.2	Proposición sistema Captante	Gl	1	3.000.000	3.000.000
1.2.-	Construcción del Sonda				
1.2.1	Entubación Acero D=12" Std(emin= 6.35mm)	m	74	285.000	21.090.000
1.2.2	Cribas Acero Inoxidable D=12" Slot 40	m	36	395.000	14.220.000
1.2.3	Pared de gravilla seleccionada	m	105	35.500	3.727.500
1.2.4	Desarrollo	Hrs	36	65.000	2.340.000
1.2.5	Desinfección	Gl	1	350.000	350.000
1.2.6	Sello sanitario de hormigón	ml	5	350.000	1.750.000
1.2.7	Tapa de pozo	Gl	1	150.000	150.000
1.2.8	Brocal de hormigón	Gl	1	150.000	150.000
1.2.9	Provisión e instalación tuvo piezométrico	ml	114	100.000	11.400.000
1.3.-	Prueba de Bombeo				
	Suministro grupo de prueba	Gl	1	1.000.000	1.000.000
	Prueba de gasto variable	Hrs	24	40.000	960.000
	Prueba de gasto constante	Hrs	72	40.000	2.880.000
1.4.-	Informe de Construcción				
	Plano de Construcción e Informe	Gl	1	1.210.000	1.210.000
	Filmación Televisiva del Sistema Captante	Gl	1	1.000.000	1.000.000
	CAPITULO II: CAÑERIA DE IMPULSION				
2.1.-	Movimiento de Tierras				
2.1.1	Despeje del área.	m	3.410	1.000	3.410.000
2.1.2	Replanteo de las obras.	m	3.410	1.000	3.410.000
2.1.3	Excavaciones de 0 a 2 m. en terreno duro sin agotamiento.	m³	5.663	8.000	45.304.578
2.1.4	Cama de apoyo.	m³	780	12.500	9.750.469
2.1.5	Rellenos de excavación en zanja compactado.	m³	4.617	10.000	46.172.896
2.1.6	Retiro y transporte de excedentes.	m³	266	5.000	1.328.726
2.2.-	Suministro e Instalación de Cañerías y Piezas Especiales				
2.2.1	Transporte y acopio de cañerías y piezas especiales.	kg	126.075	400	50.429.808
2.2.2	Suministro cañería HDPE PE100 PN25 D=315 mm.	m	3.410	99.824	340.401.204
2.2.3	Instalación y prueba cañería HDPE PE100 PN25 D=315 mm.	m	3.410	14.974	51.060.181
2.2.6	Suministro e instalación piezas especiales de HDPE.	kg	6.304	10.000	63.037.260
2.3.-	Cámaras de Válvulas y Obras Varias				
2.3.1	Desinfección de cañerías.	m	3.410	300	1.023.000
2.3.2	Machones de anclaje hormigón G-10.	Nº	17	40.000	682.000
	CAPITULO III: ACTIVIDADES FINALES				
6.1.1	Prueba Final de Conjunto.	Nº	1	2.500.000	2.500.000

6.1.2	Informe Final y aprobación de servicios.	Nº	1	2.500.000	2.500.000
-------	------------------------------------------	----	---	-----------	-----------

Tabla C.5: Costos de Inversión (CAPEX) alternativa n°1 APR Oñico.

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO Unitario (\$)	PRECIO Total (\$)
CAPITULO I: RECINTO DE CAPTACION					
1.1.-	Movimiento de Tierras				
1.1.1	Roce y despeje.	m ²	500	1.000	500.000
1.1.2	Replanteo de las obras.	m ²	500	1.000	500.000
1.1.6	Escarpe y retiro de material inadecuado (e=0.20 m.)	m ³	60	4.250	255.000
1.1.7	Excavación general con agotamiento (construcción sentina).	m ³	1.200	25.000	30.000.000
1.1.8	Excavación general sin agotamiento (construcción cámaras retrolavado).	m ³	60	4.250	255.000
1.1.9	Suministro e instalación de dren (material granular de 3" a 6").	m ³	28	15.500	440.588
1.1.10	Suministro e instalación cañería PVC Topdren D=200 mm.	m.	18	7.500	135.000
1.1.11	Suministro e instalación tapón PVC D=200 mm.	Nº	1	15.000	15.000
1.1.12	Suministro e instalación geotextil dren de infiltración.	m ²	95	1.500	142.125
1.1.13	Suministro e instalación geotextil relleno granular superior.	m ²	276	1.500	413.476
1.1.14	Suministro e instalación relleno granular superior (material 4" a 8").	m ³	216	15.500	3.348.465
1.1.15	Construcción losa inferior sentina.	Nº	1	500.000	500.000
1.1.16	Construcción sentina tubos de hormigón prefabricado D=2.0 m.	Nº	14	915.000	12.810.000
1.1.17	Relleno sanitario H10.	m ³	9	145.000	1.305.000
1.1.18	Losa superior sentina (incluye tapa metálica 0.6 x 0.6 m.)	Nº	1	945.000	945.000
1.1.19	Relleno de excavación compactado.	m ³	850	4.750	4.037.500
1.1.20	Relleno construcción explanada.	m ³	1.100	12.500	13.750.000
1.1.21	Relleno interconexiones hidráulicas y obras civiles.	m ³	10	4.750	47.500
1.1.22	Enrocado de protección.	m ³	400	37.500	15.000.000
1.1.23	Geotextil e=4 mm y 385 gr/m ² .	m ²	330	1.500	495.000
1.1.24	Retiro y transporte de excedentes.	m ³	1.250	4.500	5.625.000
1.2.-	Obras Civiles Cámaras Retrolavado Dren				
1.2.1	Hormigón H-5 emplantillados.	m ³	1	115.000	115.000
1.2.2	Hormigón H-30 estructuras.	m ³	14	225.000	3.150.000
1.2.3	Fierro redondo en barras calidad A44-28H	kg	1.715	2.000	3.430.000
1.2.4	Moldaje plano.	m ²	121	12.500	1.512.500
1.2.5	Suministro e instalación de escalones de acero.	Nº	20	5.200	104.000
1.2.6	Suministro e instalación tapas tipo palastro.	Nº	4	382.500	1.530.000
1.2.7	Suministro e instalación escalera gato.	Nº	1	750.000	750.000
CAPITULO II: CAÑERÍA DE IMPULSION					
2.1.-	Movimiento de Tierras				
2.1.1	Despeje del área.	m	9.730	1.000	9.730.000
2.1.2	Replanteo de las obras.	m	9.730	1.000	9.730.000
2.1.3	Excavaciones de 0 a 2 m. en terreno duro sin agotamiento.	m ³	10.675	8.000	85.398.264
2.1.4	Cama de apoyo.	m ³	1.678	12.500	20.980.313

2.1.5	Rellenos de excavación en zanja compactado.	m ³	8.934	10.000	89.344.584
-------	---------------------------------------------	----------------	-------	--------	------------

Tabla C.6: Costos de Inversión (CAPEX) alternativa n°1 APR Oñico (continuación).

2.1.6	Retiro y transporte de excedentes.	m ³	62	5.000	309.498
2.2.-	Suministro e Instalación de Cañerías y Piezas Especiales				
2.2.1	Transporte y acopio de cañerías y piezas especiales.	kg	29.462	400	11.784.976
2.2.2	Suministro cañería HDPE PE100 PN25 D=90 mm.	m	9.730	8.176	79.548.588
2.2.3	Instalación y prueba cañería HDPE PE100 PN25 D=90 mm.	m	9.730	1.226	11.932.288
2.2.6	Suministro e instalación piezas especiales de HDPE.	kg	1.473	10.000	14.731.220
2.3.-	Cámaras de Válvulas y Obras Varias				
2.3.1	Desinfección de cañerías.	m	9.730	300	2.919.000
2.3.2	Machones de anclaje hormigón G-10.	Nº	49	40.000	1.946.000
CAPITULO III: ACTIVIDADES FINALES					
6.1.1	Prueba Final de Conjunto.	Nº	1	2.500.000	2.500.000
6.1.2	Informe Final y aprobación de servicios.	Nº	1	2.500.000	2.500.000

Tabla C.7: Costos de Inversión (CAPEX) alternativa n°1 APR El Coihue.

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO
				Unitario (\$)	Total (\$)
	CAPITULO I: RECINTO DE CAPTACION				
1.1.-	Movimiento de Tierras				
1.1.1	Roce y despeje.	m ²	500	1.000	500.000
1.1.2	Replanteo de las obras.	m ²	500	1.000	500.000
1.1.6	Escarpe y retiro de material inadecuado (e=0.20 m.)	m ³	60	4.250	255.000
1.1.7	Excavación general con agotamiento (construcción sentina).	m ³	1.200	25.000	30.000.000
1.1.8	Excavación general sin agotamiento (construcción cámaras retrolavado).	m ³	60	4.250	255.000
1.1.9	Suministro e instalación de dren (material granular de 3" a 6").	m ³	28	15.500	440.588
1.1.10	Suministro e instalación cañería PVC Topdren D=200 mm.	m.	18	7.500	135.000
1.1.11	Suministro e instalación tapón PVC D=200 mm.	Nº	1	15.000	15.000
1.1.12	Suministro e instalación geotextil dren de infiltración.	m ²	95	1.500	142.125
1.1.13	Suministro e instalación geotextil relleno granular superior.	m ²	276	1.500	413.476
1.1.14	Suministro e instalación relleno granular superior (material 4" a 8").	m ³	216	15.500	3.348.465
1.1.15	Construcción losa inferior sentina.	Nº	1	500.000	500.000
1.1.16	Construcción sentina tubos de hormigón prefabricado D=2.0 m.	Nº	14	915.000	12.810.000
1.1.17	Relleno sanitario H10.	m ³	9	145.000	1.305.000
1.1.18	Losa superior sentina (incluye tapa metálica 0.6 x 0.6 m.)	Nº	1	945.000	945.000
1.1.19	Relleno de excavación compactado.	m ³	850	4.750	4.037.500
1.1.20	Relleno construcción explanada.	m ³	1.100	12.500	13.750.000
1.1.21	Relleno interconexiones hidráulicas y obras civiles.	m ³	10	4.750	47.500
1.1.22	Enrocado de protección.	m ³	400	37.500	15.000.000
1.1.23	Geotextil e=4 mm y 385 gr/m ² .	m ²	330	1.500	495.000
1.1.24	Retiro y transporte de excedentes.	m ³	1.250	4.500	5.625.000
1.2.-	Obras Civiles Cámaras Retrolavado Dren				
1.2.1	Hormigón H-5 emplantillados.	m ³	1	115.000	115.000
1.2.2	Hormigón H-30 estructuras.	m ³	14	225.000	3.150.000
1.2.3	Fierro redondo en barras calidad A44-28H	kg	1.715	2.000	3.430.000
1.2.4	Moldaje plano.	m ²	121	12.500	1.512.500
1.2.5	Suministro e instalación de escalones de acero.	Nº	20	5.200	104.000
1.2.6	Suministro e instalación tapas tipo palastro.	Nº	4	382.500	1.530.000
1.2.7	Suministro e instalación escalera gato.	Nº	1	750.000	750.000
	CAPITULO II: CAÑERÍA DE IMPULSION				
2.1.-	Movimiento de Tierras				
2.1.1	Despeje del área.	m	2.860	1.000	2.860.000
2.1.2	Replanteo de las obras.	m	2.860	1.000	2.860.000
2.1.3	Excavaciones de 0 a 2 m. en terreno duro sin agotamiento.	m ³	3.269	8.000	26.154.128

Tabla C.8: Costos de Inversión (CAPEX) alternativa n°1 APR El Coihue (continuación).

2.1.4	Cama de apoyo.	m ³	508	12.500	6.345.625
2.1.5	Rellenos de excavación en zanja compactado.	m ³	2.734	10.000	27.344.365
2.1.6	Retiro y transporte de excedentes.	m ³	27	5.000	135.897
2.2.-	Suministro e Instalación de Cañerías y Piezas Especiales				
2.2.1	Transporte y acopio de cañerías y piezas especiales.	kg	12.973	400	5.189.184
2.2.2	Suministro cañería HDPE PE100 PN25 D=110 mm.	m	2.860	12.247	35.026.992
2.2.3	Instalación y prueba cañería HDPE PE100 PN25 D=110 mm.	m	2.860	1.837	5.254.049
2.2.6	Suministro e instalación piezas especiales de HDPE.	kg	649	10.000	6.486.480
2.3.-	Cámaras de Válvulas y Obras Varias				
2.3.1	Desinfección de cañerías.	m	2.860	300	858.000
2.3.2	Machones de anclaje hormigón G-10.	Nº	14	40.000	572.000
	CAPITULO III: ACTIVIDADES FINALES				
6.1.1	Prueba Final de Conjunto.	Nº	1	2.500.000	2.500.000
6.1.2	Informe Final y aprobación de servicios.	Nº	1	2.500.000	2.500.000

Tabla C.9: Costos de Operación (OPEX) alternativa n°1 APR Putabla.

Año	Población	Caudal medio anual	Caudal medio anual	Consumo Eléctrico Potencia	Consumo Eléctrico Energía	Reposición equipos	Mantenión Equipos	Total
2022	2.360							
2023	2.454	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2024	2.553	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2025	2.655	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2026	2.761	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2027	2.871	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2028	2.986	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2029	3.106	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2030	3.230	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2031	3.359	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2032	3.493	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2033	3.633	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	23.525.460	2.222.063	77.557.311
2034	3.778	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2035	3.930	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2036	4.087	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2037	4.250	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2038	4.420	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2039	4.597	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2040	4.781	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2041	4.972	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2042	5.171	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2043	5.378	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	23.525.460	2.222.063	77.557.311
2044	5.593	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2045	5.817	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2046	6.049	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2047	6.291	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2048	6.543	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2049	6.805	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2050	7.077	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2051	7.360	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2052	7.654	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2053	7.961	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	23.525.460	2.222.063	77.557.311
2054	8.279	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2055	8.610	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2056	8.955	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2057	9.313	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2058	9.685	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2059	10.073	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
2060	10.476	23,85	494.556	12.230.544	39.579.244	0	2.222.063	54.031.851
TOTAL			18.793.111	464.760.673	1.504.011.274	70.576.380	84.438.389	2.123.786.715

Tabla C.10: Costos de Operación (OPEX) alternativa n°2 APR Putabla.

Año	Población	Caudal medio anual	Caudal medio anual	Costos camiones de aljibe	Total
2022	2.360				
2023	2.454	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2024	2.553	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2025	2.655	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2026	2.761	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2027	2.871	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2028	2.986	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2029	3.106	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2030	3.230	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2031	3.359	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2032	3.493	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2033	3.633	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2034	3.778	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2035	3.930	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2036	4.087	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2037	4.250	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2038	4.420	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2039	4.597	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2040	4.781	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2041	4.972	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2042	5.171	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2043	5.378	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2044	5.593	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2045	5.817	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2046	6.049	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2047	6.291	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2048	6.543	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2049	6.805	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2050	7.077	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2051	7.360	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2052	7.654	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2053	7.961	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2054	8.279	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2055	8.610	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2056	8.955	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2057	9.313	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2058	9.685	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2059	10.073	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
2060	10.476	23,85	494.556	1.137.477.749	1.137.477.749
TOTAL			18.793.111	43.224.154.457	43.224.154.457

Tabla C.11: Costos de Operación (OPEX) alternativa n°1 APR Oñico.

Año	Población	Caudal medio	Caudal medio	Consumo Eléctrico	Consumo Eléctrico	Reposición	Mantención	Total
		anual	anual	Potencia	Energía	equipos	Equipos	
2022	2.360							
2023	208	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2024	216	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2025	225	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2026	234	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2027	243	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2028	253	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2029	263	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2030	274	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2031	285	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2032	296	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2033	308	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	11.687.760	1.330.398	18.021.064
2034	320	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2035	333	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2036	346	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2037	360	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2038	375	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2039	390	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2040	405	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2041	421	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2042	438	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2043	456	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	11.687.760	1.330.398	18.021.064
2044	474	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2045	493	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2046	513	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2047	533	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2048	554	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2049	577	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2050	600	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2051	624	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2052	649	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2053	675	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	11.687.760	1.330.398	18.021.064
2054	702	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2055	730	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2056	759	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2057	789	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2058	821	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2059	854	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
2060	888	2,09	32.520	2.397.825	2.605.081	0	1.330.398	6.333.304
TOTAL			1.235.760	91.117.346	98.993.078	35.063.280	50.555.111	275.728.815

Tabla C.12: Costos de Operación (OPEX) alternativa n°2 APR Oñico.

Año	Población	Caudal medio anual	Caudal medio anual	Costos camiones de aljibe	Total
2022	2.360				
2023	208	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2024	216	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2025	225	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2026	234	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2027	243	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2028	253	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2029	263	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2030	274	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2031	285	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2032	296	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2033	308	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2034	320	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2035	333	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2036	346	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2037	360	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2038	375	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2039	390	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2040	405	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2041	421	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2042	438	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2043	456	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2044	474	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2045	493	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2046	513	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2047	533	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2048	554	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2049	577	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2050	600	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2051	624	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2052	649	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2053	675	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2054	702	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2055	730	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2056	759	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2057	789	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2058	821	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2059	854	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
2060	888	2,09	32.520	74.796.000	74.796.000
TOTAL			1.235.760	2.842.248.000	2.842.248.000

Tabla C.13: Costos de Operación (OPEX) alternativa n°1 APR El Coihue.

Año	Población	Caudal medio anual	Caudal medio anual	Consumo Eléctrico Potencia	Consumo Eléctrico Energía	Reposición equipos	Mantenimiento Equipos	Total
2022	2.360							
2023	387	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2024	402	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2025	418	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2026	435	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2027	453	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2028	471	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2029	490	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2030	509	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2031	529	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2032	551	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2033	573	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	10.555.020	672.594	17.980.541
2034	596	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2035	619	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2036	644	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2037	670	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2038	697	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2039	725	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2040	754	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2041	784	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2042	815	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2043	848	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	10.555.020	672.594	17.980.541
2044	882	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2045	917	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2046	954	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2047	992	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2048	1.031	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2049	1.073	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2050	1.116	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2051	1.160	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2052	1.207	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2053	1.255	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	10.555.020	672.594	17.980.541
2054	1.305	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2055	1.357	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2056	1.411	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2057	1.468	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2058	1.527	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2059	1.588	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
2060	1.651	3,50	72.495	1.990.954	4.761.974	0	672.594	7.425.521
TOTAL			2.754.826	75.656.243	180.955.009	31.665.060	25.558.558	313.834.870

Tabla C.14: Costos de Operación (OPEX) alternativa n°2 APR El Coihue.

Año	Población	Caudal medio anual	Caudal medio anual	Costos camiones de aljibe	Total
2022	2.360				
2023	387	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2024	402	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2025	418	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2026	435	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2027	453	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2028	471	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2029	490	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2030	509	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2031	529	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2032	551	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2033	573	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2034	596	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2035	619	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2036	644	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2037	670	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2038	697	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2039	725	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2040	754	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2041	784	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2042	815	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2043	848	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2044	882	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2045	917	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2046	954	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2047	992	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2048	1.031	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2049	1.073	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2050	1.116	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2051	1.160	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2052	1.207	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2053	1.255	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2054	1.305	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2055	1.357	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2056	1.411	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2057	1.468	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2058	1.527	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2059	1.588	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
2060	1.651	3,50	72.495	166.739.486	166.739.486
TOTAL			2.754.826	6.336.100.457	6.336.100.457

Anexo D: Análisis de factores y atributos

En las Figuras D.1 a D.4 se presentan las correlaciones entre los factores de corrección de cambio climático (f_3) de las cuencas similares controladas y no controladas. Luego, en las Figuras D.5 a D.9 se presenta la relación entre el coeficiente de Pardé de las cuencas controladas con respecto a algunos atributos de estas cuencas.

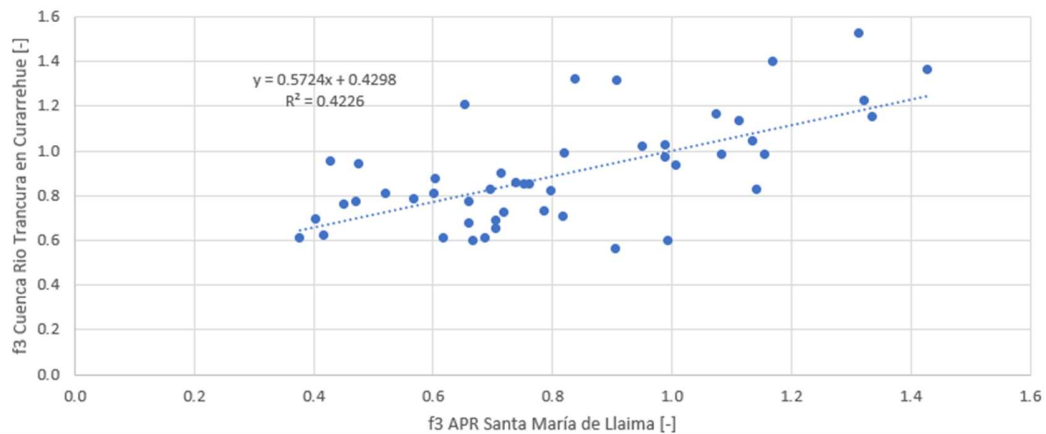


Figura D.1: Correlación entre factores de cambio climático (f_3) para cuencas Río Trancura en Curarrehue y APR Santa María de Llaima.

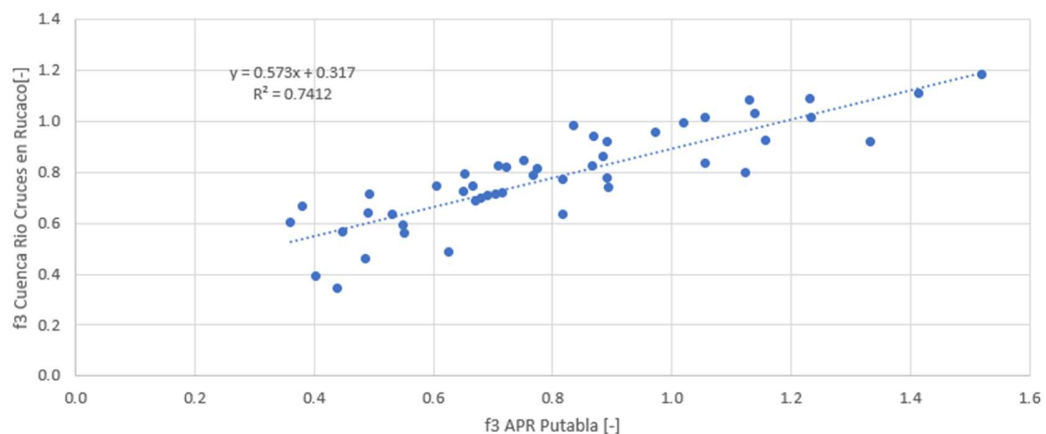


Figura D.2: Correlación entre factores de cambio climático (f_3) para cuencas Río Cruces en Rucaco y APR Putabla.

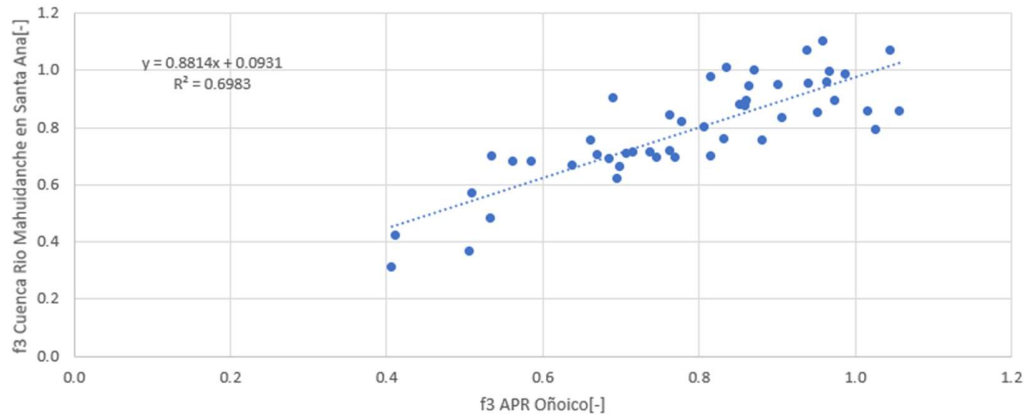


Figura D.3: Correlación entre factores de cambio climático (f3) para cuencas Río Mahuidanche en Santa Ana y APR Oñico.

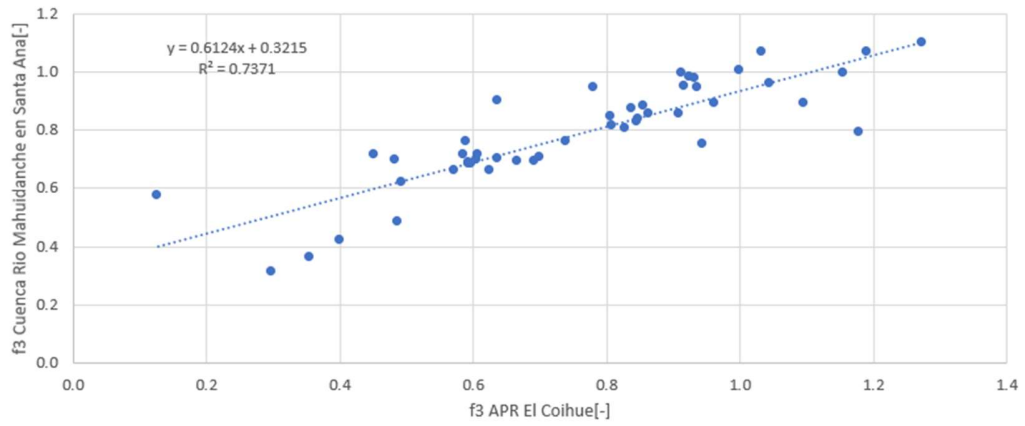


Figura D.4: Correlación entre factores de cambio climático (f3) para cuencas Río Mahuidanche en Santa Ana y APR El Coihue.

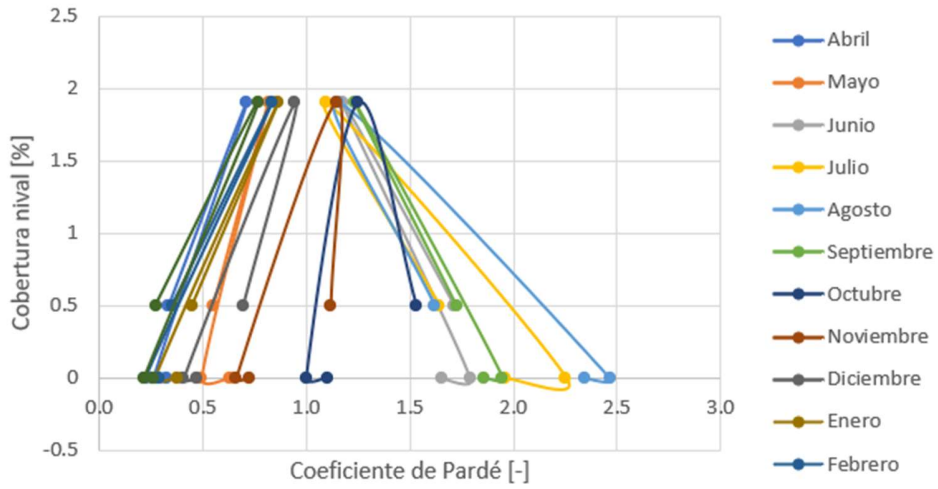


Figura D.5: Correlación entre cobertura nival de la cuenca y coeficientes de Pardé mensuales en cuencas controladas.

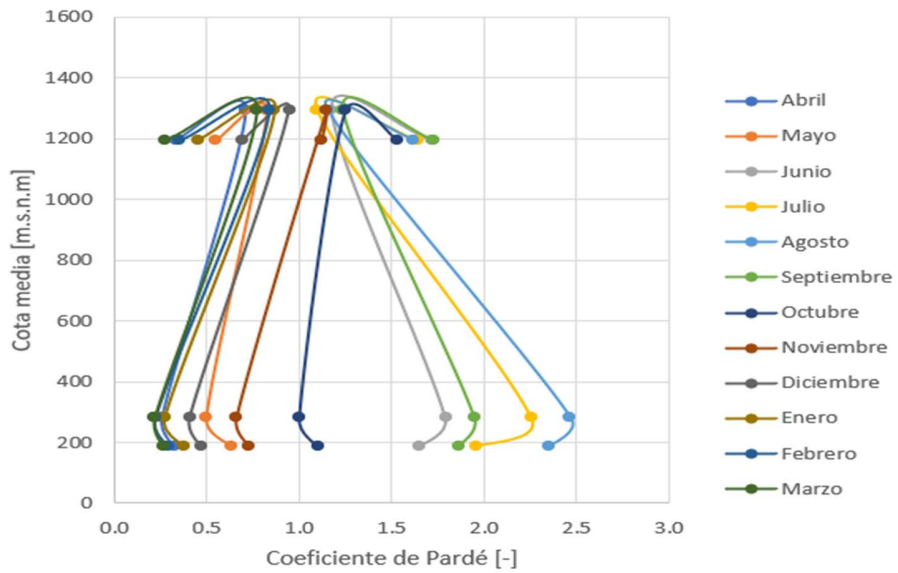


Figura D.6: Correlación entre cota media de la cuenca y coeficientes de Pardé mensuales en cuencas controladas.

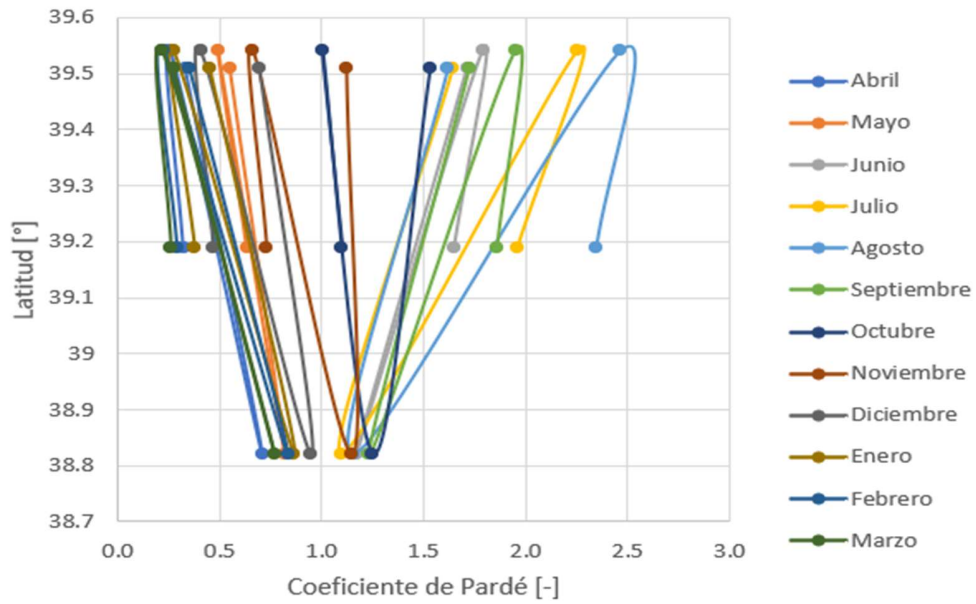


Figura D.7: Correlación entre latitud de la cuenca y coeficientes de Pardé mensuales en cuencas controladas.

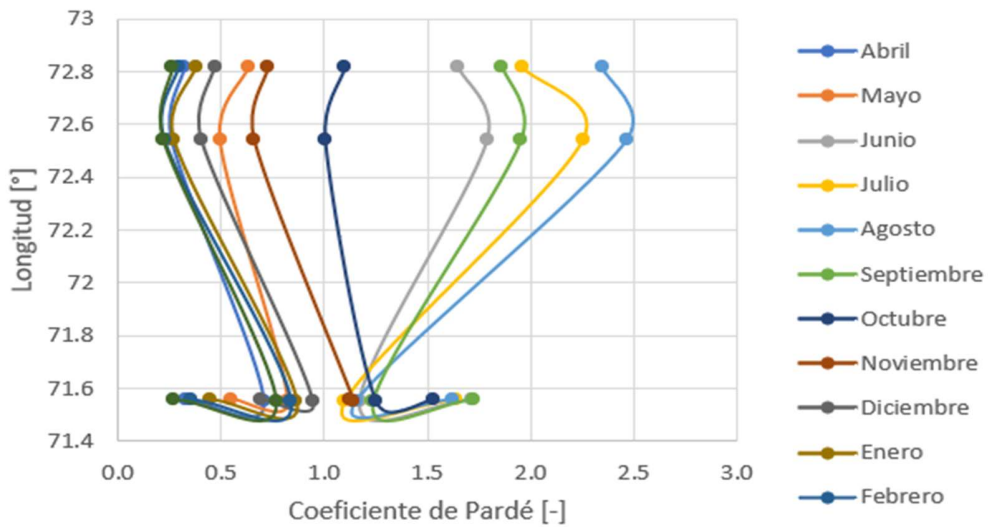


Figura D.8: Correlación entre longitud de la cuenca y coeficientes de Pardé mensuales en cuencas controladas.

Anexo E: Otras variables climáticas y Transposición de Caudales

Finalmente, en las Figuras E.1 a E.4 se presentan las comparaciones entre caudales modelados y caudales calculados mediante transposición, mientras que las series mensuales de variables meteorológicas y coeficiente de Pardé de las cuencas controladas corresponden a las Figuras E.5 a E.8.

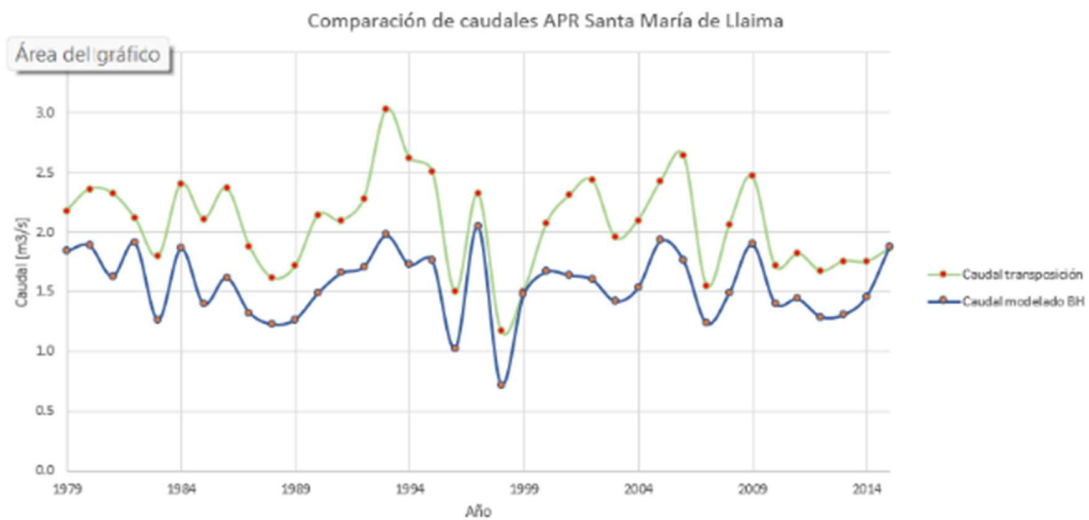


Figura E.1: Caudales modelado y por transposición en APR Santa María de Llaima.

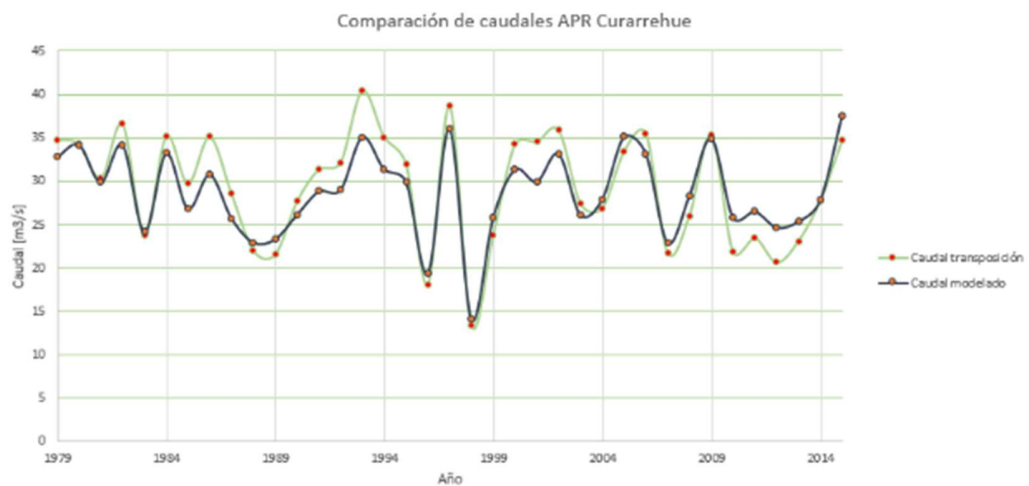


Figura E.2: Caudales modelado y por transposición en APR Curarrehue.

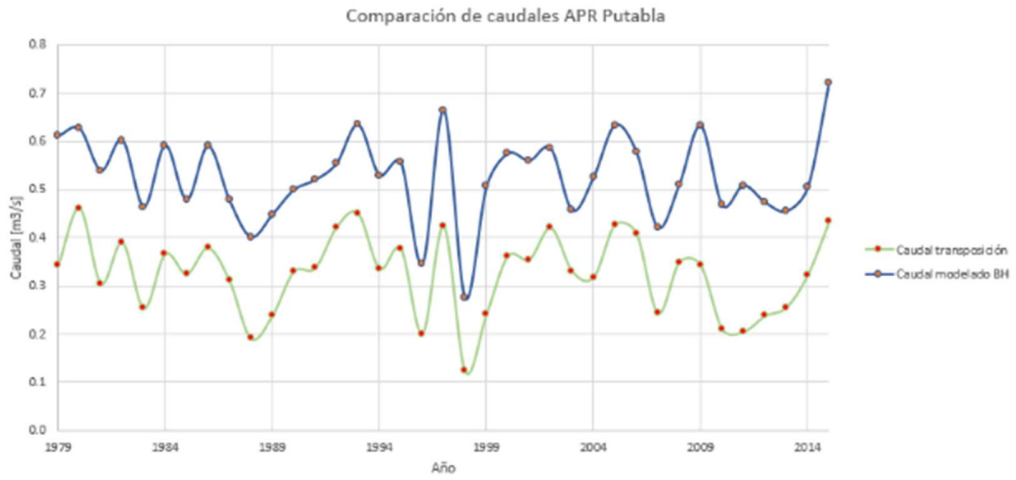


Figura E.3: Caudales modelado y por transposición en APR Putabla.

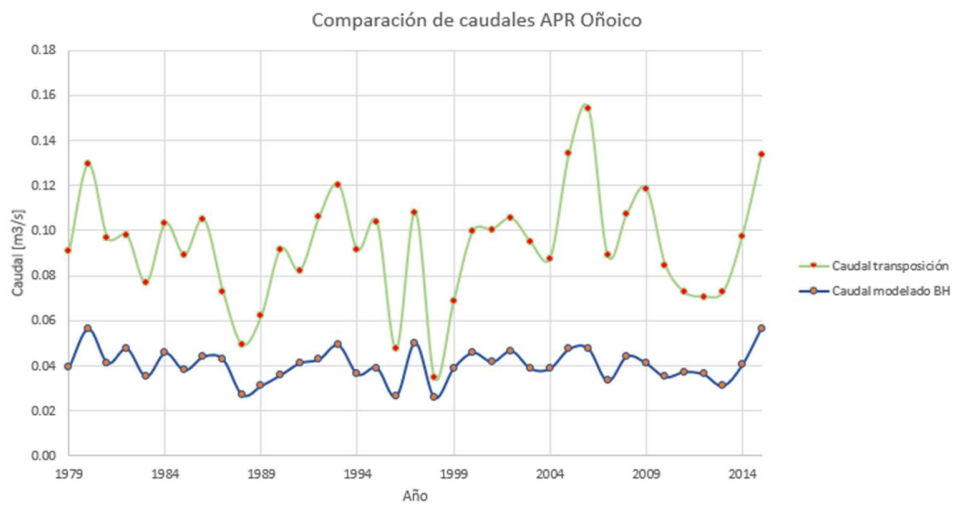


Figura E.4: Caudales modelado y por transposición en APR Oñicoico.

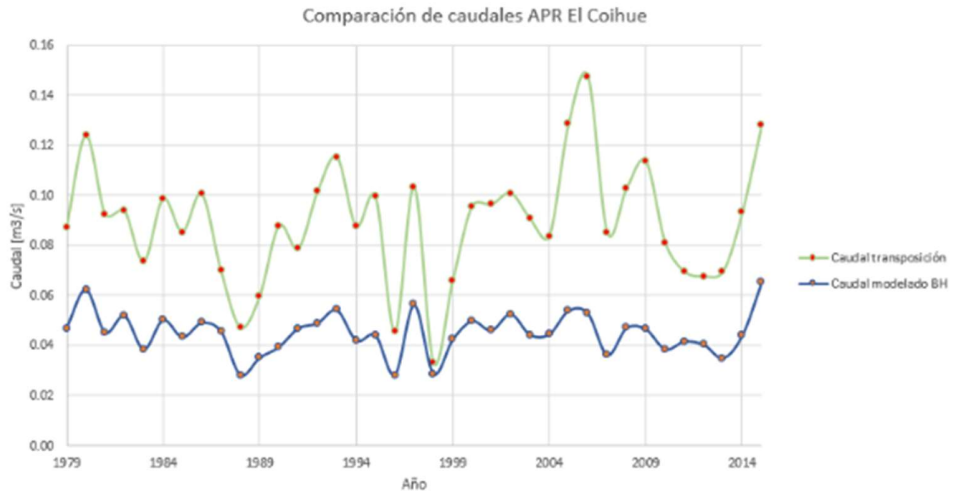


Figura E.5: Caudales modelado y por transposición en APR El Coihue.

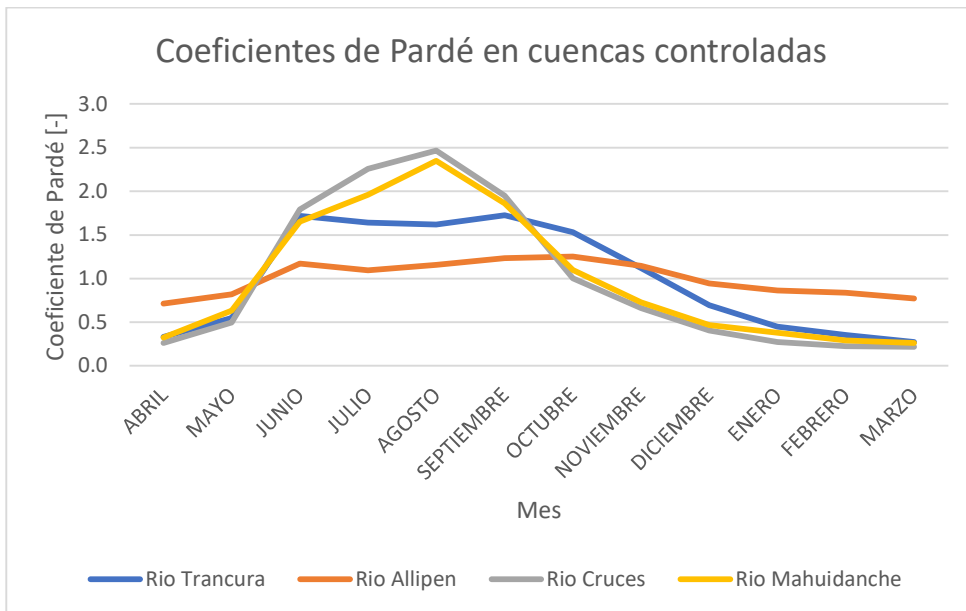


Figura E.6: Coeficientes de Pardé mensuales en cuencas controladas.

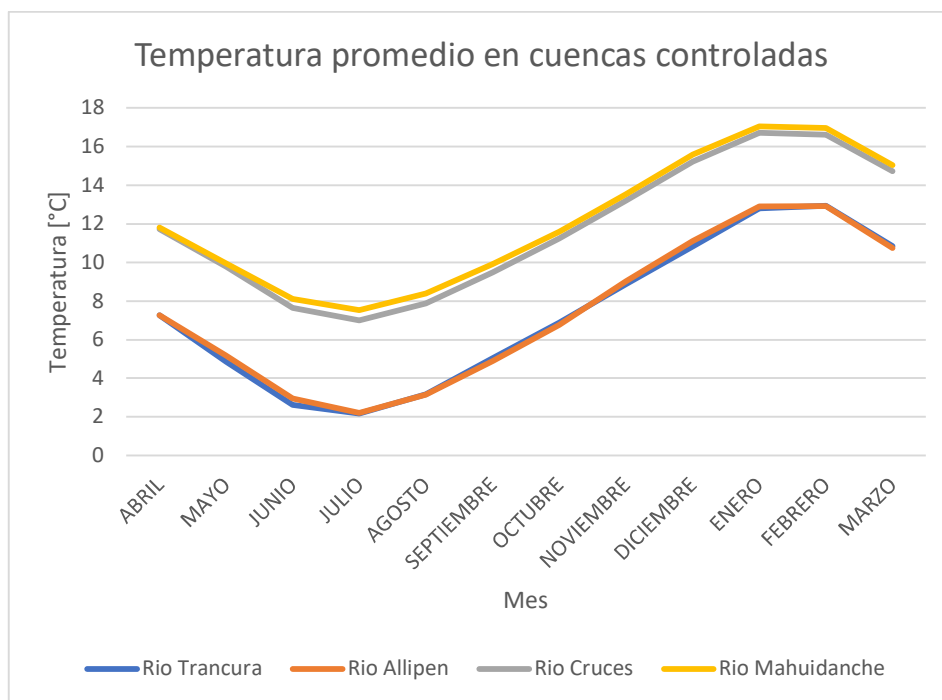


Figura E.7: Temperaturas promedio mensuales en cuencas controladas.

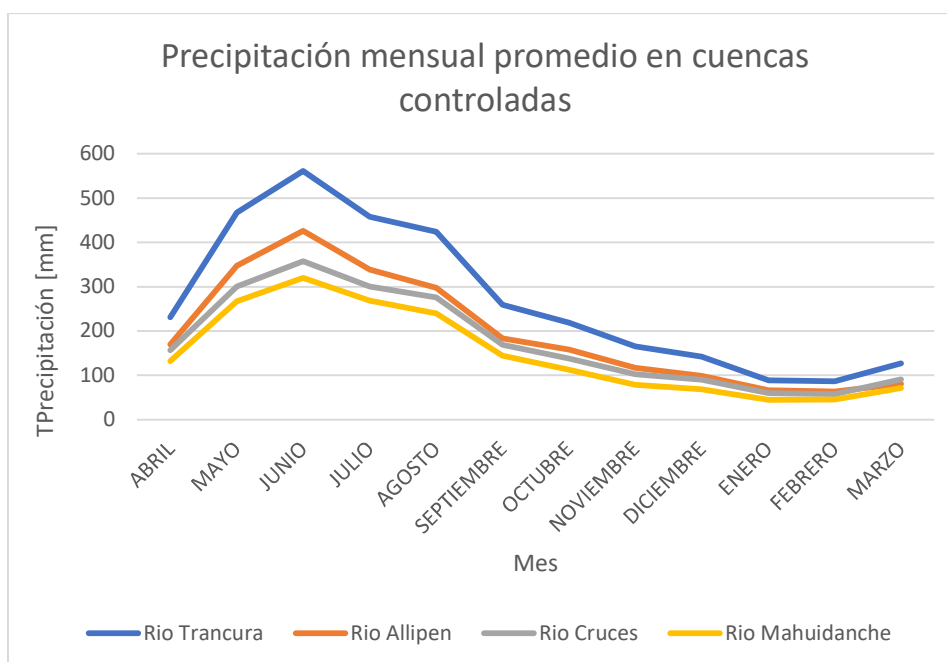


Figura E.8: Precipitación promedio mensuales en cuencas controladas.