

Informe
Proyecto
Arclim

Recursos Hídricos

ARCLIM
Atlas de Riesgo Climático
Chile



Equipo realizador:

Sebastián Vicuña

Centro de Cambio Global UC
y Depto. Ing. Hidráulica y Ambiental,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Eduardo Bustos

Centro de Cambio Global UC.

Carlos Calvo

Centro de Cambio Global UC.

Kiara Tesen

Depto. Ing. Hidráulica y Ambiental,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Jorge Gironás

Centro de Cambio Global UC
y Depto. Ing. Hidráulica y Ambiental,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Francisco Suárez

Depto. Ing. Hidráulica y Ambiental,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Santiago, Chile - 2020.



Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Vicuña, S.; Bustos, E.; Calvo, C.; Tesen, K.; Gironás, J. & Suárez, F., 2020. Informe Proyecto ARClim: Recursos Hídricos. Centro de Cambio Global UC coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago.

Preparado para:



ARClim es un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, financiado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Coordinado por:



Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR]2
ANID/FONDAP/15110009



Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC
de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Desarrollado por:



Informe
Proyecto
ARCLIM

Recursos Hídricos

ARCLIM
Atlas de Riesgo Climático
Chile



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.		Pág.	
2	1. Resumen Ejecutivo	31	4.4 Cuenca del río Choapa.
5	2. Introducción	31	4.4.1 Introducción y Vulnerabilidad histórica.
5	2.1 Objetivo.	33	4.4.2 Vulnerabilidad y Riesgos futuros.
6	2.2 Antecedentes.	38	4.5 Cuencas de los ríos Ligua y Petorca.
8	3. Metodología	38	4.5.1 Introducción y Vulnerabilidad histórica.
8	3.1 Alcances de la metodología considerada.	40	4.5.2 Vulnerabilidad y Riesgos futuros.
12	3.2 Definiciones.	45	4.6 Cuenca del río Maipo.
12	3.3 Fuentes de datos y referencias.	45	4.6.1 Introducción y Vulnerabilidad histórica.
14	3.4 Modelación hidrológica y de recursos hídricos.	47	4.6.2 Vulnerabilidad y Riesgos futuros.
14	3.5 Descripción de los análisis desarrollados.	51	4.7 Cuenca del río Maule.
15	3.6 Generación de sistema SIG con los mapas de Riesgo.	51	4.7.1 Introducción y Sensibilidad histórica.
17	4. Resultados	52	4.7.2 Vulnerabilidad y Riesgos futuros.
17	4.1 Introducción a los resultados presentados en cada cuenca para el período histórico y futuro.	57	5. Desafíos Futuros
18	4.2 Cuenca del río Copiapó.	58	6. Conclusiones
18	4.2.1 Introducción y Vulnerabilidad histórica.	61	7. Agradecimientos
20	4.2.2 Vulnerabilidad y Riesgos futuros.	62	8. Referencias
26	4.3 Cuenca del río Limarí.	65	9. Anexos
26	4.3.1 Introducción y Sensibilidad histórica.	65	9.1 Detalle sistemas analizados.
28	4.3.2 Vulnerabilidad y Riesgos futuros.	65	9.1.1 Detalle del sistema de la cuenca del río Copiapó.
		68	9.1.2 Detalle del sistema de la cuenca del río Limarí.
		71	9.1.3 Detalle del sistema de la cuenca del río Choapa.



Pág.

73	9.1.4 Detalle del sistema de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
75	9.1.5 Detalle del sistema de la cuenca del río Maipo.
76	9.1.6 Detalle del sistema de la cuenca del río Maule.
77	9.2 Resultados detallados por sistema analizado.
77	9.2.1 Resultados detallados cuenca del río Copiapó.
77	9.2.1.1 Vulnerabilidad histórica.
84	9.2.1.2 Cambios en Vulnerabilidad futura.
85	9.2.2 Resultados detallados cuenca del río Limarí.
85	9.2.2.1 Vulnerabilidad histórica.
90	9.2.2.2 Cambios en Vulnerabilidad futura.
91	9.2.3 Resultados detallados cuenca del río Choapa.
91	9.2.3.1 Vulnerabilidad histórica.
95	9.2.3.2 Cambios en Vulnerabilidad futura.
95	9.2.4 Resultados detallados cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
95	9.2.4.1 Vulnerabilidad histórica.
99	9.2.4.2 Cambios en Vulnerabilidad futura.
101	9.2.5 Resultados detallados cuenca del río Maipo.
101	9.2.5.1 Vulnerabilidad histórica.
105	9.2.5.2 Cambios en Vulnerabilidad futura.
105	9.2.6 Resultados detallados cuenca del río Maule.
105	9.2.6.1 Vulnerabilidad histórica.
108	9.2.6.2 Cambios en Vulnerabilidad futura.





ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

- 10** **Figura 1.** Distribución espacial de los principales elementos del sistema de distribución de recursos hídricos a nivel nacional (y un detalle en la zona centro sur del país), incluyendo embalses, canales, plantas de producción de agua potable y centrales hidroeléctricas.
- 18** **Figura 2.** Caudal medio anual del río Copiapó en Pastillo.
- 19** **Figura 3.** Hidrograma promedio del río Copiapó en Pastillo.
- 19** **Figura 4.** Principales hitos en la gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Copiapó representados en el análisis.
- 19** **Figura 5.** Caudal promedio anual entre 1980 - 2009 de suministro de agua superficial y subterránea para distintos usuarios en cuenca río Copiapó.
- 21** **Figura 6.** Variación del caudal en el río Copiapo, en Pastillo, del período futuro con respecto al período de control.
- 21** **Figura 7.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y de control del caudal con 50% de probabilidad de excedencia, en cabecera, y el caudal con 85% de probabilidad de excedencia, en punto intermedio y desembocadura, para la cuenca del río Copiapó.
- 22** **Figura 8.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y de control de los descensos en los niveles de agua subterránea para la cuenca del río Copiapó.
- 25** **Figura 9.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales para distintos usos en la cuenca del río Copiapó, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.
- 25** **Figura 10.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales y subterráneos para distintos usos en la cuenca del río Copiapó, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.
- 26** **Figura 11.** Caudal medio anual del río Grande, en Las Ramadas.
- 26** **Figura 12.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 del río Grande, en Las Ramadas.
- 27** **Figura 13.** Principales hitos en la gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Limarí representados en el análisis.

Pág.

- 29** **Figura 14.** Variación del caudal en el río Grande, en Las Ramadas, del período futuro con respecto al período de control.
- 29** **Figura 15.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y de control del caudal con 50% de probabilidad de excedencia, en cabecera, y caudal con 85% de probabilidad de excedencia, en punto intermedio y desembocadura, para la cuenca del río Limarí.
- 31** **Figura 16.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales para distintos usos en la cuenca del río Limarí, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.
- 32** **Figura 17.** Caudal medio anual del río Choapa, en Cuncumén.
- 32** **Figura 18.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 del río Choapa, en Cuncumén.
- 33** **Figura 19.** Principales hitos en la gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Choapa representados en el análisis.
- 33** **Figura 20.** Caudal promedio anual entre 1980 - 2009 de suministro de agua superficial y subterránea para distintos usuarios en la cuenca del río Choapa.
- 34** **Figura 21.** Variación del caudal en la estación río Choapa, en Cuncumén, en el período futuro con respecto al período de control.
- 35** **Figura 22.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y control del caudal con 50% de probabilidad de excedencia, en cabecera, y el caudal con 85% de probabilidad de excedencia, en punto intermedio y desembocadura, para la cuenca del río Choapa.
- 35** **Figura 23.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y control de los descensos en los niveles de agua subterránea para la cuenca del río Choapa.
- 37** **Figura 24.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales para distintos usos en la cuenca del río Choapa, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.
- 37** **Figura 25.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales y subterráneos para distintos usos en la cuenca del río Choapa, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.



ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

- 38** **Figura 26.** Caudal medio anual del río La Ligua en Alicahue, en Colliguay, y en río Petorca, en Pedernal.
- 38** **Figura 27.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 del río La Ligua en Alicahue, en Colliguay, y en río Petorca, en Pedernal.
- 39** **Figura 28.** Principales hitos en la gestión de recursos hídricos de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca representados en el análisis.
- 39** **Figura 29.** Caudal anual de suministro de agua superficial y subterránea, período 1980 - 2009, para distintos usuarios en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 41** **Figura 30.** Variación del caudal en el río La Ligua en Alicahue, en Colliguay, del período futuro con respecto al período de control.
- 41** **Figura 31.** Variación del caudal en el río Petorca, en Pedernal, del período futuro con respecto al período de control.
- 42** **Figura 32.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y de control del caudal con 50% de probabilidad de excedencia, en cabecera, y el caudal con 85% de probabilidad de excedencia, en punto intermedio y desembocadura, para las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 42** **Figura 33.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y de control de los descensos en los niveles de agua subterránea para las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 44** **Figura 34.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales para distintos usos en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.
- 44** **Figura 35.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales y subterráneos para distintos usos en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.
- 45** **Figura 36.** Caudal medio anual en río Maipo, en El Manzano.
- 45** **Figura 37.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 en río Maipo, en El Manzano.
- 46** **Figura 38.** Principales hitos en la gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Maipo representados en el análisis.

Pág.

- 48** **Figura 39.** Variación del caudal en el río Maipo, en El Manzano, del período futuro con respecto al período de control.
- 49** **Figura 40.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y de control del caudal con 50% de probabilidad de excedencia, en El Manzano, y el caudal con 85% de probabilidad de excedencia, en punto bajo canales, para la cuenca del río Maipo.
- 50** **Figura 41.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales para distintos usos en la cuenca del río Maipo, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.
- 51** **Figura 42.** Caudal medio anual del río Maule, en Armerillo.
- 51** **Figura 43.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 del río Maule, en Armerillo.
- 52** **Figura 44.** Principales hitos en la gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Maule.
- 54** **Figura 45.** Variación del caudal en el río Maule, en Armerillo, del período futuro con respecto al período de control.
- 54** **Figura 46.** Representación espacial de la variación relativa entre el período futuro y de control del caudal con 50% de probabilidad de excedencia, en Maule, en Armerillo, y el caudal con 85% de probabilidad de excedencia, en Maule medio y bajo Colbún, para la cuenca del río Maule.
- 55** **Figura 47.** Representación espacial de los cambios (entre el período futuro y de control) en la Vulnerabilidad extrema en la extracción de recursos hídricos superficiales para distintos usos en la cuenca del río Maule, tomando en cuenta el promedio de los escenarios climáticos.
- 66** **Figura 48.** Plano esquemático de la red de canales en la cuenca del Copiapó. En amarillo la red de canales y en azul, la red hidrográfica de ríos principales.
- 67** **Figura 49.** Plano esquemático de los nodos de agua subterránea (verde) y nodos de demanda (rojo) en cuenca del río Copiapó.
- 67** **Figura 50.** Dominio de celdas activas del modelo de hidrología subterránea (en colores).
- 68** **Figura 51.** Pozos de observación de nivel piezométrico en el modelo de la cuenca del río Copiapó.



ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

- 69** **Figura 52.** Plano esquemático de la red de canales en la cuenca del río Limarí. En amarillo la red de canales y en azul, la red hidrográfica de ríos principales.
- 69** **Figura 53.** Plano esquemático de los nodos de agua subterránea y nodos de demanda.
- 70** **Figura 54.** Dominio de celdas activas del modelo de hidrología subterránea.
- 70** **Figura 55.** Pozos de observación de nivel piezométrico en el modelo de la cuenca del río Limarí.
- 72** **Figura 56.** Plano esquemático de la red de canales en la cuenca del Choapa. En amarillo la red de canales y en azul, la red hidrográfica de ríos principales.
- 72** **Figura 57.** Plano esquemático de los nodos de agua subterránea y nodos de demanda.
- 73** **Figura 58.** Dominio de celdas activas del modelo de hidrología subterránea.
- 74** **Figura 59.** Plano esquemático de los nodos de demanda y líneas de transmisión.
- 74** **Figura 60.** Dominio de celdas activas del modelo de hidrología subterránea.
- 75** **Figura 61.** Plano esquemático del sistema de captación y distribución de agua potable del Sistema Maipo de Aguas Andinas.
- 75** **Figura 62.** Plano esquemático de la red de canales matrices de la primera sección de la cuenca del río Maipo. En amarillo la red de canales y en azul, la red hidrográfica de ríos principales.
- 76** **Figura 63.** Subcuencas modeladas de la cuenca del río Maule
- 76** **Figura 64.** Plano esquemático de la red de canales en la cuenca del río Maule. En amarillo la red de canales y en azul, la red hidrográfica de ríos principales.
- 77** **Figura 65.** Plano esquemático de los nodos de agua subterránea y nodos de demanda.
- 78** **Figura 66.** Suministro de agua mensual en sector de riego 1, cuenca río Copiapó.
- 78** **Figura 67.** Suministro de agua promedio anual en sector de riego 1, cuenca río Copiapó
- 78** **Figura 68.** Hidrograma promedio de suministro de agua en sector de riego 1, cuenca río Copiapó.

Pág.

- 79** **Figura 69.** Suministro de agua mensual en sector de Riego 2, cuenca río Copiapó.
- 79** **Figura 70.** Suministro de agua promedio anual en sector de riego 2, cuenca río Copiapó.
- 79** **Figura 71.** Hidrograma promedio de suministro de agua en sector de riego 2, cuenca río Copiapó.
- 80** **Figura 72.** Suministro de agua mensual en sector de riego 3, cuenca río Copiapó.
- 80** **Figura 73.** Suministro de agua promedio anual en sector de riego 3, cuenca río Copiapó.
- 80** **Figura 74.** Hidrograma promedio de suministro de agua en sector de riego 3, cuenca río Copiapó.
- 81** **Figura 75.** Suministro de agua potable mensual en cuenca río Copiapó.
- 81** **Figura 76.** Suministro de agua potable promedio anual en cuenca río Copiapó.
- 81** **Figura 77.** Hidrograma promedio de suministro de agua potable en cuenca río Copiapó.
- 82** **Figura 78.** Suministro de agua en minería mensual en cuenca río Copiapó.
- 82** **Figura 79.** Suministro de agua en minería promedio anual en cuenca río Copiapó.
- 82** **Figura 80.** Hidrograma promedio de suministro de agua en minería en cuenca río Copiapó.
- 83** **Figura 81.** Suministro de agua industrial mensual en cuenca río Copiapó.
- 83** **Figura 82.** Suministro de agua industrial promedio anual en cuenca río Copiapó.
- 83** **Figura 83.** Hidrograma promedio de suministro de agua industrial en cuenca río Copiapó.
- 84** **Figura 84.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego en la cuenca del río Copiapó.
- 84** **Figura 85.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego en la cuenca del río Copiapó.



ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

- 84** **Figura 86.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para riego en la cuenca del río Copiapó.
- 84** **Figura 87.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para agua potable en la cuenca del río Copiapó.
- 85** **Figura 88.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso minero en la cuenca del río Copiapó.
- 85** **Figura 89.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso industrial en la cuenca del río Copiapó.
- 85** **Figura 90.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para distintos usos en la cuenca del río Copiapó.
- 86** **Figura 91.** Suministro de agua mensual en sector 1, cuenca río Limarí.
- 86** **Figura 92.** Suministro de agua promedio anual en sector 1, cuenca río Limarí.
- 86** **Figura 93.** Hidrograma promedio entre 1980-2009 de suministro de agua en sector 1, cuenca río Limarí.
- 87** **Figura 94.** Suministro de agua mensual en sector 2, cuenca río Limarí.
- 87** **Figura 95.** Suministro de agua promedio anual en sector 2, cuenca río Limarí.
- 87** **Figura 96.** Hidrograma promedio entre 1980-2009 de demanda entregada en sector 2, cuenca río Limarí.
- 88** **Figura 97.** Suministro de agua mensual en sector 3, cuenca río Limarí.
- 88** **Figura 98.** Suministro de agua promedio anual en sector 3, cuenca río Limarí.
- 88** **Figura 99.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua en sector 3, cuenca río Limarí.
- 89** **Figura 100.** Suministro de agua mensual para agua potable, cuenca río Limarí.
- 89** **Figura 101.** Suministro promedio anual para agua potable, cuenca río Limarí.

Pág.

- 89** **Figura 102.** Hidrograma promedio entre 1980-2009 del suministro para agua potable, cuenca río Limarí.
- 90** **Figura 103.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego aguas arriba de embalses en la cuenca del río Limarí.
- 90** **Figura 104.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego entre embalses y Ovalle en la cuenca del río Limarí.
- 90** **Figura 105.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego abajo de Ovalle en la cuenca del río Limarí.
- 90** **Figura 106.** Resumen del cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para distintos usos en la cuenca del río Limarí.
- 91** **Figura 107.** Suministro de agua mensual para riego en la cuenca del río Choapa.
- 91** **Figura 108.** Suministro de agua anual para riego en la cuenca del río Choapa.
- 91** **Figura 109.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua para riego en la cuenca del río Choapa.
- 92** **Figura 110.** Suministro mensual para agua potable en cuenca río Choapa.
- 92** **Figura 111.** Suministro promedio anual para agua potable en cuenca río Choapa.
- 92** **Figura 112.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro para agua potable en cuenca río Choapa.
- 93** **Figura 113.** Suministro de agua mensual para minería en cuenca río Choapa.
- 93** **Figura 114.** Suministro de agua promedio anual para minería en cuenca río Choapa.
- 93** **Figura 115.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua para minería en cuenca río Choapa.
- 94** **Figura 116.** Suministro de agua mensual para uso industrial en cuenca río Choapa.



ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

- 94** **Figura 117.** Suministro de agua promedio anual para uso industrial en cuenca río Choapa.
- 94** **Figura 118.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua para uso industrial en cuenca río Choapa.
- 95** **Figura 119.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego asociadas a los ríos Choapa, Chalinga e Illapel.
- 95** **Figura 120.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en agua potable para los ríos Choapa, Chalinga e Illapel.
- 95** **Figura 121.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso minero e industrial presente en la cuenca del río Choapa.
- 96** **Figura 122.** Suministro de agua mensual a usuarios agrícolas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 96** **Figura 123.** Suministro de agua promedio anual a usuarios agrícolas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 96** **Figura 124.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua a usuarios agrícolas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 97** **Figura 125.** Suministro de agua mensual a usuarios de agua potable urbana de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 97** **Figura 126.** Suministro de agua promedio anual a usuarios de agua potable urbana de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 97** **Figura 127.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua potable urbana de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 98** **Figura 128.** Suministro de agua mensual a usuarios de agua potable rural de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 98** **Figura 129.** Suministro de agua promedio anual a usuarios de agua potable rural de la cuenca del río La Ligua y del río Petorca.
- 98** **Figura 130.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua potable rural de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.

Pág.

- 99** **Figura 131.** Suministro de agua mensual en minería en cuenca del río La Ligua.
- 99** **Figura 132.** Suministro de agua promedio anual en minería en cuenca del río La Ligua.
- 99** **Figura 133.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro en minería en cuenca del río La Ligua.
- 100** **Figura 134.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 100** **Figura 135.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso de agua potable rural en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 100** **Figura 136.** Cambio en la Vulnerabilidad media (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso de agua potable urbana en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.
- 100** **Figura 137.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en minería en la cuenca del río La Ligua.
- 100** **Figura 138.** Resumen del cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para distintos usos en las cuenca de los ríos La Ligua y Petorca.
- 101** **Figura 139.** Suministro de agua mensual a las asociaciones de canalistas de la primera sección del río Maipo.
- 101** **Figura 140.** Suministro de agua promedio anual a las asociaciones de canalistas de la primera sección del río Maipo.
- 101** **Figura 141.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 del suministro de agua a las las asociaciones de canalistas de la primera sección del río Maipo.
- 102** **Figura 142.** Suministro de agua mensual a planta de producción de agua potable - Aguas Andinas.
- 102** **Figura 143.** Suministro promedio anual de agua a planta de producción de agua potable - Aguas Andinas.
- 102** **Figura 144.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua entregada a planta de producción de agua potable - Aguas Andinas.



ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

- 103** **Figura 145.** Suministro de agua mensual en canales de centrales hidroeléctricas – Zona Cordillera cuenca Maipo.
- 103** **Figura 146.** Suministro de agua promedio anual en canales de centrales hidroeléctricas – Zona Cordillera cuenca Maipo.
- 104** **Figura 147.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 del suministro de agua en canales de centrales hidroeléctricas – Zona Cordillera cuenca Maipo.
- 104** **Figura 148.** Suministro de agua mensual en canales de centrales hidroeléctricas – Zona Valle cuenca Maipo.
- 104** **Figura 149.** Suministro de agua promedio anual en canales de centrales hidroeléctricas – Zona Valle cuenca Maipo.
- 105** **Figura 150.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 del suministro de agua en canales de centrales hidroeléctricas – Zona Valle cuenca Maipo.
- 105** **Figura 151.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso de agua potable del Sistema Maipo operado por Aguas Andinas.
- 105** **Figura 152.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso por centrales hidroeléctricas en la cuenca del río Maipo.
- 106** **Figura 153.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego en la primera sección de la cuenca del río Maipo.
- 106** **Figura 154.** Suministro de agua mensual a asociaciones de canalistas del río Maule.
- 106** **Figura 155.** Suministro de agua promedio anual a asociaciones de canalistas del río Maule.
- 107** **Figura 156.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua a asociaciones de canalistas del río Maule.
- 107** **Figura 157.** Suministro de agua mensual en centrales hidroeléctricas, cuenca río Maule.
- 107** **Figura 158.** Suministro de agua promedio anual en centrales hidroeléctricas cuenca río Maule.
- 107** **Figura 159.** Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de suministro de agua en centrales hidroeléctricas, cuenca río Maule.

Pág.

- 108** **Figura 160.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso por centrales hidroeléctricas en la junta de vigilancia de la cuenca del río Maule.
- 108** **Figura 161.** Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego en la primera sección de la cuenca del río Maule.
- 109** **Figura 162.** Resumen del cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para distintos usos en junta de vigilancia de la cuenca del río Maule.



ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

- 13** **Tabla 1.** Características de los sistemas de recursos hídricos representados en los modelos considerados.
- 20** **Tabla 2.** Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Copiapó en período histórico (1980 - 2009).
- 23** **Tabla 3.** Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios en la cuenca del río Copiapó (sólo considera aguas superficiales).
- 24** **Tabla 4.** Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios en la cuenca del río Copiapó (considera aguas superficiales y subterráneas).
- 28** **Tabla 5.** Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Limarí en período histórico (1980 - 2009).
- 30** **Tabla 6.** Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios en la cuenca del río Limarí (sólo considera aguas superficiales).
- 33** **Tabla 7.** Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Choapa en período histórico (1980 - 2009).
- 36** **Tabla 8.** Variación de la Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para usos de riego, agua potable, minería e industrial en la cuenca del río Choapa, considerando solamente fuentes de aguas superficiales.
- 36** **Tabla 9.** Variación de la Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para usos de riego, agua potable, minería e industrial en la cuenca del río Choapa, considerando fuentes de aguas superficiales y subterráneas.
- 40** **Tabla 10.** Indicadores de desempeño para distintos usuarios de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca en período histórico (1980 - 2009).
- 43** **Tabla 11.** Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios de las cuencas ríos La Ligua y Petorca, así como el caudal en desembocadura (sólo considera aguas superficiales).
- 43** **Tabla 12.** Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios de las cuencas ríos La Ligua y Petorca, así como el caudal en desembocadura (considera aguas superficiales y subterráneas).

Pág.

- 47** **Tabla 13.** Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Maipo en período histórico (1980 - 2009).
- 49** **Tabla 14.** Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios en la cuenca del río Maipo.
- 53** **Tabla 15.** Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Maule en período histórico (1980 - 2009).
- 55** **Tabla 16.** Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios en la cuenca del río Maule.
- 66** **Tabla 17.** Subcuencas modeladas del río Copiapó.
- 68** **Tabla 18.** Subcuencas modeladas del río Limarí.
- 71** **Tabla 19.** Subcuencas modeladas del río Choapa.





1

RESUMEN EJECUTIVO

Frente a los posibles impactos asociados al cambio climático, el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad del Ministerio del Medio Ambiente aprobó, en 2014, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático como una herramienta para guiar la acción nacional en materia de adaptación. En este, se ha podido definir diferentes sectores vulnerables, uno de ellos es el sistema de distribución de recursos hídricos para salvaguardar las necesidades de consumo de agua potable para la población y para el desarrollo de distintas actividades productivas.

Dentro de los objetivos de este Plan de Adaptación surge el presente estudio, cuyo objetivo principal es elaborar mapas de Vulnerabilidad y Riesgos frente al cambio climático, de acuerdo con las proyecciones climáticas futuras, a escala comunal, que sean útiles para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación. Así también, se busca elaborar una propuesta del capítulo “Vulnerabilidad del país y su adaptación al cambio climático”, para la Cuarta Comunicación Nacional de Chile.

En este documento se presenta el resumen de la metodología y los resultados del grupo de trabajo de Recursos Hídricos. La gestión de los recursos hídricos, en parte importante del país, se basa en el uso de infraestructura (de regulación y conducción), que cumple con el objetivo principal de dis-

tribuir el agua, espacial y temporalmente, desde lugares y momentos donde hay exceso a lugares y momentos donde hay déficit.

La metodología utilizada para poder cuantificar el Riesgo para los distintos usuarios que extraen recursos hídricos en las cuencas analizadas considera los sistemas de abastecimiento y distribución de recursos hídricos, sin abordar el consumo de estos recursos. Es por esta razón que las Amenazas se acotan a la posibilidad de operar estos sistemas; considerando como Amenaza principal, a los cambios en la disponibilidad de estos recursos: reducción en caudal o baja en napa de aguas subterráneas.

Se evalúa, por tanto, la Vulnerabilidad, que está asociada a la Sensibilidad climática del sistema y a la capacidad de ejercer la extracción deseada de recursos hídricos en cada punto de extracción. Para el análisis de todo un período (histórico o futuro), se considera la Vulnerabilidad extrema, equivalente al máximo de la serie de media móvil de seis meses de vulnerabilidades mensuales. Así también, se evalúa el Riesgo, que corresponde a cambios en la Vulnerabilidad en los distintos objetos expuestos (sistemas de extracción de recursos hídricos). La unidad territorial de alcance de trabajo es a nivel de los distintos usuarios del sistema de captación y distribución de recursos hídricos en una cuenca.



Para la evaluación del Riesgo y Vulnerabilidad, se usan como antecedentes modelos oficiales de gestión de recursos hídricos que se encuentran en distintas etapas de desarrollo, siendo algunos de ellos objeto de mejoras en el marco de los estudios para el desarrollo de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) impulsados por la Dirección General de Aguas (DGA). Sin perjuicio de lo anterior, se espera que estos resultados puedan ser actualizados en el marco del desarrollo de esos PEGH. Las cuencas consideradas en el análisis son las que se listan a continuación (de norte a sur), indicando de dónde se obtuvieron los modelos considerados para cada una:

1. Cuenca del Copiapó

DICTUC-DGA (2019) y Eridanus (2020)

2. Cuenca del Limarí

DICTUC-DGA (2019) y CCG-UC (2020)

3. Cuenca del Choapa

DICTUC-DGA (2019) y CCG-UC (2020)

4. Cuenca Ligua-Petorca

DICTUC-DGA (2019) y Ecohyd – UV (2020)

5. Cuenca del Maipo

CCG-UC (2020)

6. Cuenca del Maule

CCG-UC (2020)

Los modelos se realizan en los softwares WEAP y MODFLOW. WEAP es una herramienta de modelación hidrológica a nivel de cuenca, desarrollada por SEI (Stockholm Environmental Institute), la cual calcula el balance de masa entre los distintos elementos presentes en la cuenca. MODFLOW consiste en una herramienta numérica que simula el flujo subterráneo tridimensional en una cuenca bajo régimen permanente o transiente y toma en consideración las propiedades hidrogeológicas del acuífero.

Estos modelos representan infraestructura de distribución y/o uso del agua, donde el nivel de cobertura, detalle y desagregación de cada sistema varía por cuenca. Así también, cuentan con la capacidad de reproducir las condiciones hidrológicas en respuesta al clima. Es decir, las series de caudales se obtienen de manera directa al interior de los mismos modelos, aplicando módulos de modelación hidrológica. De esta manera, se corren los modelos directamente con series climáticas. Para ello, se utilizó la base de clima histórico (período 1980 - 2009),

obtenida a partir de registros de la DGA, junto con las series climáticas asociadas a seis modelos de clima global (GCM), operando con el escenario RCP 8.5 para el período futuro (2035 - 2064). Estos modelos corresponden a ACCESS1-3, CanESM2, CSIRO-Mk3-6-0, Inmcm4, IPSL-CM5A-MR y IPSL-CM5B-LR.

Los resultados obtenidos para cada objeto de Exposición se presentan en una base de datos espacial SIG, que contiene la caracterización de la Sensibilidad con el clima en su condición histórica y el cambio para los escenarios futuros. Los elementos que son representados en estas capas SIG corresponden a centrales hidroeléctricas, áreas regadas, y usuarios de agua potable, minería e industrial.

Los resultados y conclusiones que se establecen del análisis de Riesgos asociados a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos son los siguientes:

- En general, el desempeño histórico (período 1980 - 2009) de la distribución de recursos hídricos para los usuarios de agua potable y minería tienen una baja Vulnerabilidad extrema (en muchos casos 0%). La presencia de embalses ayuda a mejorar la Vulnerabilidad del desempeño.
- Respecto de los escenarios futuros, en términos generales, se aprecia una disminución de caudales anuales en casi todos los escenarios climáticos, afectando la disponibilidad de recursos hídricos. Sin embargo, destacan algunos escenarios climáticos en los que el caudal anual aumenta. A nivel mensual, se aprecia que la señal es más heterogénea, existiendo aumentos y disminuciones en los caudales.
- Asociado a la disminución en la disponibilidad de recursos hídricos se aprecia, en general, un empeoramiento en el desempeño en casi todos los sistemas.
- El uso de aguas subterráneas aparece como un mecanismo de adaptación directo, al que pueden recurrir usuarios con acceso a estos recursos. Esto implica un aumento en el uso de estos recursos en el tiempo y, por ende, puede limitar su uso a largo plazo, ya que estas extracciones de agua subterránea tienen asociado un descenso en los niveles piezométricos del acuífero, por lo que el aprovechamiento del acuífero no es ilimitado.



2

INTRO- DUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que consiste en un cambio en el estado del clima, el cual puede ser identificado estadísticamente mediante cambios en la variabilidad media de sus propiedades, y que persiste sostenidamente por un período extenso en el tiempo, del orden de décadas o más. Frente a los posibles impactos asociados a estos cambios en el clima, el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad del Ministerio del Medio Ambiente aprobó en 2014 el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, como una herramienta para guiar la acción nacional en materia de adaptación frente al cambio climático.

Dentro de los objetivos de este Plan de Adaptación surge el estudio “Mapas de Vulnerabilidad y Riesgo frente al cambio climático”, que busca 1) generar índices de Vulnerabilidad y Riesgo frente al cambio climático, considerando las proyecciones futuras para el clima del país y los sistemas naturales y humanos expuestos; 2) presentar esta información en formato de mapas, de modo que permita una visualización más amigable e interactiva, a disposición de toda la ciudadanía; y 3) elaborar una propuesta del capítulo “Vulnerabilidad del país y su adaptación al cambio climático”, para la Cuarta Comunicación Nacional de Chile.

Uno de los sectores que puede ser afectado por el cambio climático es el sistema de distribución de recursos hídricos para salvaguardar las necesidades de consumo de agua potable de la población y para el desarrollo de distintas actividades productivas. En este informe se presentan los avances metodológicos y primeros resultados del análisis que se desarrolla para evaluar los Riesgos y la Vulnerabilidad de este sector. Los resultados tienen relevancia en los Riesgos que registran otros sistemas, como el agrícola, las ciudades y energético. En el informe se entregan antecedentes que son relevantes para estos análisis complementarios.

2.1 OBJETIVO

El objetivo general del proyecto “Mapas de Vulnerabilidad y Riesgo Frente al Cambio Climático” es elaborar mapas de Vulnerabilidad y Riesgos frente al cambio climático, de acuerdo con las proyecciones climáticas futuras, a escala comunal, que sean útiles para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación.



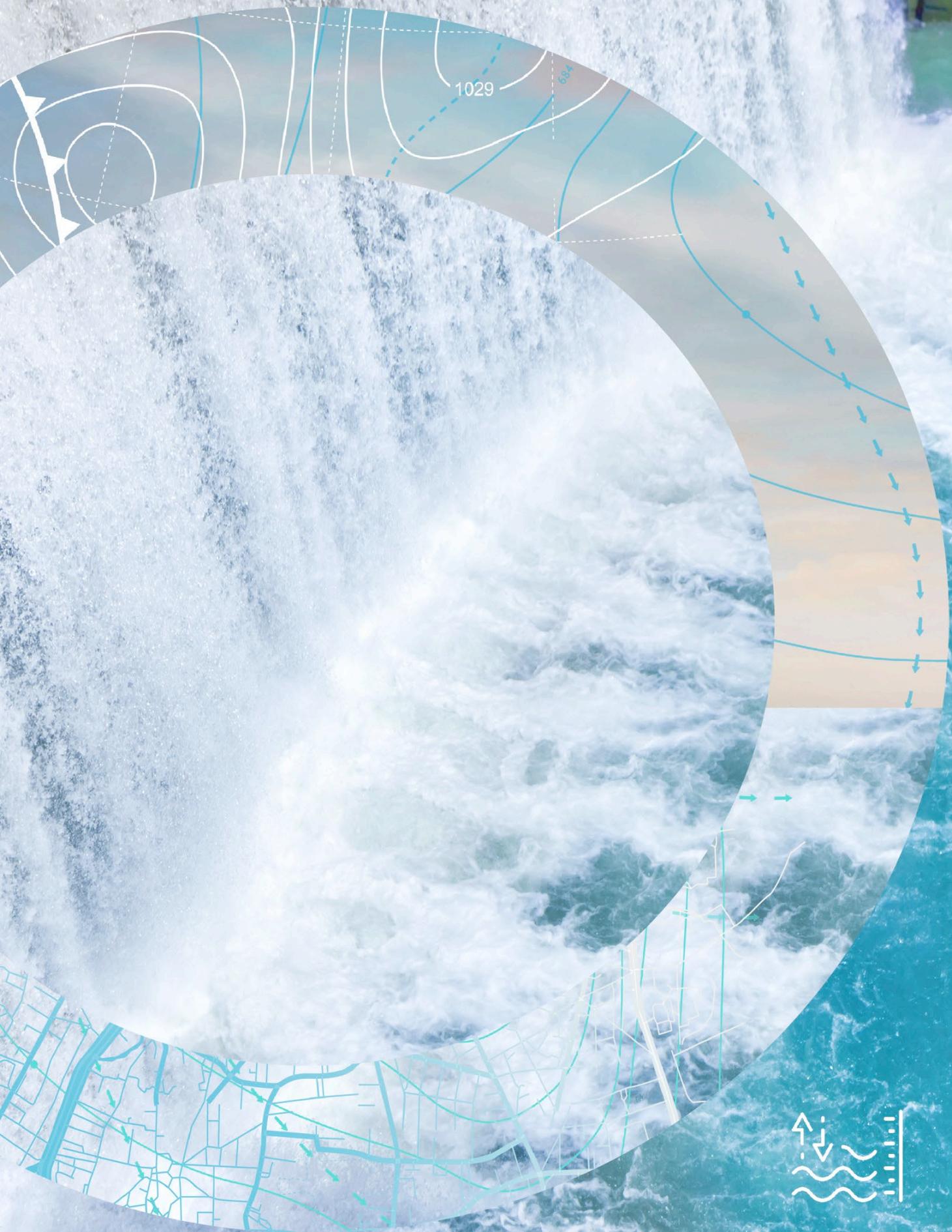
Este objetivo general se desglosa en una serie de objetivos específicos relacionados con el levantamiento de información, análisis, preparación de indicadores y mapas de Vulnerabilidad y Riesgos, entre otros. Estos objetivos específicos tienen posteriormente una bajada a cada uno de los grupos de trabajo que se ha constituido. En particular, este informe da cuenta de la manera en que estos objetivos se concretan en materia de distribución de recursos hídricos.

2.2 ANTECEDENTES

Los antecedentes considerados en este grupo de trabajo tienen relación con bases de datos y herramientas de análisis que provienen de desarrollos de experiencias previas. Respecto de las bases de datos, la información crítica corresponde a las series climáticas que surgen de los proyectos de Actualización del Balance Hídrico (DGA, 2017; DGA, 2018) y que han sido revisados en este proyecto. Se consideran, en este sentido, la base de clima histórico (período 1980 - 2009), obtenida a partir de registros de la DGA (2020),

junto con las series climáticas asociadas a seis modelos de clima global (GCM), operando con el escenario de RCP 8.5 para el período futuro (2035 -2064). Estos modelos corresponden a ACCESS1-3, CanESM2, CSIRO-Mk3-6-0, Inmcm4, IPSL-CM5A-MR y IPSL-CM5B-LR. Estos son los mismos GCM utilizados por el grupo de trabajo de Agricultura.

Por otra parte, para la evaluación del Riesgo y Vulnerabilidad, asociados a la capacidad de satisfacer la demanda de recursos hídricos (a nivel superficial y subterráneo), se usan como antecedentes modelos de gestión de recursos hídricos definidos por distintas iniciativas, incluyendo los modelos que están siendo desarrollados en el marco de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica impulsados por la Dirección General de Aguas y, que están siendo actualizados y mejorados por diferentes instituciones. En secciones siguientes se presenta más detalle la naturaleza de estos modelos. Las cuencas consideradas en el análisis son (de norte a sur): Copiapó, Limarí, Choapa, Petorca, La Ligua, Maipo y Maule. Las series de caudales se obtienen de manera directa al interior de los mismos modelos, aplicando módulos de modelación hidrológica. De esta manera, se corren los modelos directamente con series climáticas.





3

METODOLOGÍA

Este capítulo describe la metodología utilizada en cuantificar el Riesgo para los distintos usuarios que extraen recursos hídricos de las cuencas analizadas.

3.1 ALCANCES DE LA METODOLOGÍA CONSIDERADA

La gestión de los recursos hídricos, en parte importante del país, se basa en el uso de infraestructura (de regulación y conducción), que cumple con el objetivo principal de distribuir el agua espacial y temporalmente desde lugares y momentos donde hay exceso a lugares y momentos donde hay déficit. En la metodología considerada por este grupo de trabajo se ha puesto énfasis en la representación de estas situaciones a través de la simulación de la distribución de recursos hídricos en el tiempo y el espacio usando esta infraestructura. Esta es una situación relevante en parte importante del país, como se puede apreciar en la **Figura 1**,

en la que se presenta el ordenamiento espacial de cuatro elementos críticos en este sistema de distribución de recursos hídricos: obras de acumulación de agua (embalses), red de canales, plantas de producción de agua potable y centrales de generación hidroeléctrica.

Tomando en cuenta esta situación, este grupo de trabajo tiene algunas diferencias con las metodologías de otros grupos de trabajo. Una de las diferencias, por ejemplo, es que, espacialmente, pese a que el capítulo pretende cubrir algunas de las cuencas hidrográficas más relevantes del país en materia de uso de recursos hídricos, no cubre todo el territorio nacional, ya que depende de la existencia de modelos de gestión de recursos que no están disponibles para todo el país. Así también, la información que se requiere para realizar las simulaciones con estos modelos no corresponde exactamente a la que se genera desde otros sistemas (ej. grupo de trabajo de Hidrología).

Por otra parte, la metodología considera los sistemas de abastecimiento y distribución de recursos hídricos, sin abor-

dar el consumo. Por esta razón, las Amenazas se acotan a la posibilidad de operar estos sistemas. La Amenaza principal que se ha considerado tiene relación con cambios en la disponibilidad de estos recursos: reducción en caudal o baja en napa de aguas subterráneas. Estos sistemas pueden verse afectados por otras Amenazas, por ejemplo, eventos extremos (inundaciones, aluviones) que pueden alterar su funcionamiento. Un ejemplo en esta categoría corresponde a los eventos de alta turbidez que afectan la operación de las obras de captación de agua potable en varias ciudades del país. Esta es una Amenaza que no se aborda en este capítulo; es tratada en el capítulo de Hidrología, pero no a nivel de poder hacer un completo análisis de Sensibilidad, Vulnerabilidad y Riesgo.

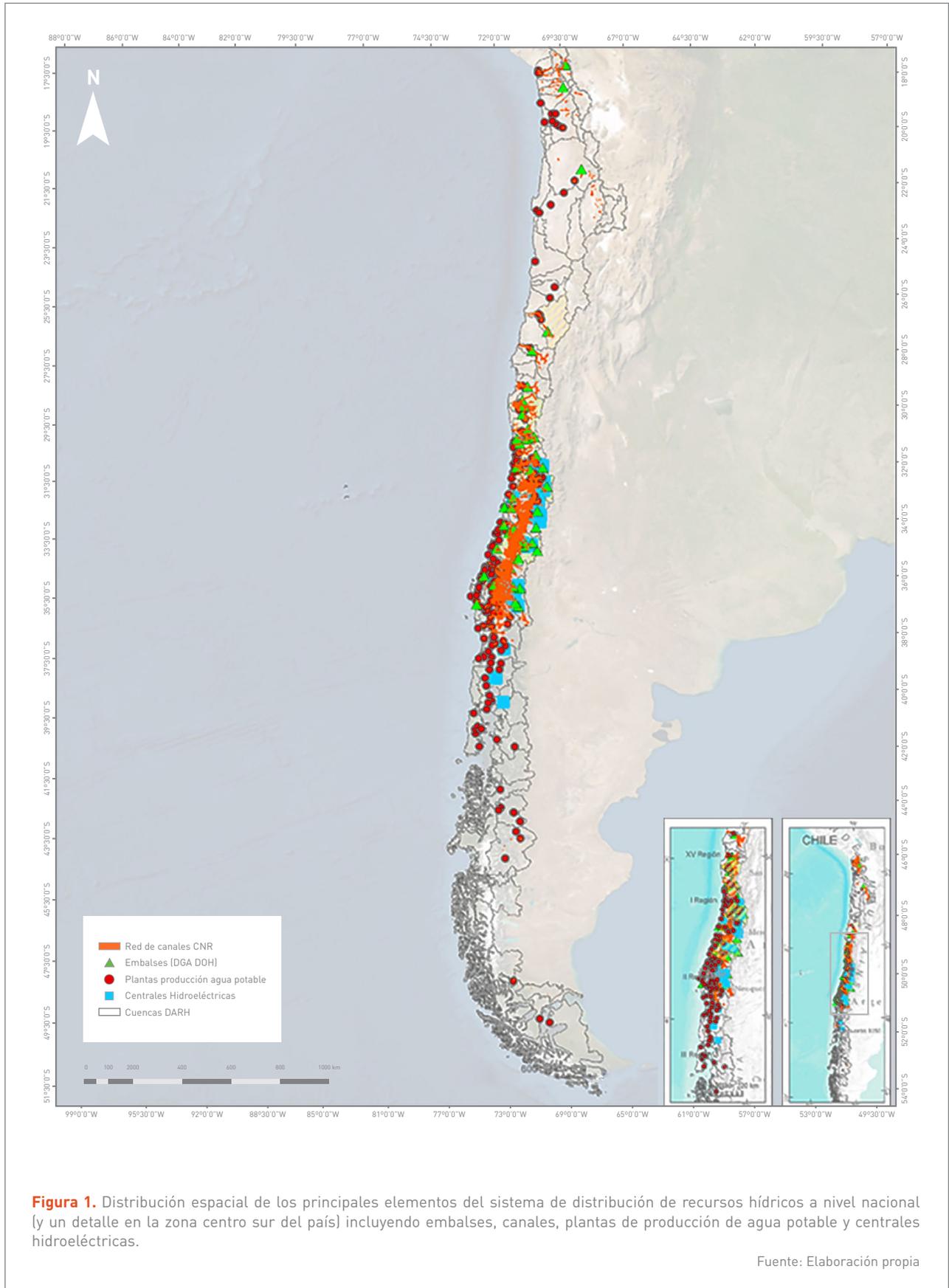
En el sistema de abastecimiento de recursos hídricos, la existencia de infraestructura de regulación o de extracción y conducción, que permita responder a los objetivos de estos sistemas, define -en parte- la capacidad adaptativa. Este tipo de capacidades (y sus diferencias entre distintas cuencas o regiones) queda representada en los análisis y cadenas de impactos. De manera complementaria, existen formas de gestión de estos sistemas que pueden influir en estas capacidades. La gestión de estos sistemas se ejerce por Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA) a distintas escalas (juntas de vigilancia, asociación de canalistas, comunidades de aguas, comunidades de aguas subterráneas). Distintos trabajos dan cuenta de las deficiencias o carencias en la gestión que ejercen estas OUAs (ej. Banco Mundial, 2011; Vicuña y Meza, 2012; DGA, 2018). Sin embargo, estas deficiencias no pueden ser incluidas en los alcances de este trabajo.

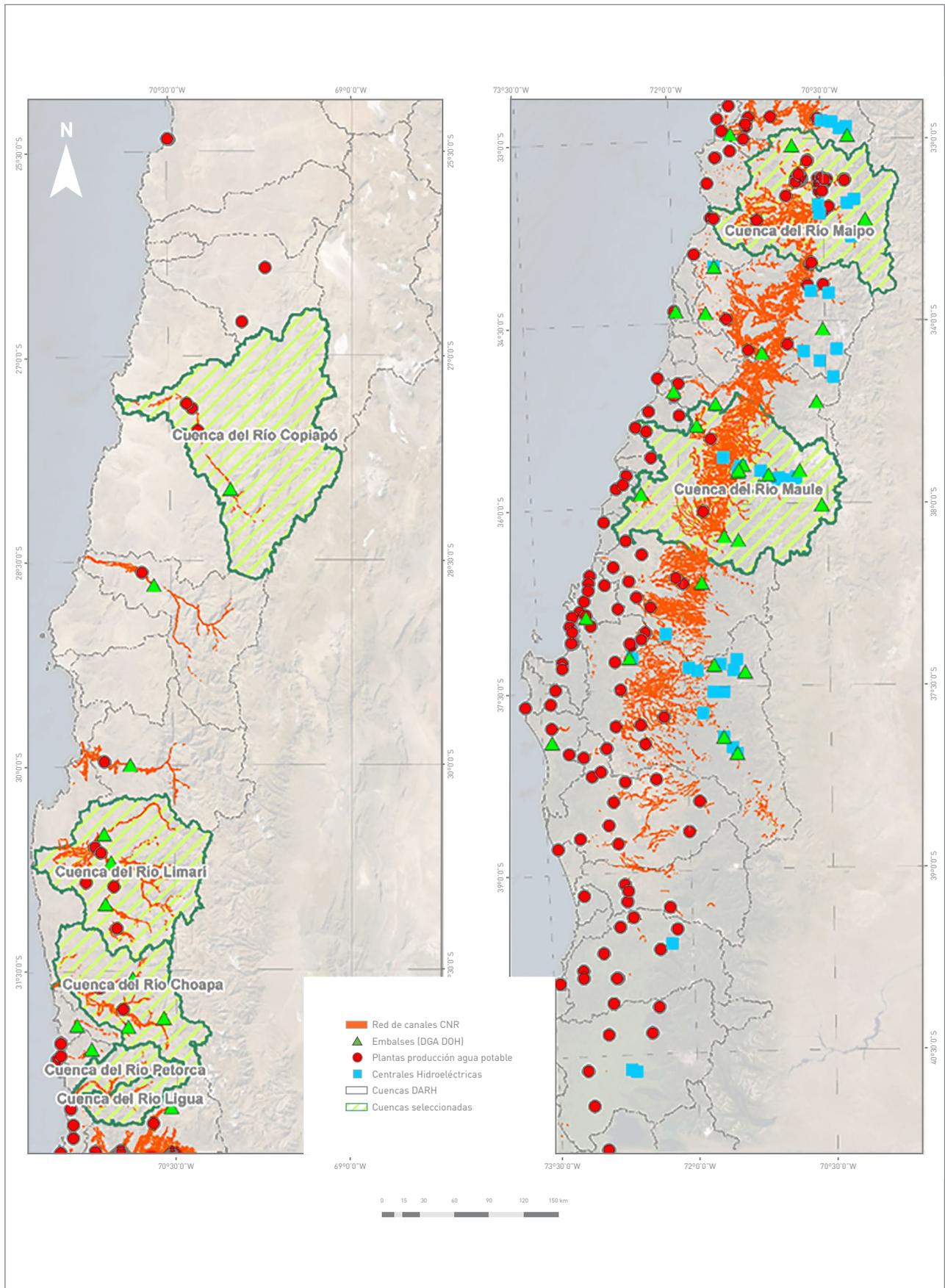
La metodología propuesta implica, en este sentido, una posible desconexión entre el impacto como consecuencia del ejercicio del derecho y el impacto por falta en la disponibilidad del recurso. Sin embargo, las OUAs, objeto principal de análisis de este grupo de trabajo, distribuyen en función de derechos de aprovechamiento de agua (DAA) y no de necesidades, y esa es la información que se maneja y con la cual se construyen los modelos de gestión que están disponibles para el análisis. Una excepción es la cuenca del Río Limarí, en la que la OUA recibe solicitudes de agua a partir de la cual opera el sistema de distribución.

Respecto del alcance espacial de la metodología, pese a que el capítulo pretende cubrir algunas de las cuencas hidrográficas más relevantes del país en materia de consumo de recursos hídricos (ver **Figura 1**), no cubre todo el territorio nacional, ya que -lamentablemente- no existen las herramientas disponibles para realizar el análisis en todo el país. Sin embargo, aunque la metodología es restringida en su alcance espacial, es profunda en cuanto a representar de la mejor manera posible los impactos del cambio climático en el abastecimiento de recursos hídricos, especialmente, en las zonas donde es más crítico este sistema de abastecimiento.

Por otra parte, la metodología utilizada es relevante para poder caracterizar la Vulnerabilidad posterior de otros sectores. Desde este punto de vista, la relación entre capítulos es complementaria y, una vez terminados los resultados, debiesen ayudar a mejorar las respuestas sistémicas. Algunas de las relaciones que se espera resulten de la interacción entre grupos de trabajo son las siguientes:

- **Grupo de trabajo Energía:** Cambios en los patrones de generación de energía hidroeléctrica. Con los resultados de este capítulo, se derivarán funciones que permitan cambiar los patrones de generación de hidroelectricidad, un factor clave en el análisis de Riesgos del sector Energía.
- **Grupo de trabajo Agricultura:** La disponibilidad de agua para riego es un factor muy relevante en la evaluación de Riesgos en el sector agrícola, especialmente, en las zonas del país de clima mediterráneo y semiárido. Por esto, resulta relevante para este grupo de trabajo la información sobre los cambios esperados en la disponibilidad de agua para riego en las cuencas en estudio.
- **Grupo de trabajo Ciudades y Asentamientos humanos:** En este capítulo se prepara la información clave para entender los Riesgos producto de falta de recursos hídricos en el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Santiago. Esperamos que esta información sea útil en esos capítulos, pero, lamentablemente, la información estará disponible sólo para una ciudad.







3.2 DEFINICIONES

Este apartado contiene las definiciones de los conceptos evaluados para determinar los niveles de Riesgo de este estudio en cada uno de sus componentes de base:

Exposición: Los elementos expuestos corresponden a los usuarios que extraen agua desde fuentes de aguas superficiales y subterráneas para distintos usos. Para realizar estas extracciones, estos usuarios poseen DAA y la infraestructura hidráulica requerida. En este sentido, los elementos expuestos consideran el sistema de distribución y uso de los recursos, como canales de conducción, centrales hidroeléctricas, acueductos de distribución de agua potable. También, en algunos casos, donde el uso de los recursos tiene una representación espacial adicional al medio de conducción, se presentarán las superficies donde son usados estos recursos (zonas de riego agrícola y zonas de distribución de agua potable urbana). Esta definición (a diferencia de otros grupos de trabajo) implica que no se incluye dentro de este análisis a aquellas zonas donde la presencia de esta infraestructura no es relevante. Por ejemplo, no incorpora actividades productivas que no requieran de una obra para suministrar el recurso hídrico (ej. agricultura de secano). Por otra parte, esta definición conlleva una mayor complejidad para el análisis a escala comunal, ya que la extracción y posterior distribución de recursos hídricos no ocurre necesariamente siguiendo las fronteras de esta división administrativa.

Amenaza: Corresponde a cambios en la disponibilidad de recursos para poder ejercer el uso de extracción. Dichos cambios se manifiestan en los componentes hidrometeorológicos, niveles piezométricos para el caso de aguas subterráneas y caudal en río en puntos de extracción de canales para distintos usos.

Vulnerabilidad: En el contexto de este grupo de trabajo, la Vulnerabilidad está asociada a la Sensibilidad climática del sistema y a la capacidad de ejercer la extracción deseada (limitada por DAA y capacidad de infraestructura) de recursos hídricos en cada punto de extracción. La Vulnerabilidad en cada período de tiempo corresponde a

la diferencia positiva entre el requisito de operación y el caudal realmente entregado, relativizando esta diferencia al dividir por el requisito (es decir, la Vulnerabilidad se mide como la diferencia porcentual positiva respecto del requisito). Para el análisis de todo un período (histórico o futuro) se considera la Vulnerabilidad extrema, equivalente al máximo de la serie de media móvil de seis meses de vulnerabilidades mensuales.

Riesgo: Corresponde a cambios en la Vulnerabilidad en los distintos objetos expuestos (sistemas de extracción de recursos hídricos). Esta Vulnerabilidad aumenta al existir una disminución en los caudales y niveles piezométricos, impidiendo que el uso del derecho pueda ser ejercido íntegramente. La unidad territorial de alcance de trabajo es a nivel de los distintos usuarios del sistema de captación y distribución de recursos hídricos en una cuenca.

3.3 FUENTES DE DATOS Y REFERENCIAS

Este grupo de trabajo empleó los modelos hidrológicos oficiales, existentes a raíz de distintos proyectos e instituciones. Estos modelos se encuentran en diferentes etapas de desarrollo, siendo algunos de ellos objeto de mejoras en el marco de los estudios para el desarrollo de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH, DGA). Sin perjuicio de lo anterior, se espera que estos resultados iniciales puedan ser actualizados en el marco del desarrollo de esos PEGH. Dentro esta primera etapa de desarrollo se está trabajando con las siguientes cuencas (se menciona la fuente de donde se obtuvo el o los modelos considerados para cada una de las cuencas):

1. Cuenca del Copiapó

DICTUC - DGA (2019) y Eridanus (2020).

2. Cuenca del Limarí

DICTUC - DGA (2019) y CCG - UC (2020).

3. Cuenca del Choapa

DICTUC - DGA (2019) y CCG - UC (2020)

4. Cuenca Ligua-Petorca

DICTUC - DGA (2019) y Ecohyd – UV (2020).

5. Cuenca del Maipo

CCG - UC (2020).

6. Cuenca del Maule

CCG - UC (2020).

Estos modelos cuentan con la capacidad de reproducir las condiciones hidrológicas en respuesta al clima de cada una de las cuencas, así como también de representar la infraestructura de distribución y/o uso del agua en cada cuenca. Por lo tanto, se ha optado por esta capacidad respecto de la obtención de caudales de manera directa desde los modelos, en vez de usar la base de datos hidrológicas obtenida con el modelo de simulación hidrológica Variable Infiltration Capacity (Liang, X., y Z. Xie, 2001), a partir del estudio “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (DGA, 2018).

Cada cuenca en estudio consta de un sistema modelado a partir del cual se identifica el nivel de Exposición o Sensibilidad del sistema, con el fin de determinar el Riesgo. El nivel de cobertura, detalle y desagregación de cada sistema está implementado de forma distinta y varía por cuenca. En este sentido, algunas cuencas no están modeladas en toda su extensión, como son el caso de la cuenca del río Maipo y del río Maule, las cuales se concentran en la representación de la hidrología de cordillera y la estructura de usos asociados a las primeras secciones de dichas cuencas.

En la **Tabla 1** se presenta una síntesis de las características de cada sistema modelado. En la sección de resultados se describen algunas características de estas cuencas en relación a su hidrología. Mayores detalles respecto de los modelos utilizados se entregan en el Anexo 9.1.

Cuenca	Atributos			
	Extensión	Usuarios	Infraestructura considerada	Aguas subterráneas
Copiapó	Completa	Agrícola, minero, agua potable e industrial.	Embalse: Lautaro. 34 canales de extracción y distribución. Pozos de extracción.	Considerado
Limarí	Completa	Agrícola, agua potable.	Embalses: Recoleta, Paloma, Cogotí. Red de siete canales principales.	No se considera
Choapa	Completa	Agrícola, minero, agua potable.	Embalse: El Bato. Canales: • Río Choapa: 31 • Río Illapel: 13 • Río Chalinga: 4 Pozos de extracción.	Considerada
Ligua-Petorca	Completa	Agrícola, minero, agua potable.	Usuarios de agua potable urbana: La Ligua, Cabildo, Petorca y Chincolco. Usuarios de agua potable rural: 56 Mineras: Cerro Negro, Las Cenizas y La Patagua. Pozos de extracción.	Considerada
Maipo	Parcial (1ª Sección río Maipo)	Agrícola, agua potable, hidroelectricidad.	Embalse: El Yeso. Planta de tratamiento de agua potable. Canales: relacionados a siete asociaciones de canalistas. Centrales hidroeléctricas: 9	No se considera
Maule	Parcial (Junta de Vigilancia río Maule)	Agrícola, hidroelectricidad.	Embalse: Laguna Maule, El Melado, Colbún, La Invernada. Canales: 32 (destacan Maule Norte Alto y Maule Norte Bajo, Canal Sur 1 a 3 y canal La Isla). Centrales hidroeléctricas: 9	No se considera

Tabla 1. Características de los sistemas de recursos hídricos representados en los modelos considerados.

Fuente: Elaboración propia.



3.4 MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE RECURSOS HÍDRICOS

El trabajo de análisis de Riesgo y Vulnerabilidad en este sector se basa en el uso de herramientas computacionales, que sirven para hacer una modelación de las condiciones físicas y de gestión asociadas al ciclo hidrológico en cuencas del país. Esta modelación se realiza en los softwares WEAP y MODFLOW. El modelo WEAP es una herramienta de modelación hidrológica a nivel de cuenca, desarrollada por SEI (Stockholm Environmental Institute), la cual calcula el balance de masa entre los distintos elementos presentes en la cuenca, utilizando una arquitectura nodo - enlace (Yates *et al.*, 2005). Esta herramienta permite simular diferentes escenarios climáticos y políticos, bajo los cuales se desee evaluar la gestión de la cuenca, por medio de una interfaz amigable al usuario. Este modelo requiere series climáticas de entrada, tanto de precipitaciones como de temperatura, para extrapolar y distribuir las sobre las subcuencas. Las series fluviométricas de caudales en las subcuencas de cabecera son obtenidas usando la misma herramienta de simulación WEAP.

MODFLOW (Harbaugh *et al.*, 2000) consiste en una herramienta numérica que simula el flujo subterráneo tridimensional en una cuenca bajo régimen permanente o transiente y toma en consideración las propiedades hidrogeológicas del acuífero.

3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS DESARROLLADOS

A continuación, se describe la manera en que se desarrollaron los distintos análisis, tomando como base los resultados de los modelos hidrológicos y de gestión de recursos hídricos.

Análisis de Amenaza: Como caracterización de la Amenaza se analizan las series de caudales que reflejan la

disponibilidad de recursos hídricos en cada cuenca para el período histórico, comparando con las condiciones de los escenarios futuros. Donde corresponde, también se entregan resultados respecto de caudales en otras partes de la cuenca, para representar Amenazas en términos de condiciones ambientales (caudal de dilución o caudal en desembocadura) y, también donde corresponda, se entregan resultados en términos de cambios en niveles piezométricos.

Análisis de Sensibilidad: Se presentan los resultados del modelo operacional para cada cuenca. Los resultados entregados son específicos a cada objeto de Exposición representado en los modelos, como representativos de distintos usuarios de recursos hídricos.

Los objetos de Exposición considerados en cada caso son los siguientes:

- > **Centrales hidroeléctricas (objeto de Exposición 1):** Se determina el caudal de ingreso a las centrales hidroeléctricas y el caudal utilizado para acumular agua en embalses de generación eléctrica. Estos indicadores reflejan el ejercicio de derechos, incluida la posibilidad de acumular agua en embalses. Existen centrales de generación en dos de las cuencas consideradas, pero este es un aspecto especialmente relevante en la cuenca del río Maule.
- > **Áreas de Riego (objeto de Exposición 2):** Se determina la suma de caudales que abastecen la zona de riego de una asociación de canalistas. Este es un indicador del ejercicio del derecho. En algunos casos (ej. Maipo y Limarí, aguas arriba de embalse), este ejercicio corresponde a la proporción de agua pasando en el punto de extracción hasta un valor máximo determinado por el derecho o la capacidad de porteo. En otros casos (Limarí, aguas abajo de embalses), el ejercicio del derecho corresponde a la asignación de agua almacenada en embalses. Y, finalmente, existen casos intermedios (Maule), donde el indicador corresponde a la extracción proporcional de agua desde el río, pero tomando en cuenta convenios de operación entre los sectores agrícola e hidroeléctrico, que regulan la cantidad de

agua que puede ser almacenada y extraída desde embalses. En algunas cuencas (Copiapó, Choapa, Ligua y Petorca), los modelos desarrollados consideran el aporte de aguas superficiales y subterráneas permitiendo analizar una Sensibilidad.

- > **Sectores de distribución de agua potable en Santiago (objeto de Exposición 3):** Se determina la suma de caudales que llegan a planta de tratamiento que abastece sector distribución de la zona sur de la ciudad de Santiago (zona abastecida por los recursos del río Maipo). Estos recursos consideran extracción de DAA desde el río más la posibilidad de usar agua acumulada en embalse El Yeso, siendo similar a la situación del Maule para agricultores.

Para cada uno de estos sistemas, se define un requerimiento de operación a partir de la modelación del período histórico, con información climatológica proveniente de estaciones DGA (DGA, 2020). Este requerimiento de operación tiene un valor mensual y corresponde al promedio de la serie de valores mensuales registrados en la operación histórica.

Tomando en cuenta este requisito de operación, la Vulnerabilidad se evalúa con las siguientes métricas:

- > **Desempeño:** Para cada período de tiempo, se compara el caudal extraído (desde el río y/o acuífero) con el requisito de operación.
- > **Vulnerabilidad:** En cada período de tiempo, corresponde a la diferencia positiva entre el requisito de operación y el caudal realmente entregado, relativizando esta diferencia al dividir por el requisito (es decir, la Vulnerabilidad se mide como la diferencia porcentual positiva respecto del requisito). Para el análisis de todo un período (histórico o futuro) se consideran dos indicadores agregados: una **Vulnerabilidad media**, equivalente al promedio de las vulnerabilidades estimadas; y una **Vulnerabilidad extrema**, equivalente al máximo de la serie de media móvil de seis meses de vulnerabilidades mensuales.

Para caracterizar el efecto asociado al uso de aguas subterráneas como una medida de adaptación no planificada a posibles reducciones en la disponibilidad de agua superficial, se reporta también el cambio en los niveles de aguas subterráneas.

Análisis de Riesgo: El impacto del cambio climático se mide al comparar, para cada escenario climático, cambios en la Vulnerabilidad extrema asociada a cada escenario y objeto de Exposición.

3.6 GENERACIÓN DE SISTEMA SIG CON LOS MAPAS DE RIESGO

Los resultados obtenidos para cada objeto de Exposición se utilizan en una base de datos espacial SIG, que contiene la caracterización de la Sensibilidad con el clima en su condición histórica y el cambio para los escenarios futuros (para los modelos seleccionados).

Los elementos que serán representados en estas capas SIG corresponden a los siguientes objetos de Exposición:

- > **Objeto de Exposición 1 (OE1):** Centrales hidroeléctricas representados por un icono (ej. círculo) en el mapa.
- > **Objeto de Exposición 2 (OE2):** Áreas regadas por asociaciones de canalistas representados por un polígono en el mapa.
- > **Objeto de Exposición 3 (OE3):** Sectores de distribución de agua potable en Santiago representados por un polígono en el mapa.



4 RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN A LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN CADA CUENCA PARA LOS PERÍODOS HISTÓRICO Y FUTURO

A continuación, los resultados separados para cada una de las cuencas analizadas, de acuerdo con lo explicado en la sección 3.5. Para cada cuenca, en una primera parte, se presenta una breve introducción de las características esenciales de la cuenca y de la operación para el período histórico, incluyendo los indicadores de Sensibilidad. El período histórico es el comprendido entre 1980 y 2009, en el que los modelos de gestión de recursos hídricos han sido calibrados. Respecto al clima histórico, se consideró la estadística obtenida a partir de registros oficiales de la Dirección General de Aguas (DGA, 2020). Para caracterizar la operación en período histórico se consideran resultados de series de caudal (en distintos tramos de río y de extracción) promedio anual e hidrograma promedio, el cual consiste en la representación gráfica de una variable hidrológica en el tiempo. La descripción introductoria de cada cuenca incluye un análisis de los indicadores de Vul-

nerabilidad en el período histórico, explicándose la manera en que se caracteriza el requerimiento de operación.

Posteriormente, se presentan los cambios en la Vulnerabilidad para los escenarios climáticos futuros, los cuales consideran el período entre 2035 y 2064. Para el análisis de período futuro, se comparan los indicadores de Vulnerabilidad, tomando en cuenta las series climáticas completas (períodos de control y futuro) de los seis modelos de circulación general presentados en la parte introductoria. Complementando los análisis de estos indicadores, para cada uno de los tipos de usuarios se incluyen, para algunas cuencas, el análisis respecto de los cambios en el caudal de base en tramos de río, emulando el impacto que podría existir en términos de caudal de dilución de carga de contaminantes y caudal para sostener ecosistemas críticos, con especial énfasis en la zona de desembocadura de ríos. Se escoge el caudal mensual que se supera en un 85% de los meses como el caudal representativo de este rol ecosistémico.

En los casos donde el uso de aguas subterráneas es importante, se incluyen resultados relacionados con cambios en el uso de estos recursos. Para ello, se calcula la variación



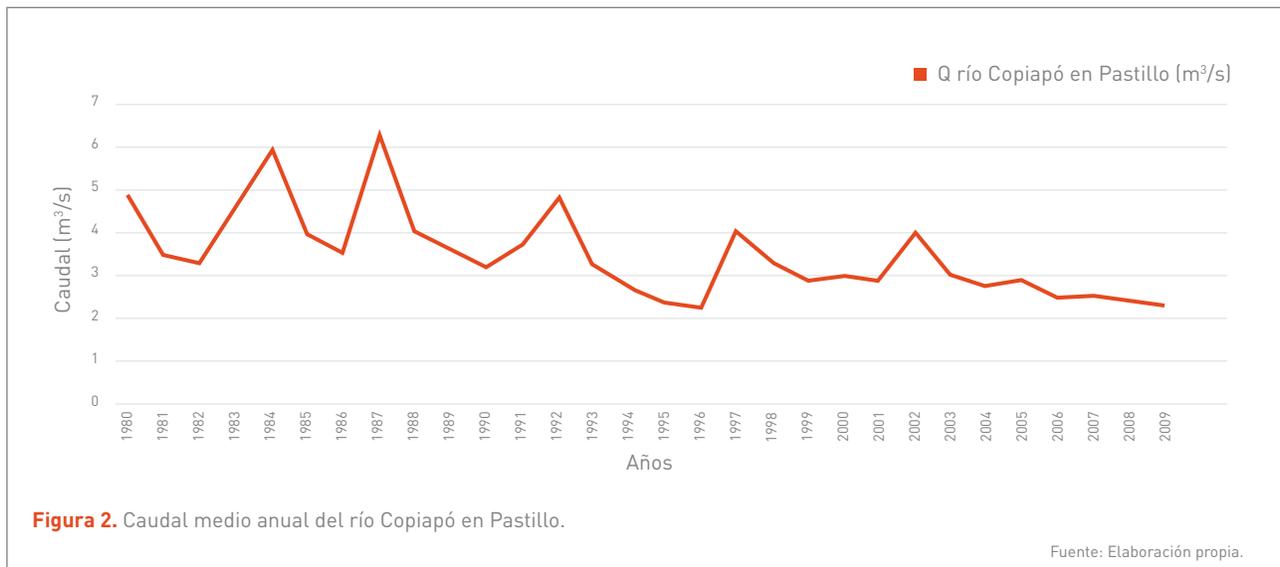
relativa entre los descensos del nivel piezométrico registrados en el futuro, menos los registrados en el período de control, sobre el descenso en el período control. El análisis se realiza en puntos que representan la ubicación de pozos en las cuencas, para posteriormente presentar un mapa con el promedio de los escenarios de los seis GCM modelados. Una variación positiva indica que, en los escenarios futuros, el descenso registrado es mayor que en el período histórico, lo cual se traduce en una mayor extracción del recurso subterráneo en la zona. Por el contrario, una variación negativa indicaría una reducción de los descensos en el futuro, por ende, un aumento del nivel piezométrico en dicha zona.

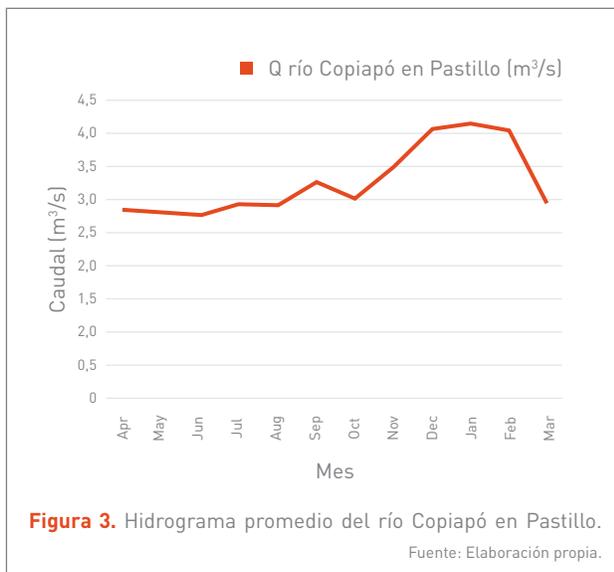
4.2 CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ

4.2.1 INTRODUCCIÓN Y VULNERABILIDAD HISTÓRICA

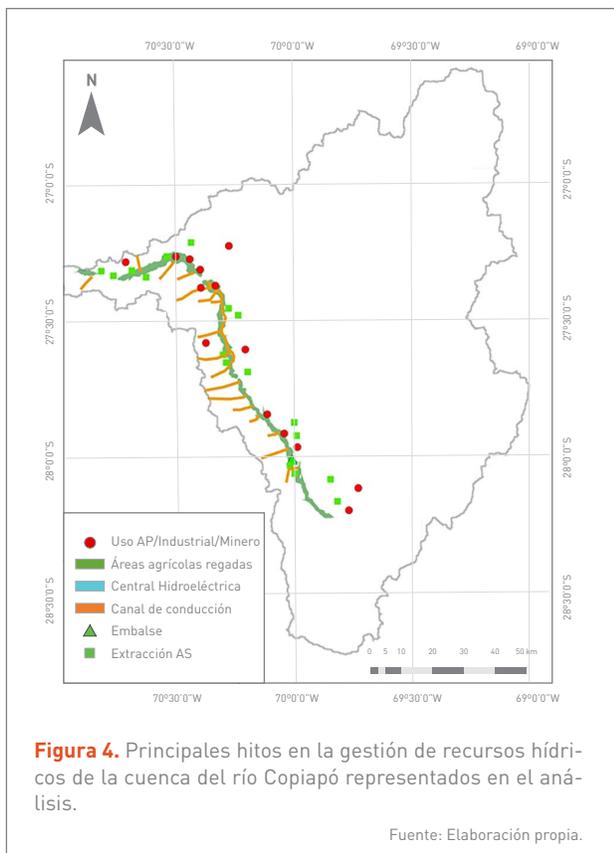
La cuenca del río Copiapó se ubica en la Región de Atacama, limitando al norte y al sur con las cuencas del río Salado y río Huasco, respectivamente; al oeste con el océano Pacífico y al oriente con la República Argentina. Su área es de 18.540 km², aproximadamente, la que cubre parte importante de las comunas de Tierra Amarilla y Co-

piapó, y una parte de la comuna de Caldera en el sector de desembocadura. Los principales centros poblados en la cuenca son la ciudad de Copiapó y los asentamientos de Tierra Amarilla y Los Loros. Las principales actividades son la agricultura de uvas y hortalizas, y la minería del cobre, hierro, oro y plata. El clima en la cuenca es de tipo semiárido, con una temperatura media anual de 15,2 °C en la estación meteorológica de Copiapó, y temperaturas medias mensuales entre los 11 °C y 20 °C. La precipitación media anual en la cuenca es de, aproximadamente, 30 mm, siendo su comportamiento muy variado en el tiempo, con una alternancia de épocas de sequía relativamente prolongadas y años más lluviosos. El régimen de escurrimiento del río Copiapó es de tipo mixto, con caudales medios mensuales en la estación río Copiapó en La Puerta de entre 1,49 y 1,82 m³/s (DICTUC, 2010). Los principales afluentes del río Copiapó corresponden a los ríos Manflas, Jorquera y Pulido, siendo la intersección de estos dos últimos ("La Junta") a 1.230 msnm el origen del río Copiapó, el que se extiende por 162 km hasta el mar. Existen también quebradas laterales que se activan en épocas lluviosas, siendo quebrada de Paipote la principal. La cuenca cuenta con el embalse Lautaro, el cual tiene un área superficial de 1,3 km² y una capacidad de 26 millones de m³. Este régimen de caudales superficiales queda de manifiesto en la estación río Copiapó en Pastillo (**Figura 2** y **Figura 3**), en donde se puede apreciar una disminución importante en los caudales.



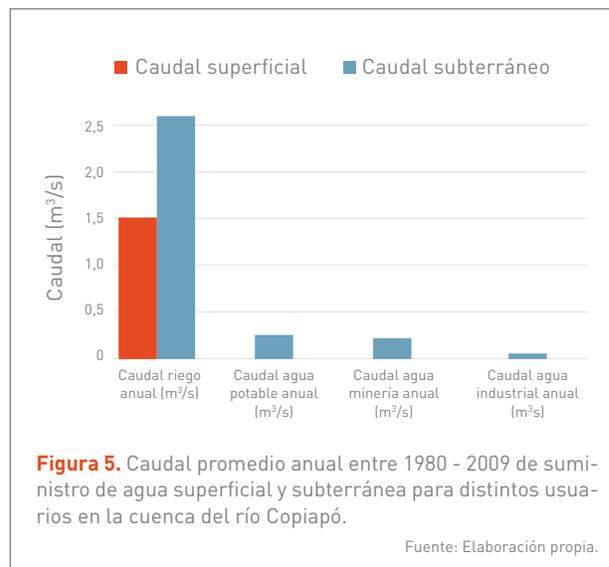


En esta cuenca coexisten cuatro usuarios principales: la agricultura de riego y el suministro de agua potable, principalmente, para la ciudad de Copiapó, y las actividades minera e industrial. La **Figura 4** muestra los principales hitos asociados a la gestión de los recursos hídricos en la



cuenca del Copiapó que son representados en el modelo analizado. Con el fin de evaluar la disponibilidad hídrica presente y futura de manera agregada, las zonas de riego se agruparon en tres sectores, los cuales corresponden a los regantes aguas arriba del embalse Lautaro: el sector 1 abarca la Junta-Lautaro, los ríos Manflas, Pulido y Jorquera; el sector 2 se extiende entre el embalse Lautaro hasta Copiapó y comprende las zonas de riego de Lautaro-Capilla hasta Cerrillos-Mal Paso; el sector 3 abarca desde la zona de riego de Copiapó hasta Angostura y comprende las zonas de regantes entre Mal Paso-Palermo hasta Angostura.

En el Anexo 9.2.1.1 se presentan los caudales de agua que son utilizados por los distintos usuarios en la cuenca, tomando, en todos los casos, la suma de los aportes de aguas superficiales y subterráneas. La diferencia en el aporte relativo entre ambas fuentes se puede apreciar en la **Figura 5**, donde la variabilidad en el suministro de agua es más evidente en el caso de la operación de sistemas de riego que en el caso de sistemas de agua potable, industrial y minero. Esto se refleja en los niveles de Vulnerabilidad del suministro para los distintos usuarios, tal como se presenta en la **Tabla 2**. El requerimiento de operación para evaluar los cálculos de desempeño se consideró como el caudal de demanda promedio mensual del período histórico.





Tipo de usuario	Usuario	Déficit medio (m ³ /s)	Vulnerabilidad máxima (%)
Agricultura	Junta-Lautaro	0,02	87%
	Jorquera	0,02	64%
	Pulido	0,02	87%
	Manflas	0,01	67%
	Lautaro - Capilla	0,09	84%
	Capilla - San Antonio	0,02	86%
	San Antonio - La Puerta	0,03	87%
	La Puerta - La Turbina	0,00	87%
	La Turbina - El Yeso	0,04	87%
	El Yeso - C. Negras	0,04	87%
	C. Negras - Pabellón	0,01	87%
	Pabellón - Cerrillos	0,05	87%
	Cerrillos - Mal Paso	0,06	87%
	Mal Paso - Palermo	0,01	60%
	Palermo - La Florida	0,03	59%
	La Florida - Copiapó	0,10	58%
	Copiapó - Chamonate	0,07	74%
	Chamonate - Colgada	0,06	59%
	Colgada - Valle Fértil	0,07	59%
Valle Fértil - Angostura	0,02	61%	
Agua potable	S02A_AP	0,00	0%
	S03B_AP	0,00	0%
	S04A_AP	0,00	0%
	S05A_AP	0,00	0%
	S06A_AP	0,01	0%
Minería	S01B_Minero	0,00	0%
	S01C_Minero	0,00	0%
	S02A_Minero	0,02	0%
	S03B_Minero	0,00	0%
	S04A_Minero	0,00	0%
	S05A_Minero	0,00	0%
Industria	S02A_Industriales	0,00	0%
	S05A_Industriales	0,00	0%

Tabla 2. Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Copiapó en período histórico (1980 - 2009).

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 VULNERABILIDAD Y RIESGOS FUTUROS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la cuenca en términos de variaciones en caudales de agua en el río Copiapó (en Pastillo) y los caudales de agua que son utilizados por los distintos usuarios. Respecto de los distintos usuarios, se muestran los cambios en el índice de Vulnerabilidad, cuyo cálculo se explica en la sección 3.5. Este índice se calcula a partir de las simulaciones de los modelos hidrológicos, utilizando las series climáticas de los seis GCM mencionados en la sección 2.2. Los resultados son presentados en función de la variación relativa

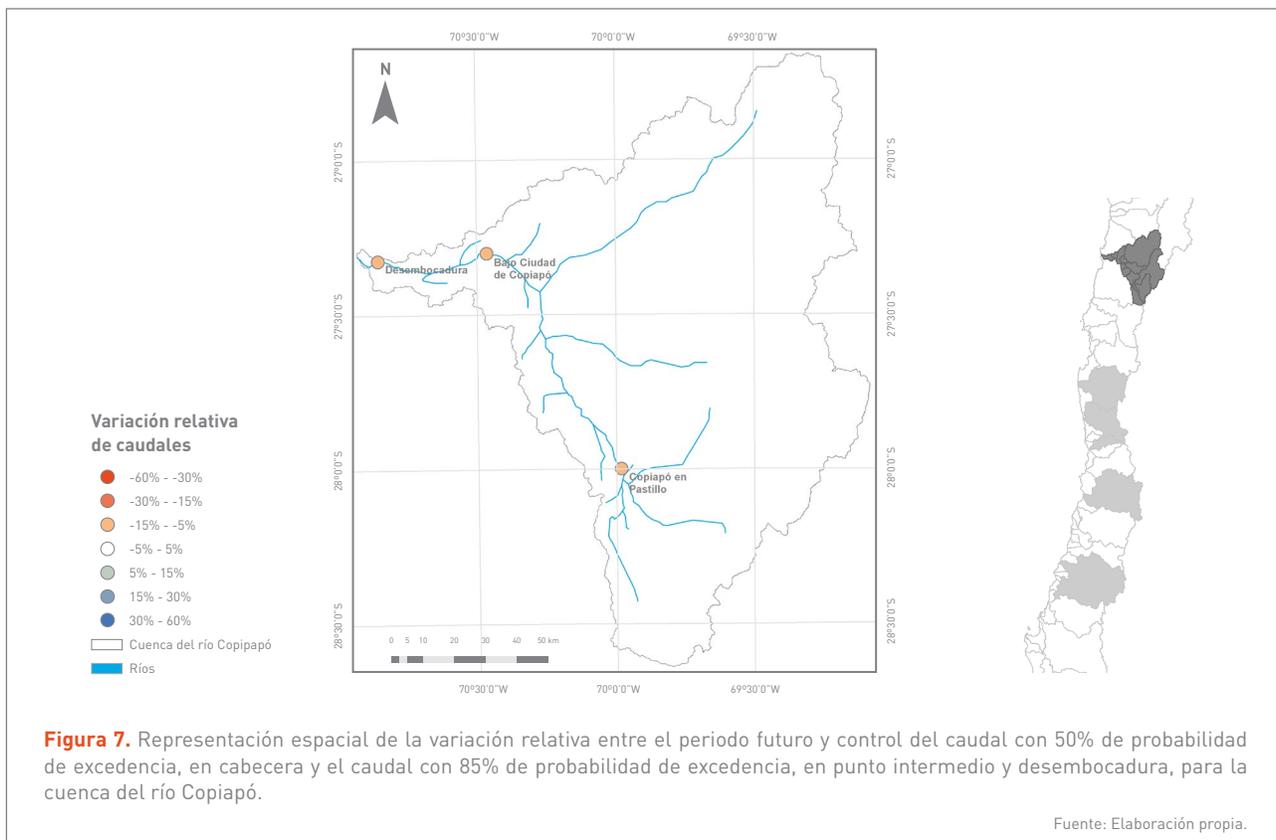
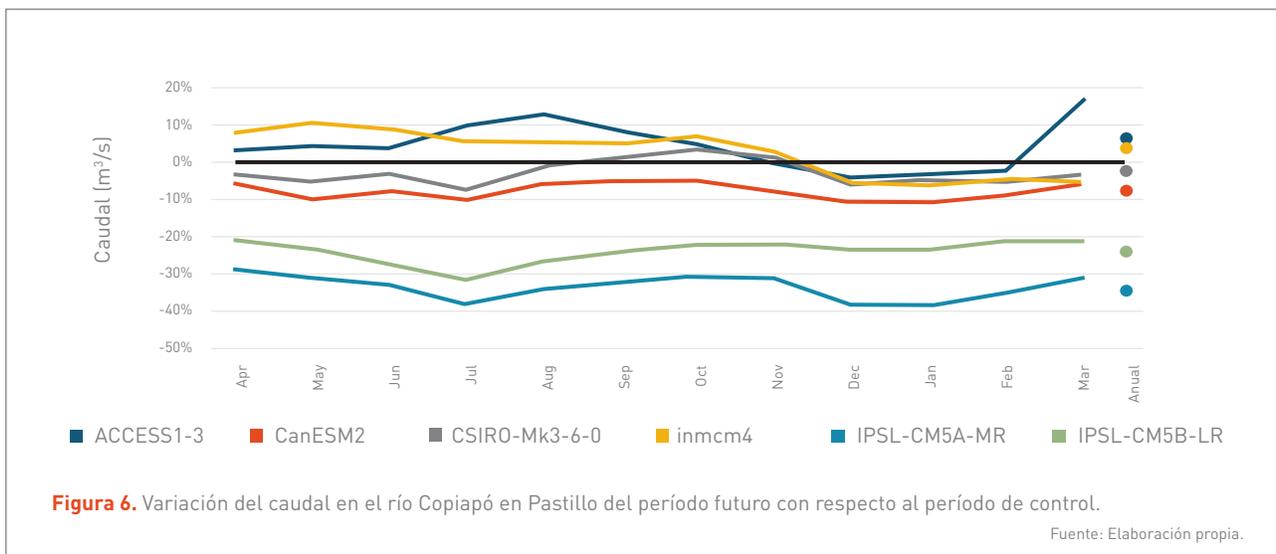
del clima futuro (2035 - 2064) con respecto al período de control (1980 - 2009).

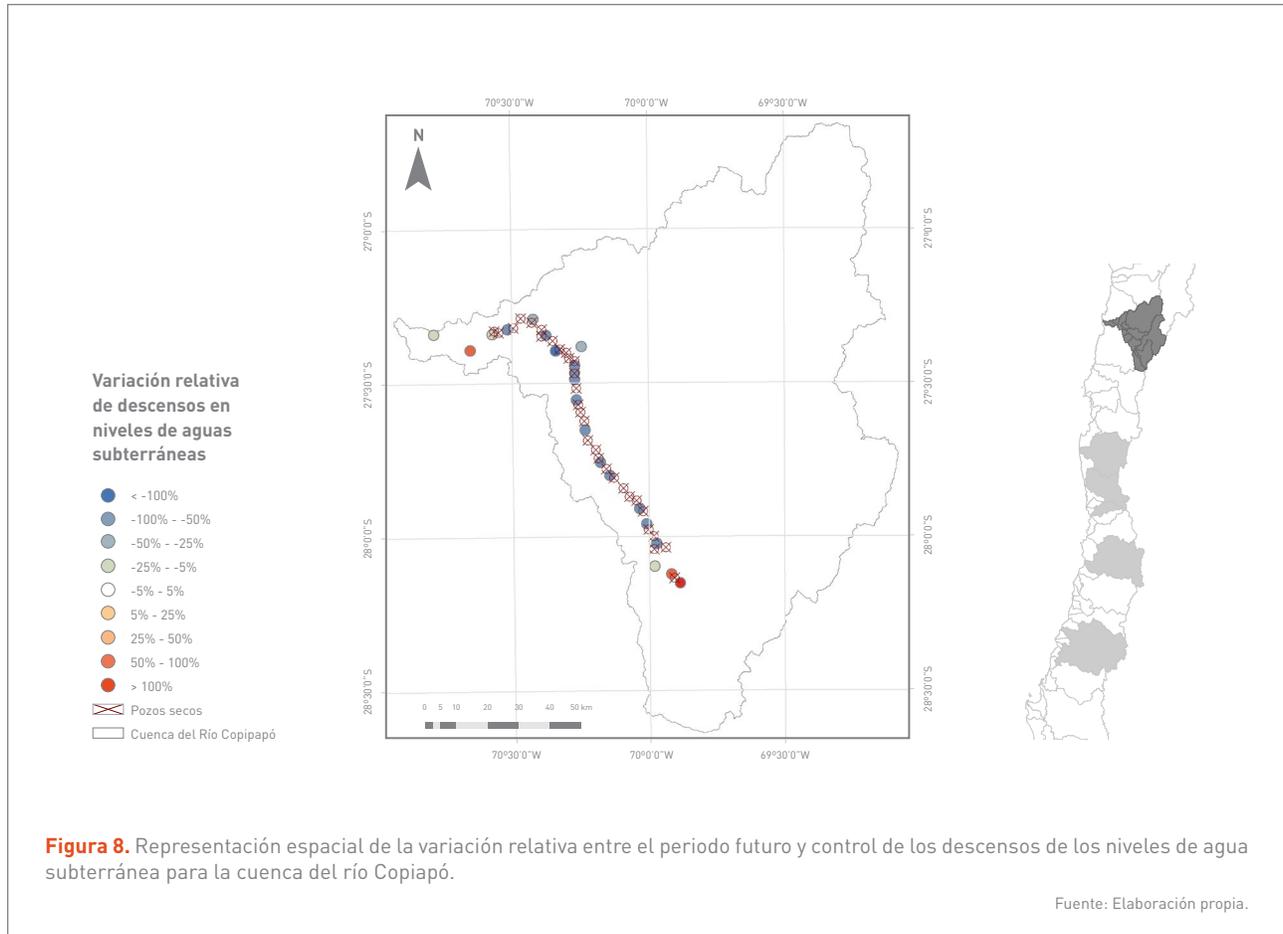
Variación de caudales y niveles de aguas subterráneas

La variación de la disponibilidad del caudal en la cuenca del río Copiapó se presenta en la **Figura 6**. En esta, se aprecia una reducción en el caudal anual en cuatro de los seis escenarios climáticos. En el escenario climático más extremo se presenta una reducción del orden de 35% en el caudal anual. A nivel mensual, los cambios son variables, pero similares en magnitud a los cambios anuales.

Asimismo, se obtiene la variación relativa de caudales de la serie futura (2035 – 2064) en comparación con la serie histórica (1980 – 2009) de cada escenario de los GCM. Se evalúa el caudal con 50% de probabilidad de excedencia en Copiapó, en Pastillo, y el caudal con probabilidad de excedencia del 85% para dos puntos del río en la cuenca, aguas abajo de la ciudad de Copiapó y en la desemboca-

dura. Esto, con la finalidad de evaluar la variación de la disponibilidad hídrica (en el caso de Copiapó, en Pastillo) y el caudal de dilución y ambiental en la cuenca (los dos puntos a nivel intermedio y de desembocadura en la cuenca). En la **Figura 7** se muestra el promedio de los seis GCM utilizados, evidenciando una reducción en estos caudales del orden de 5% a 15%.





Se presenta también, el mapa con la variación relativa de los descensos de niveles piezométricos, entre el período futuro y de control de los GCM: los valores en rojo (azul) indican que en los escenarios futuros el descenso registrado es mayor (menor) que en el período histórico. Los descensos se evaluaron en la ubicación de pozos representativos de la cuenca del río Copiapó. La **Figura 8** indica que existen pozos que no extraen mucha agua en el futuro con respecto al período de control. Esto, puede deberse a que también existen gran cantidad de pozos a lo largo de la zona de estudio, que quedan colgados (pozos secos), pues se registró que, en esa zona, en algunos casos, ya no es posible extraer más recurso hídrico subterráneo.

Vulnerabilidad

Los cambios en la Vulnerabilidad extrema de los caudales utilizados (considerando abastecimiento de aguas super-

ficiales y subterráneas) por los distintos usuarios en la cuenca se presentan en forma de diagramas de caja en el Anexo 9.2.1.2. Los valores corresponden a la variación porcentual relativa de cada modelo climático para el período futuro respecto del período de control. En este sentido, una variación positiva en la Vulnerabilidad corresponde a un aumento del déficit promedio de abastecimiento, lo cual representa una situación desfavorable en términos de disponibilidad hídrica. Se entrega un resumen de la variación de la Vulnerabilidad para los distintos usuarios del río Copiapó en la **Tabla 3** y **Tabla 4**, considerando sólo fuentes de agua superficial y ambas fuentes de agua, respectivamente. Los cambios en Vulnerabilidad afectan, principalmente, a los usuarios de recursos hídricos para riego, quienes -en general- aumentan su Vulnerabilidad. Así también, el acceso a agua subterránea reduce el impacto en las vulnerabilidades.



Tipo de usuario	Usuario	Variación Vulnerabilidad máxima					
		ACCESS1-0	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Riego aguas arriba embalse	Junta-Lautaro	-17%	8%	4%	15%	9%	7%
	Jorquera	0%	10%	4%	16%	13%	8%
	Pulido	16%	10%	4%	17%	18%	8%
	Manflas	53%	8%	11%	16%	1%	7%
Riego aguas arriba y Copiapó	Lautaro - Capilla	15%	9%	-24%	-2%	32%	7%
	Capilla - San Antonio	17%	10%	-9%	5%	36%	8%
	San Antonio - La Puerta	15%	8%	-24%	-2%	32%	7%
	La Puerta - La Turbina	19%	10%	-15%	1%	33%	9%
	La Turbina - El Yeso	45%	37%	28%	36%	55%	38%
	El Yeso - C. Negras	16%	9%	-6%	6%	36%	7%
	C. Negras - Pabellón	0%	0%	9%	9%	9%	0%
	Pabellón - Cerrillos	0%	0%	7%	7%	7%	0%
	Cerrillos - Mal Paso	0%	0%	6%	6%	6%	0%
Riego entre Copiapó y Angostura	Mal Paso - Palermo	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Palermo - La Florida	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	La Florida - Copiapó	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Copiapó - Chamonate	0%	0%	0%	74%	0%	0%
	Chamonate - Colgada	0%	0%	0%	59%	0%	0%
	Colgada - Valle Fértil	0%	0%	0%	59%	0%	0%
	Valle Fértil - Angostura	0%	0%	0%	61%	0%	0%
Agua potable entre embalse y Copiapó	S02A_AP	3%	0%	0%	0%	17%	0%
	S03B_AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Agua potable entre Copiapó y Angostura	S04A_AP	1%	0%	0%	0%	0%	0%
	S05A_AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S06A_AP	0%	-3%	-2%	-3%	0%	0%
Minería aguas arriba de embalse	S01B_Minero	7%	-2%	0%	-2%	17%	-2%
	S01C_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S02A_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Minería entre embalse y Copiapó	S03B_Minero	1%	-5%	0%	0%	0%	-5%
	S04A_Minero	1%	-2%	0%	0%	0%	-7%
	S05A_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Industria entre embalse y Copiapó	S02A_Industriales	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Industria en Copiapó	S05A_Industriales	-4%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 3. Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos por distintos usuarios en la cuenca del río Copiapó (sólo considera aguas superficiales).

Fuente: Elaboración propia.



Tipo de usuario	Usuario	Variación Vulnerabilidad máxima					
		ACCESS1-0	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Riego aguas arriba embalse	Junta-Lautaro	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Jorquera	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Pulido	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Manflas	63%	8%	11%	16%	0%	7%
Riego aguas arriba y Copiapó	Lautaro - Capilla	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Capilla - San Antonio	18%	10%	3%	17%	30%	8%
	San Antonio - La Puerta	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	La Puerta - La Turbina	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	La Turbina - El Yeso	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	El Yeso - C. Negras	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	C. Negras - Pabellón	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Pabellón - Cerrillos	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Cerrillos - Mal Paso	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Riego entre Copiapó y Angostura	Mal Paso - Palermo	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Palermo - La Florida	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	La Florida - Copiapó	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Copiapó - Chamonate	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Chamonate - Colgada	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Colgada - Valle Fértil	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Valle Fértil - Angostura	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Agua potable entre embalse y Copiapó	S02A_AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S03B_AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Agua potable entre Copiapó y Angostura	S04A_AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S05A_AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S06A_AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Minería aguas arriba de embalse	S01B_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S01C_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S02A_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Minería entre embalse y Copiapó	S03B_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S04A_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	S05A_Minero	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Industria entre embalse y Copiapó	S02A_Industriales	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Industria en Copiapó	S05A_Industriales	0%	0%	0%	0%	0%	0%

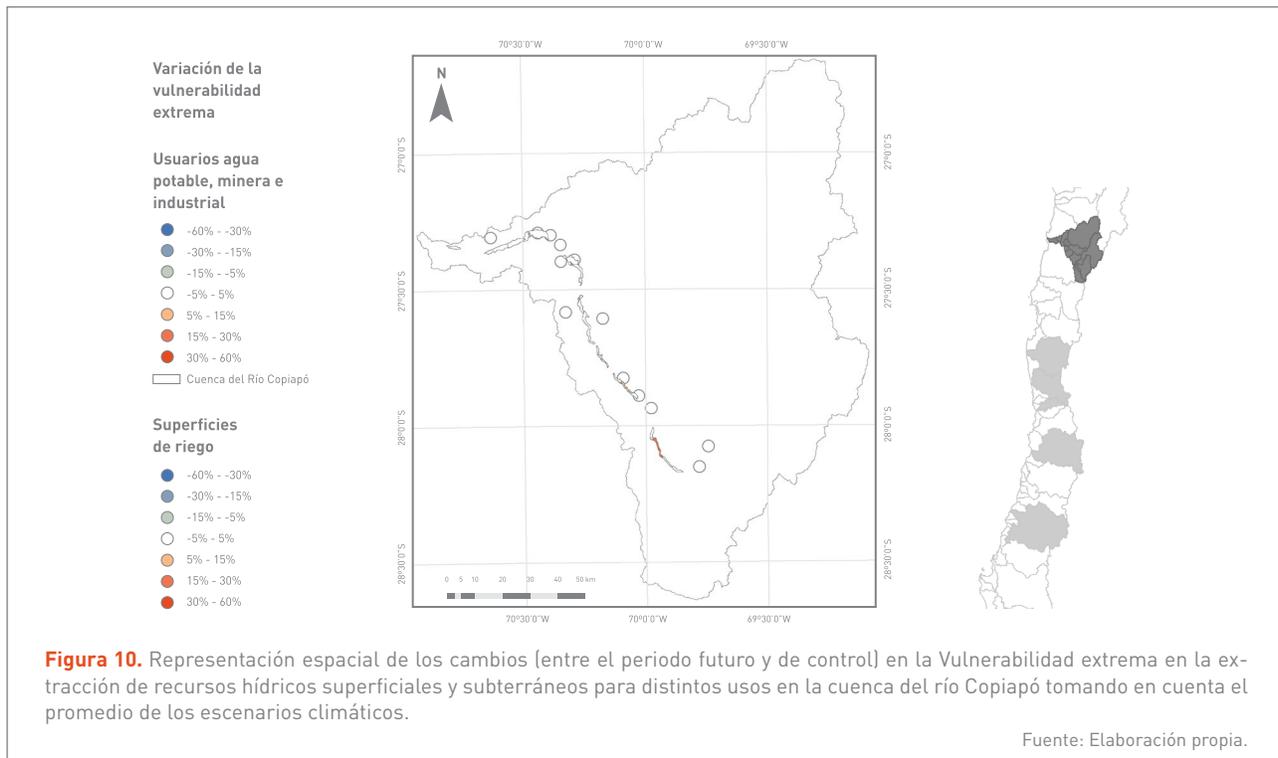
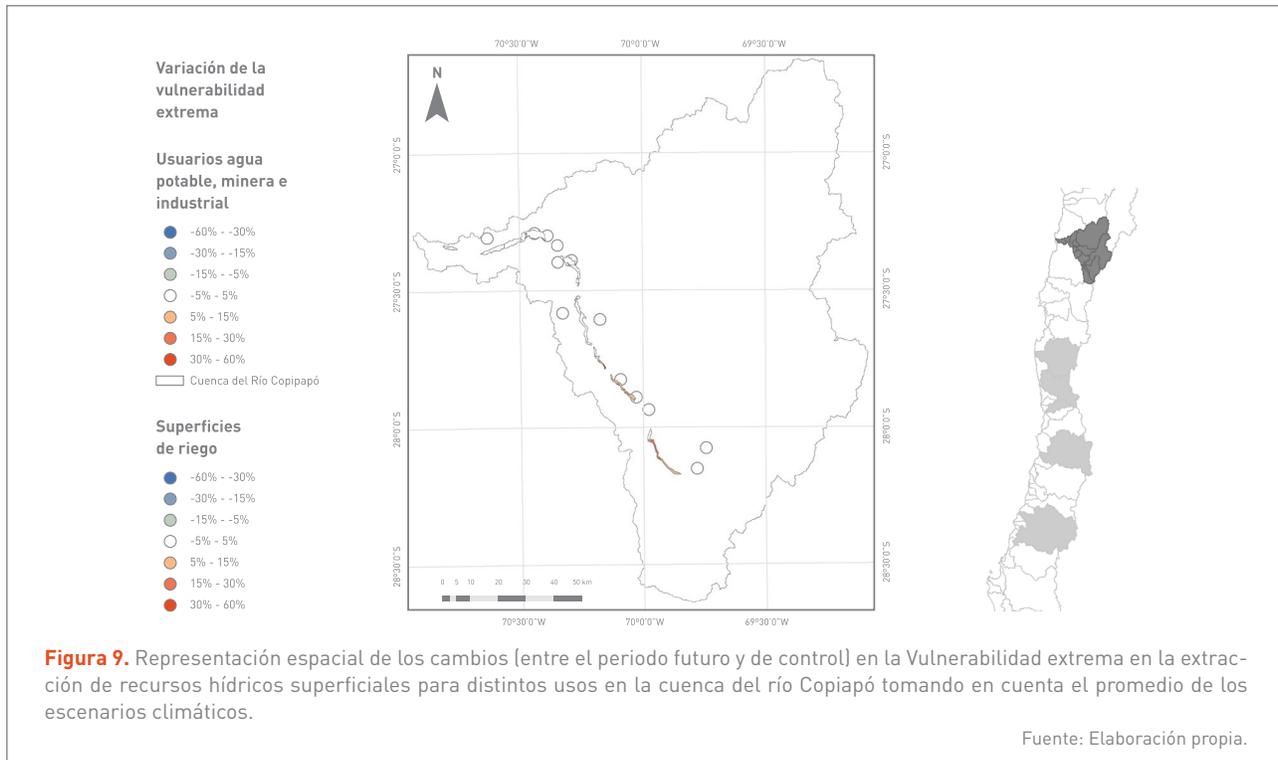
Tabla 4. Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos por distintos usuarios en la cuenca del río Copiapó (considera aguas superficiales y subterráneas).

Fuente: Elaboración propia.

Mapas de Riesgos

En esta sección se muestran los mapas de Riesgos asociados a la variación de la Vulnerabilidad extrema en los

caudales disponibles para riego y agua potable de la cuenca del río Copiapó. Los resultados se muestran en la **Figura 9** y la **Figura 10**.





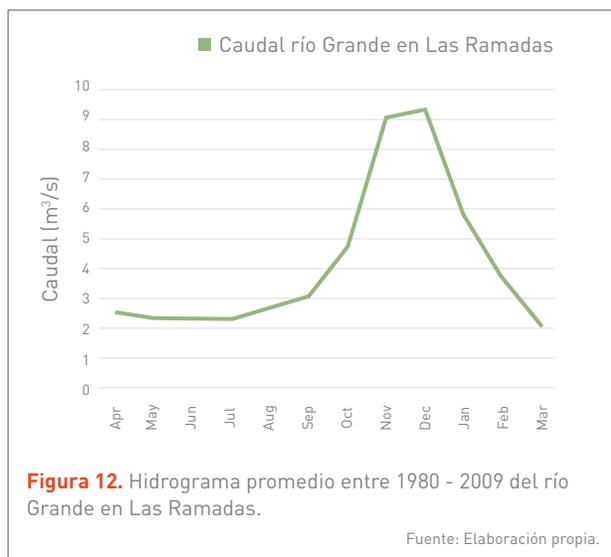
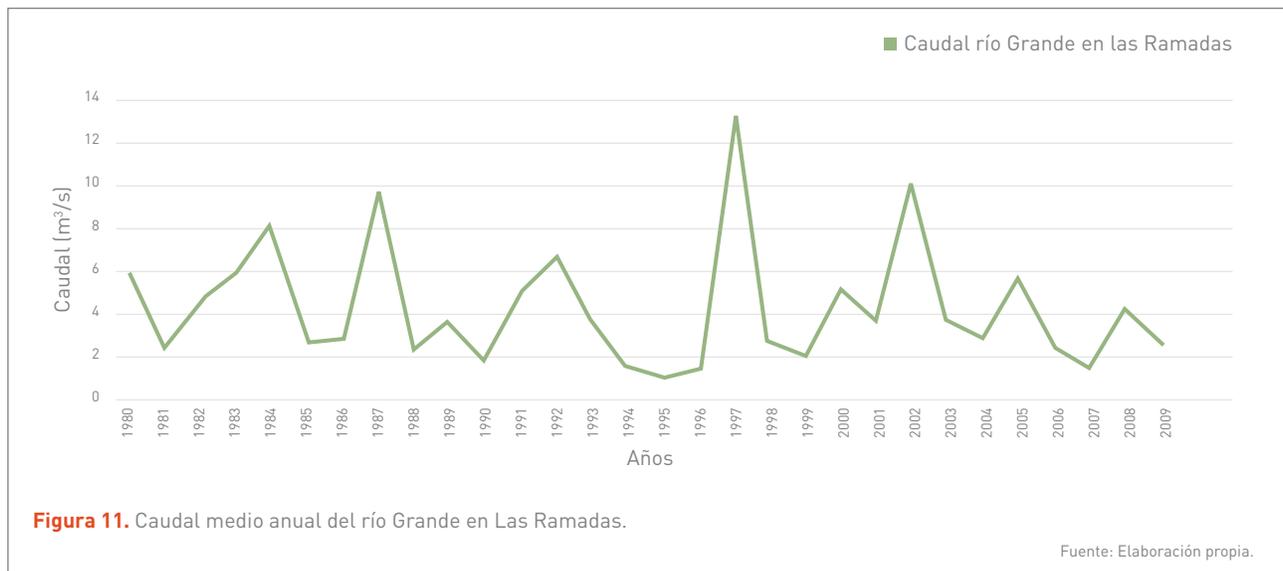
4.3 CUENCA DEL RÍO LIMARÍ

4.3.1 INTRODUCCIÓN Y SENSIBILIDAD HISTÓRICA

La cuenca del río Limarí se encuentra en la región semiárida de Chile (clima semiárido con nublados abundantes, semiárido templado con lluvias invernales y semiárido frío con lluvias invernales), unos 400 kilómetros al norte de la ciudad de Santiago. Esta cuenca, de aproximadamente 15.000 km², tiene condiciones hidroclimáticas que se caracterizan por niveles bajos de precipitación (en la zona

del valle los valores son, aproximadamente, 150 mm de precipitación al año), con alta variabilidad interanual y con predominio de suministro de agua en épocas de deshielo. La alta variabilidad en la disponibilidad de agua en la cuenca queda demostrada al comparar el caudal promedio anual de río Grande en Las Ramadas (3,4 m³/s) con el caudal anual que se supera el 85% de los años (disponibilidad natural) equivalente a 1,7 m³/s (**Figura 11**). El régimen nival queda de manifiesto en la **Figura 12**.

Las condiciones climáticas ideales para el desarrollo de la agricultura de alto valor y la gran fluctuación en la oferta motivaron la construcción de un sistema de embalse deno-

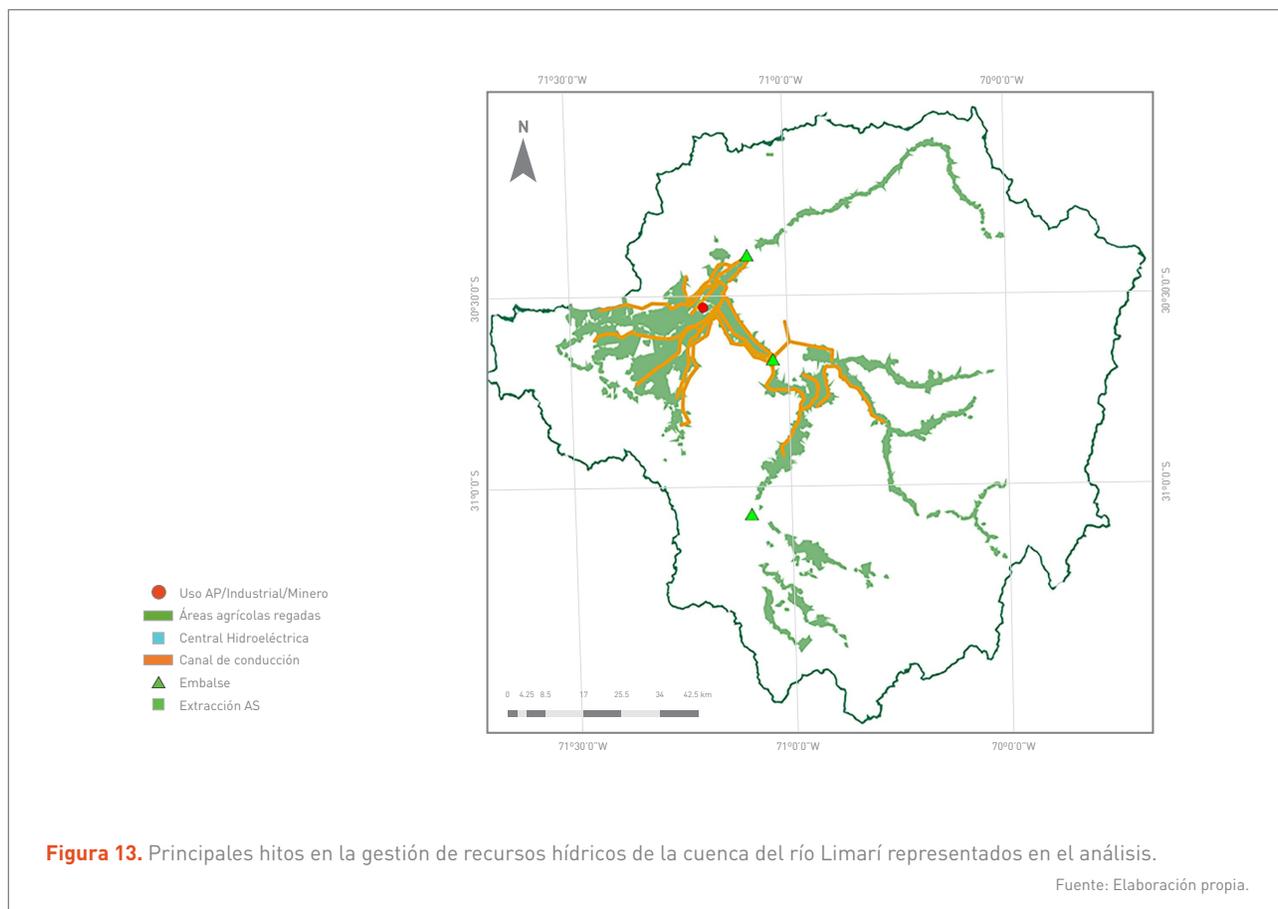


minado Paloma, con una capacidad de almacenamiento de alrededor de 1.000 Mm³. Esto equivale a, aproximadamente, tres veces el volumen de agua promedio disponible en la cuenca y permite lograr una gran regulación de la alta variabilidad climatológica existente (Vicuña *et al.*, 2014; Chadwick *et al.*, 2018). Aguas arriba de este sistema de embalses, las OUA presentes en la cuenca gestionan los recursos disponibles de acuerdo con la disponibilidad de agua pasando por el río (sistema de repartición de prorrateo) y el uso, principalmente agrícola, tiende a desarrollarse de manera cercana al río sin que existan importantes canales de distribución hacia zonas más alejadas.

Aguas abajo de los embalses, las aguas son gestionadas a través de la coordinación de diversas asociaciones de canalistas, en lo que se conoce como el CASEP (Comunidad de Aguas Embalse Paloma). A diferencia de lo que ocurre aguas arriba de los embalses, la CASEP distribuye el agua que se ha acumulado, usando una regla de opera-

ción que toma en cuenta el valor del agua acumulada para años posteriores y el valor del agua que se puede usar en el mismo año (Vicuña *et al.*, 2012). El agua acumulada en estos embalses se usa, principalmente, para el riego de 45.000 hectáreas de cultivos, aproximadamente. También existe uso para consumo humano, principalmente, concentrado en la ciudad de Ovalle, con 111.800 habitantes. La **Figura 13** muestra los principales hitos asociados a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Limarí, que son representados en el modelo analizado.

En el Anexo 9.2.2.1 se presentan los caudales de agua utilizados por las distintas OUAs (incluyendo, de manera separada, a la ciudad de Ovalle). Se puede apreciar que la variabilidad en la disponibilidad total de caudal para usuarios en la zona aguas arriba es distinta a la disponibilidad en la zona aguas abajo de los embalses, lo que explica la distinta Vulnerabilidad climática, tal como se presenta en la **Tabla 5**.





Tipo de usuario	Usuario	Déficit medio (m3/s)	Vulnerabilidad máxima
Agricultura	Río Grande y afluentes	1,47	52%
	Río Huatulame y afluentes	0,47	52%
	Río Hurtado y afluentes	0,49	43%
	Camarico sector río Grande	0,01	35%
	Canal matriz Paloma	0,02	35%
	Río Grande en embalse Paloma	0,04	35%
	Canal matriz Cogotí en río Grande	0,04	72%
	Limarí entre Recoleta y Ovalle	0,20	85%
	Talhuen y Angostura Recoleta	0,28	85%
	Riego sector Punitaqui	0,08	49%
	Riego Cogotí camino a Punitaqui	0,19	34%
	Riego canal Villalón	0,36	32%
	Riego canal Camarico	0,26	47%
	Riego río Limarí en Ingenio	0,13	38%
	Riego estero Punitaqui	0,02	37%
Agua potable	Agua potable Ovalle	0,00	0%

Tabla 5. Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Limarí en período histórico (1980 - 2009).

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 VULNERABILIDAD Y RIESGOS FUTUROS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la cuenca del río Limarí en términos de variaciones en caudales de agua en el río (Río Grande en Las Ramadas) y los caudales de agua que son utilizados por los distintos usuarios de la cuenca. Respecto de los usuarios, se muestran los cambios en los valores del índice de Vulnerabilidad) definidos en la sección 3.5. Este indicador se calcula a partir de las simulaciones de los modelos hidrológicos, utilizando las series climáticas de los seis GCM mencionados en la sección 2.2. Los resultados son presentados en función de la variación relativa del clima futuro (2035 - 2064) con respecto al período de control (1980 - 2009).

Variación de caudales

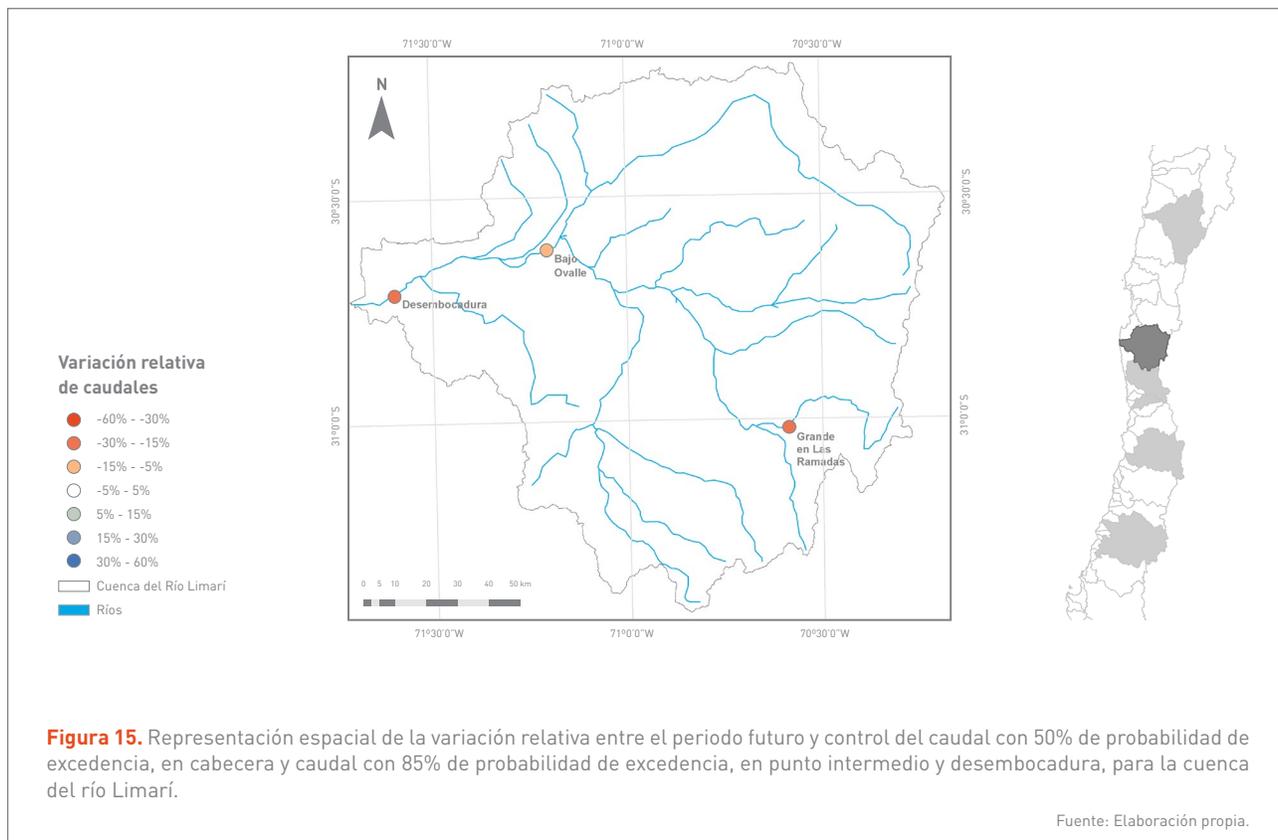
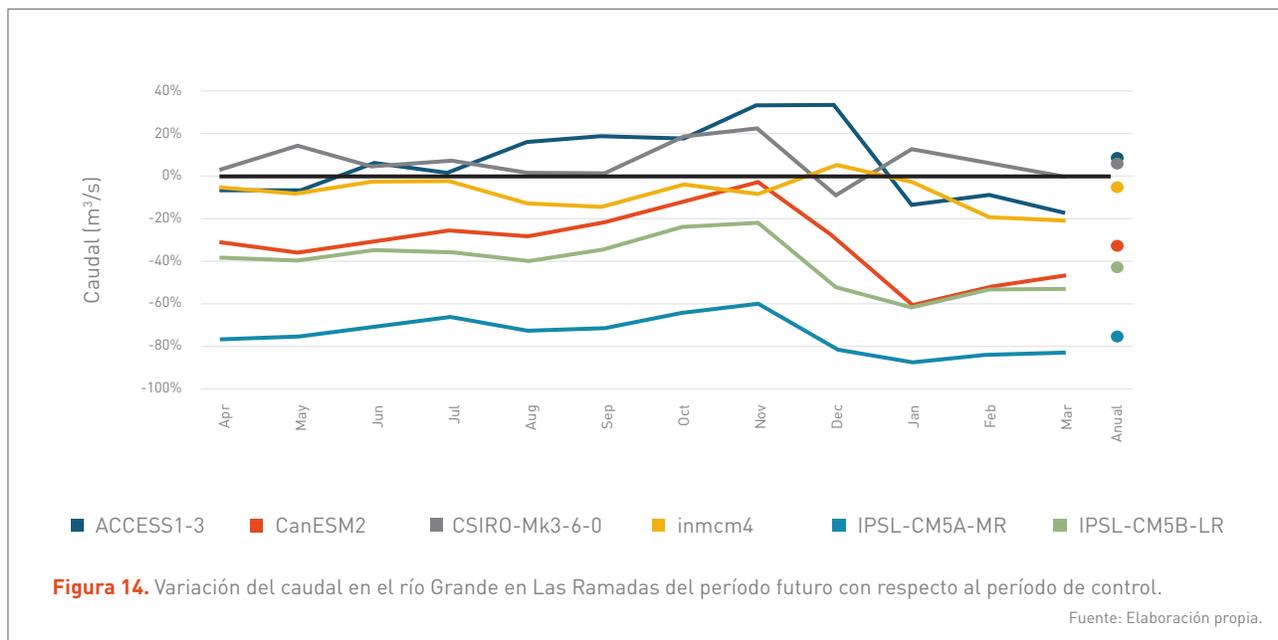
La variación de la disponibilidad del caudal en la cuenca del río Limarí se obtiene a partir del análisis de los

cambios en caudales en el río Grande en Las Ramadas, calculando la diferencia relativa (futuro menos control, dividida por control), tanto para el caudal mensual promedio como para el caudal anual promedio, considerando el período futuro de cada modelo climático o GCM, respecto del período de control. Estos resultados se muestran en la **Figura 14**, donde se aprecia una reducción en el caudal anual en cuatro de los seis escenarios climáticos. En el escenario climático más extremo se presenta una reducción del orden de 80% en el caudal anual. A nivel mensual, los cambios son variables, pero similares en magnitud a los cambios anuales.

Asimismo, se obtiene la variación relativa de caudales de la serie futura (2035 - 2064) en comparación con la serie histórica (1980 - 2009) de cada escenario de los GCM. Se evalúa el caudal con 50% de probabilidad de excedencia en río Grande, en Las Ramadas, y el caudal de excedencia del 85% para dos puntos de río en la cuenca,

aguas abajo de Ovalle y en la desembocadura. Esto, con la finalidad de evaluar variación de la disponibilidad hídrica (en el caso de río Grande, en Las Ramadas) y el caudal de dilución y ambiental en la cuenca (los dos puntos a nivel

intermedio y de desembocadura en la cuenca). En la **Figura 15** se muestra el promedio de los seis GCM utilizados, evidenciando la mayor reducción de caudal del orden de 15% a 30%.





Vulnerabilidad

Los cambios en la Vulnerabilidad extrema de los caudales utilizados por los distintos usuarios en la cuenca se presentan en forma de diagramas de caja en el Anexo 9.2.2.2. Los valores corresponden a la variación porcentual relativa de cada modelo climático para el período futuro respecto del período de control. En este sentido, una variación positiva en la Vulnerabilidad corresponde a un aumento del déficit promedio de abastecimiento, lo cual representa una situación desfavorable en términos de disponibilidad hídrica. Se entrega un resumen de la variación de la Vulnerabilidad para los distintos usuarios

del río Limarí en la **Tabla 6**, considerando sólo las fuentes de agua superficial. Las vulnerabilidades aumentan para casi todos los usuarios. Esto significa que algunas de las fallas que ocurren tienen un déficit mayor que lo ocurrido en el período de control.

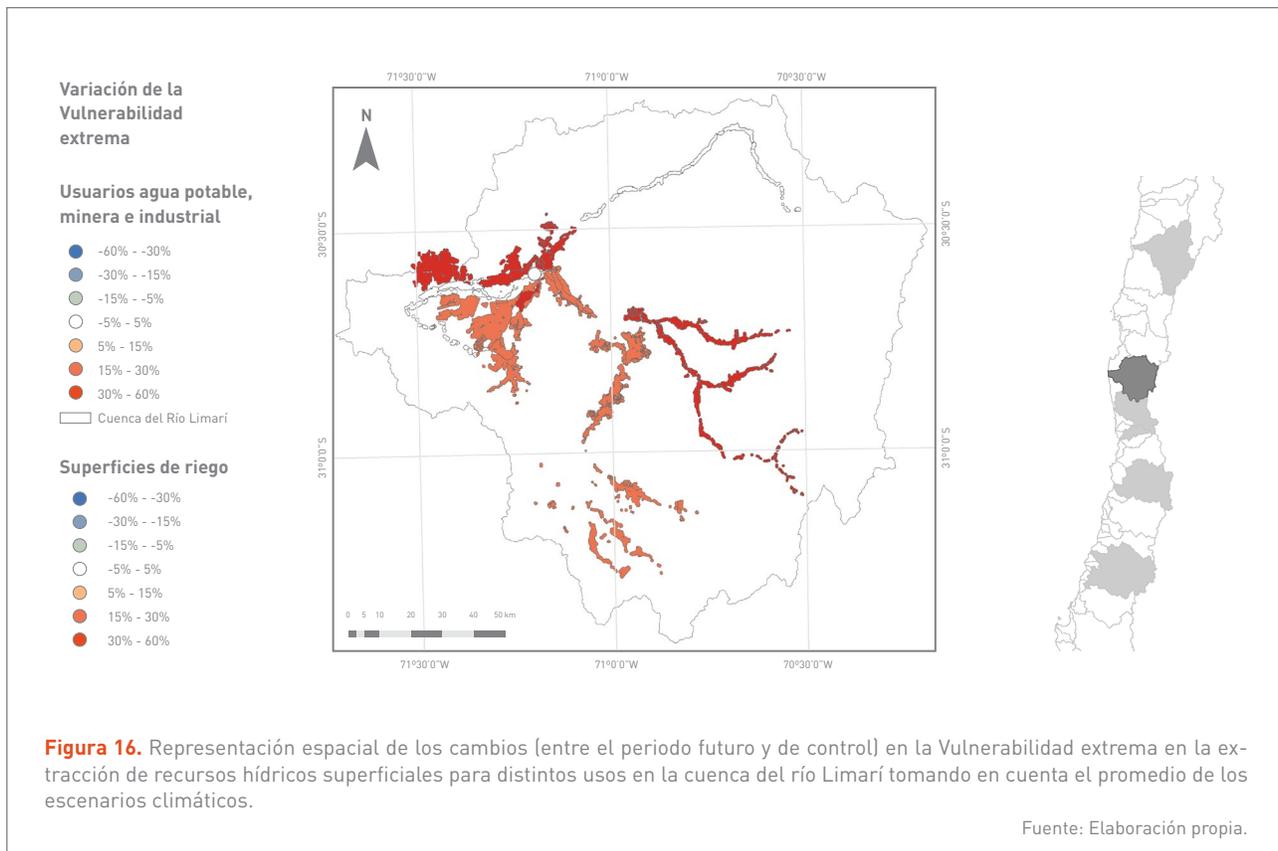
Mapa de Riesgos

En esta sección se presenta el mapa asociado a la variación de la Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para riego y agua potable de la cuenca del río Limarí. Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 16**.

Tipo de usuario	Usuario	Variación Vulnerabilidad máxima					
		ACCESS1-3	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Agricultura aguas arriba de embalses	Río Grande y afluentes	24%	34%	20%	24%	58%	36%
	Río Huatulame y afluentes	16%	23%	5%	20%	58%	31%
	Río Hurtado y afluentes	3%	-16%	-1%	8%	24%	8%
Agricultura entre Ovalle y embalses	Camarico sector Río Grande	21%	25%	2%	11%	59%	40%
	Canal matriz Paloma	21%	25%	2%	11%	59%	40%
	Río Grande en embalse Paloma	20%	25%	3%	11%	60%	40%
	Canal matriz Cogoti en río Grande	7%	34%	4%	12%	59%	47%
	Limarí entre Recoleta y Ovalle	40%	46%	0%	2%	75%	60%
	Talhuen y Angostura Recoleta	40%	46%	0%	2%	74%	60%
Agricultura en Ovalle hasta desembocadura del R. Limarí	Riego sector Punitaqui	10%	23%	14%	10%	59%	32%
	Riego Cogotí Camino a Punitaqui	22%	28%	3%	12%	60%	44%
	Riego canal Villalón	29%	34%	1%	5%	68%	49%
	Riego canal Camarico	21%	26%	6%	9%	60%	41%
	Riego río Limarí en Ingenio	2%	-18%	3%	16%	10%	-7%
	Riego estero Punitaqui	10%	-6%	5%	7%	-9%	4%
Agua Potable	Agua potable Ovalle	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 6 Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos por distintos usuarios en la cuenca del río Copiapó (considera aguas superficiales y subterráneas).

Fuente: Elaboración propia.

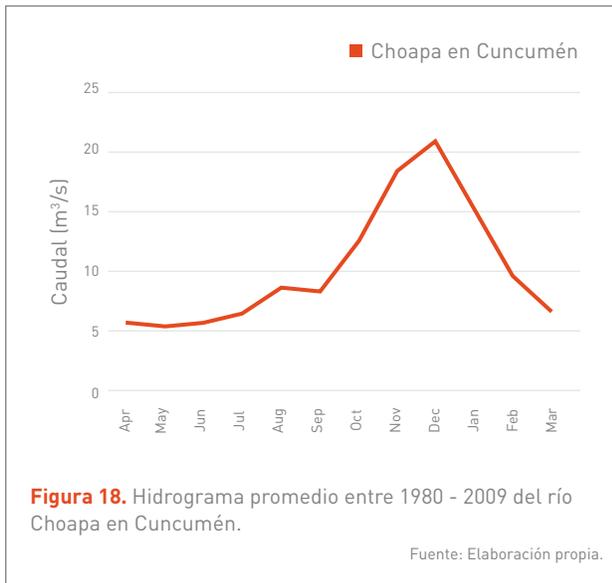
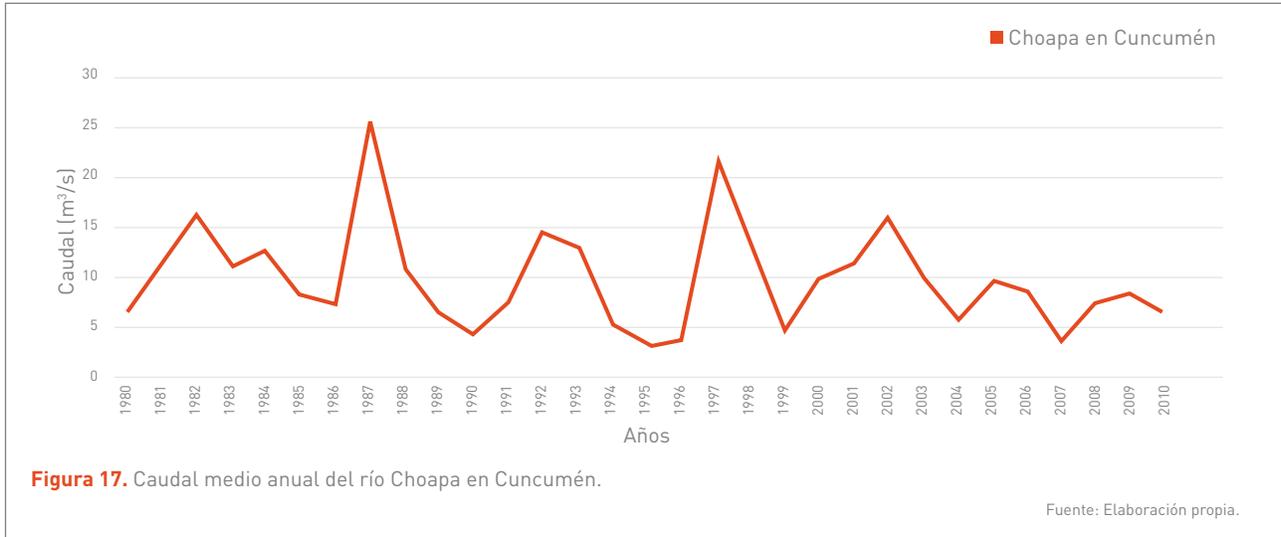


4.4 CUENCA DEL RÍO CHOAPA

4.4.1 INTRODUCCIÓN Y VULNERABILIDAD HISTÓRICA

La cuenca del río Choapa se encuentra en el extremo sur de la Región de Coquimbo, limitando al norte con la cuenca del río Limarí y por el sur con las cuencas del estero Pupío y río Petorca. Los principales afluentes al río Choapa son los ríos Illapel y Chalinga, junto a la ciudad de Salamanca. Por su vinculación con la actividad minera en el área alta de la cuenca, el río Cuncumén cobra también relevancia. La cuenca del Choapa presenta una marcada estacionalidad de las precipitaciones y temperaturas, mostrando un comportamiento característico de climas mediterráneos o templados, con precipitaciones concentradas en los meses de invierno (mayo - agosto), alcanzando como

promedio histórico un total anual de 270 mm. Las temperaturas máximas anuales se registran en los meses correspondientes al verano (diciembre - marzo) y las mínimas en invierno (mayo - agosto). A partir de esta estacionalidad en el clima, los caudales muestran una respuesta característica de un régimen nival, con escurrimientos máximos observados en los meses de noviembre y diciembre, alcanzando valores anuales promedio de 10 m³/s para la salida de la cordillera en la estación Choapa en Cuncumén. La **Figura 17** y la **Figura 18** muestran la información hidrológica de base de esta cuenca. Como es posible apreciar, es evidente la alta variabilidad interanual que existe en la cuenca. Las temporadas 1986 / 87 – 1987 / 88, así como las 1996 / 97 / 98 son muestra de ello, en donde años 87 y 97 fueron notablemente más lluviosos, en medio de años secos. Finalmente, el régimen nival queda de manifiesto en la **Figura 18**.

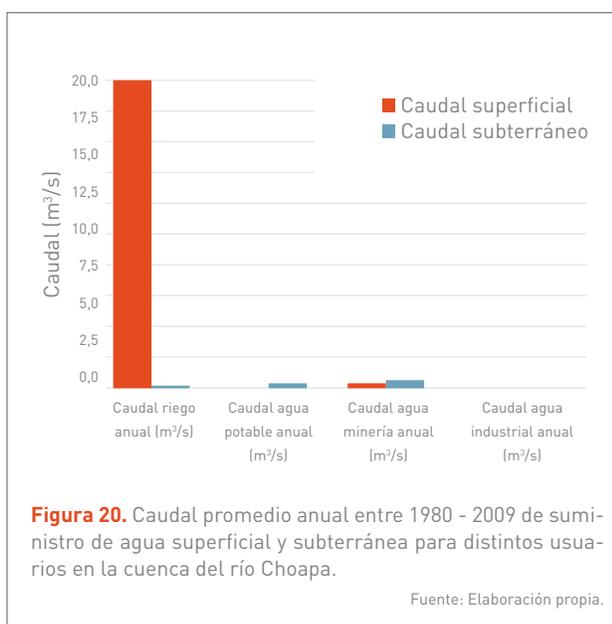
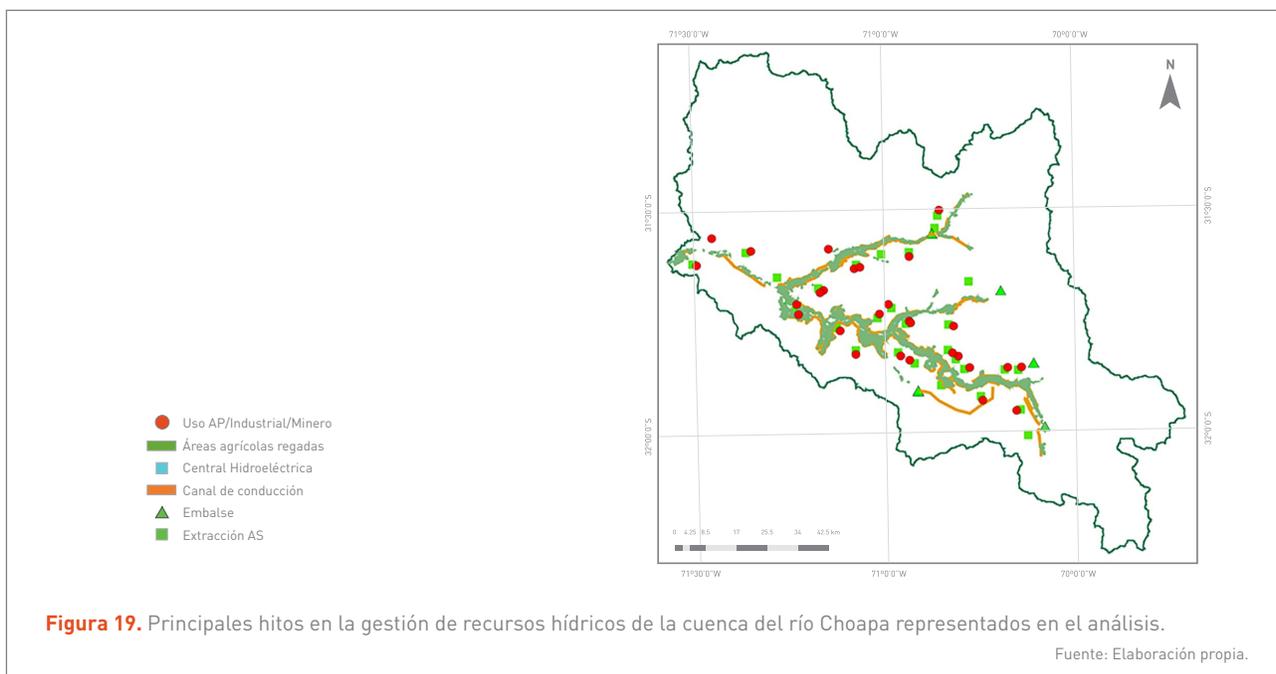


tecnificación en el riego. Asimismo, existe una demanda de agua potable urbana para las ciudades de Illapel, Salamanca y Canela, la cual es provista por la empresa Aguas del Valle S.A. Las fuentes hídricas para la ciudad de Illapel son diversas, provienen del acuífero Illapel, Cuzcuz y del canal Potrero. Salamanca obtiene el agua desde el acuífero Choapa, mientras que Canela Alta y Baja lo hacen desde el acuífero del estero Canela. Asimismo, existen 34 sistemas de agua potable rural que abastecen diversas áreas de la cuenca, principalmente desde aguas subterráneas. En términos de la actividad minera, se cuantifica una demanda por 400 l/s superficiales desde el río Choapa aguas abajo de la estación Cuncumén, 133 l/s subterráneos del acuífero de Cuncumén, 693 acciones del río Cuncumén y 8 l/s subterráneos en la cuenca de Illapel. La administración de las aguas la realizan tres Juntas de vigilancia en los ríos Choapa, Chalinga e Illapel. La **Figura 19** muestra los principales hitos asociados a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Choapa, que son representados en el modelo analizado.

La cuenca tiene infraestructura de almacenamiento, con los embalses Corrales (50 Mm³) y El Bato (26 Mm³). El primero se ubica en el área suroeste de la zona intermedia de la cuenca, mientras que El Bato se encuentra en el área de cabecera del río Illapel. En términos de aguas subterráneas, se consideran seis sistemas hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHACs) para las áreas de Choapa alto, Chalinga, Choapa Medio, Illapel, Canela y Choapa Bajo, los que contarían con un volumen total de 400 Mm³.

En el Anexo 9.2.3.1 se presentan los caudales de agua utilizados por los distintos usuarios de la cuenca. La diferencia en el aporte relativo entre el agua superficial y el agua subterránea se puede apreciar en la **Figura 20**. Los usuarios de riego se han agregado para las tres cuencas principales (Choapa, Chalinga e Illapel). Se puede apreciar que la mayor variabilidad de la disponibilidad total de caudal es para los usuarios de riego. La Vulnerabilidad del suministro para distintos usuarios se presenta en la **Tabla 7**.

En toda la cuenca, hay más de 17.000 hectáreas cultivadas bajo riego, superficie repartida entre huertos frutales (30%) y cultivos anuales (70%), alcanzando sólo 23% de



4.4.2 VULNERABILIDAD Y RIESGOS FUTUROS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la cuenca del río Choapa en términos de variaciones en caudales de agua en el río (en Cuncumén) y los caudales de agua que son utilizados por los distintos usuarios de la cuenca. Respecto de los usuarios, se muestran los cambios en los valores del índice de Vulnerabilidad, definidos en la sección 3.5. Este indicador se calcula a partir de las simulaciones de los modelos hidrológicos, utilizando las series climáticas de los seis GCM mencionados en la sección 2.2. Los resultados son presentados en función de la variación relativa del clima futuro (2035 - 2064) con respecto al período de control (1980 - 2009).

Tipo de usuario	Asociación o sector de riego	Déficit medio (m³/s)	Vulnerabilidad máxima
Agricultura	Río Choapa	3,15	51%
	Río Chalinga	0,47	61%
	Río Illapel	1,20	84%
Agua potable	AP río Choapa	0,004	13%
	AP río Chalinga	0,00	0%
	AP río Illapel	0,00	0%
Minería	Minería	0,00	1%
Industria	Industria	0,00	0%

Tabla 7. Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Choapa en período histórico (1980 - 2009).

Fuente: Elaboración propia.

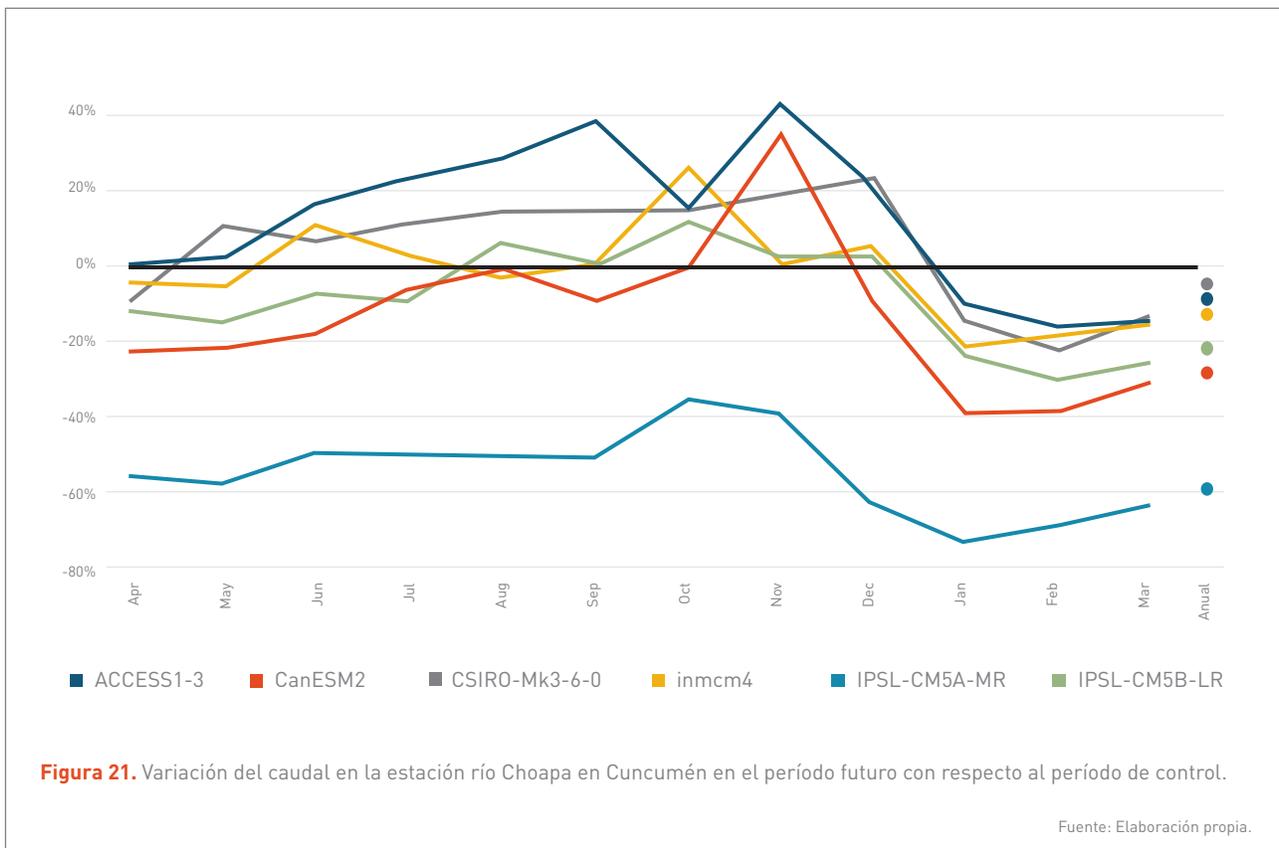


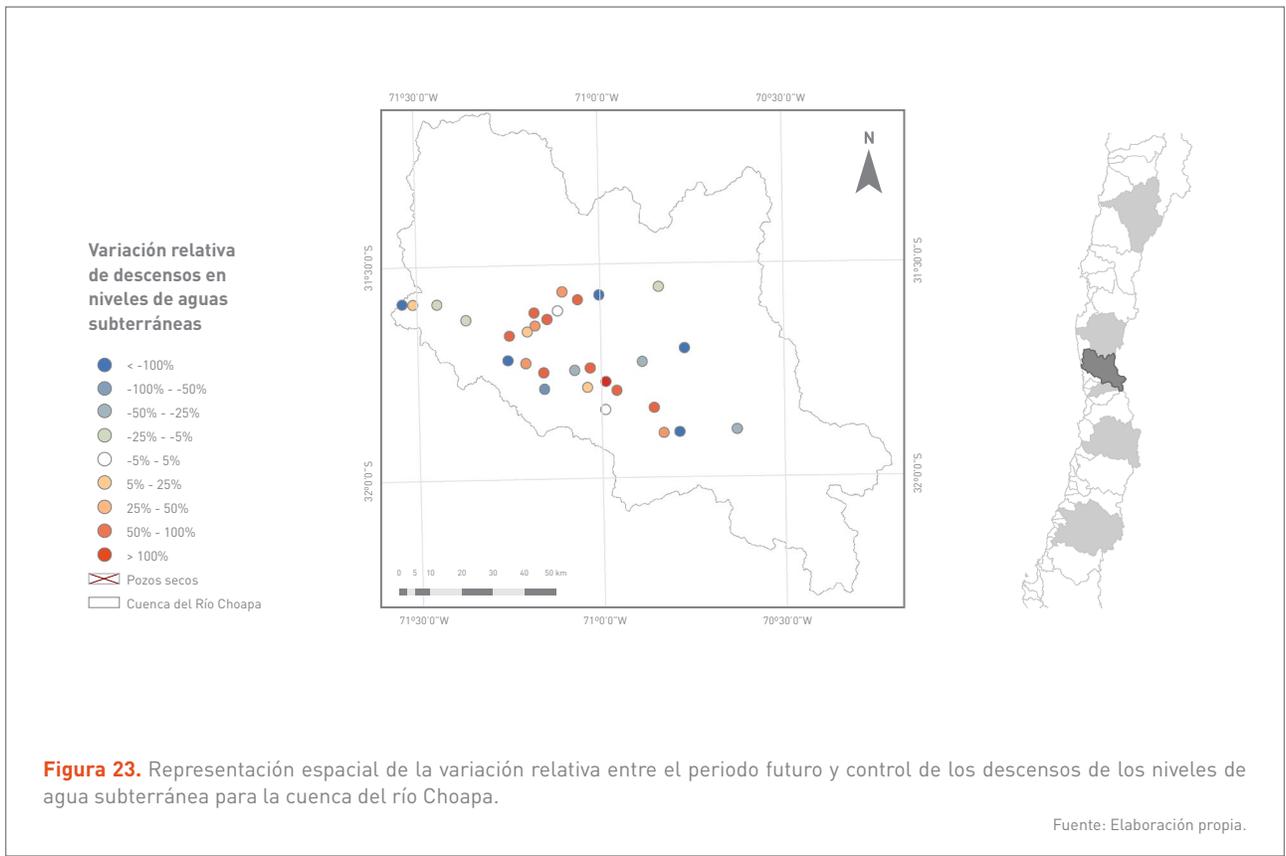
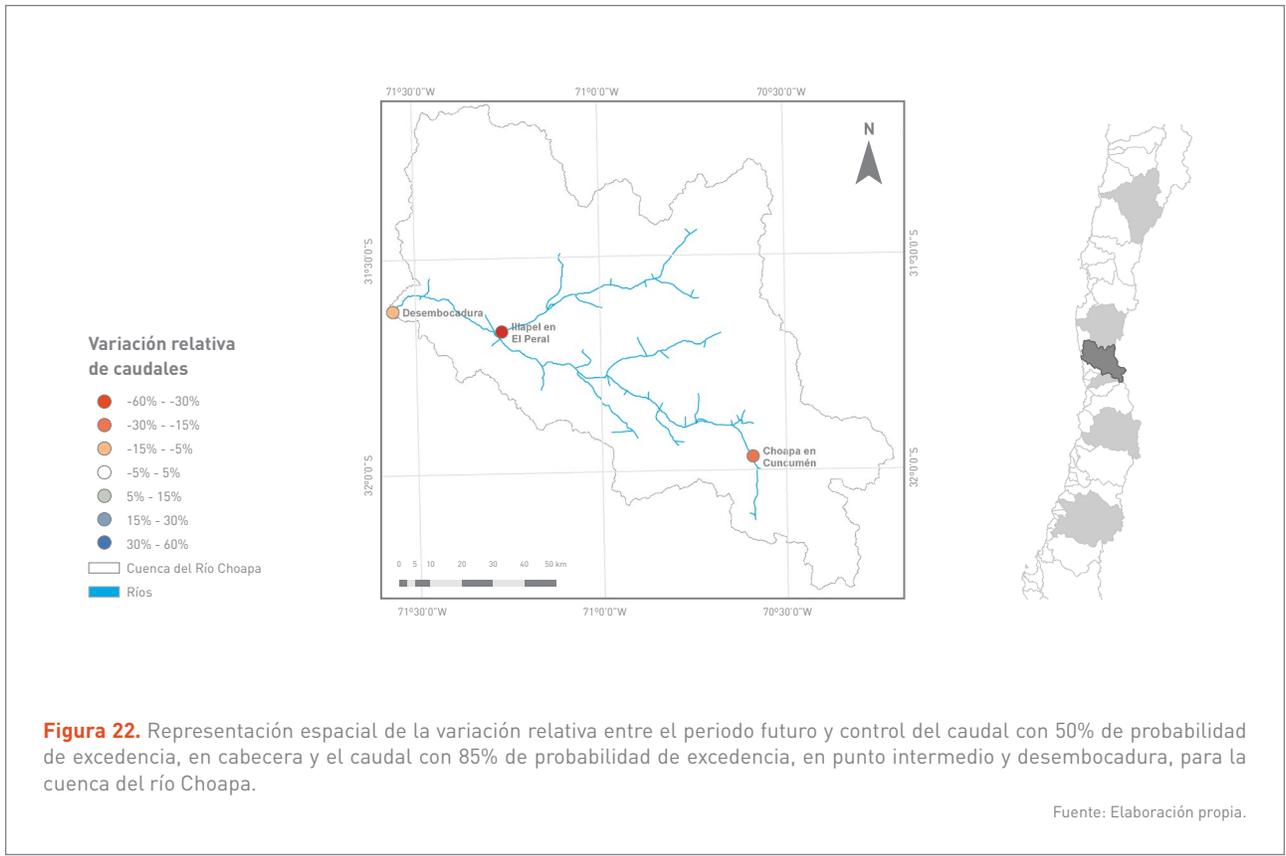
La variación de la disponibilidad del caudal en la cuenca del río Choapa se obtiene a partir del análisis de los cambios en caudales en la estación río Choapa en Cuncumén, calculando la diferencia relativa (futuro menos control, dividida por control), tanto para el caudal mensual promedio como para el caudal anual promedio, considerando el período futuro de cada modelo climático o GCM, respecto del período de control. Estos resultados se muestran en términos de la variación mensual y anual en la **Figura 21**. En el escenario climático más extremo se presenta una reducción del orden de 60% en el caudal anual. A nivel mensual, los cambios son variables a lo largo del año, concentrando las mayores disminuciones en los meses de verano y aumentos relativos en los meses de invierno y primavera. Asimismo, se obtiene la variación relativa de caudales de la serie futura (2035 – 2064) en comparación con la serie histórica (1980 – 2009) de cada escenario de los GCM. Se evalúa el caudal con 50% de probabilidad de excedencia en Choapa, en Cuncumén, y el caudal con probabilidad de excedencia del 85% para dos puntos del río en la cuenca, Illapel en El Peral y en la desembocadura. Esto, con la finalidad de

evaluar la variación de la disponibilidad hídrica (en el caso de Choapa en Cuncumén) y el caudal de dilución y ambiental en la cuenca (los dos puntos a nivel intermedio y de desembocadura en la cuenca). En la **Figura 22** se muestra el promedio de los seis GCM utilizados, evidenciando la mayor reducción de caudal del orden de 30% a 60%.

Se presenta también, el mapa con la variación relativa de los descensos de niveles piezométricos, entre el período futuro y de control de los GCM, en donde los valores en rojo (azul) indican que en los escenarios futuros el descenso registrado es mayor (menor) que en el período histórico. Los descensos se han evaluado en la ubicación de pozos representativos de la cuenca del río Choapa.

La **Figura 23** indica que no existen pozos que caigan en desuso (pozos secos) en el futuro, pero sí se observa que hay muchos pozos que generan una extracción excesiva del recurso subterráneo en diferentes partes de la cuenca, en el futuro en comparación con el período histórico.







Vulnerabilidad

Los cambios en la Vulnerabilidad extrema de los caudales utilizados por los distintos usuarios en la cuenca se presentan en forma de diagramas de caja en el Anexo 9.2.3.2. Los valores corresponden a la variación porcentual relativa de cada modelo climático para el período futuro respecto del período de control. En este sentido, una variación positiva en la Vulnerabilidad corresponde a un aumento del déficit promedio de abastecimiento, lo cual representa una situación desfavorable en términos de disponibilidad hídrica. Se entrega un resumen de la variación de la Vulnerabilidad para los distintos usuarios del río Choapa en la **Tabla 8** y en la **Tabla 9**, considerando sólo fuentes superficiales o ambas fuentes, respectivamente. Las vulnerabilidades aumentan para usuarios agrícolas

y minería. Estos últimos disminuyen su Vulnerabilidad al incorporar fuentes de suministro subterráneo.

De manera de realizar un análisis de disponibilidad hídrica de esta cuenca, se agruparon las zonas de riego y de abastecimiento de agua potable en tres sectores, siguiendo las áreas de influencia de los ríos Choapa y sus dos afluentes principales, Chalinga e Illapel.

Mapas de Riesgos

En esta sección se presentan los mapas de Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para riego, agua potable, minería y uso industrial de la cuenca del río Choapa. Los resultados obtenidos se muestran la **Figura 24** y en la **Figura 25**.

Tipo de usuario	Usuario	Variación Vulnerabilidad extrema					
		ACCESS1-3	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Agricultura	Río Choapa	22%	8%	16%	3%	49%	20%
	Río Chalinga	27%	5%	25%	2%	52%	23%
	Río Illapel	37%	31%	35%	0%	50%	33%
Agua potable	AP Río Choapa	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	AP Río Chalinga	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	AP Río Illapel	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Minería	Minería	2%	7%	3%	4%	24%	6%
Industria	Industria	0%	0%	0%	0%	0%	0%

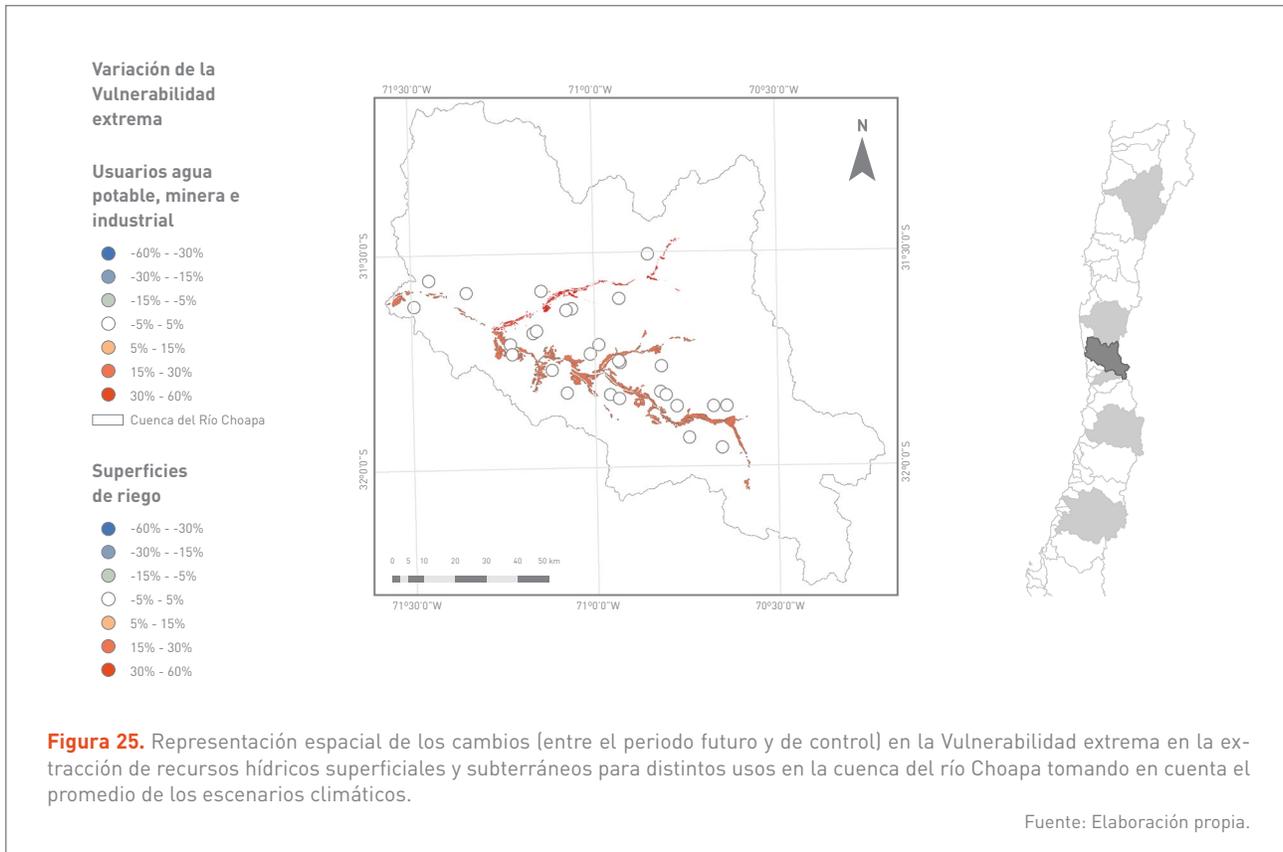
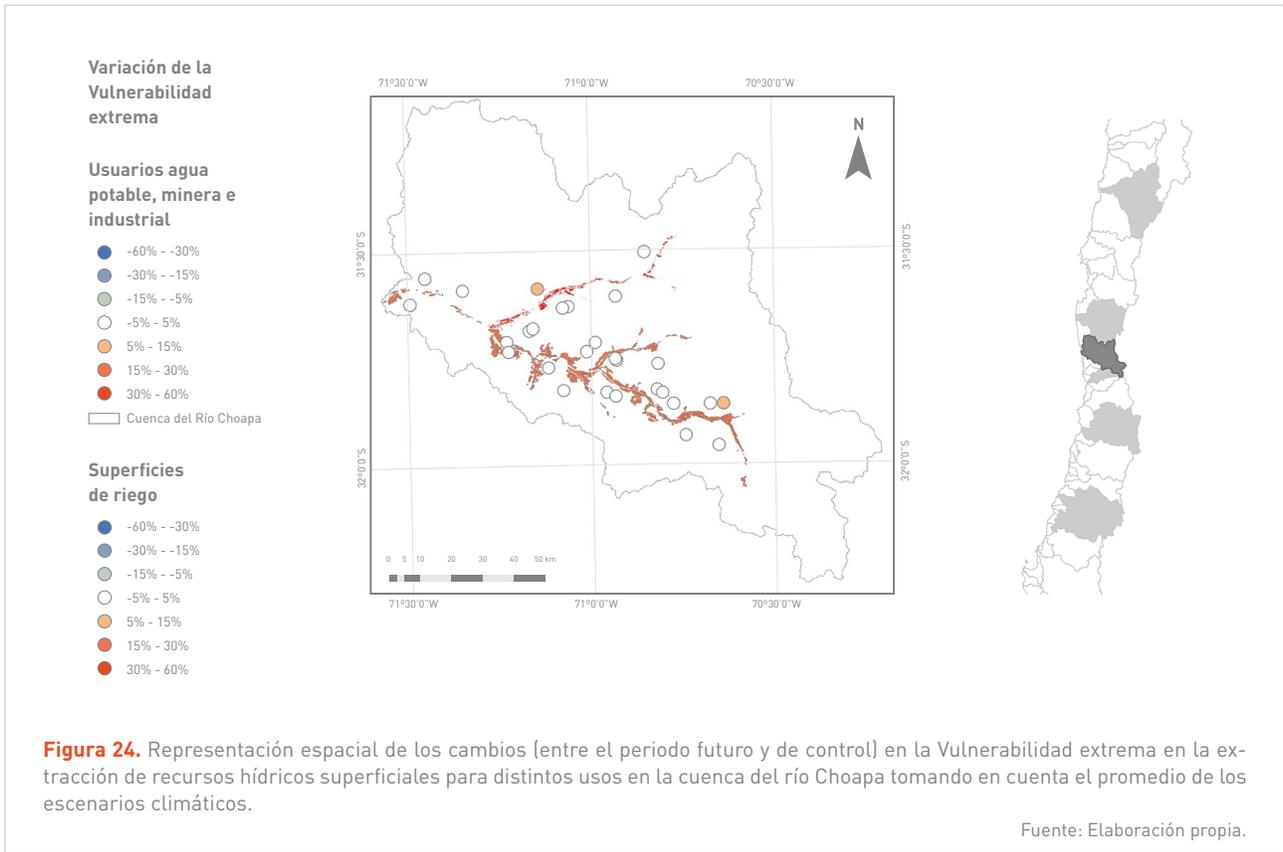
Tabla 8. Variación de la Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para usos de riego, agua potable, minería e industrial en la cuenca del río Choapa, considerando solamente fuentes de aguas superficiales.

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de usuario	Usuario	Variación Vulnerabilidad extrema					
		ACCESS1-3	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Agricultura	Río Choapa	22%	8%	16%	3%	49%	22%
	Río Chalinga	27%	5%	25%	2%	52%	28%
	Río Illapel	37%	31%	35%	0%	50%	66%
Agua potable	AP Río Choapa	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	AP Río Chalinga	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	AP Río Illapel	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Minería	Minería	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Industria	Industria	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 9. Variación de la Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para usos de riego, agua potable, minería e industrial en la cuenca del río Choapa, considerando fuentes de aguas superficiales y subterráneas.

Fuente: Elaboración propia.





4.5 CUENCAS DE LOS RÍOS LA LIGUA Y PETORCA

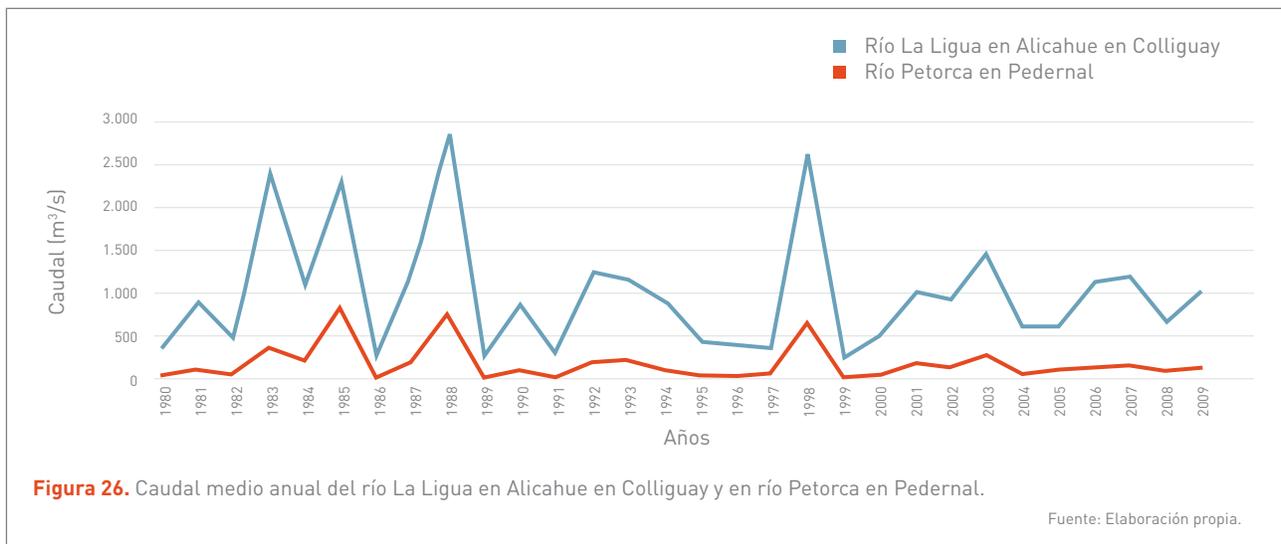
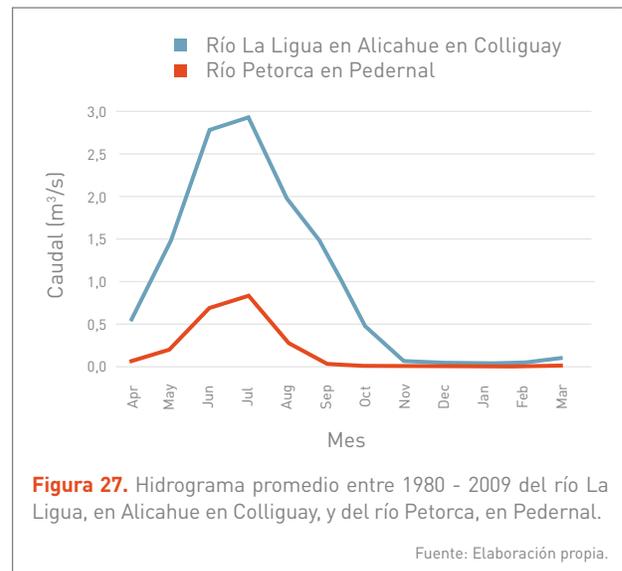
4.5.1 INTRODUCCIÓN Y VULNERABILIDAD HISTÓRICA

Las cuencas de los ríos Petorca y La Ligua se encuentran ubicadas contiguamente en la Región de Valparaíso, de norte a sur, respectivamente. La primera abarca una superficie de 1.980 Km² y la segunda, un área de 2.669 Km². Ambas cuencas tienen un clima de estepa con gran sequedad atmosférica, en donde las lluvias son escasas e irregulares, por lo que las sequías son frecuentes. Los totales anuales de precipitación alcanzan, aproximadamente, los 200 mm (DGA, 2004; Bujes, 2015).

El principal cauce en la cuenca de La Ligua es el río del mismo nombre, con una extensión de 89.255 m. Este presenta un régimen pluvio – nival, ya que los aportes pluviales se hacen más importantes por estar a una menor elevación. El período de mayores caudales ocurre entre julio y noviembre. Así también, dentro de la cuenca del río La Ligua, está la subcuenca del Alicahue, que tiene un régimen nival diferente al mencionado anteriormente, con sus mayores crecidas entre octubre y diciembre, producto de deshielos primaverales. El principal cauce en la cuenca del Petorca es el río Petorca, cuya extensión asciende a

101.132 m, con un régimen pluvial y con pronunciados estiajes (Niemeyer, 2018). Se ha tomado el caudal en cauce natural para ambas cuencas, en río La Ligua, en Alicahue en Colliguay, y en río Petorca, en Pedernal, que evidencian el comportamiento antes mencionado (Figuras 26 y 27).

Se considera que el sistema acuífero de Petorca se divide en cinco sistemas hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC), mientras que el sistema de La Ligua, en 7 SHAC. Esto se contempla en el acople del modelo de hidrología superficial, WEAP e hidrología subterránea, MODFLOW. Además, la cuenca del río La Ligua tiene representados 15 pozos de uso para el agua potable rural (APR)



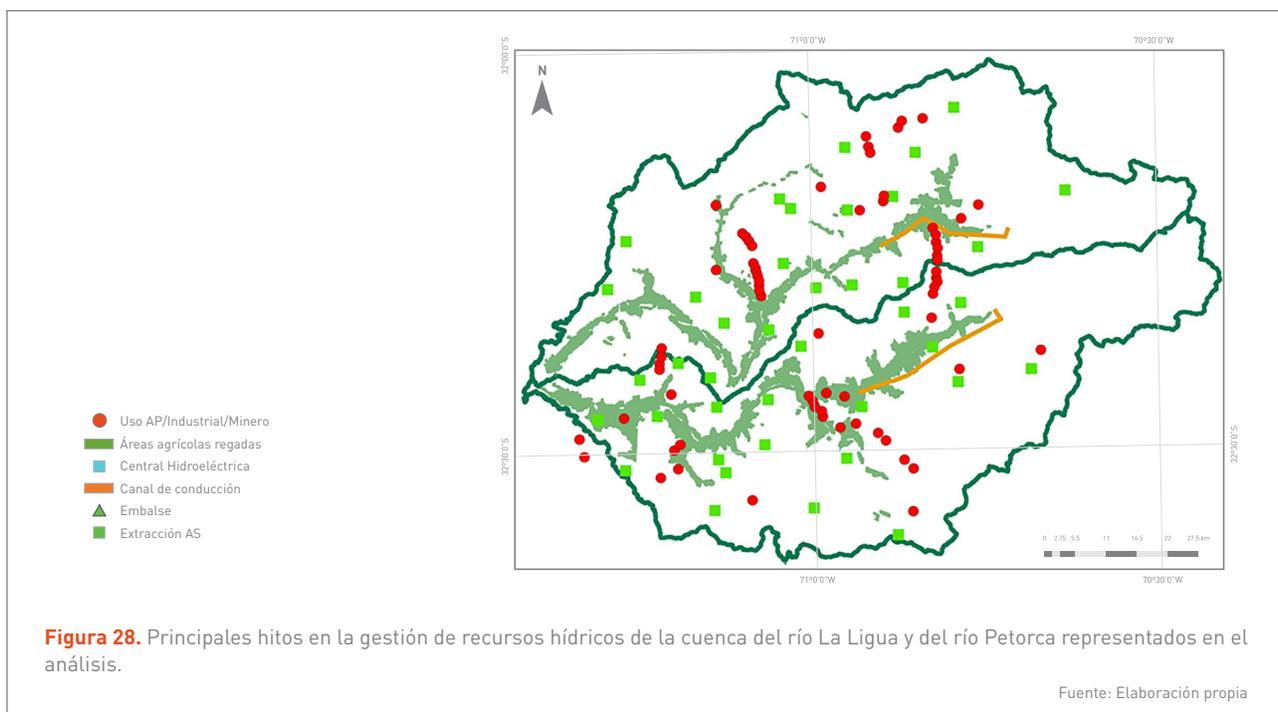
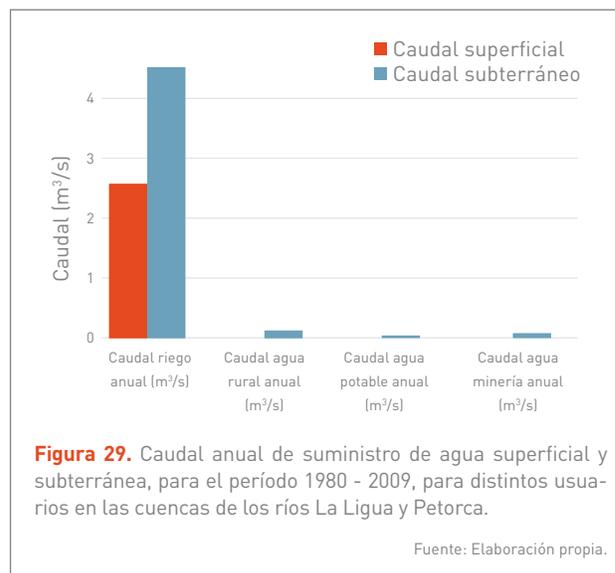
y se considera que el agua potable urbana es abastecida por la empresa ESVAL, la cual obtiene el recurso a través de derechos asignados de agua subterránea. La población de La Ligua es de 24.078 habitantes, aproximadamente. En Petorca se tienen 16 pozos de uso de APR y el agua potable urbana es atendida por dos empresas: Empresa de Servicios Sanitarios San Isidro S.A., que atiende a 857 habitantes; y ESVAL, a 31.191 habitantes (DGA, s.f.). Para la configuración del modelo en la cuenca del río La Ligua, se tiene en cuenta la población de las comunas La Ligua y Cabildo. Mientras que para la cuenca del río Petorca, las comunas son Petorca y Chincolco. Se analiza el descenso de agua por la operación de pozos.

La **Figura 28** muestra los principales hitos asociados a la gestión hidrológica, que son representados en el modelo utilizado. Se observa que en ambas cuencas coexisten usuarios de agua potable urbana y rural, minería y agricultura.

En el Anexo 9.2.4.1 se presentan los caudales de aguas que son utilizados por los distintos usuarios de agua potable, minería y agricultura. En todos los gráficos se muestra la suma de los aportes de aguas superficiales y subterráneas. Cabe resaltar que los usuarios de riego y minería reciben aporte superficial y subterráneo, aunque la Minera Las Ce-

nizas, una de las tres mineras consideradas en la modelación, sólo recibe agua subterránea. Por último, los usuarios de agua potable y rural se abastecen de agua subterránea.

La diferencia en el aporte relativo entre ambas fuentes se puede apreciar en la **Figura 29**, en donde se observa que el aporte subterráneo para los usuarios agrícolas es notablemente superior al aporte subterráneo para agua potable y minería.





Tipo de usuario	Usuario	Déficit medio (m³/s)	Vulnerabilidad máxima
Agricultura	La Ligua con estero Las Palmas	0,3524	41%
	La Ligua con estero de La Patagua	0,4566	49%
	La Ligua hasta desembocadura	0,1685	44%
	Petorca con río Sobrante	0,1743	66%
	Petorca con estero Las Palmas	0,5102	65%
	Petorca con estero Las Palmas	0,3965	53%
Agua potable urbana	Cabildo	0,0017	9%
	La Ligua	0,0001	6%
	Chincolco	0,0045	15%
	Petorca	0,0006	6%
Agua potable rural	La Ligua con estero Los Ángeles	0,0000	0%
	La Ligua con estero de La Patagua	0,0000	0%
	La Ligua hasta desembocadura	0,0000	0%
	Petorca con río Sobrante	0,0000	0%
	Petorca con estero Las Palmas	0,0001	0%
Minería	Cerro Negro	0,0002	0%
	Las Cenizas	0,0000	0%
	La Patagua	0,0000	0%

Tabla 10. Indicadores de desempeño para distintos usuarios de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca en período histórico (1980 - 2009).

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 10** se presentan los niveles de Vulnerabilidad del suministro para los distintos usuarios. Estos se calculan en base al objetivo histórico, definido por el requerimiento de cada uso de agua en el período de 1980 - 2009.

4.5.2 VULNERABILIDAD Y RIESGOS FUTUROS

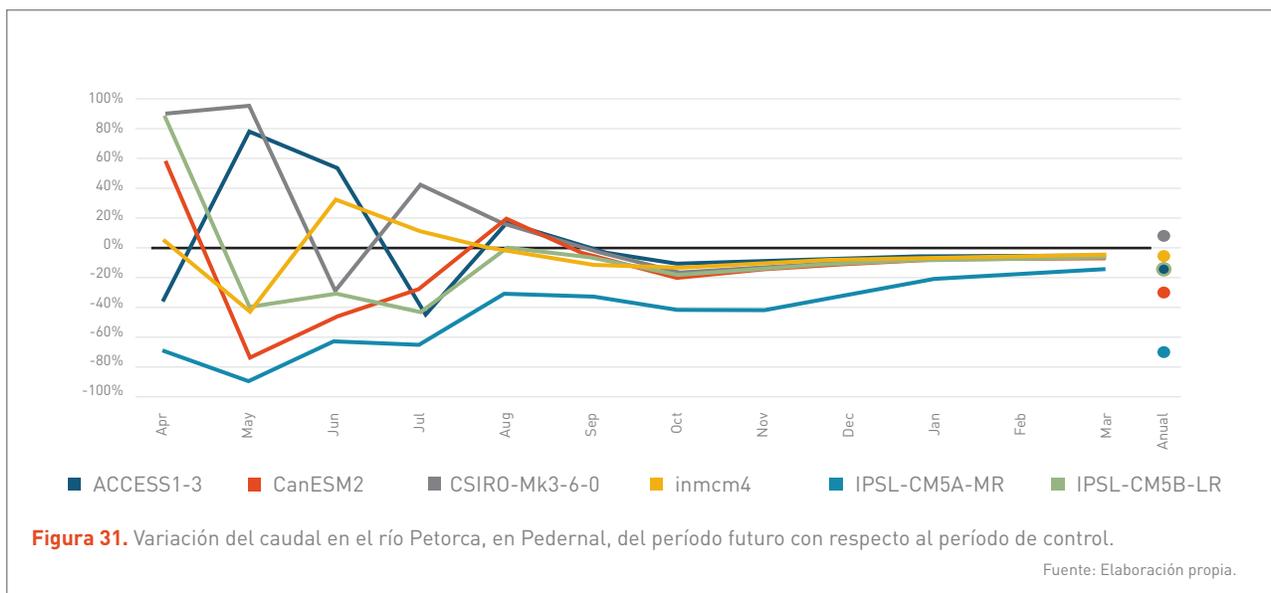
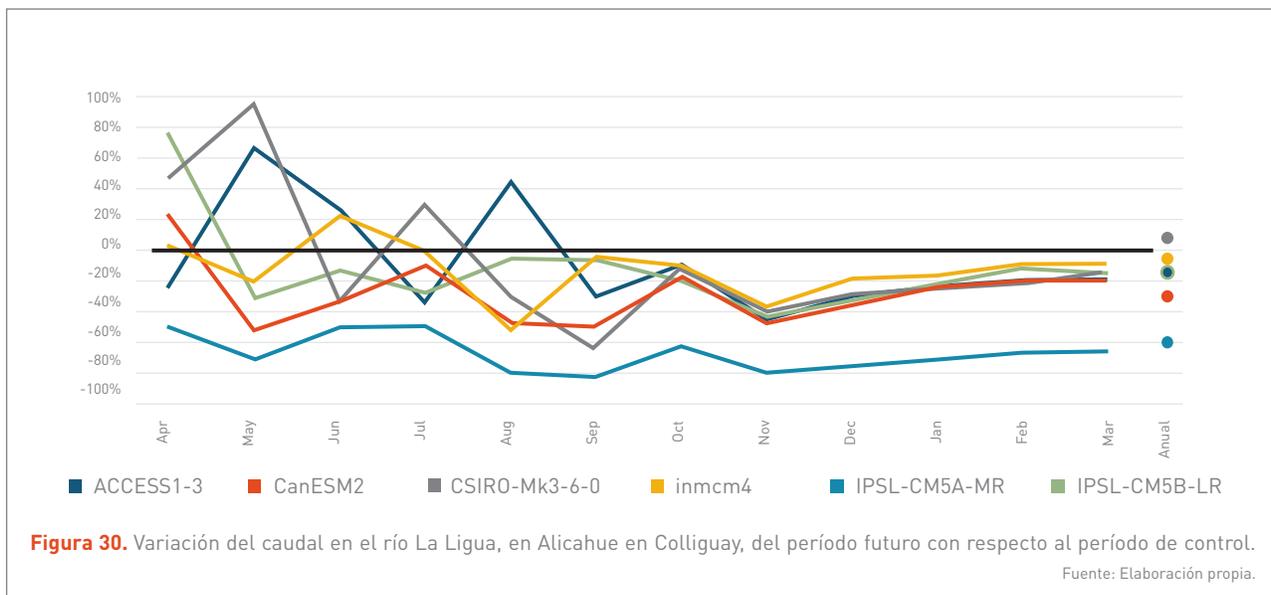
A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca en términos de caudales de agua de cada cuenca; en el río La Ligua, en Alicahue en Colliguay, y en el río Petorca, en Pedernal. Así también, se presentan los caudales de agua utilizados por los usuarios de agua potable, agrícolas y mineras.

Los indicadores se calculan a partir de las simulaciones de los modelos hidrológicos, utilizando las series climáticas de los seis GCM mencionados en la sección 2.2. Los resultados son presentados en función de la variación relativa del clima futuro (2035 - 2064) con respecto al período de control (1980 - 2009).

Variación de caudales y niveles de agua subterránea

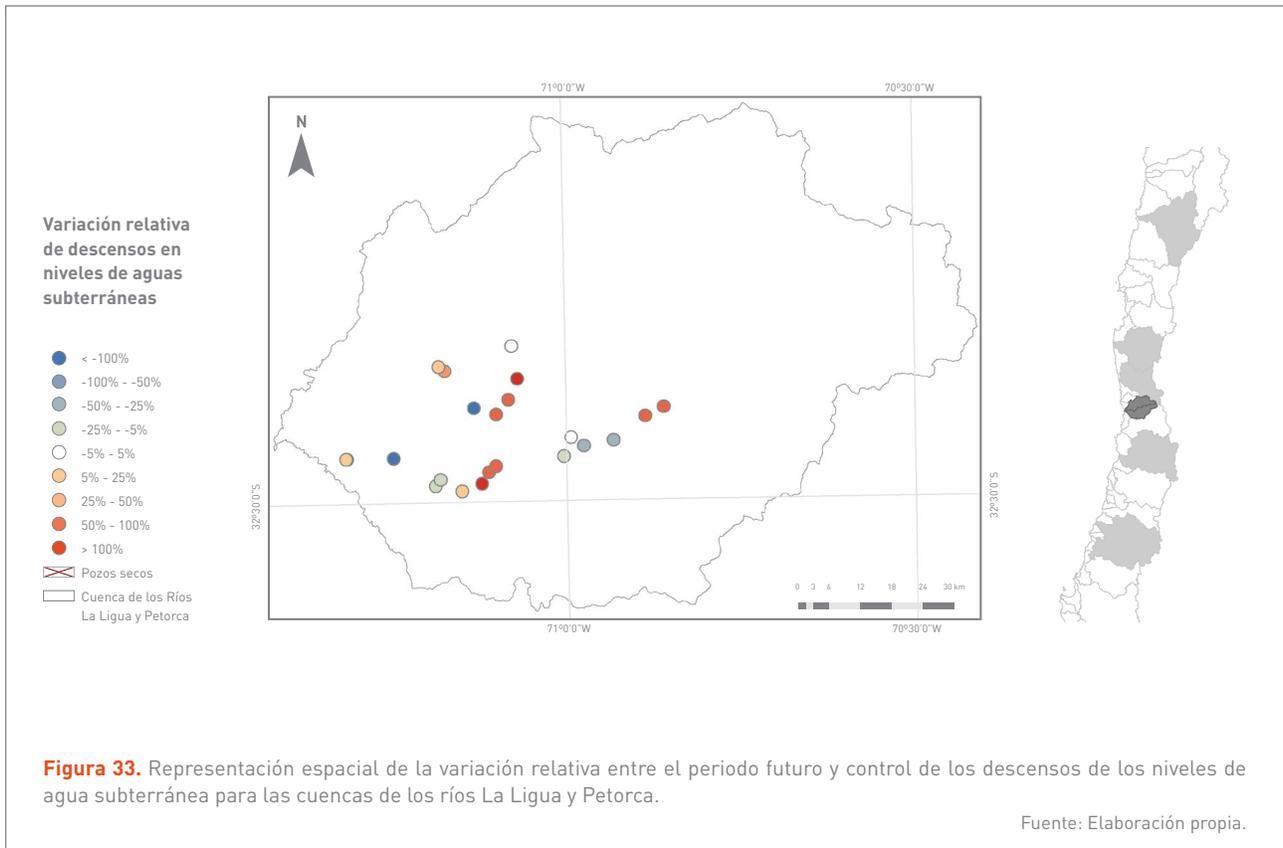
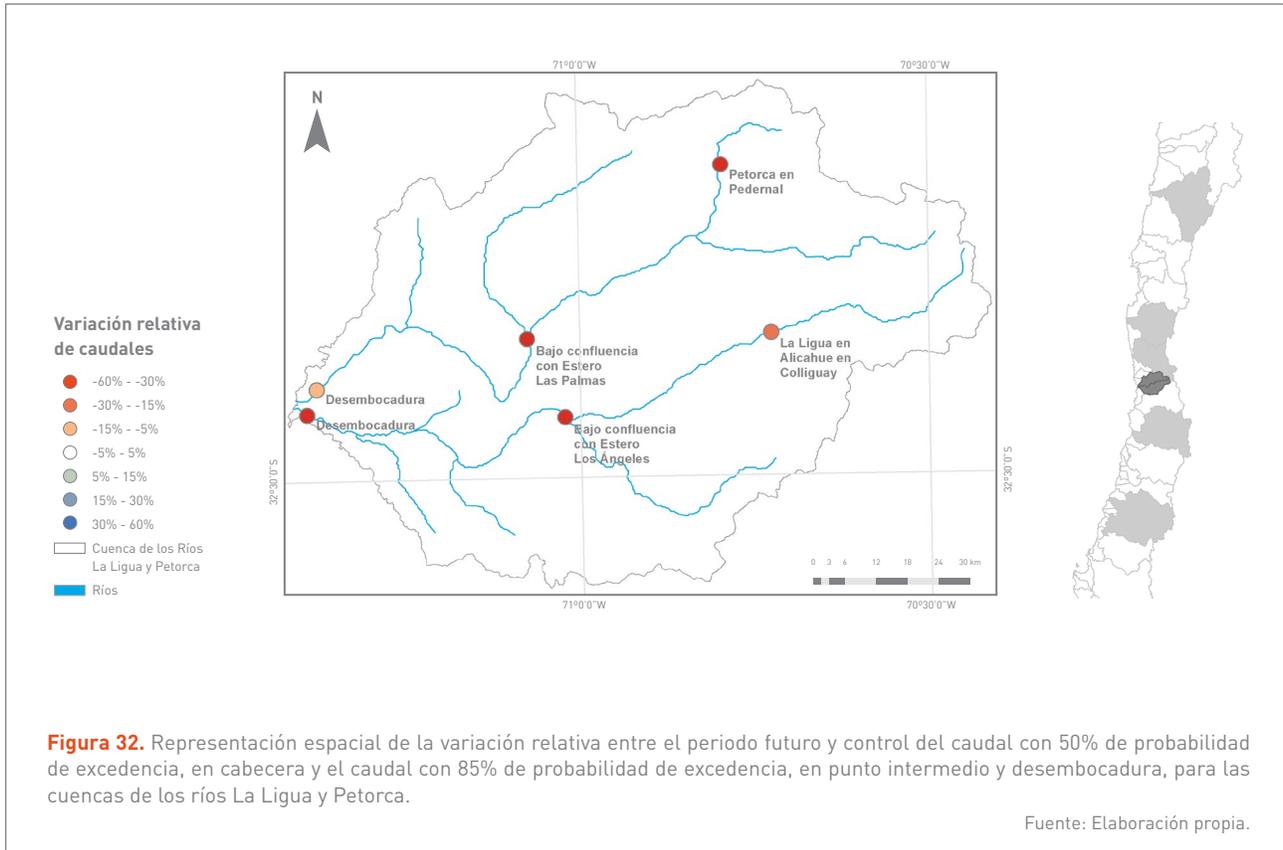
La variación de la disponibilidad del caudal de ambos ríos se obtiene en términos de la diferencia relativa (futuro menos control, dividida por control), tanto para el caudal mensual promedio como para el caudal anual promedio, considerando el período futuro de cada modelo climático o GCM, respecto del período de control. Estos resultados se muestran de la **Figura 30** y en la **Figura 31**. A nivel mensual, los cambios son variables y diferentes en magnitud a los cambios anuales, existiendo fuertes cambios en la forma del hidrograma mensual entre los meses de abril y agosto. En el resto de los meses se mantiene una tendencia a la baja en todos los escenarios de cambio climático para ambos ríos.

Asimismo, se obtiene la variación relativa de caudales de la serie futura (2035 - 2064) en comparación con la serie histórica (1980 - 2009) de cada escenario de los GCM. Se evalúa el caudal con 50% de probabilidad de excedencia en La Ligua, en Alicahue en Colliguay, y en Petorca, en Pedernal; y el caudal con probabilidad de excedencia del



85% para dos puntos del río en cada cuenca: en el río La Ligua, en la confluencia con el estero Los Ángeles y en la desembocadura; y en el río Petorca, en la confluencia con el estero Las Palmas y en la desembocadura. Esto, con la finalidad de evaluar la variación de la disponibilidad hídrica (en los casos de La Ligua, en Alicahue en Colliguay, y en Petorca, en Pedernal) y el caudal de dilución y ambiental en la cuenca (los dos puntos a nivel intermedio y de desembocadura). En la **Figura 32** se muestra el promedio de los seis GCM utilizados, donde el mayor déficit es del orden de 30% a 60%.

Se presenta también, el mapa con la variación relativa de los descensos de niveles piezométricos entre el período futuro y de control de los GCM, en donde los valores en rojo (azul) indican que en los escenarios futuros el descenso registrado es mayor (menor) que en el período histórico. Los descensos se han evaluado en la ubicación de pozos representativos en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca. La **Figura 33** indica que hay pozos extrayendo mayor recurso en el período futuro en comparación con el extraído en el período histórico, en las zonas intermedias de ambas cuencas. Aunque también, algunos pozos en la cuenca logran disminuir la cantidad de agua extraída.





Vulnerabilidad

Los cambios en Vulnerabilidad extrema de los caudales utilizados por los distintos usuarios se presentan en forma de diagramas de caja en el Anexo 9.2.4.2. Los valores corresponden a la máxima variación porcentual relativa de cada modelo climático respecto del período de control, expresada en términos de la media móvil cada seis meses. En este sentido, una variación positiva en la Vulnerabilidad corresponde a un aumento del déficit promedio de abastecimiento, lo cual representa una situación desfavorable en términos de disponibilidad hídrica. Se entrega un resumen de la variación de la Vulnerabilidad

para los distintos usuarios de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca en la **Tabla 11** y en la **Tabla 12**, considerando sólo fuentes de agua superficial y ambas fuentes de agua, respectivamente.

Mapas de Riesgos

En esta sección se muestran los mapas de Riesgos asociados a la variación de la Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para riego, agua potable y minería de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca. Los resultados se muestran en la **Figura 34** y en la **Figura 35**.

Tipo de usuario	Ríos / Canalistas	Variación Vulnerabilidad extrema					
		ACCESS1-3	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Riego	La Ligua con estero Los Ángeles	7%	18%	11%	7%	20%	5%
Riego	La Ligua con estero de La Patagua	-1%	10%	-3%	0%	8%	7%
Riego	La Ligua hasta desembocadura	6%	10%	-1%	-4%	17%	5%
Riego	Petorca con Río Sobrante	11%	24%	14%	-7%	38%	20%
Riego	Petorca con estero Las Palmas	-5%	7%	2%	-10%	29%	-4%
Riego	Petorca con estero Las Palmas	9%	11%	-1%	-3%	18%	8%
Minería	La Patagua	0%	7%	0%	0%	0%	0%
Minería	Cerro Negro	0%	0%	0%	0%	0%	0%

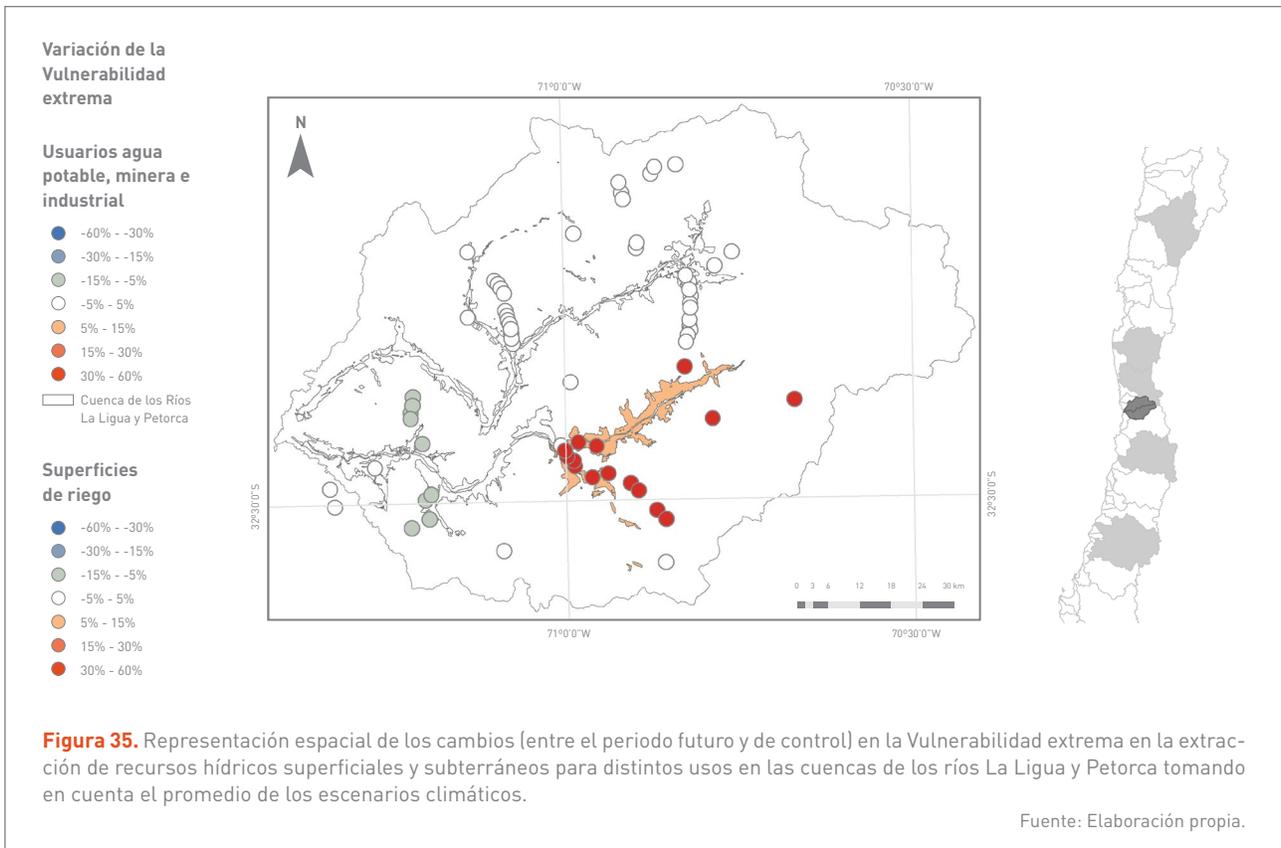
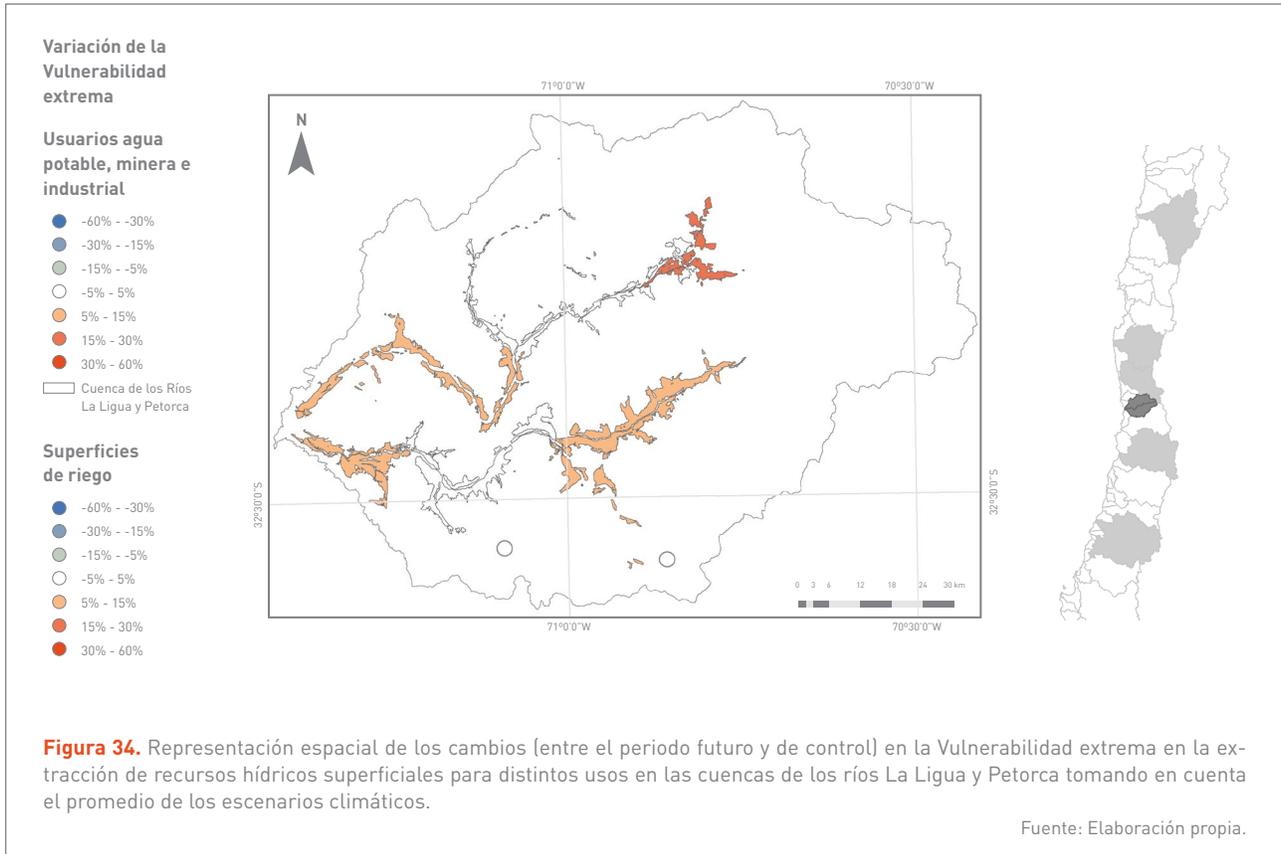
Tabla 11. Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, así como el caudal en desembocadura (sólo considera aguas superficiales).

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de usuario	Ríos / Canalistas	Variación Vulnerabilidad extrema					
		ACCESS1-3	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Riego	La Ligua con estero Los Ángeles	4%	11%	23%	-6%	33%	7%
Riego	La Ligua con estero de La Patagua	1%	10%	-6%	1%	-10%	1%
Riego	La Ligua hasta desembocadura	4%	8%	2%	-3%	-3%	7%
Riego	Petorca con Río Sobrante	0%	-3%	7%	-7%	-1%	-9%
Riego	Petorca con estero Las Palmas	4%	-2%	13%	-4%	-2%	-12%
Riego	Petorca con estero Las Palmas	6%	2%	8%	10%	-24%	-6%
APU	Cabildo	0%	0%	0%	0%	0%	0%
APU	Chincolco	0%	0%	0%	0%	0%	0%
APU	La Ligua	0%	0%	0%	0%	0%	0%
APU	Petorca	0%	0%	0%	0%	0%	0%
APR	La Ligua con estero Los Ángeles	61%	61%	61%	61%	63%	61%
APR	La Ligua con estero de La Patagua	0%	0%	-53%	0%	0%	0%
APR	La Ligua hasta desembocadura	0%	0%	0%	0%	28%	0%
APR	Petorca con Río Sobrante	0%	0%	0%	0%	0%	0%
APR	Petorca con estero Las Palmas	-12%	1%	-6%	-3%	31%	-1%
Minería	Cerro Negro	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Minería	Las Cenizas	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Minería	La Patagua	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 12. Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, así como el caudal en desembocadura (considera aguas superficiales y subterráneas).

Fuente: Elaboración propia.



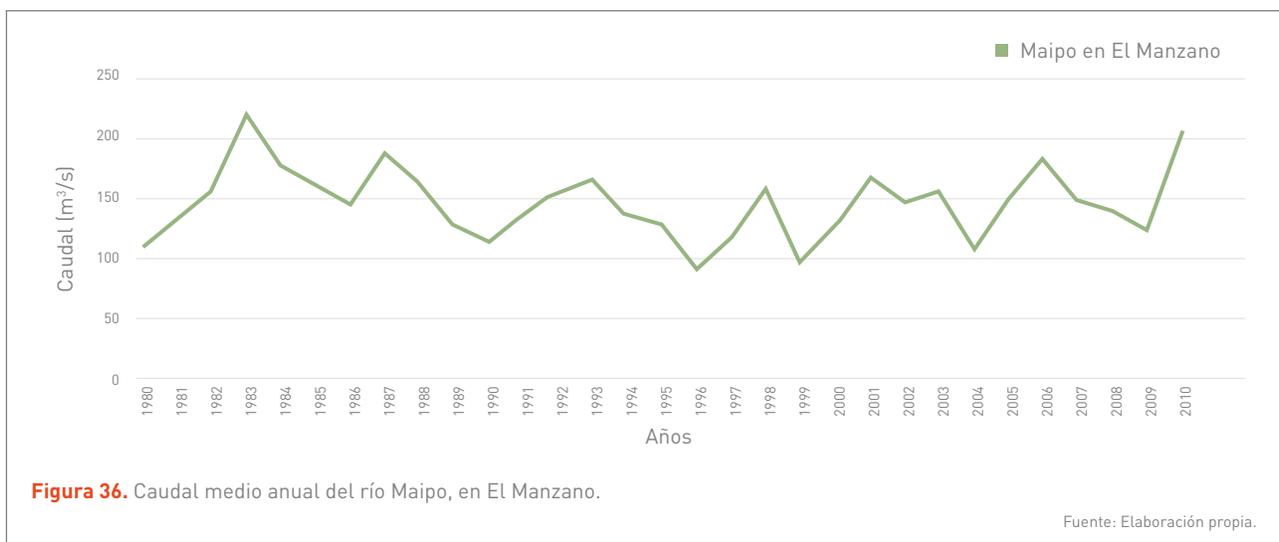
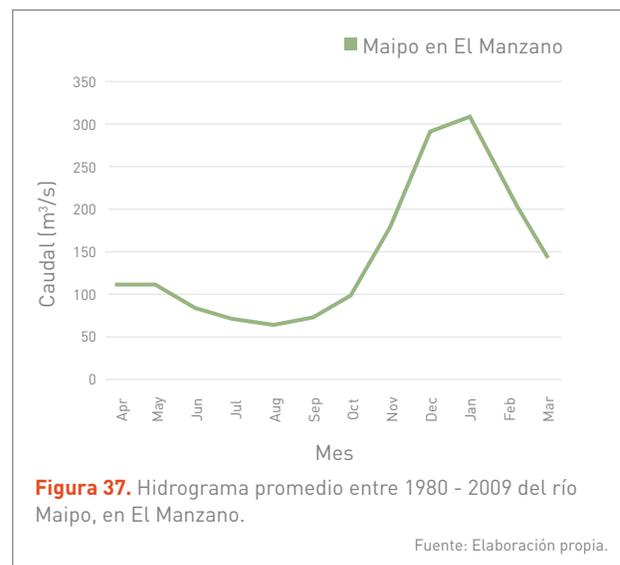
4.6 CUENCA DEL RÍO MAIPO

4.6.1 INTRODUCCIÓN Y VULNERABILIDAD HISTÓRICA

La cuenca del río Maipo se encuentra en la zona central del país, con un clima marcadamente mediterráneo (de estación seca prolongada), concentrando la mayor población y una importante actividad económica. Esta cuenca, de más de 15.000 km², tiene condiciones hidroclimáticas que se caracterizan por niveles intermedios de precipitación (en la zona del valle los valores son, aproximadamente, 300 mm al año), con alta variabilidad interanual y con predominio de suministro de agua en épocas de deshielo. La **Figura 36** y la **Figura 37** muestran la información hidrológica de base de esta cuenca. Una alta variabilidad en la disponibilidad de agua en la cuenca queda demostrada al comparar el caudal promedio anual, de 145,6 m³/s, con el caudal anual que se supera el 85% de los años (disponibilidad natural) equivalente a 107,5 m³/s (**Figuras 36** y **37**). El régimen nival queda de manifiesto en la **Figura 37**. Este régimen nival va dando paso a un régimen mixto, en la medida que la cuenca va recibiendo aporte de subcuencas menores (como la del río Mapocho) hasta llegar a la desembocadura al mar.

La agricultura de riego abarca una superficie de 136.000 hectáreas, alzándose como el principal usuario de aguas en la cuenca. Más del 60% de esta superficie es regada mediante sistemas superficiales, por lo que su nivel de eficiencia media bordea el 50% (Vicuña y Meza, 2012).

El segundo usuario más importante, en términos de volumen, corresponde al uso de agua para consumo humano, concentrado de manera importante en la ciudad de Santiago. Adicionalmente, existe consumo de agua para la generación de hidroelectricidad (en la cordillera y en la zona del valle, asociada a la operación de canales de riego) y para actividades mineras.

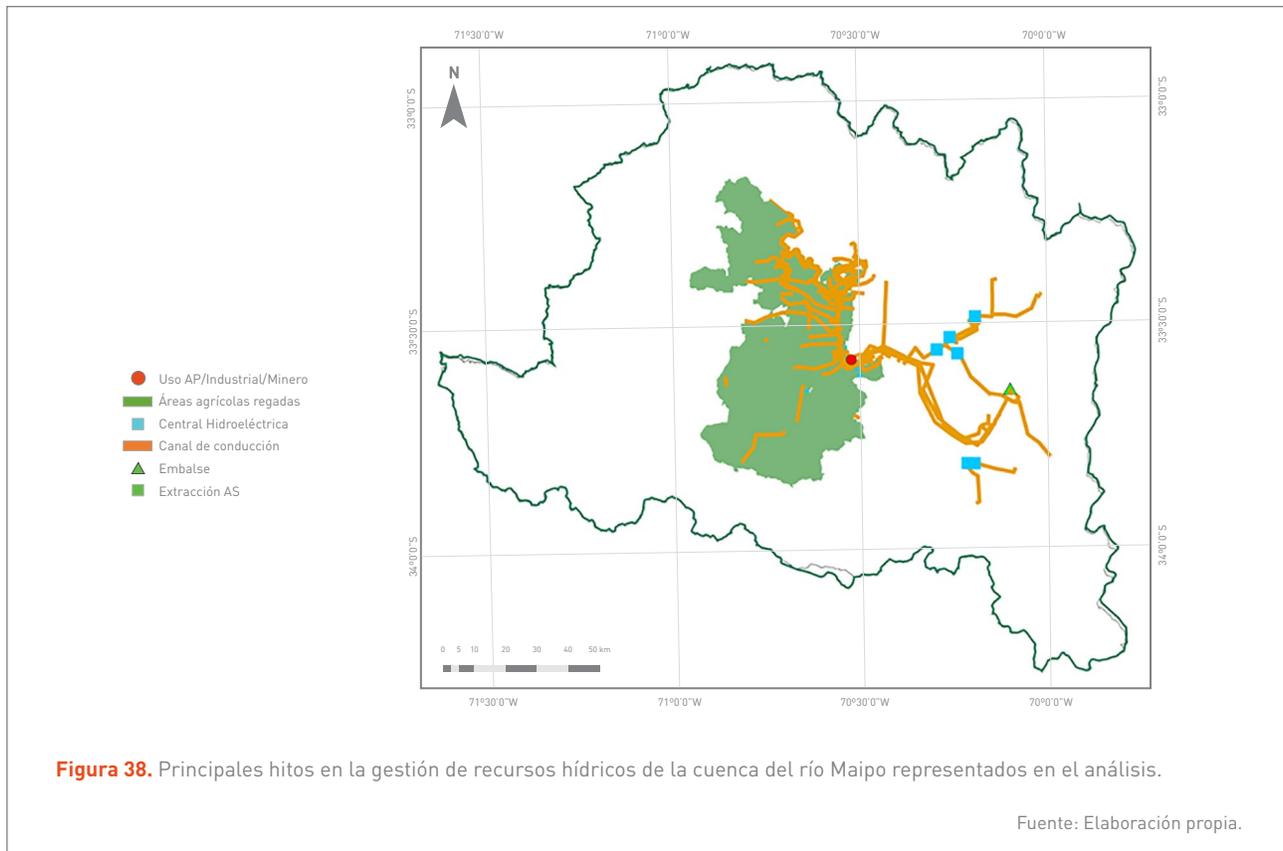




La gestión de los recursos hídricos está dividida en secciones de río que son administradas por juntas de vigilancia, existiendo tres de estas para el río Maipo y cinco para el río Mapocho. En cada sección, la distribución de recursos se realiza a través de la prorrata del agua disponible en el río. El suministro de agua potable para la ciudad de Santiago (y otras localidades cercanas) lo realizan empresas sanitarias que tienen distintas concesiones de suministro. La empresa Aguas Andinas es la principal de las concesionarias, abasteciendo a cerca de seis millones de habitantes en Santiago. Aguas Andinas suministra agua a la población a través de tres fuentes principales: los recursos hídricos de los ríos Maipo y Mapocho, y la disponibilidad de aguas subterráneas. El río Maipo es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad, especialmente, en la zona sur de la ciudad, tal como lo muestra la **Figura 38**. Este abastecimiento se logra a través de la disponibilidad de agua en el río Maipo (sector El Manzano, donde le empresa posee, aproximadamente, el 13 % de los derechos),

las descargas desde la Laguna Negra y el agua acumulada en la principal obra de regulación en la cuenca, el Embalse El Yeso, con una capacidad de almacenamiento de 225 Mm³ (Vicuña *et al.*, 2018). La actividad agrícola está distribuida en distintas zonas de la cuenca, destacándose la actividad de las asociaciones de canalistas de la primera sección de la cuenca, que poseen del orden de 173.432 hectáreas de área de influencia (Meza *et al.*, 2012). Finalmente, es importante destacar que existe una importante capacidad de generación hidroeléctrica en la cuenca, con un total de 333 MW instalados de potencia (271 MW ubicados en la zona de cordillera y 62 MW ubicados en los canales de regadío de la 1ª sección del río Maipo). La **Figura 38** muestra los principales hitos asociados a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Maipo, que son representados en el modelo analizado.

En el Anexo 9.2.5.1 se presentan los caudales de agua utilizados por las distintas asociaciones de canalistas pertenecientes a la 1ª sección del río Maipo, el agua suministrada



por el río Maipo para las necesidades de agua potable de la ciudad de Santiago (tratadas en el complejo Las Vizcachas) y el agua utilizada por las centrales hidroeléctricas de la cuenca. Se puede apreciar que, con excepción del suministro a la ciudad de Santiago, existe una relación directa entre la alta variabilidad en la disponibilidad de recursos (en términos de caudal) y la variabilidad en el suministro para distintos usuarios. Esto se refleja en los niveles de Vulnerabilidad del suministro para los distintos usuarios, tal como se presenta en la **Tabla 13**.

4.6.2 VULNERABILIDAD Y RIESGOS FUTUROS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la cuenca del río Maipo en términos de caudales de agua utilizados por los distintos usuarios: producción de agua potable de parte de la empresa sanitaria Aguas Andinas, las centrales hidroeléctricas y asociaciones de canalistas,

pertenecientes a la junta de vigilancia de la primera sección del río Maipo.

Se muestran los valores de Vulnerabilidad extrema definidos en la sección 3.5 y la variación de los caudales simulados en el río Maipo, en El Manzano. Estos indicadores se calculan a partir de las simulaciones de los modelos hidrológicos, utilizando las series climáticas de los seis GCM mencionados en la sección 2.2. Los resultados son presentados en función de la variación relativa del clima futuro (2035 - 2064) con respecto al período de control (1980 - 2009).

Variación de caudales

La variación de la disponibilidad del caudal del río Maipo, en El Manzano, se obtiene en términos de la diferencia relativa (futuro menos control, dividida por control), tanto para el caudal mensual promedio como para el caudal anual promedio, considerando el período futuro de cada

Tipo de usuario	Usuario	Déficit medio (m³/s)	Vulnerabilidad máxima
Agricultura	SCM	4,02	42%
	ACM	2,88	48%
	Pirque	1,16	52%
	ACUB	1,41	45%
	Huidobro	1,14	48%
	Lo Herrera	0,09	48%
	Isla Lonquén	0,09	48%
Agua potable	Aguas Andinas	0,00	0%
Hidroelectricidad Cordillera	Central Queltehues	2,43	30%
	Central Volcán	1,33	43%
	Central Alfalfal	5,17	72%
	Central Maitenes	1,82	57%
Hidroelectricidad Valle	Central Puntilla	1,59	20%
	Central Florida	3,78	47%
	Central Bajos de Mena	1,89	18%
	Central CAEMSA	1,89	18%
	Central Los Morros	2,58	65%

Tabla 13. Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Maipo en período histórico (1980 - 2009).

Fuente: Elaboración propia.



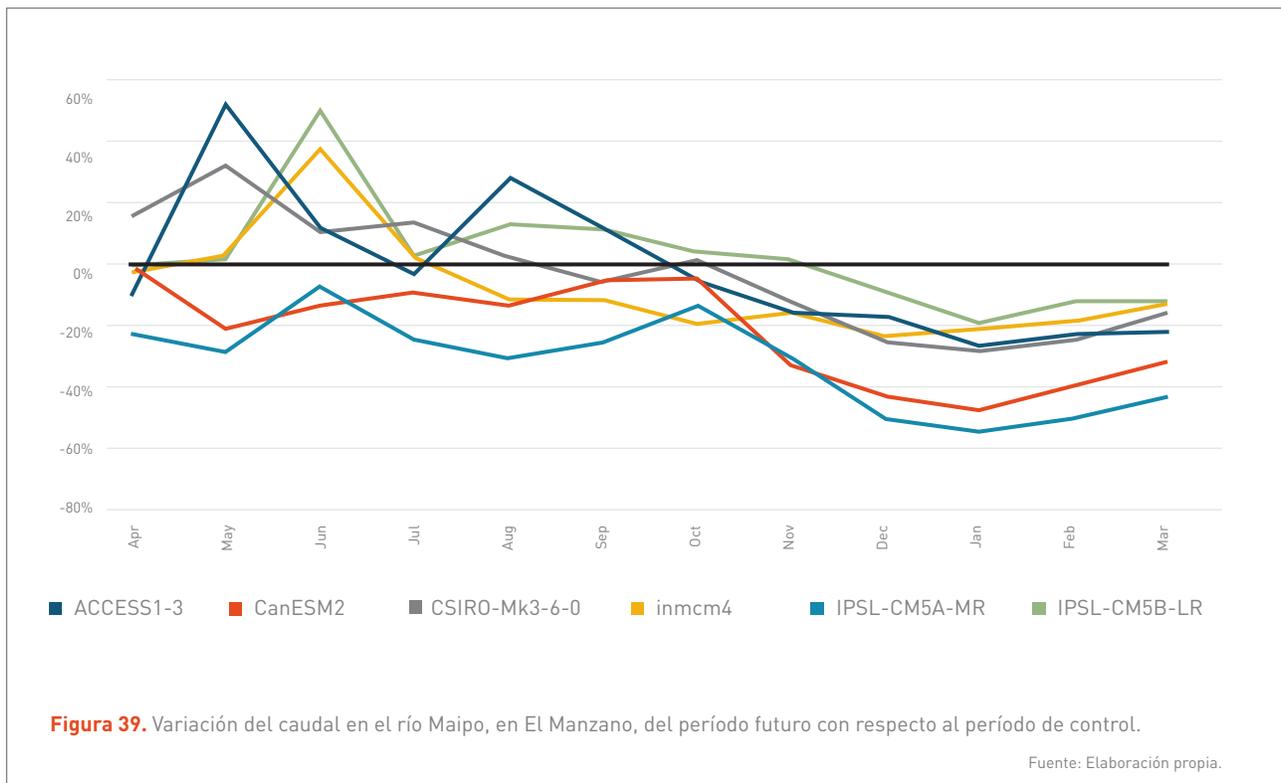
modelo climático o GCM, respecto del período de control (**Figura 39**). Se aprecia una reducción en el caudal anual en todos los escenarios climáticos. En el escenario climático más extremo se presenta una reducción del orden de 30% en el caudal anual. A nivel mensual, se observan reducciones importantes en los meses de primavera y de verano y, en algunos escenarios, se aprecian aumentos en los caudales en los meses de otoño e invierno, un efecto esperable como consecuencia del aumento de temperatura en una cuenca de tipo nival.

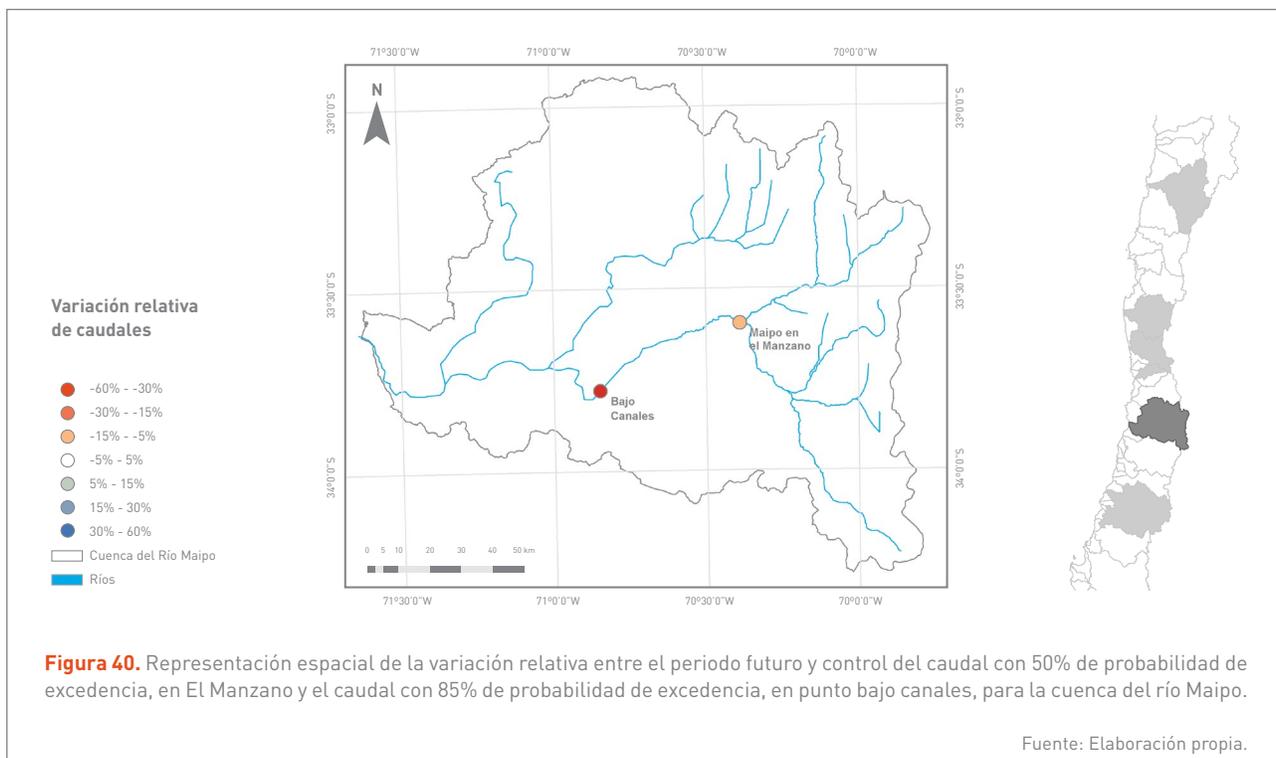
Asimismo, se obtiene la variación relativa de caudales de la serie futura (2035 – 2064) en comparación con la serie histórica (1980 – 2009) de cada escenario de los GCM. Se evalúa el caudal con 50% de probabilidad de excedencia en río Maipo, en El Manzano, y el caudal con probabilidad de excedencia del 85% para un punto del río en la cuenca, debajo de los canales. Esto, con la finalidad de evaluar la variación de la disponibilidad hídrica (en el caso de Maipo, en el Manzano) y el caudal de dilución y ambiental en la cuenca (en un punto intermedio en la cuenca). En la **Figura**

40 se muestra el promedio de los seis GCM utilizados, evidenciando la mayor reducción de caudal del orden de 30% a 60%.

Vulnerabilidad

Los cambios en la Vulnerabilidad extrema de los caudales utilizados por los distintos usuarios en la cuenca se presentan en forma de diagramas de caja en el Anexo 9.2.5.2. Los valores corresponden a la variación porcentual relativa de cada modelo climático para el período futuro respecto del período de control. En este sentido, una variación positiva en la Vulnerabilidad corresponde a un aumento del déficit promedio de abastecimiento, lo cual representa una situación desfavorable en términos de disponibilidad hídrica. Al igual que en el caso de la confiabilidad, se entrega un resumen de la variación de la Vulnerabilidad para los distintos usuarios del río Maipo en la **Tabla 14**, considerando sólo las fuentes de agua superficial.





		Variación Vulnerabilidad extrema					
		ACCESS1-3	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Agua Potable	Aguas Andinas	21%	32%	26%	-4%	58%	22%
Hidroelectricidad - Cordillera	Central Queltehues	-16%	19%	18%	-12%	19%	-6%
Hidroelectricidad - Cordillera	Central Volcán	-18%	-12%	-15%	-20%	-10%	-9%
Hidroelectricidad - Cordillera	Central Alfalfal	-25%	-19%	-32%	-42%	-13%	-42%
Hidroelectricidad - Cordillera	Central Maitenes	-12%	5%	-2%	1%	6%	-16%
Asociación de Canalistas	Sociedad del Canal de Maipo	7%	25%	16%	-2%	40%	-3%
Asociación de Canalistas	Asociación de Canalistas del Maipo	6%	27%	16%	0%	39%	3%
Asociación de Canalistas	Asociación de Canalistas de Pirque	7%	27%	17%	-2%	40%	2%
Asociación de Canalistas	Asociación de Canalistas Unidos de Buin	10%	30%	14%	2%	42%	2%
Asociación de Canalistas	Asociación de Canalistas Canal Huidobro	6%	27%	16%	0%	39%	3%
Asociación de Canalistas	Asociación de Canalistas Lo Herrera	6%	27%	17%	-3%	40%	3%
Asociación de Canalistas	Asociación de Canalistas Isla-Lonquén	7%	26%	15%	-1%	40%	3%

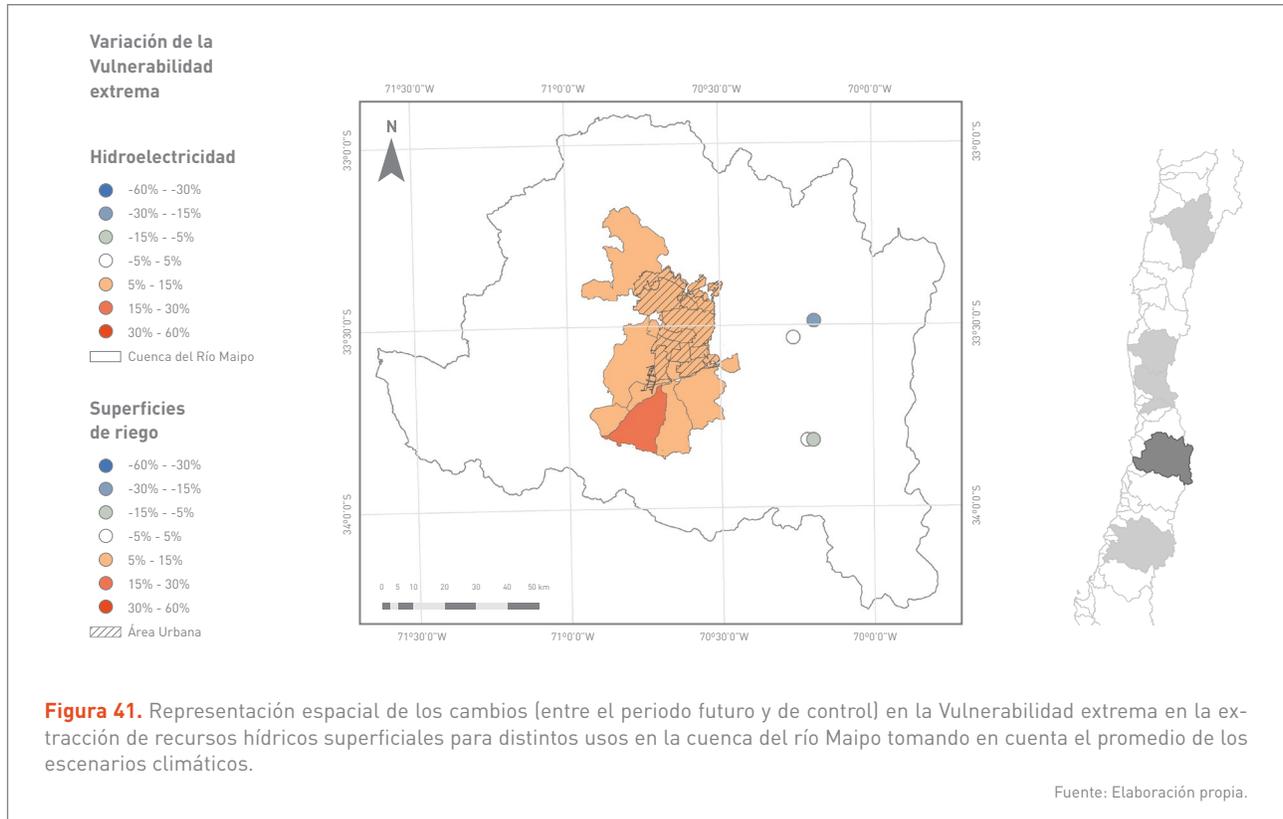
Tabla 14. Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios en la cuenca del río Maipo.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa de Riegos

En esta sección se presenta el mapa asociado a la variación de Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para riego, hidroelectricidad y agua potable de la cuenca del río Maipo. Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 41**.



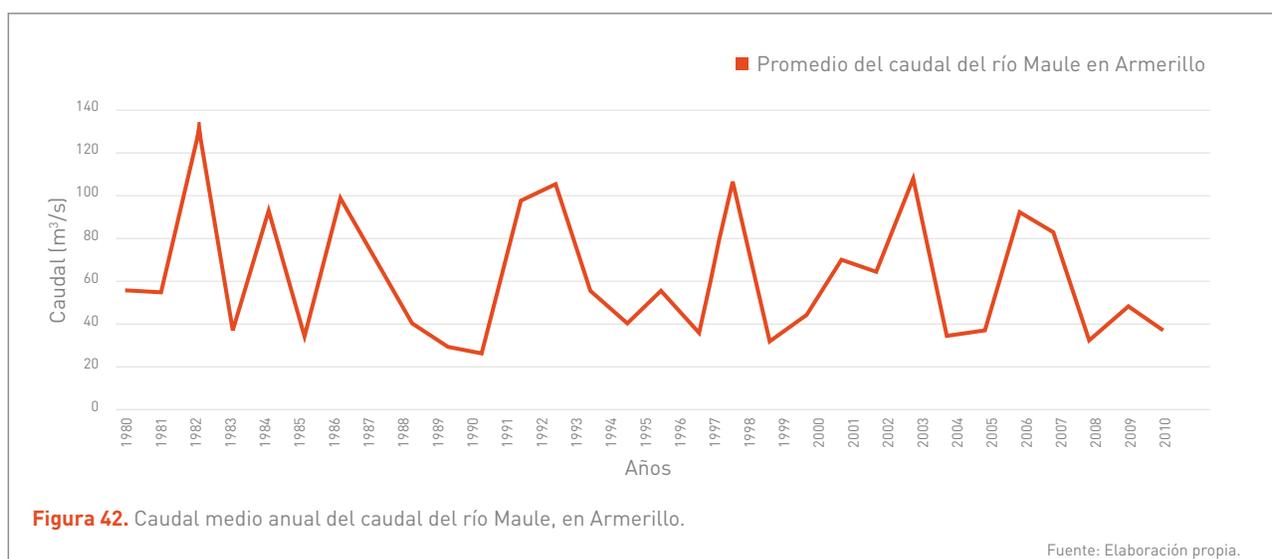
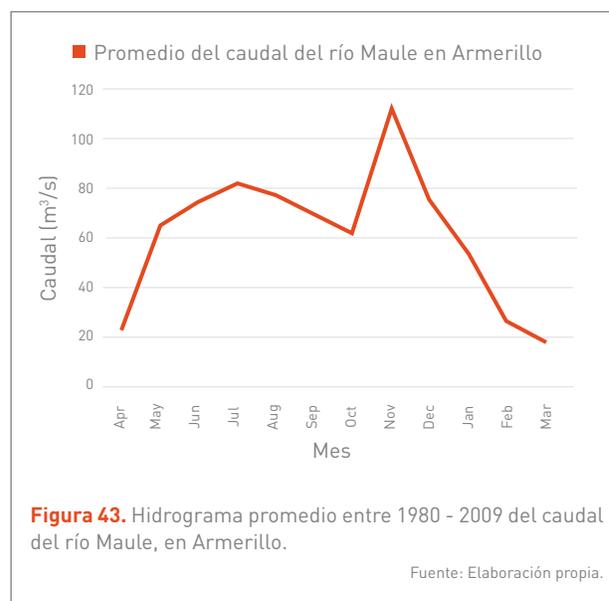
4.7 CUENCA DEL RÍO MAULE

4.7.1 INTRODUCCIÓN Y SENSIBILIDAD HISTÓRICA

La cuenca del río Maule se encuentra en la Región del Maule, en el centro sur de Chile. Tiene una superficie de poco más de 20.000 km² y un clima mediterráneo templado típico de esta zona. Las precipitaciones son superiores a los 700 mm (en la zona del valle) y la variabilidad interanual es menor (Chadwick *et al.*, 2018), con un caudal promedio anual (89,8 m³/s) correspondiente a dos veces el caudal anual que se supera el 85% de los años (disponibilidad natural), equivalente a 44,3 m³/s (Figura 42). El régimen del río Maule es principalmente nival, es decir, su máximo caudal se observa en épocas de deshielo (octubre - enero), pero también presenta importantes crecidas en respuesta a las lluvias invernales (Figura 43).

En esta cuenca coexisten dos usuarios principales: la hidroelectricidad y la agricultura de riego. Las centrales de generación hidroeléctrica en el Maule tienen una capacidad total del orden de 1.600 MW, lo que corresponde a casi un cuarto de toda la capacidad de generación hidroeléctrica en el país¹. Por otra parte, la actividad agrícola, con

sus más de 240.000 hectáreas, representa más del 20% de terrenos agrícolas bajo riego en Chile (Censo Agropecuario, 2007). Existen importantes obras hidráulicas de regulación asociadas al sistema del río Maule, dentro de las que destacan la Laguna del Maule (1.400 Mm³), embalse de cabecera destinado a la acumulación de agua de riego y gestionado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH); y el sistema de embalses Colbún-Machicura (1.500 Mm³) para la generación de energía, ubicado en la zona media de la cuenca.



¹ <http://energiaabierta.cl/>

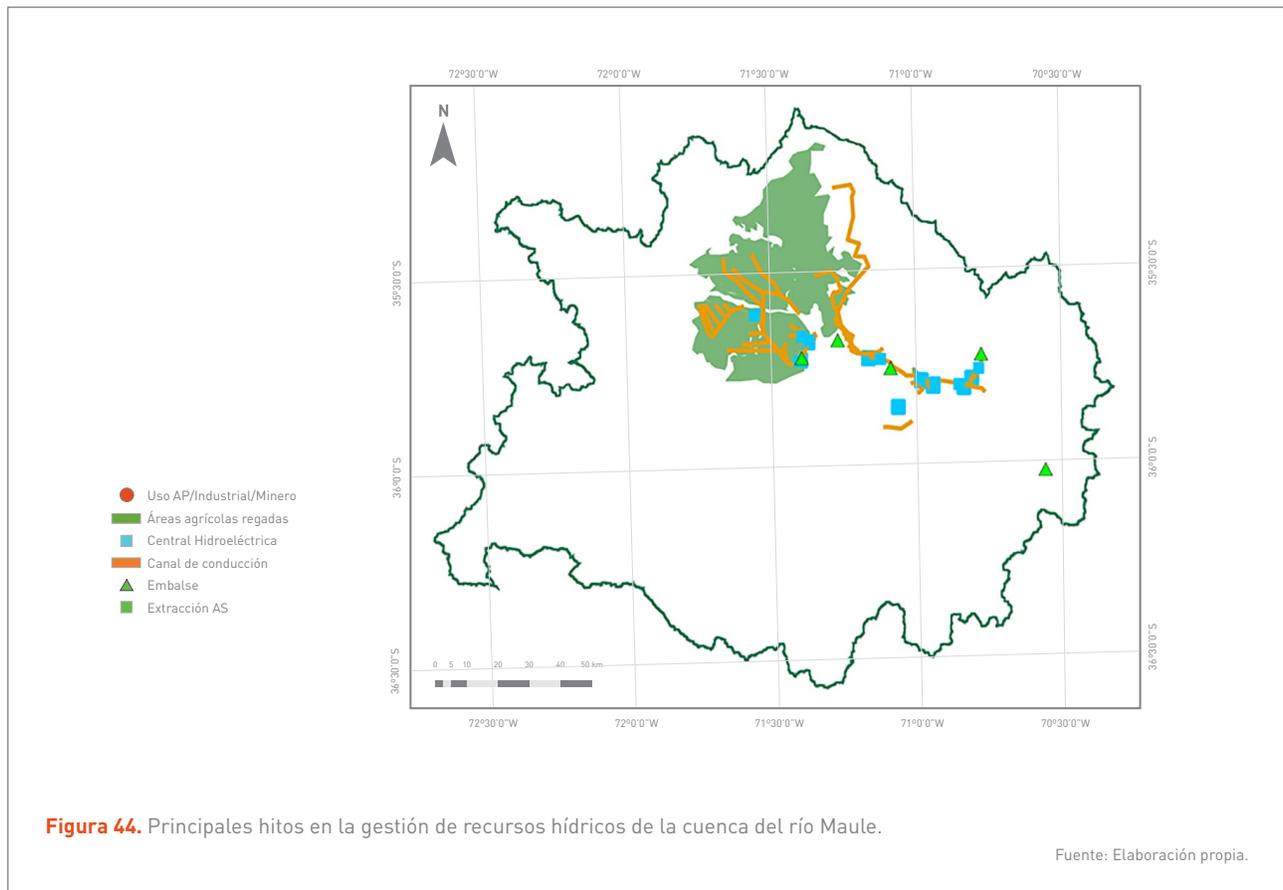


La distribución de recursos hídricos en la cuenca del río Maule se realiza a través de una serie instrumentos legales, que apuntan a normar y establecer las reglas de operación del sistema de embalses y DAA en la cuenca (Vicuña y Meza, 2012). El primero es el convenio Riego-ENDESA, suscrito en el año 1947, entre la Dirección de Riego (actual Dirección de Obras Hidráulicas) y la entonces estatal ENDESA. Este convenio establece las normas de operación de la Laguna del Maule, determinando según el volumen acumulado, las porciones correspondientes a la agricultura y a la generación hidroeléctrica. Posteriormente, la Dirección General de Aguas, en su Resolución 105/83, establece los caudales destinados a la agricultura, siguiendo una dotación mensual que presenta un máximo en los meses de verano, coincidiendo con la demanda del sector agrícola en la fecha en que se suscribió dicho convenio. El agua disponible que excede estas necesidades se almacena en el embalse Colbún para, posteriormente, ser utilizada en la generación de electricidad. La **Figura 44** muestra los principales hitos asociados a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Maule.

En el Anexo 9.2.6.1 se presentan los caudales de agua utilizados por las distintas asociaciones de canalistas, pertenecientes a la Junta de Vigilancia del río Maule; el agua utilizada por las centrales hidroeléctricas de manera directa y el agua que almacena en los embalses con capacidad de generación eléctrica. Se observa que la variabilidad en el suministro de agua es más evidente en el caso de la operación de las centrales hidroeléctricas, siendo más constante el suministro en el caso de las asociaciones de canalistas. Esto se refleja en los niveles de Vulnerabilidad del suministro para los distintos usuarios, tal como se presenta en la **Tabla 15**.

4.7.2 VULNERABILIDAD Y RIESGOS FUTUROS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la cuenca del río Maule en términos de caudales de agua utilizados por las distintas asociaciones de canalistas, pertenecientes a la Junta de Vigilancia del Río Maule, el caudal



Tipo de usuario	Usuario	Déficit medio (m³/s)	Vulnerabilidad máxima
Hidroelectricidad	Central Cipreses	8,61	66%
	Central Isla	12,62	69%
	Central Curilinque	12,62	69%
	Central Loma alta	13,50	63%
	Central Pehuenche	48,53	60%
	Central Colbún	64,01	68%
	Central Machicura	64,01	68%
	Central Chiburgo	2,49	42%
	Central San Ignacio	63,96	79%
Agricultura	A. Canal Maule	5,46	59%
	A. Canalistas Maule Sur	3,62	42%
	Cooperativa de Riego	4,21	42%
	Canalistas Las Garzas y Las Suizas	0,05	23%
	Particulares Ribera Norte	0,09	39%
	Particulares Ribera Sur	0,42	42%
	SORPAM	2,99	42%

Tabla 15. Indicadores de desempeño para distintos usuarios de la cuenca del río Maule en período histórico (1980 - 2009).

Fuente: Elaboración propia.

utilizado por las centrales hidroeléctricas y el caudal del río Maule en Armerillo. Se muestran los valores de Vulnerabilidad definido en la sección 3.5 y la variación de los caudales simulados en el río Maule, en Armerillo. Este indicador se calcula a partir de las simulaciones de los modelos hidrológicos, utilizando las series climáticas de los seis GCM mencionados en la sección 2.2. Los resultados son presentados en función de la variación relativa del clima futuro (2035 - 2064) con respecto al período de control (1980 - 2009).

Variación de caudales

La variación de la disponibilidad del caudal del río Maule, en Armerillo, se obtiene en términos de la diferencia relativa (futuro menos control, dividida por control), tanto para el caudal mensual promedio como para el caudal anual promedio, considerando el período futuro de cada modelo climático o GCM, respecto del período de control. Estos resultados se muestran en términos de la variación mensual y anual en la **Figura 45**. Se observa una reducción en el caudal anual en cinco de los seis escenarios climáticos. En el escenario climático más extremo se presenta una reducción del orden de 50% en el caudal anual. A nivel mensual, las variaciones son similares al cambio anual.

Asimismo, se obtiene la variación relativa de caudales de la serie futura (2035 - 2064) en comparación con la serie histórica (1980 - 2009) de cada escenario de los GCM. Se evalúa el caudal con 50% de probabilidad de excedencia en Maule, en Armerillo, y el caudal con probabilidad de excedencia del 85% para dos puntos del río en la cuenca, Maule medio y en Maule bajo Colbún. Esto, con la finalidad de evaluar la variación de la disponibilidad hídrica (en el caso de Maule, en Armerillo) y el caudal de dilución y ambiental en la cuenca (los dos puntos a nivel intermedio). En la **Figura 46** se muestra el promedio de los seis GCM utilizados, evidenciando una reducción de caudal del orden de 15% a 30% en el futuro, en Maule en Armerillo y bajo Colbún.

Vulnerabilidad

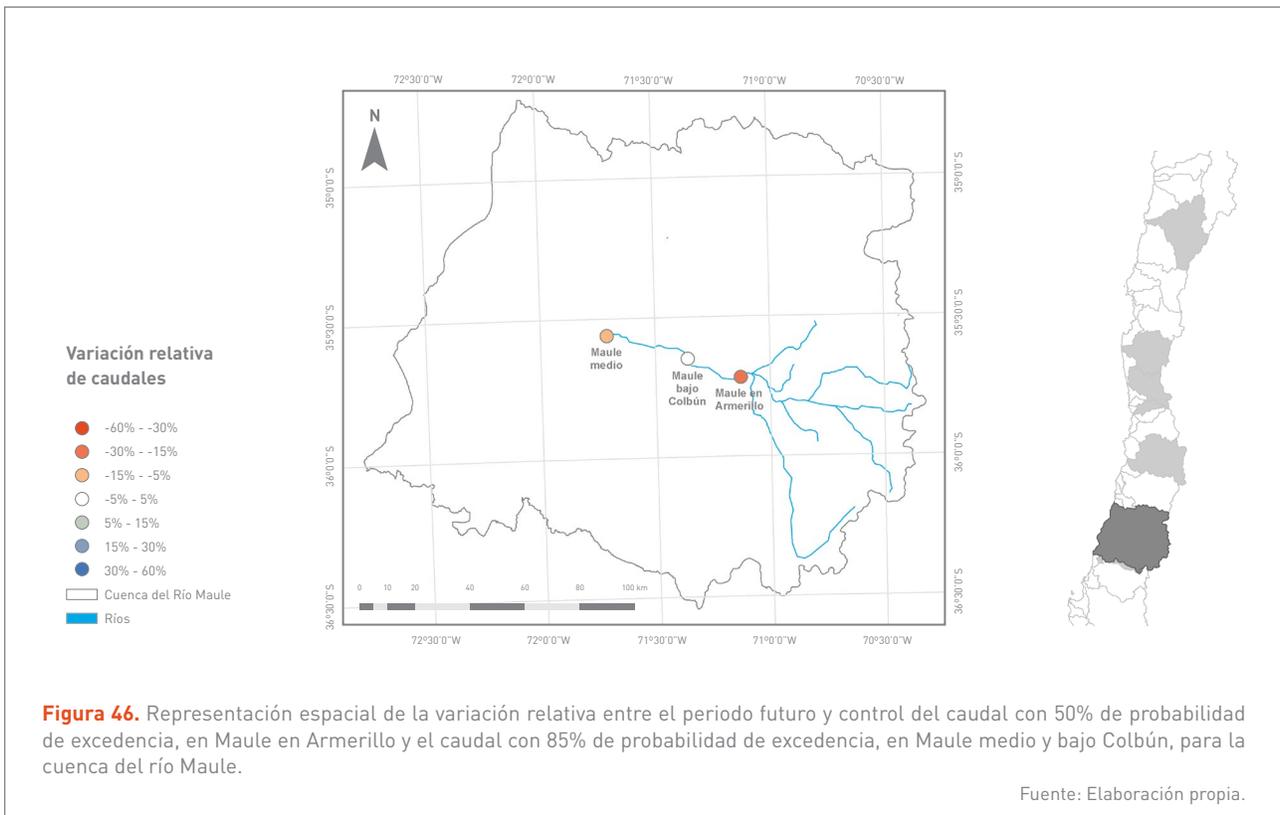
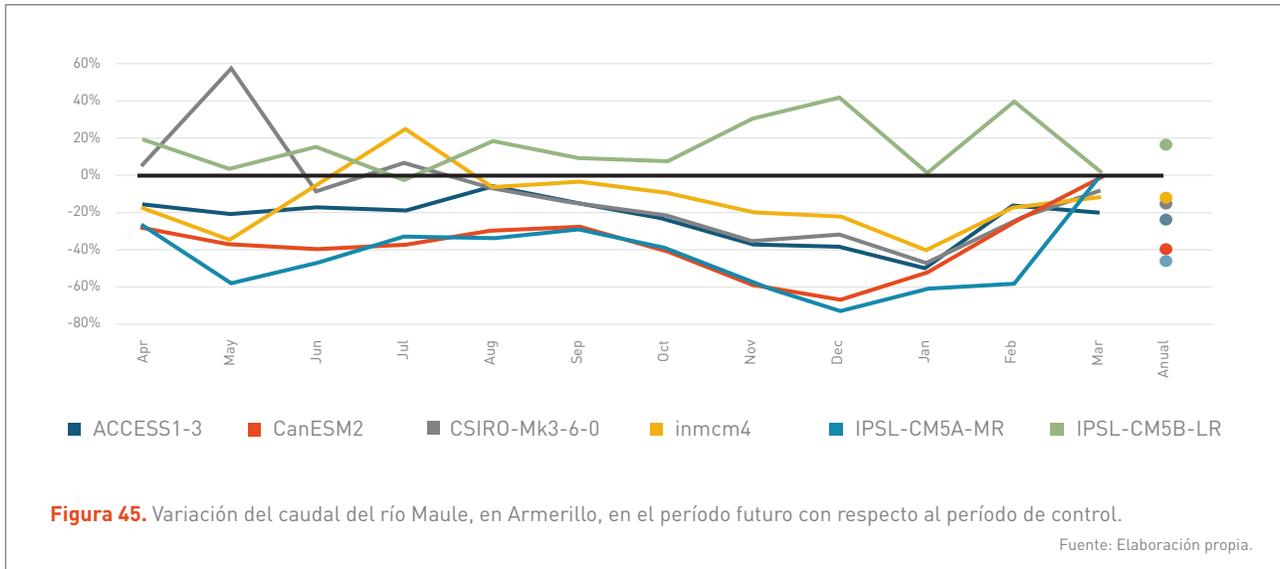
Los cambios en Vulnerabilidad extrema de los caudales utilizados para la generación hidroeléctrica y para riego se presentan en forma de diagramas de caja en el Anexo 9.2.6.2. Los valores corresponden a la variación porcentual relativa de cada modelo climático respecto del período de control. En este sentido, una variación positiva en la Vulnerabilidad corresponde a un aumento del déficit pro-



medio de abastecimiento, lo cual representa una situación desfavorable en términos de disponibilidad hídrica. El único cambio relevante es que el aumento en la Vulnerabilidad máxima (Tabla 16) en el uso de agua para riego es mayor que el aumento en la Vulnerabilidad máxima en el uso de agua para generación de electricidad.

Mapa de Riesgos

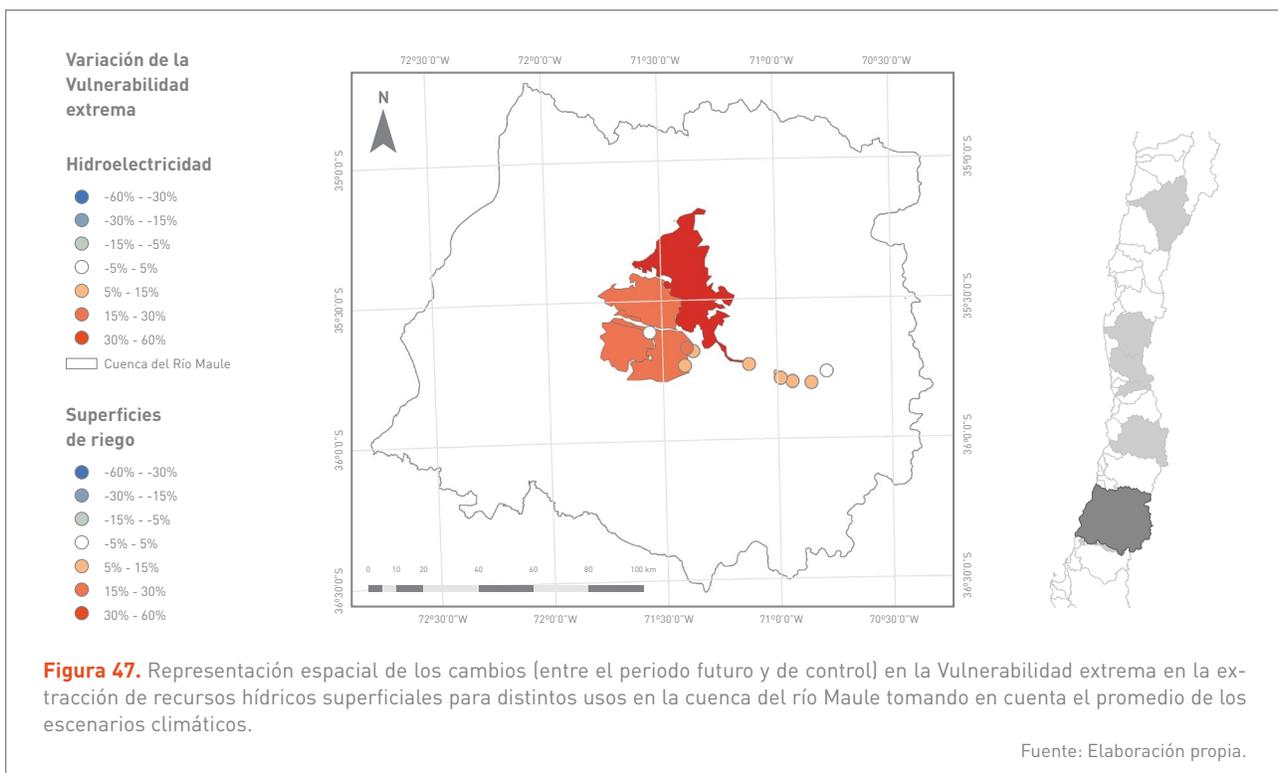
En esta sección se presenta el mapa asociado a la variación de la Vulnerabilidad extrema en los caudales disponibles para riego e hidroelectricidad de la cuenca del río Maule. Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 47**.



Tipo de usuario	Ríos / Canalistas	Variación Vulnerabilidad extrema					
		ACCESS1-3	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0	inmcm4	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR
Hidroelectricidad	Cipreses	-3%	10%	-1%	-1%	3%	0%
Hidroelectricidad	Isla	6%	13%	6%	9%	22%	16%
Hidroelectricidad	Curilinqué	6%	13%	6%	9%	22%	16%
Hidroelectricidad	Loma alta	10%	16%	9%	6%	27%	16%
Hidroelectricidad	Pehuenche	2%	20%	11%	3%	27%	6%
Hidroelectricidad	Colbún	11%	23%	-4%	8%	22%	16%
Hidroelectricidad	Machicura	11%	23%	-4%	8%	22%	16%
Hidroelectricidad	Chiburgo	4%	37%	22%	4%	42%	12%
Hidroelectricidad	San Ignacio	2%	4%	-9%	-5%	3%	1%
Riego	A. Canal Maule	8%	56%	44%	38%	56%	26%
Riego	A. Canalistas Maule Sur	4%	37%	22%	4%	42%	12%
Riego	Cooperativa de Riego	4%	37%	22%	4%	41%	12%
Riego	Canalistas Las Garzas y Las Suizas	4%	37%	11%	5%	23%	12%
Riego	Particulares Ribera Norte	4%	37%	19%	4%	34%	12%
Riego	Particulares Ribera Sur	4%	37%	22%	4%	42%	12%
Riego	SORPAM	4%	37%	22%	4%	41%	12%

Tabla 16. Variación de la Vulnerabilidad extrema entre el período futuro y de control en el uso de recursos para distintos usuarios en la cuenca del río Maule.

Fuente: Elaboración propia.





684

595

1029

1020



5 DESAFÍOS FUTUROS

Existe una serie de desafíos respecto del análisis de Riesgos asociados a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. Estos desafíos se plantean como brechas que el trabajo este grupo no pudo resolver.

Entre ellas, las asociadas a las limitaciones de la metodología empleada, que -para ser superadas- deben considerar cambios en la misma. Ejemplos de estas brechas son las siguientes:

- > La metodología no permite analizar los impactos de la ocurrencia de eventos extremos sobre la operación de los sistemas de regulación, captación y distribución de recursos hídricos. Lamentablemente, los análisis realizados por el grupo de trabajo de Hidrología incluyen análisis sobre infraestructura hidráulica distinta a la relevante en la distribución de recursos hídricos (ej. protección de cauces y evacuación de aguas lluvias).
- > La metodología está acotada a la representación de usuarios, a partir de cierta magnitud relevante para poder ser representados en un modelo de gestión de

recursos hídricos. Usuarios a menor escala (ej. canales de distribución secundarios o pequeños usuarios de aguas subterráneas) no son representados en el modelo y, por lo tanto, no pueden realizarse análisis de Riesgos.

- > La metodología no considera el uso final de los recursos hídricos, por lo cual no se puede estimar una Sensibilidad respecto de esos consumos, sino que sólo una Sensibilidad respecto de la posibilidad de extraer recursos hídricos.

Otras brechas tienen relación con la disponibilidad de herramientas para poder implementar la metodología en todo todas las cuencas del país. Por el momento se contaba con modelos para siete cuencas relevantes en el país, pero existen muchas cuencas que no han sido consideradas en el análisis. Es de esperar que en la medida que en el corto-mediano plazo se incluyan más cuencas en el proceso de desarrollo de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica que la DGA se encuentra liderando.



6

CONCLU- SIONES

Se presenta en este informe la versión final de la metodología que se utiliza para el análisis de Riesgos asociados al suministro de recurso hídricos en Chile. El enfoque metodológico requiere de la existencia de herramientas que permitan representar la acumulación y posterior distribución de recursos hídricos, incluyendo obras hidráulicas como embalses, canales, centrales hidroeléctricas y pozos de bombeo. Requiere, adicionalmente, la capacidad de generar las condiciones hidrológicas en un escenario histórico y en escenarios de cambio climático.

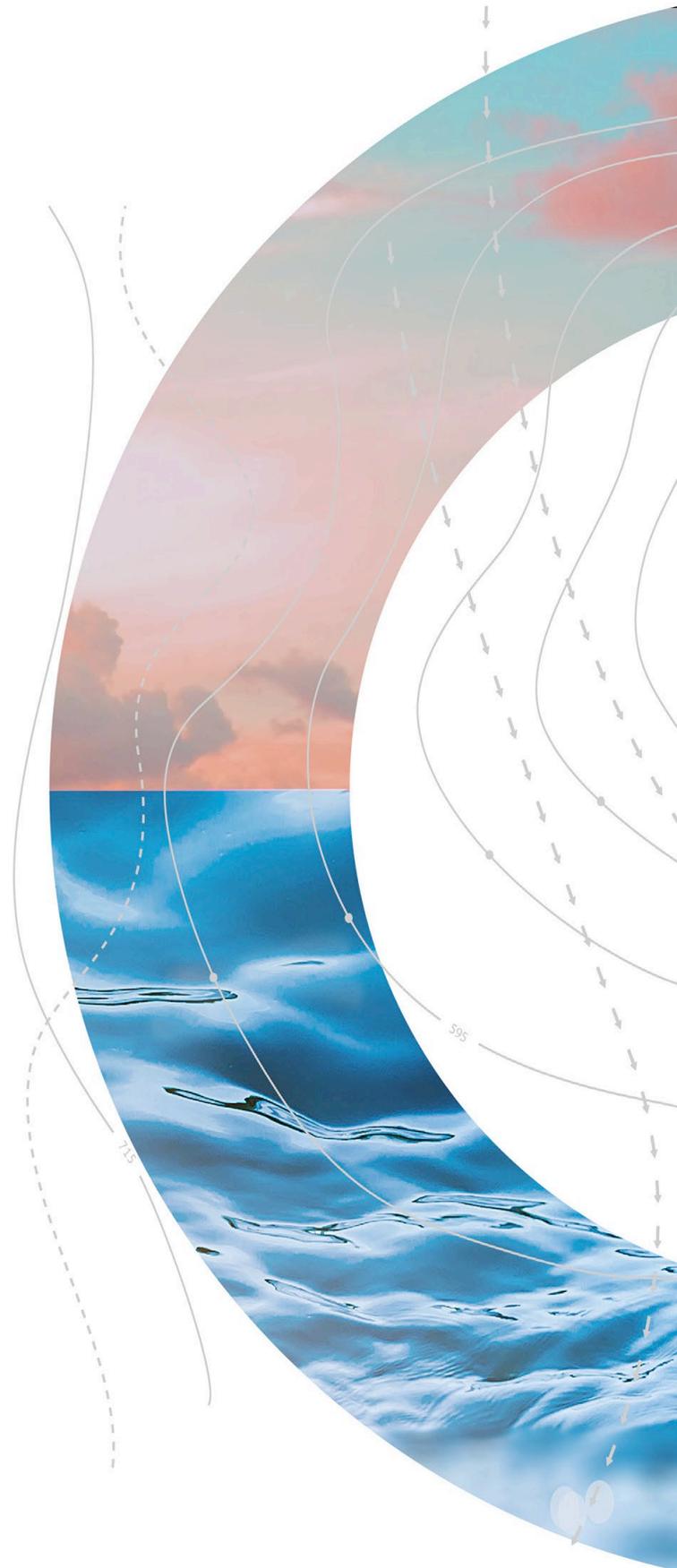
En esta entrega, se presentan los resultados para siete cuencas (Copiapó, Limarí, Choapa, La Ligua, Petorca, Maipo y Maule), cuyos modelos se encuentran en etapa de desarrollo final en el marco de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica de la Dirección General de Aguas. Versiones no finalizadas de estos modelos han sido utilizados en este estudio. Estas cuencas representan una variabilidad en condiciones climáticas, tipos de usuarios y de condiciones de gestión de los recursos que permite destacar conclusiones interesantes respecto de las condiciones de Sensibilidad climática bajo escenarios históricos y futuros. Esta Sensibilidad se mide a través de la capacidad (o incapacidad) de extraer recursos hídricos por distintos

tipos de usuarios (riego, agua potable, hidroelectricidad, minería, industria). Cada vez que la extracción es menor al requisito operacional existe una Vulnerabilidad.

Las conclusiones que se pueden establecer de los análisis realizados son los siguientes:

- > El desempeño histórico (período 1980 - 2009) de la distribución de recursos hídricos para distintos usuarios muestra diferencias importantes. En general, el desempeño de los usuarios de agua potable y minería tienen una baja Vulnerabilidad extrema (en muchos casos 0%). La presencia de embalses ayuda a mejorar la Vulnerabilidad del desempeño.
- > Respecto de los escenarios futuros, en términos generales, se aprecia una disminución de caudales anuales en casi todos los escenarios climáticos, afectando la disponibilidad de recursos hídricos. Pero, destacan algunos escenarios climáticos en los que el caudal anual aumenta. A nivel mensual, se aprecia que la señal es más heterogénea, existiendo aumentos y disminuciones en los caudales.

- > Asociado a esta disminución en la disponibilidad de recursos hídricos se aprecia, en general, un empeoramiento en el desempeño de casi todos los sistemas.
- > El uso de aguas subterráneas aparece como un mecanismo de adaptación directo al que pueden recurrir usuarios con acceso a estos recursos. Esto implica un aumento de su uso en el tiempo y, por ende, pueden verse restringidos en el largo plazo si este consumo adicional supera la capacidad de recarga de los acuíferos.
- > Dicho aumento de extracción de agua subterránea tiene un límite asociado a la condición inicial de niveles piezométricos, a las condiciones hidroclimáticas de recarga, a los derechos de aprovechamiento de agua subterránea de los usuarios de agua, a la profundidad de extracción de los pozos respecto de los descensos conjuntos en las zonas de extracción, a los coeficientes de almacenamiento y rendimiento del acuífero, entre otras propiedades hidrogeológicas de los acuíferos, por lo que el aprovechamiento del acuífero no es ilimitado.







7 AGRADE- CIMIENTOS

Se agradece a las siguientes personas (consultoras) por el apoyo con los modelos utilizados para el desarrollo del presente informe: Eduardo Rubio (Eridanus) y Sergio Duarte (Hídrica Consultores), por el modelo de la cuenca del río Copiapó; Cristián Chadwick, por la cuenca del río Limarí; y David Poblete (Universidad de Valparaíso) por las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.



8

REFERENCIAS

Banco Mundial (2011). *Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos en Chile*. Departamento de medio ambiente y Desarrollo Sostenible Región para América Latina y el Caribe. Disponible en: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/452181468216298391/Chile-Diagn-243-stico-de-la-gesti-243-n-de-los-recursos-h-237-dricos>

Bujes, N. (2015). (Tesis de pregrado). *Estudio de la propiedad del agua subterránea del acuífero del río Petorca en la región de Valparaíso, Chile*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Chadwick, C., Gironás, J., Vicuña, S., Meza, F. & McPhee, J., (2018). *Using a Statistical Preamalysis Approach as an Ensemble Technique for the Unbiased Mapping of GCM Changes to Local Stations*, *Journal of Hydrometeorology*, 19(9), 1447-1465

Dirección General de Aguas (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca La Ligua*. Santiago de Chile. Ministerio de Obras Públicas (Chile).

DGA (Dirección General de Aguas) (2008). *Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos*. Santiago, 2008 S.I.T N° 156

DGA (Dirección General de Aguas) (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional*. Ministerio de Obras Públicas. Desarrollado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. 417. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5796v1.pdf>

DGA (Dirección General de Aguas) (2018). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro*. Ministerio de Obras Públicas. Desarrollado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T 435. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5850v1.pdf>

DGA (Dirección General de Aguas) (2018). *Diagnóstico nacional de organizaciones de usuarios: informe final*. Ministerio de Obras Públicas; Dirección General de Aguas; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. S.I.T. 422. Disponible en <https://snia.mop.gob.cl/sad/ADM5812v1.pdf>

DGA (Dirección General de Aguas) (2020). *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea*. Disponible en <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>



- División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile (2010). *Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del río Copiapó*. DICTUC. Santiago, Chile.
- DICTUC-SEI-DGA. (2019). *Desarrollo De Herramienta Para El Análisis De Gestión En El Marco Del Plan Nacional De Recursos Hídricos*.
- Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M. & McDonald, M. (2000). *MODFLOW-2000, The US Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process*. In Open-file Report 00-92. wipp.energy.gov. Retrieved from http://wipp.energy.gov/library/CRA/2009_CRA/references/Others/Harbaugh_Banta_Hill_and_McDonald_2000_MODFLOW_2000_Open_File_Report_00_92.pdf
- Liang, X. and Xie, Z. (2001). *A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models*. *Advances in Water Resources*, 24(9-10), 1173-1193.
- Meza, F. J., Wilks, D. S., Gurovich, L., & Bambach, N. (2012). *Impacts of climate change on irrigated agriculture in the Maipo Basin, Chile: reliability of water rights and changes in the demand for irrigation*. *Journal of water resources planning and management*, 138(5), 421-430.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Plan Nacional de adaptación al cambio climático*.
- Niemeyer F. (2018). *Hoyas hidrográficas de Chile, Quinta Región*. Santiago de Chile. Ministerio de Obras Públicas (Chile), Dirección General de Aguas.
- Vicuña, S. and Meza, F. (2012). *Los nuevos desafíos para los recursos hídricos en Chile en el marco del cambio global*. Centro de Políticas Públicas UC. *Temas de la Agenda Pública*. Año 7 N° 55. Santiago, Chile. 14 p. Disponible en: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/2889>
- Vicuña, S., Garreaud, R. McPhee, J, (2012). *Agriculture Vulnerability to Climate Change in a Snowmelt Driven Basin in Semiarid Chile*, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 431-441.
- Vicuña, S., Álvarez, P., Melo, O., Dale, L., Meza, F.J., (2014). *Irrigation infrastructure development in the Limarí Basin in Central Chile: implications for adaptation to climate variability and climate change*. *Water International*, 39 (5).
- Vicuña, S., Gil, M., Melo, O., Donoso, G., & Merino, P. (2018). *Water option contracts for climate change adaptation in Santiago, Chile*. *Water International*, 43(2), 237-256
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). *WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics*. *Water International*, 30(4), 487-500.



9

ANEXOS

9.1 DETALLE SISTEMAS ANALIZADOS

Esta sección presenta los anexos de los sistemas analizados para cada cuenca.

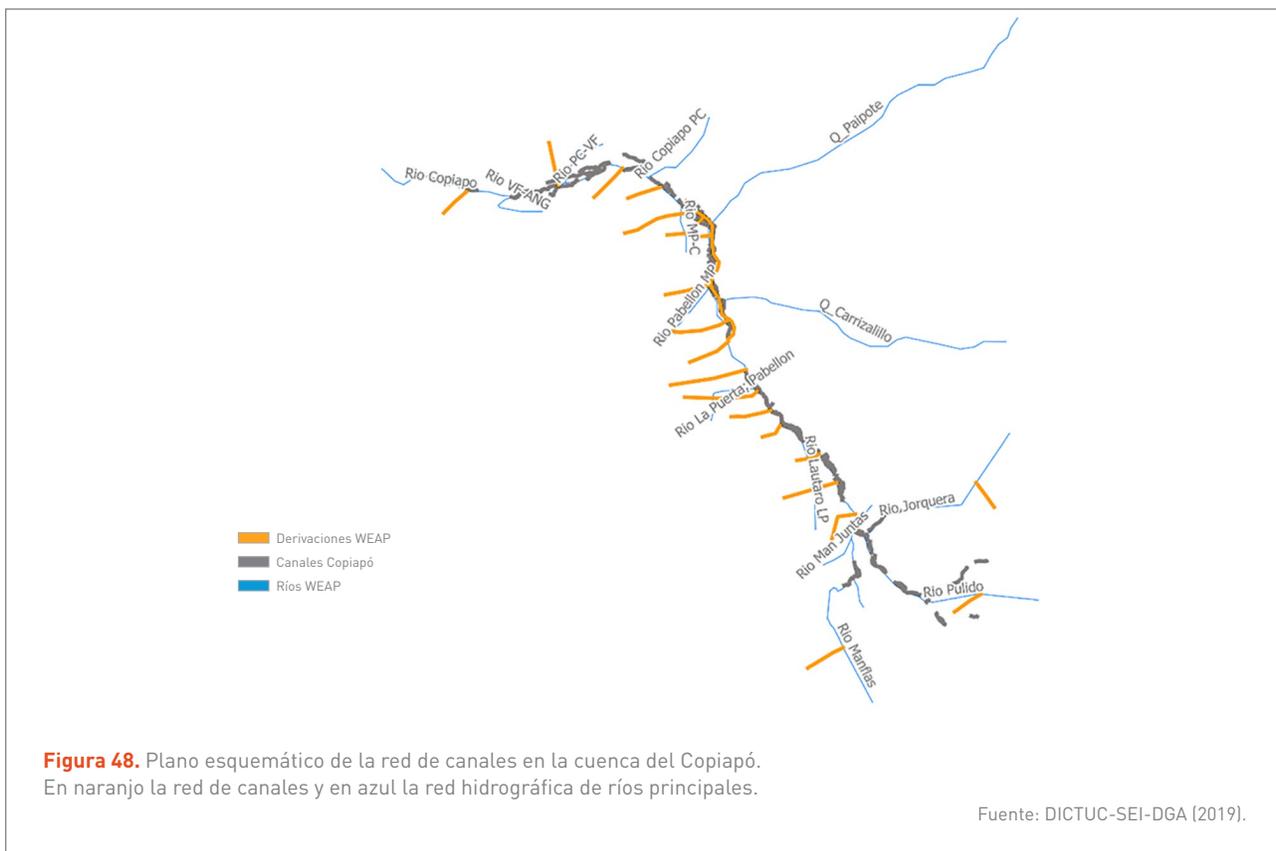
9.1.1 DETALLE DEL SISTEMA DE LA CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ

La Cuenca del río Copiapó se encuentra ubicada dentro de los límites político-administrativos de la Región de Atacama, en particular, comprende las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla. Esta cuenca se extiende desde la divisoria de aguas en la cordillera de los Andes hasta desembocar

en el océano Pacífico. El área total de la cuenca abarca una superficie de 23.861 km², dividida en 10 cuencas y 71 subcuencas. El área modelada de la cuenca (**Figura 48**) corresponde a un subdominio de la cuenca, conformado por las subcuencas presentadas en la **Tabla 17**.

Por otro lado, el sistema de aguas subterráneas está modelado en esta cuenca por nodos, desde los cuales se extrae agua, vinculados a un modelo subterráneo y distribuido, MODFLOW. Esta representación se encuentra esquematizada en la **Figura 49**.

El modelo de aguas subterráneas MODFLOW está conformado por celdas de ancho variable y su área activa comprende las zonas aluviales de mayor permeabilidad, como se muestra en la **Figura 50**.



ID	Nombre Subcuenca	Tipo	Área (km ²)
1	Río Jorquera	Cabecera	4.207
2	Río Pulido	Cabecera	2.023
3	Río Manflas	Cabecera	981
4	Manflas-Junta	Intermedia	221
5	Junta-Lautaro	Intermedia	46
6	Lautaro-La Puerta	Intermedia	855
7	La Puerta-Pabellón	Intermedia	471
8	Quebrada Carrizalillo	Lateral	1.116
9	Pabellón-Mal Paso	Intermedia	237
10	Quebrada Paipote	Lateral	6.649
11	Mal Paso-Copiapó	Intermedia	338
12	Copiapó-Piedra Colgada	Intermedia	733
13	Piedra Colgada-Valle Fértil	Intermedia	264
14	Valle Fértil-Angostura	Intermedia	396
Total			18.537

Tabla 17. Subcuencas modeladas del río Copiapó.

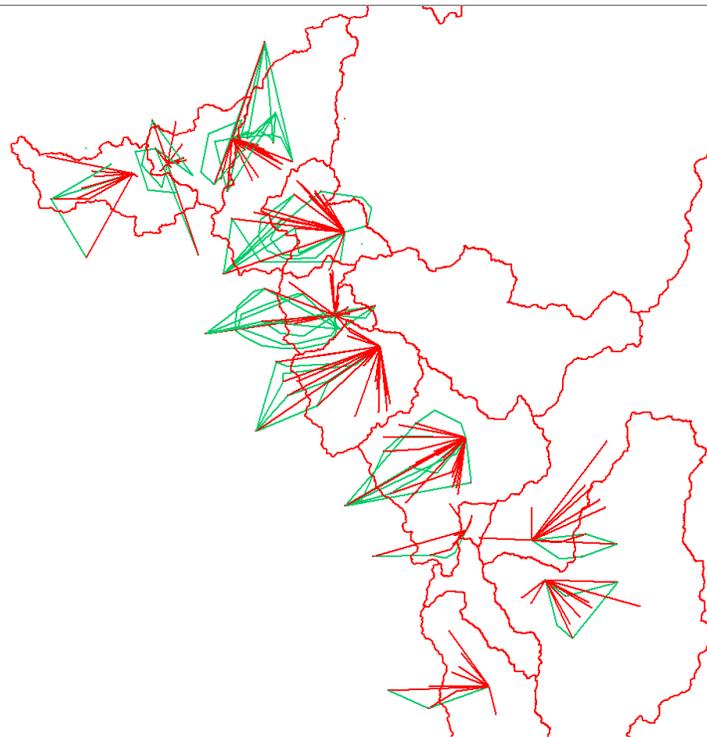


Figura 49. Plano esquemático de los nodos de agua subterránea (verde) y nodos de demanda (rojo) en cuenca del río Copiapo.

Fuente: Elaboración propia.

Conductividad Hidráulica Vertical

Kz (m/d)	
■ < 20.39	■ < 400
■ < 57.35	■ < 968.71
■ < 188.84	

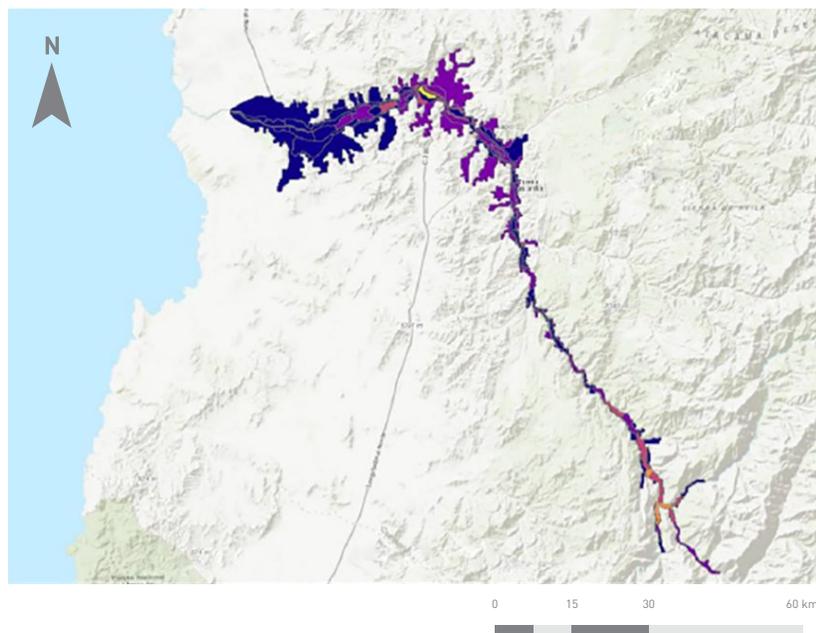


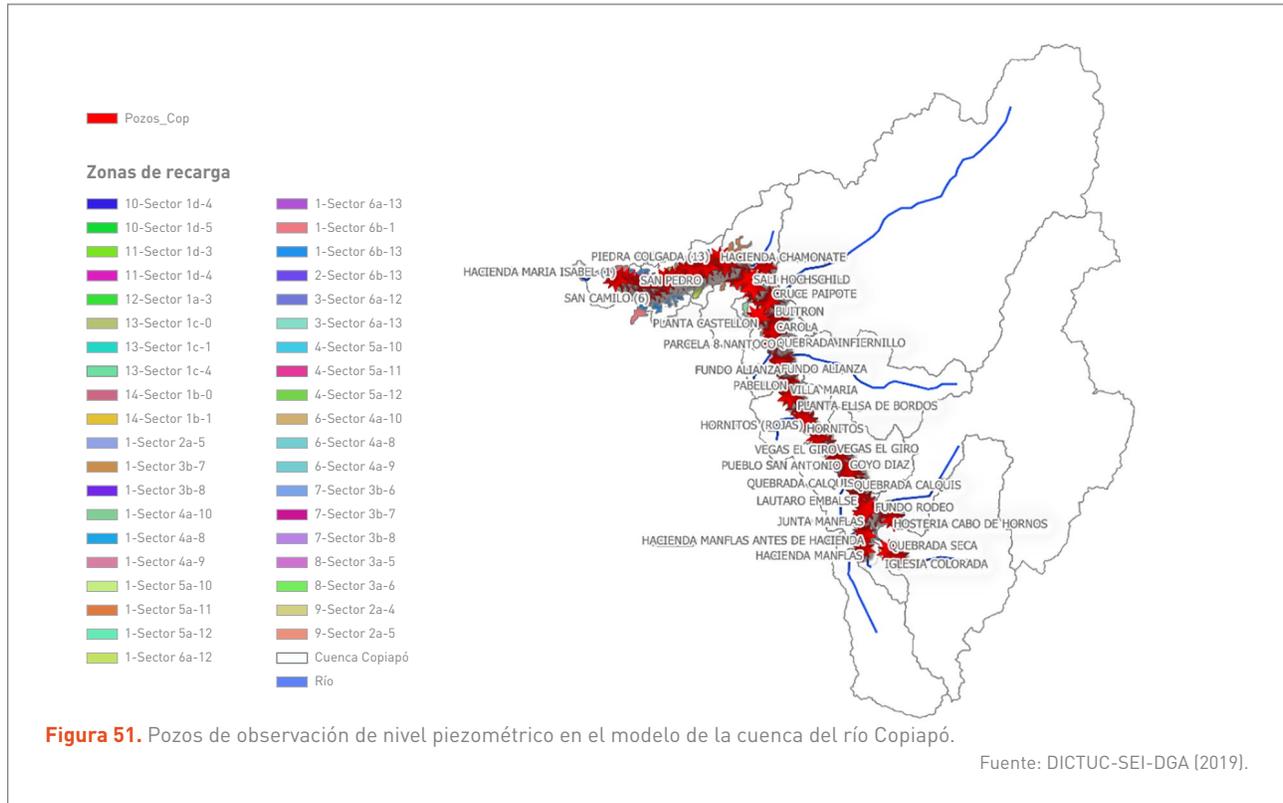
Figura 50. Dominio de celdas activas del modelo de hidrología subterránea (en colores).

Fuente: DICTUC-SEI-DGA (2019).



Respecto de la Exposición del sistema del modelo subterráneo, la **Figura 51** muestra la distribución de los pozos

de observación de nivel piezométrico en el modelo de la cuenca del río Copiapó.



9.1.2 DETALLE DEL SISTEMA DE LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ

La Cuenca del río Limarí se encuentra ubicada dentro de los límites político-administrativos de la Región de Coquimbo, en particular, de las provincias del Limarí y las comunas de Combarbalá, Monte Patria, Ovalle, Punitaqui y Río Hurtado. Esta cuenca exorreica se extiende desde la divisoria de las aguas en la cordillera de los Andes hasta desembocar en el océano Pacífico. Su área abarca una superficie de 11.944 km², dividida en seis cuencas y 37 subcuencas. En este caso, se modelaron las subcuencas presentadas en la **Tabla 18** y **Figura 52**.

El sistema de aguas subterráneas está modelado en esta cuenca por nodos, desde los cuales se extrae agua, vinculados a un modelo subterráneo y distribuido, MODFLOW. Esta representación se encuentra esquematizada en la **Figura 53**.

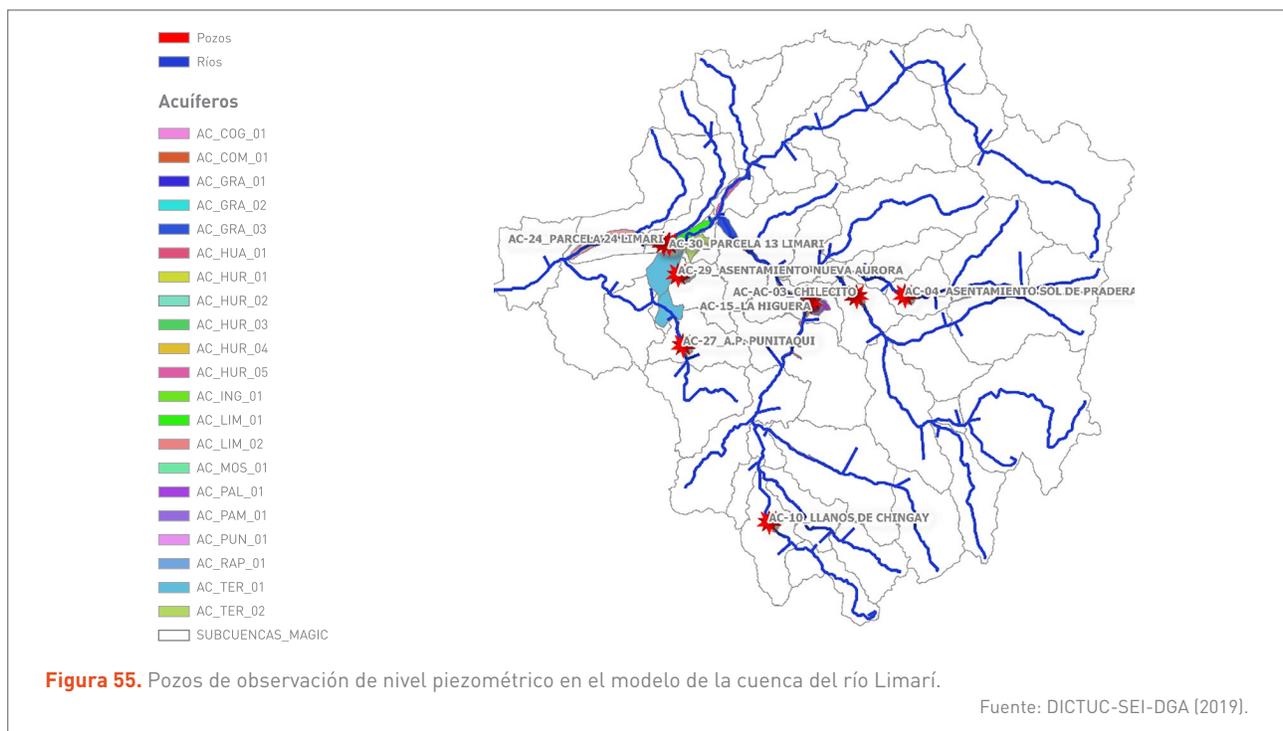
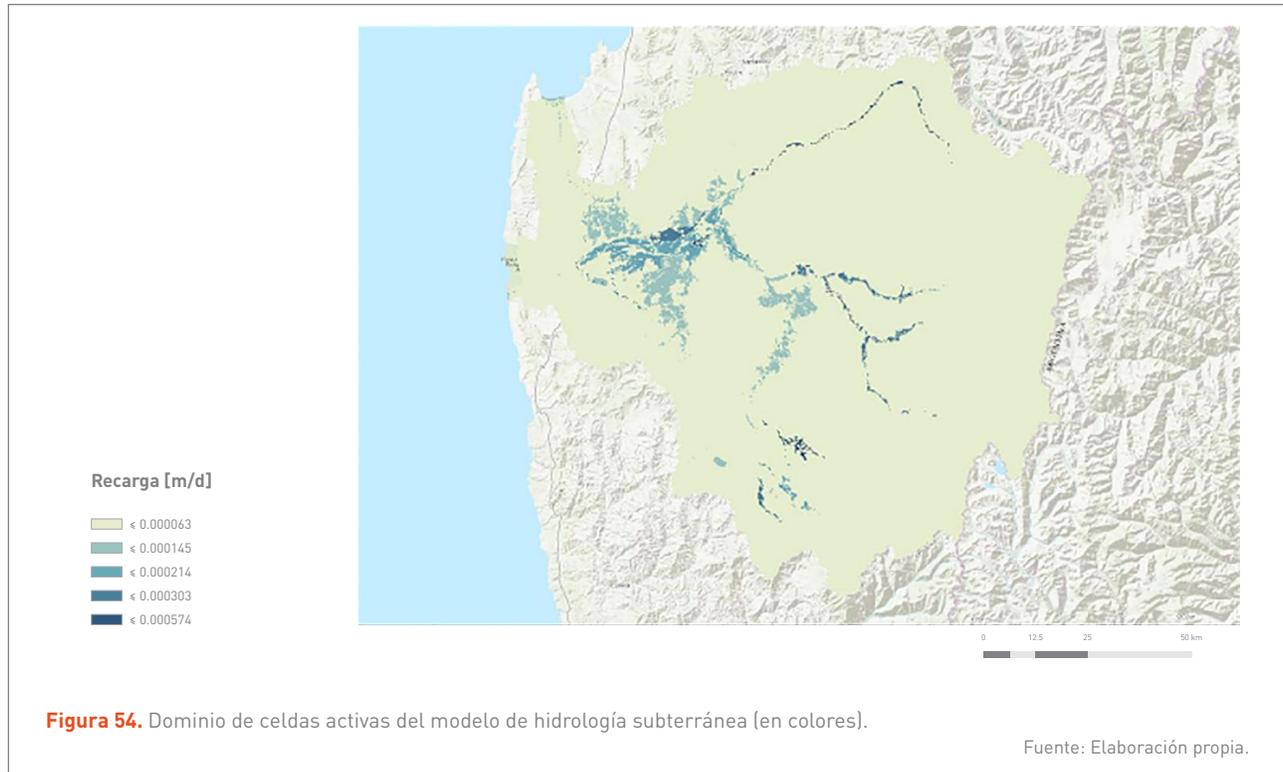
Zona	Área (km ²)
Hurtado int. San Agustín Angostura	1.617
Hurtado antes embalse Recoleta	198
Los Molles Alto 8	88
Rapel	1.907
Mostazal antes desemb.	1.001
Grande antes Mostazal	996
Grande Puntilla San Juan	1.054
Afluente Paloma Norte	939
Cogotí embalse	1.399
Combarbalá	1.353
Pama intermedio	990
Punitaqui Chalinga	234
Punitaqui antes Limarí	168
Total	11.944

Tabla 18. Subcuencas modeladas del río Limarí.



El modelo de aguas subterráneas MODFLOW está conformado por celdas de ancho fijo de 300 m x 300 m y su área activa comprende toda la cuenca del río Limarí, como se esquematiza en la **Figura 54**.

Respecto de la Exposición del sistema del modelo subterráneo, la **Figura 55** muestra la distribución de los pozos de observación de nivel piezométrico en el modelo de la cuenca del río Limarí.





9.1.3 DETALLE DEL SISTEMA DE LA CUENCA DEL RÍO CHOAPA

La Cuenca del río Choapa se encuentra ubicada dentro de los límites político-administrativos de la Región de Coquimbo, en particular, de las provincias de Choapa y

las comunas de Illapel, Salamanca y Canela. Esta cuenca exorreica se extiende desde la divisoria de las aguas en la cordillera de los Andes hasta desembocar en el océano Pacífico. Su área abarca una superficie de 7.686 km², dividida en cuatro cuencas y 25 subcuencas. Las subcuencas modeladas se presentan en la **Tabla 19**.

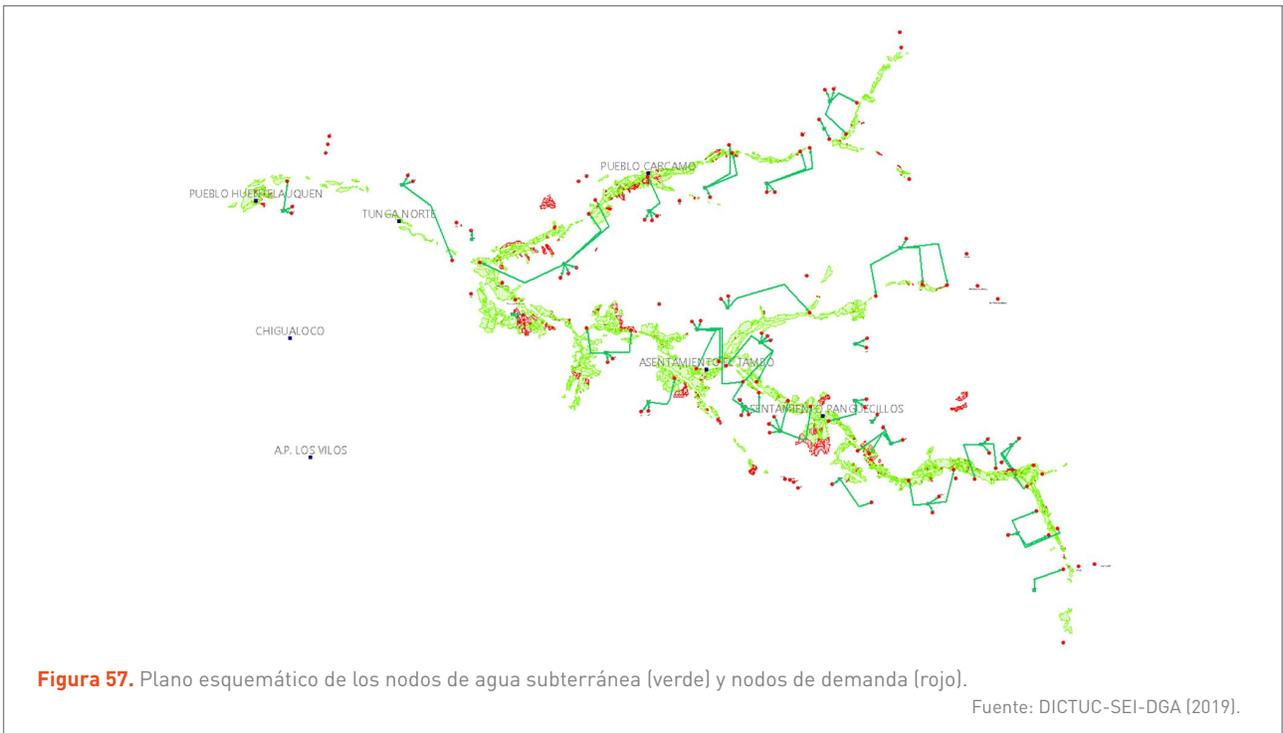
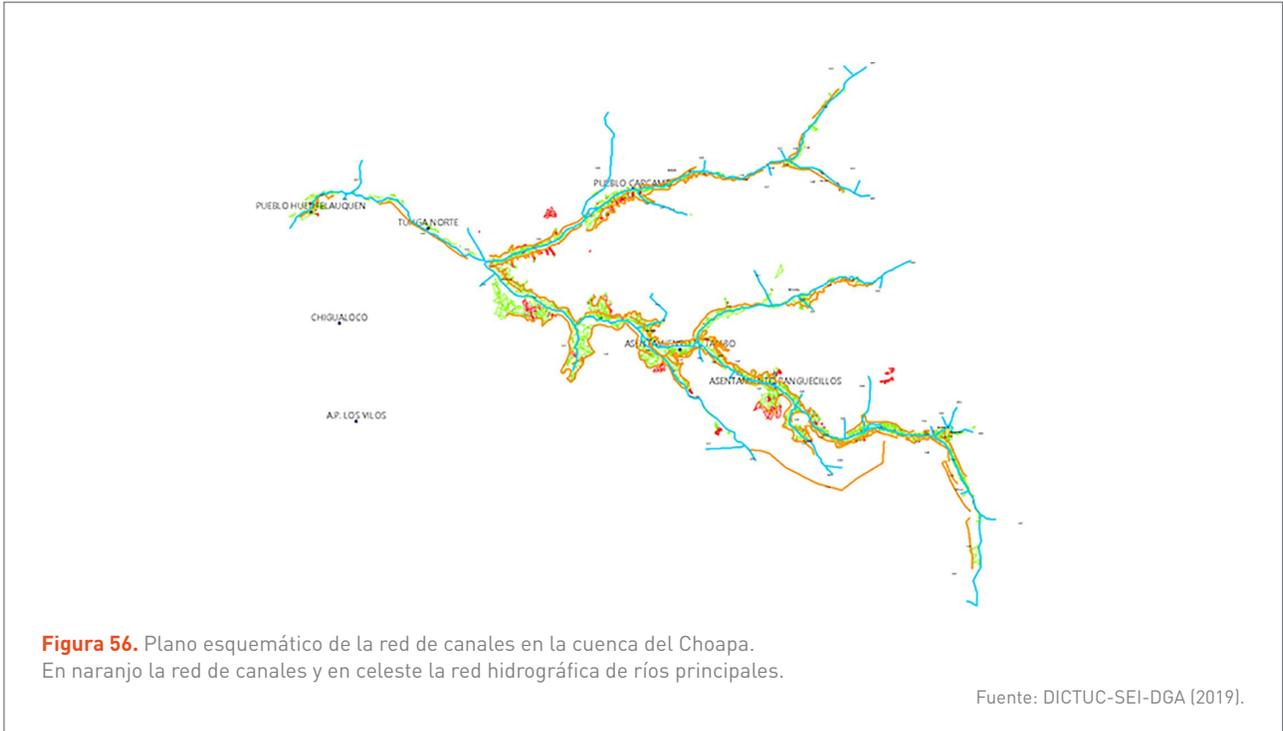
Nombre	Área
Río Choapa, entre estero Quelén y entrega Corrales N ° 2.	60,3
Sector confluencia ríos Choapa, Chalinga y Chalinga abajo. Quebrada Cunlagua.	191,7
Río Choapa, entre EF Choapa en Salamanca y descarga Los Veneros.	14,7
Río Choapa, entre bocatoma Corrales y sector confluencia Quelén -Choapa.	236,8
Río Valle, cabecera.	60,3
Río Choapa arriba, EF Choapa sobre río Valle.	905,8
Río Chalinga, entre La Palmilla y San Agustín.	130,5
Río Choapa, aguas abajo de estero La Canela.	34,5
Río Chalinga, entre San Agustín y quebrada Cunlagua.	85,0
Río Choapa, entre bocatoma Corrales y sector confluencia Quelén -Choapa.	48,9
Río Tencadán arriba Canales.	89,1
Estero Camisas, cabecera.	257,4
Río Cuncumén arriba Canales.	262,9
Estero La Canela.	1.379,3
Río Valle parte baja y EF Choapa en Cuncumén.	151,6
Río Choapa, entre EF Choapa en Cuncumén y pueblo Cuncumén.	79,2
Río Illapel, entre confluencia con río Carén y embalse El Bato.	28,6
Río Choapa, entre bocatoma Corrales y sector confluencia Quelén -Choapa.	50,8
Río Illapel, entre Huintil y quebrada Cárcamo.	102,1
Río Illapel, cabecera.	270,5
Río Carén, cabecera.	94,5
Río Illapel, entre estero Aucó y El Peral.	799,5
Río Chalinga arriba de La Palmilla.	244,8
Río Illapel, entre embalse El Bato y Huintil.	171,7
Río Illapel, entre quebrada Cárcamo y estero Aucó.	107,9
Río Choapa, entre esteros Camisas y Limáhuida.	311,6
Río Choapa, entre río Illapel y estero La Canela.	352,9
Estero Camisas, parte baja.	217,4
Río Choapa, entre río Chalinga y estero Camisas.	23,1
Confluencia ríos Illapel y Carén.	132,4
Río Illapel, entre comienzo Canales y Las Burras.	334,6
Río Choapa, confluencia con río Illapel, Illapel bajo El Peral.	93,6
Río Choapa, entre estero Limáhuida y confluencia con río Illapel.	90,4
Estero Quelén, cabecera.	112,3
Río Choapa, entre entrega Corrales N ° 2 y EF Choapa en Salamanca.	44,0
Río Choapa, sector confluencia Choapa-Cuncumén-Tencadán.	29,8
Río Choapa, entre confluencia Cuncumén-Choapa y bocatoma Corrales	85,7
Total	7.686,2

Tabla 19. Subcuencas modeladas del río Choapa.



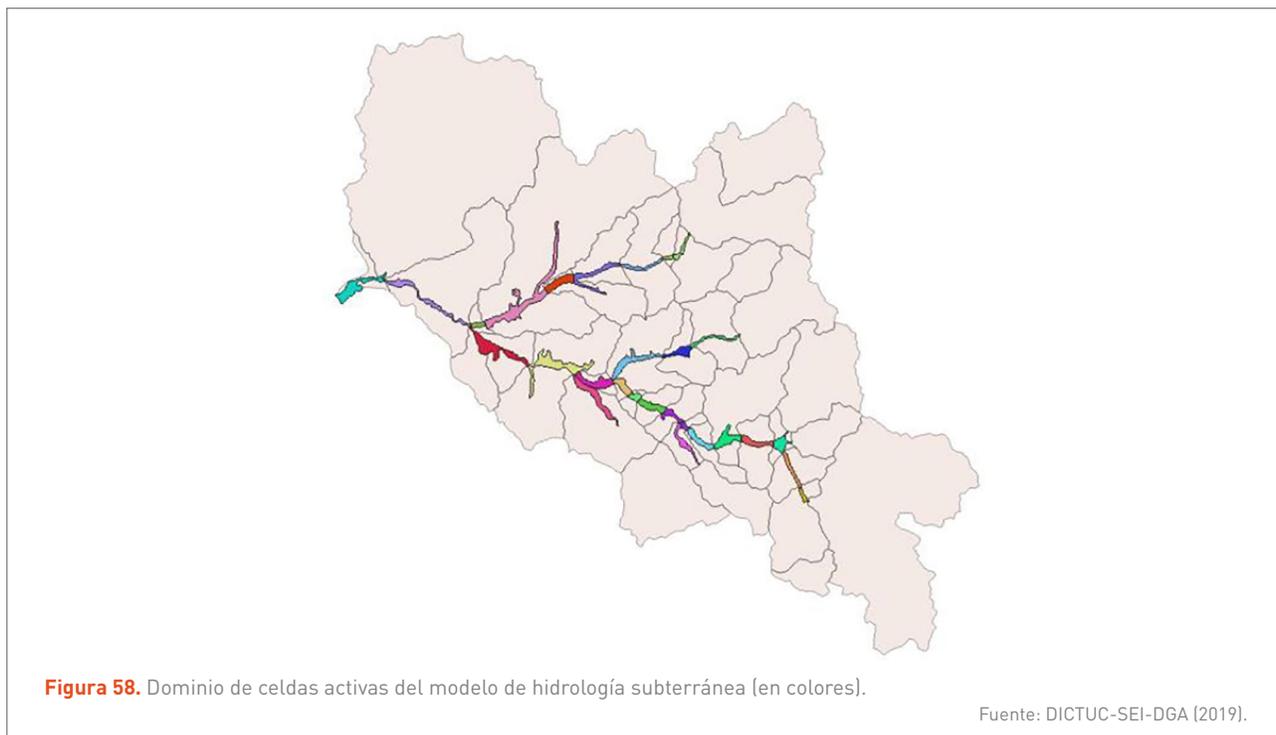
Respecto del uso del agua captada y conducida, el modelo de esta cuenca considera a los siguientes usuarios de agua en torno a cada red de canales (**Figura 56**):

1. Junta de vigilancia del río Choapa.
2. Junta de vigilancia del río Chalinga.
3. Junta de vigilancia del río Illapel.



El sistema de aguas subterráneas está modelado en esta cuenca por nodos, desde los cuales se extrae agua, vinculados a un modelo subterráneo y distribuido, MODFLOW. Esta representación se encuentra esquematizada en la **Figura 57**.

El modelo de aguas subterráneas MODFLOW está conformado por celdas de 200 x 200 metros. El área activa se define donde existe mayor desarrollo de depósitos fluviales, como se observa en la **Figura 58**.



9.1.4 DETALLE DEL SISTEMA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS LA LIGUA Y PETORCA

La cuenca del río La Ligua se encuentra dentro de la división político-administrativa de la Región de Valparaíso, entre las provincias de Petorca y San Felipe de Aconcagua. Esta cuenca exorreica se extiende desde unos kilómetros al oeste de la divisoria de las aguas en la cordillera de los Andes hasta su desembocadura en el océano Pacífico. Se subdivide en tres subcuencas y cinco subsubcuencas. Su área abarca una superficie total de 1.979 km².

La cuenca del río Petorca se encuentra dentro de la división político-administrativa de la Región de Valparaíso, entre las provincias de Petorca y La Ligua. Esta cuenca exorreica se extiende desde unos kilómetros al oeste de la

divisoria de las aguas en la cordillera de los Andes hasta su desembocadura en el océano Pacífico. Su área abarca una superficie total de 1.988 km².

La modelación de este sistema contempló ambas cuencas completas (**Figura 59**). El sistema de aguas subterráneas está modelado en estas cuencas por nodos, desde los cuales se extrae agua, vinculados a un modelo subterráneo y distribuido, MODFLOW.

El modelo de aguas subterráneas MODFLOW está conformado por celdas de ancho fijo de 200 m x 200 m y su área activa abarca las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, como se esquematiza en la **Figura 60**.

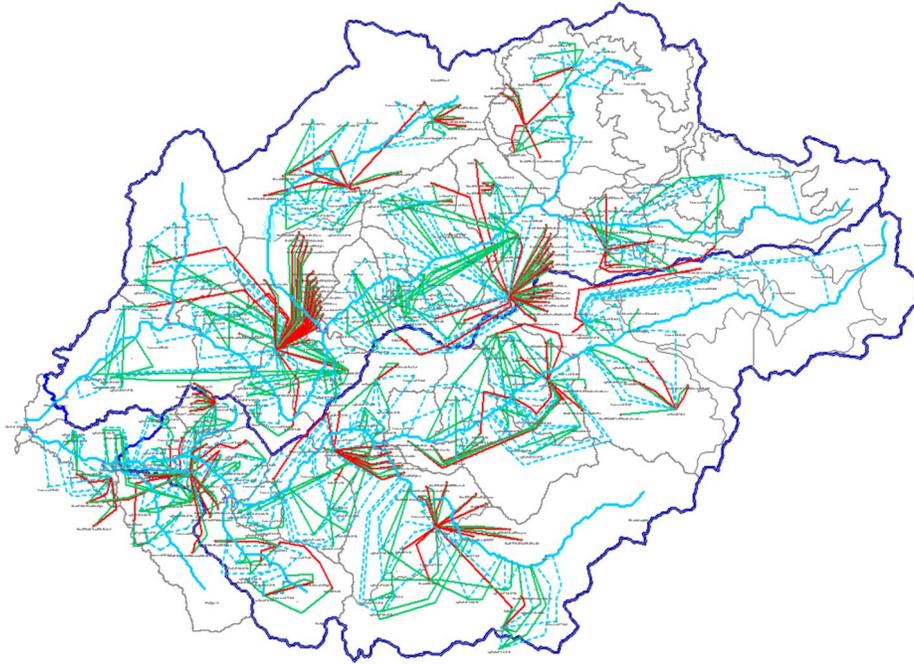


Figura 59. Plano esquemático de los nodos de demanda (rojo) y líneas de transmisión (rojo).

Fuente: Elaboración propia.

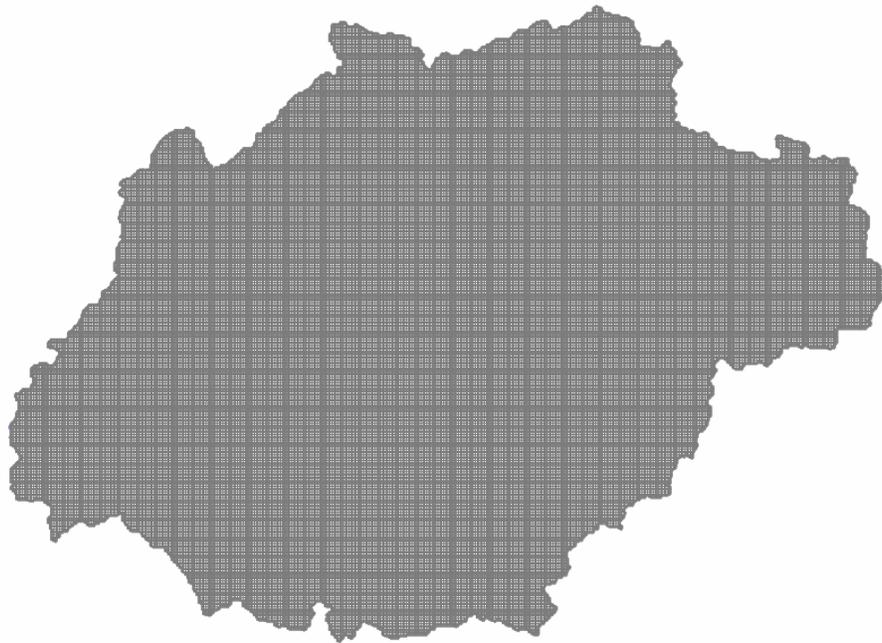


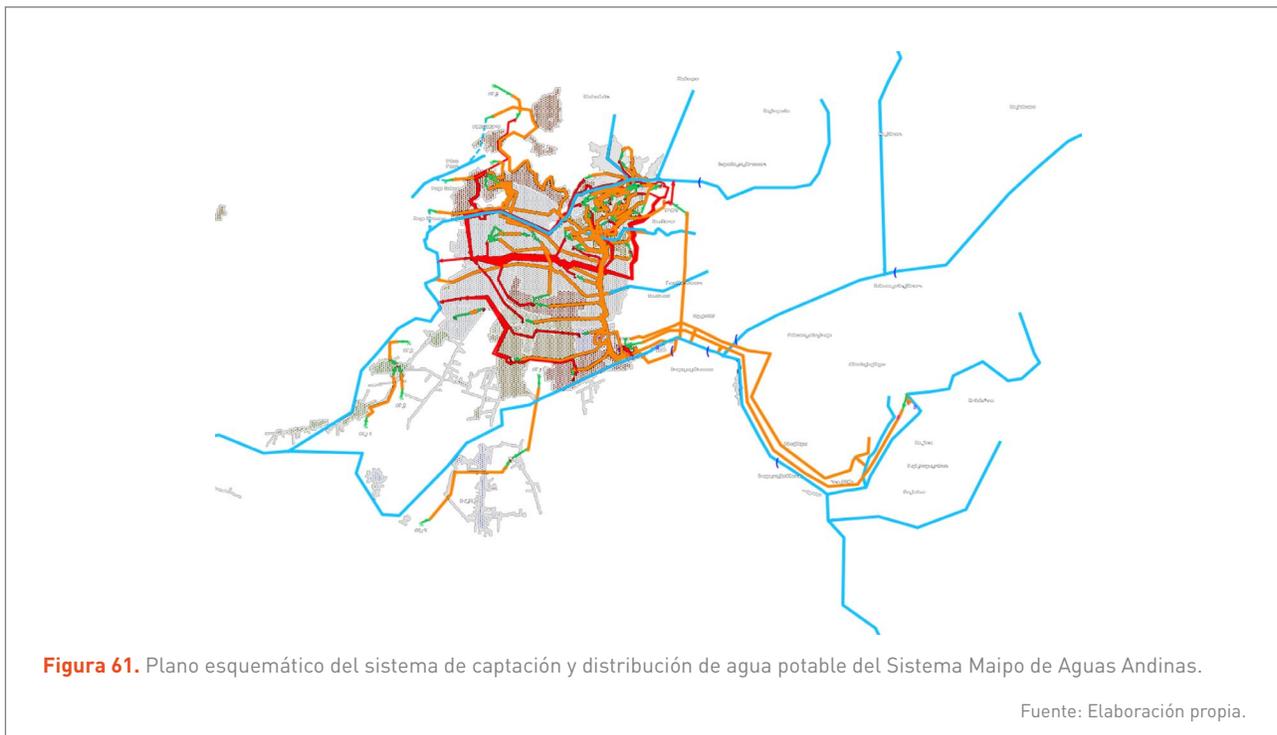
Figura 60. Dominio de celdas activas del modelo de hidrología subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

9.1.5 DETALLE DEL SISTEMA DE LA CUENCA DEL RÍO MAIPO

La Cuenca del río Maipo se encuentra ubicada dentro de los límites político-administrativos de la Región Metropolitana. Esta cuenca exorreica se extiende desde la

divisoria de las aguas en la cordillera de los Andes hasta desembocar en el océano Pacífico. Su área abarca una superficie de 14.939 km², dividida en cinco cuencas y 37 subcuencas. Los elementos tomados para la modelación se muestran en la **Figura 61** y en la **Figura 62**.





9.1.6 DETALLE DEL SISTEMA DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE

La cuenca del río Maule se encuentra ubicada dentro de los límites político-administrativos de la Región del Maule y contempla las provincias de Ñuble, Talca, Linares y Cauquenes. Esta cuenca exorreica se extiende desde la divisoria de las aguas en la cordillera de los Andes hasta

desembocar en el océano Pacífico. Su área abarca una superficie de 20.103 km², dividida en nueve subcuencas y 64 subsubcuencas. El área modelada corresponde a un subconjunto de 11 subcuencas, con un total de 5.502 km², como se observa en la **Figura 63** y en la **Figura 64**.

La modelación de aguas subterráneas de esta cuenca no incluyó un acople a un modelo distribuido hidrogeológico

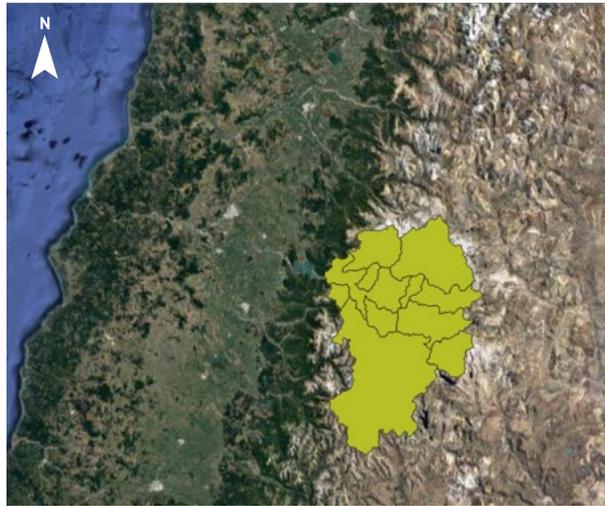


Figura 63. Subcuencas modeladas de la cuenca del río Maule.

Fuente: Elaboración propia.

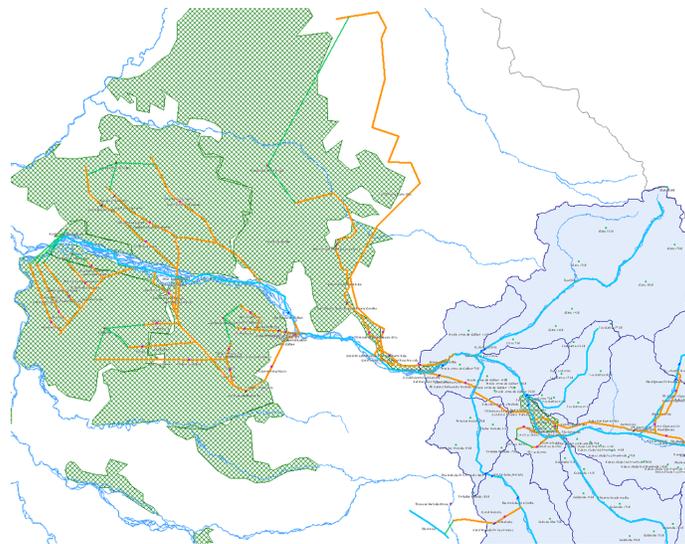
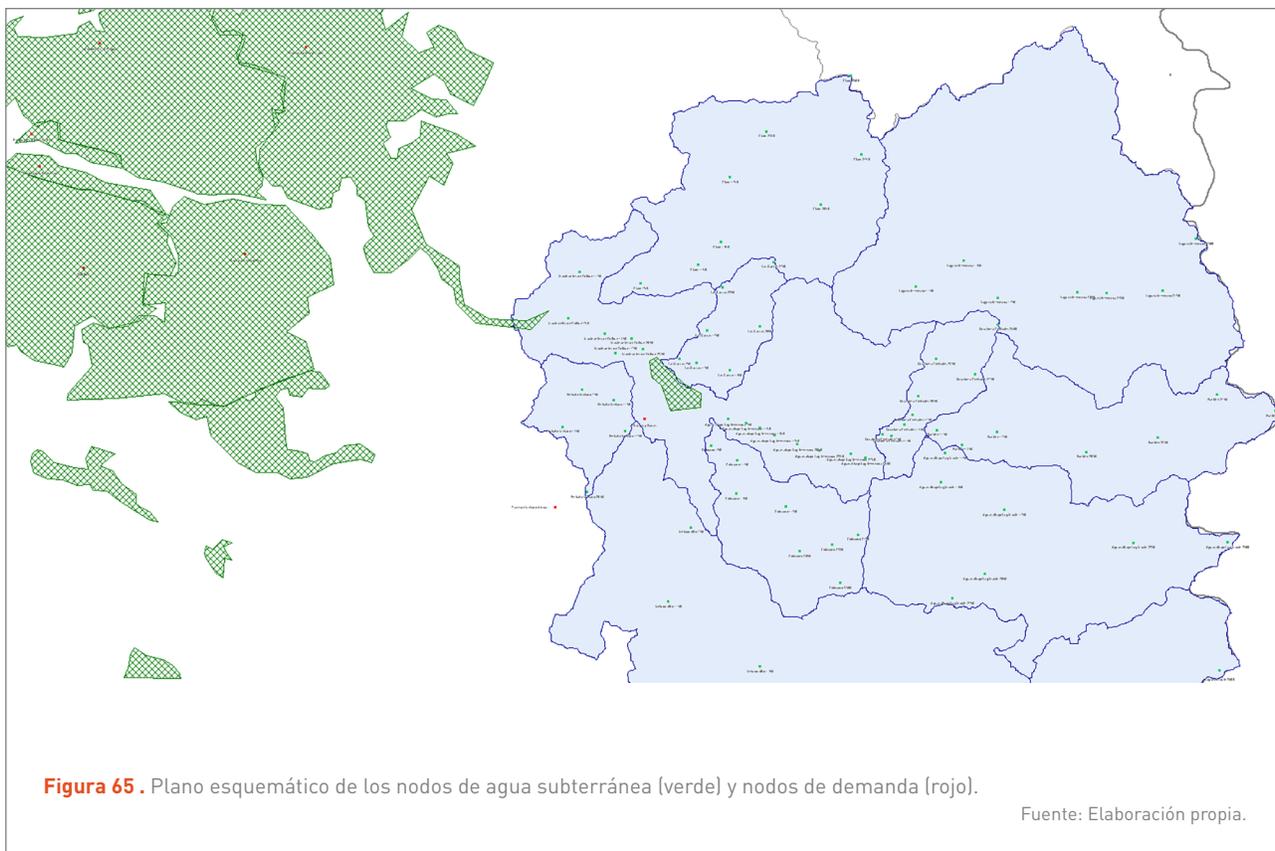


Figura 64. Plano esquemático de la red de canales en la cuenca del río Maule. En naranja la red de canales y en celeste la red hidrográfica de ríos principales.

Fuente: Elaboración propia.

como MODFLOW, sino que los acuíferos de este sistema se encuentran modelados mediante nodos de almacenamiento de aguas subterráneas, cuya distribución se presenta en la **Figura 65**. Sin embargo, este modelo no cuenta con pozos de observación de niveles piezométricos.



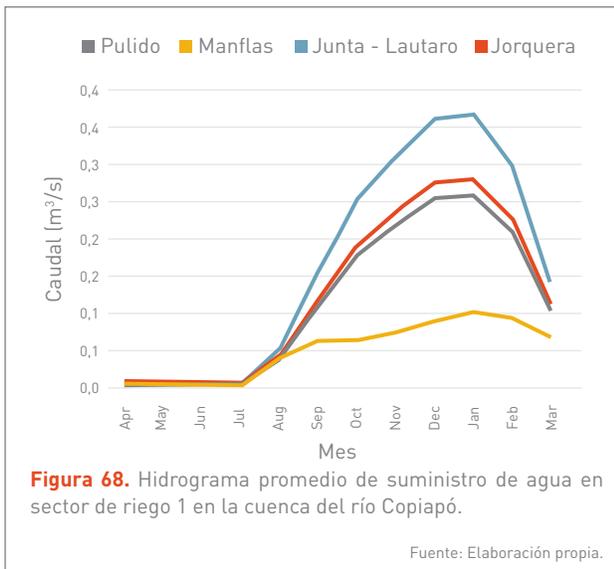
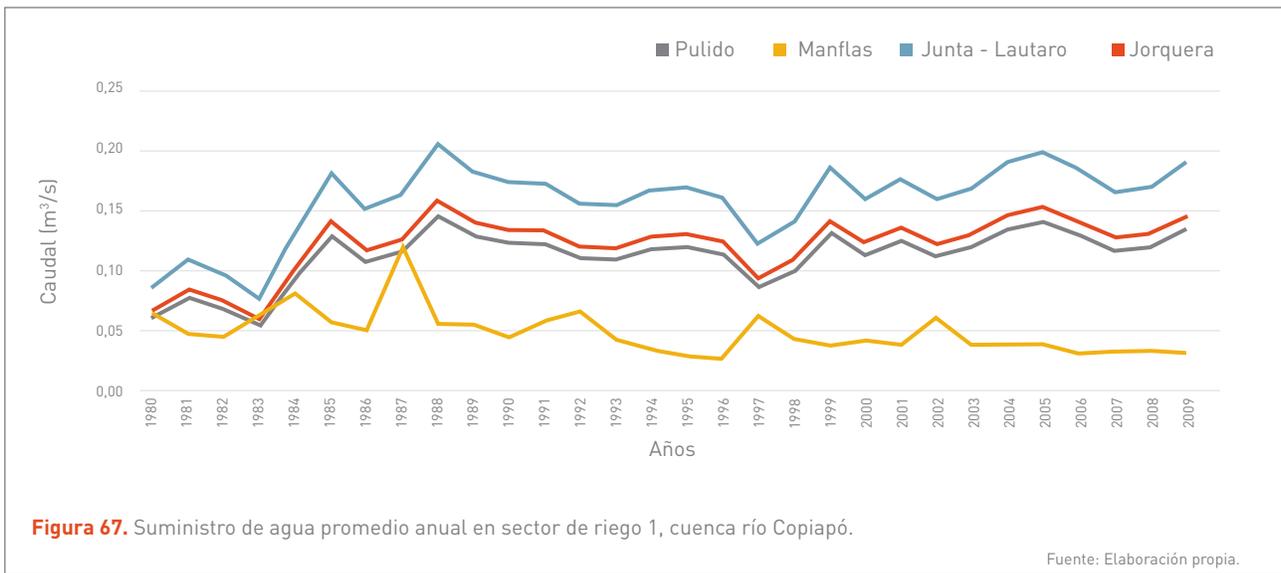
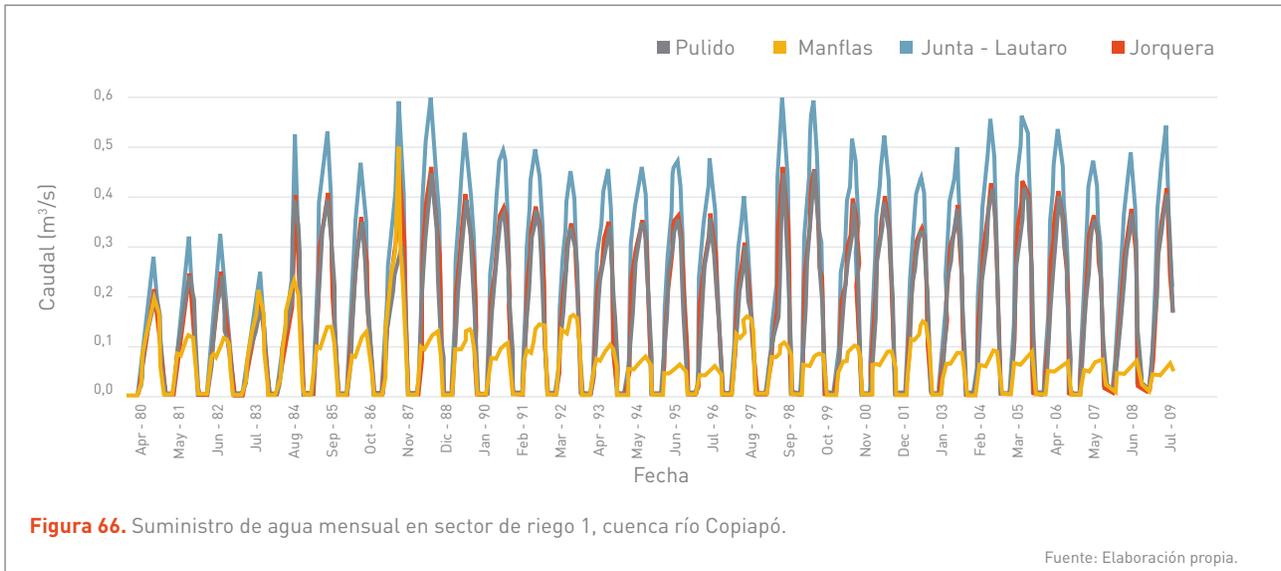
9.2 RESULTADOS DETALLADOS POR SISTEMA ANALIZADO

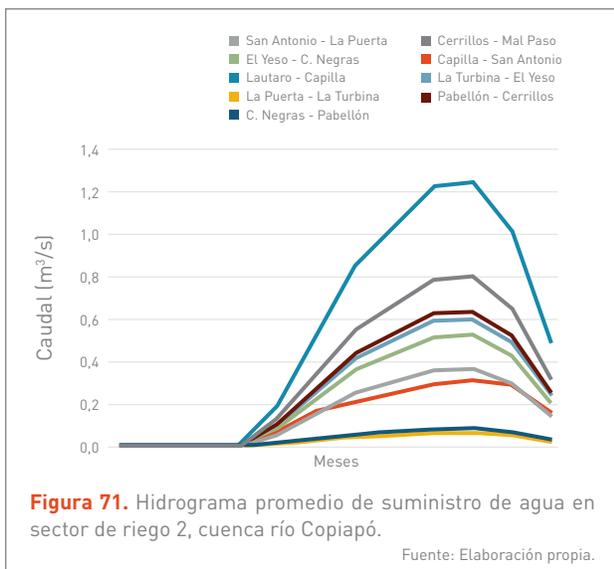
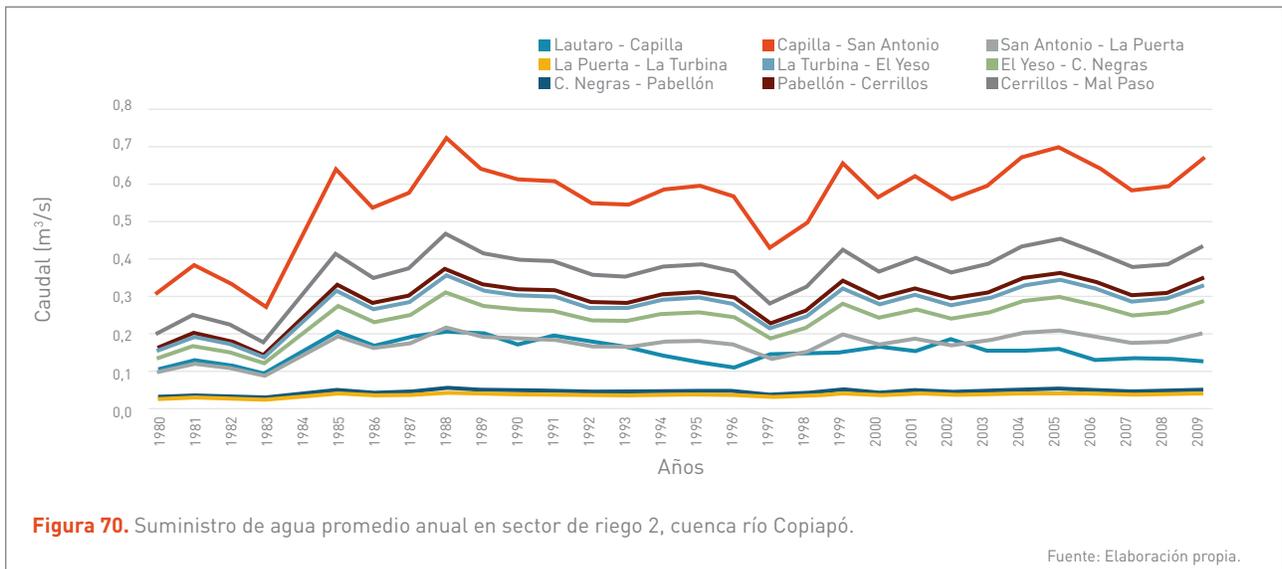
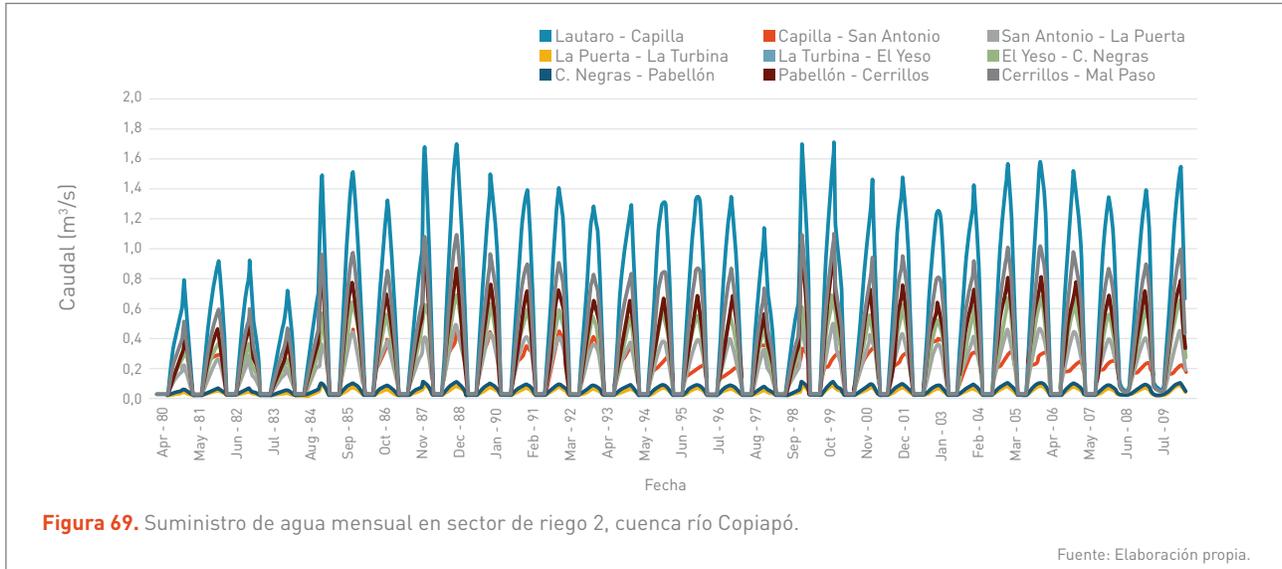
Esta sección presenta los detalles de los resultados de los sistemas analizados para la Vulnerabilidad histórica y futura.

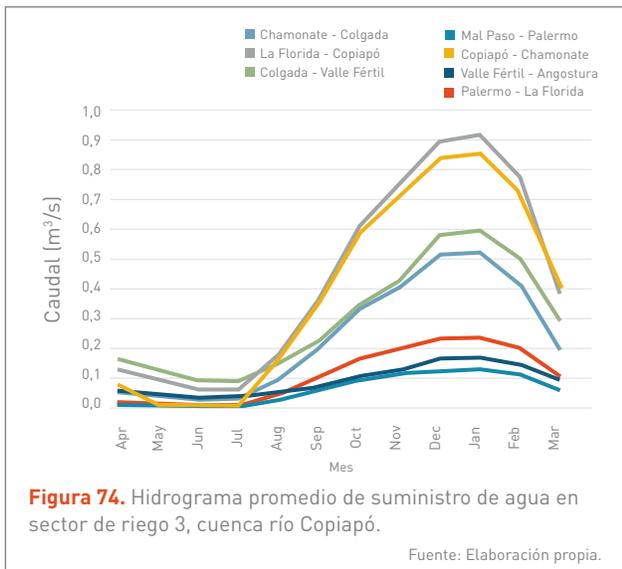
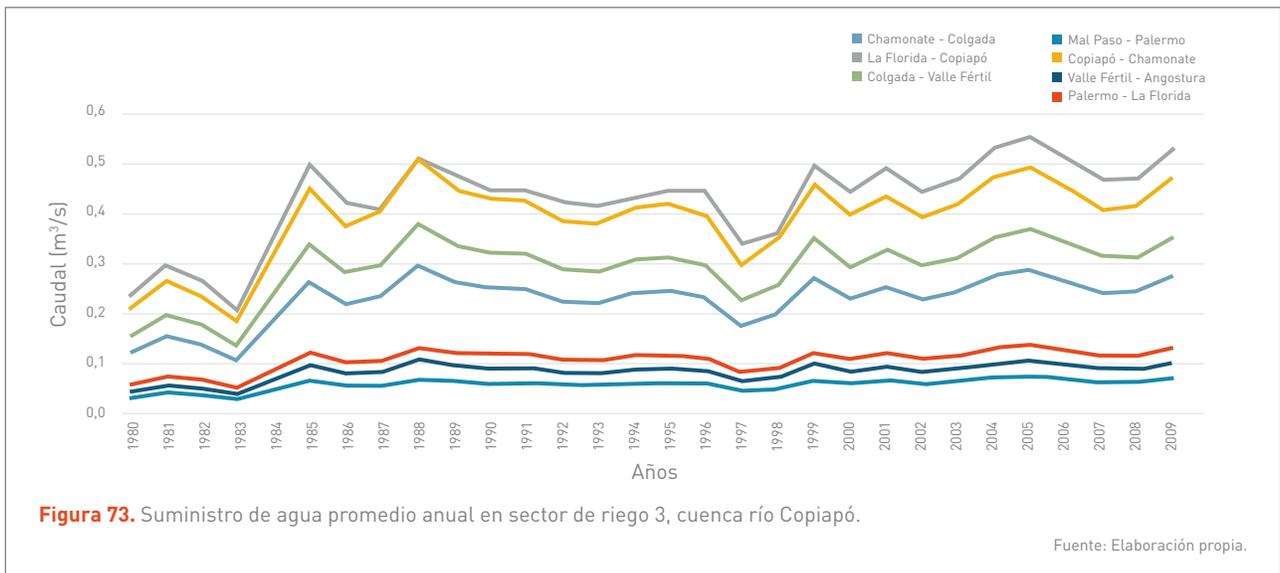
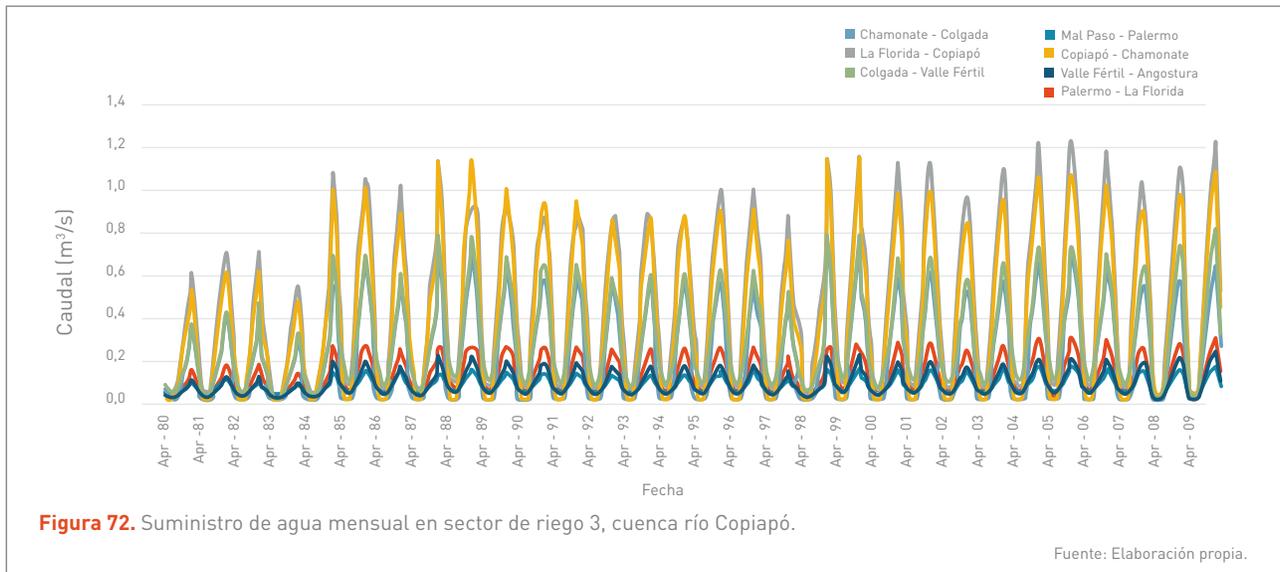
9.2.1 RESULTADOS DETALLADOS CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ

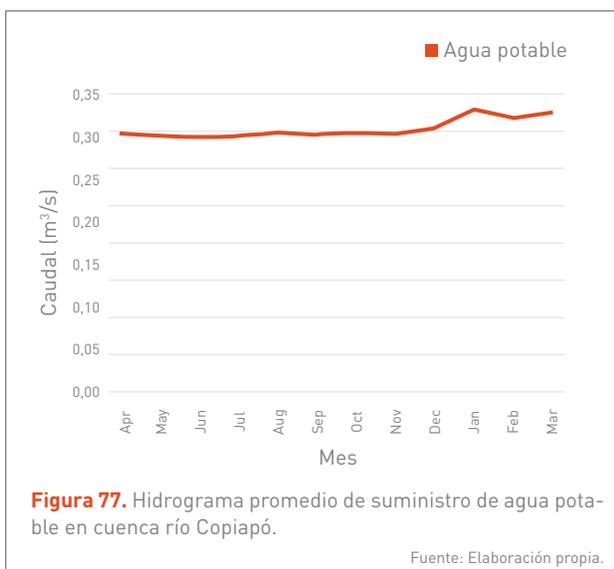
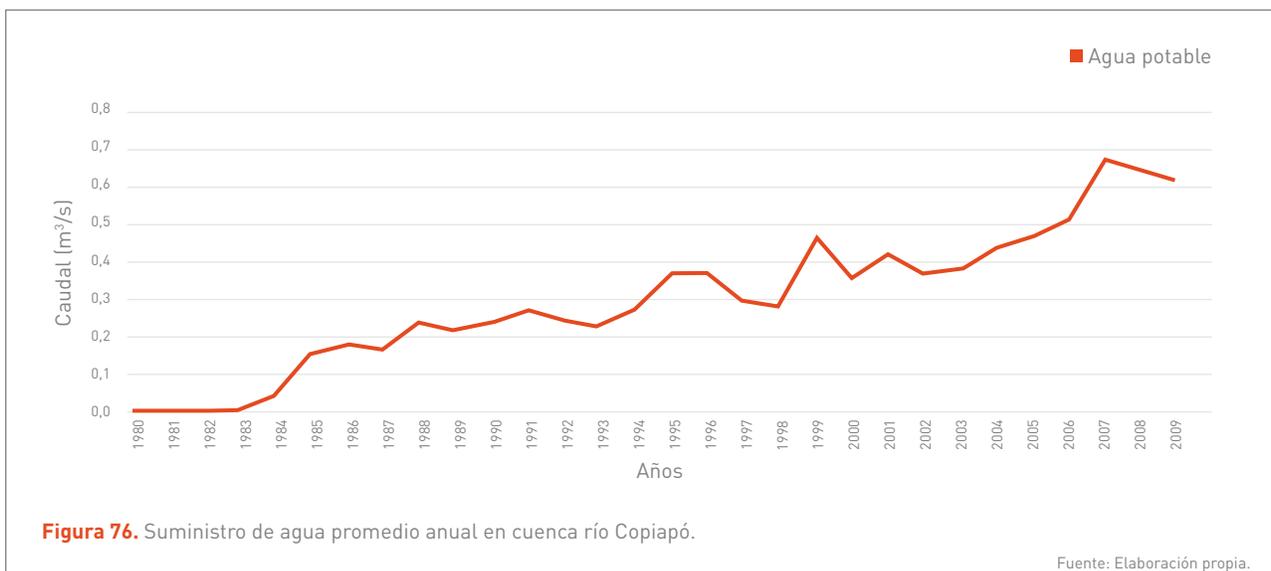
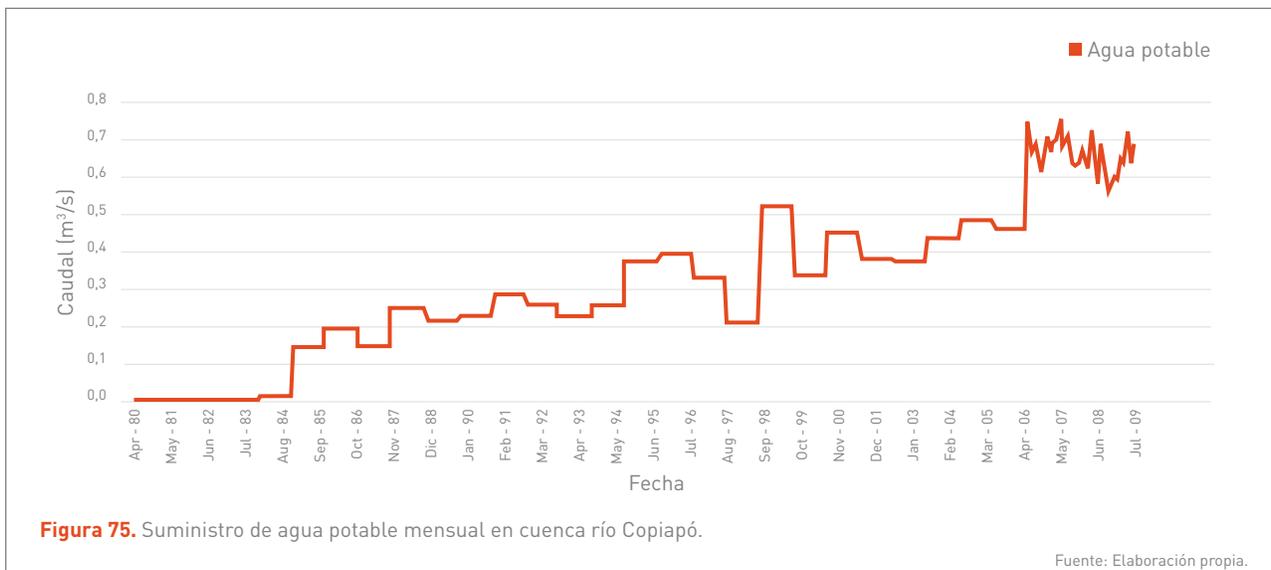
9.2.1.1 VULNERABILIDAD HISTÓRICA

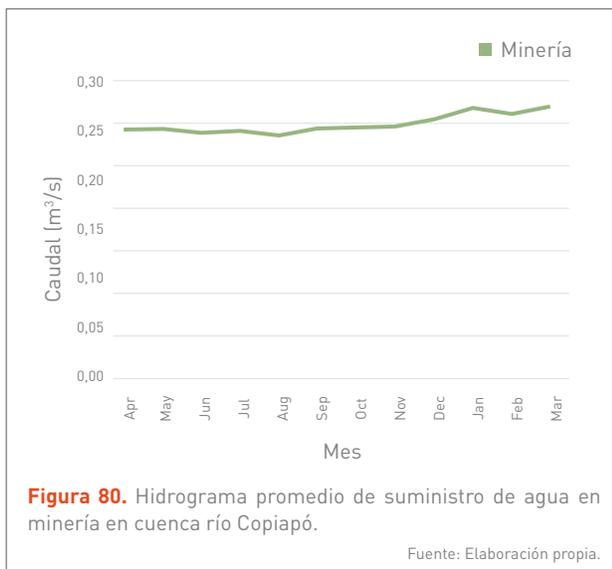
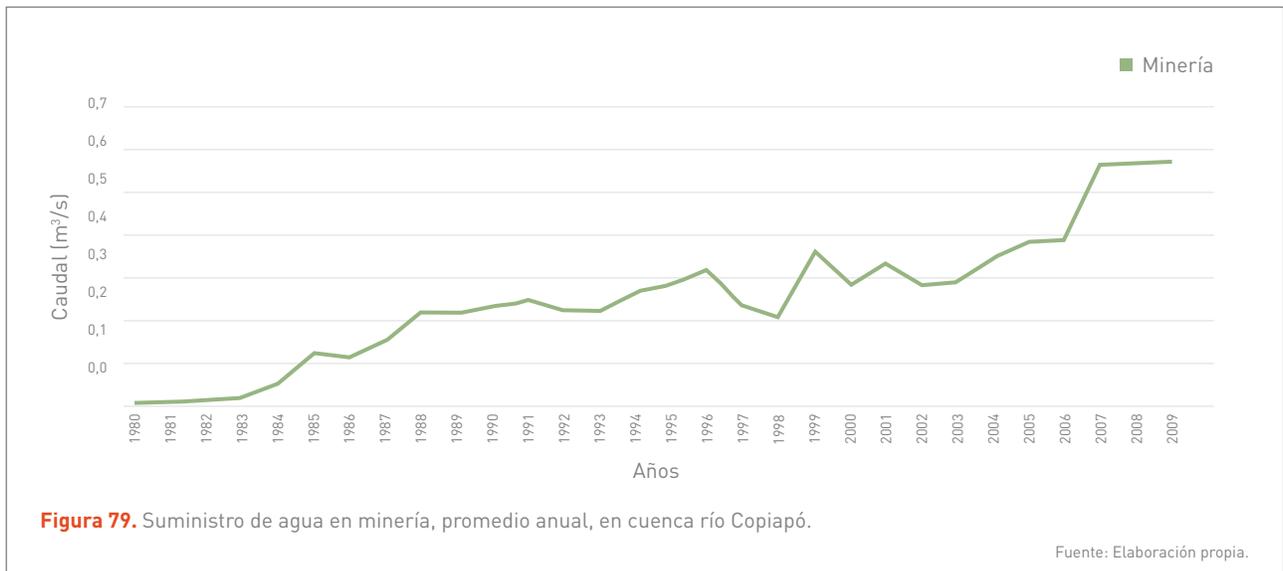
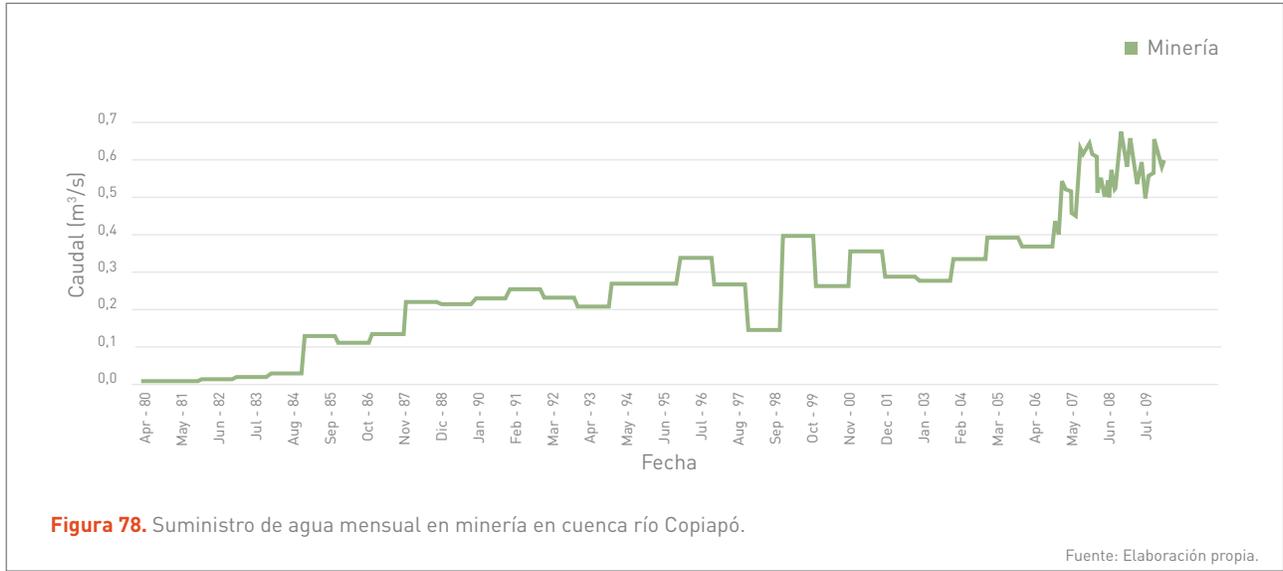
Los resultados de la Vulnerabilidad histórica se presentan entre la **Figura 66** y la **Figura 83**.

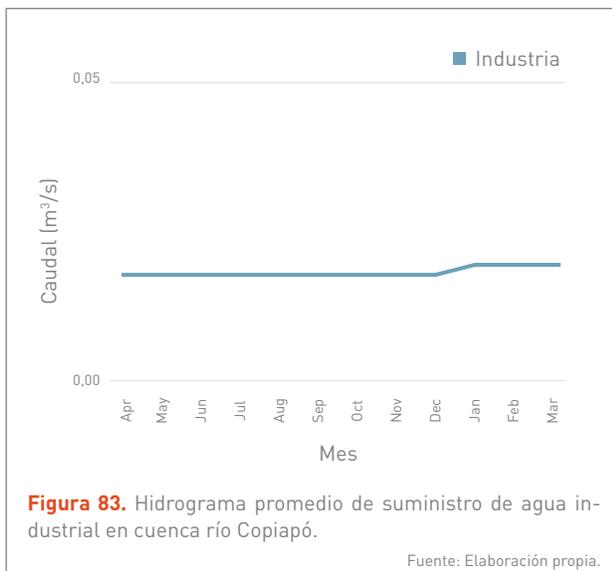
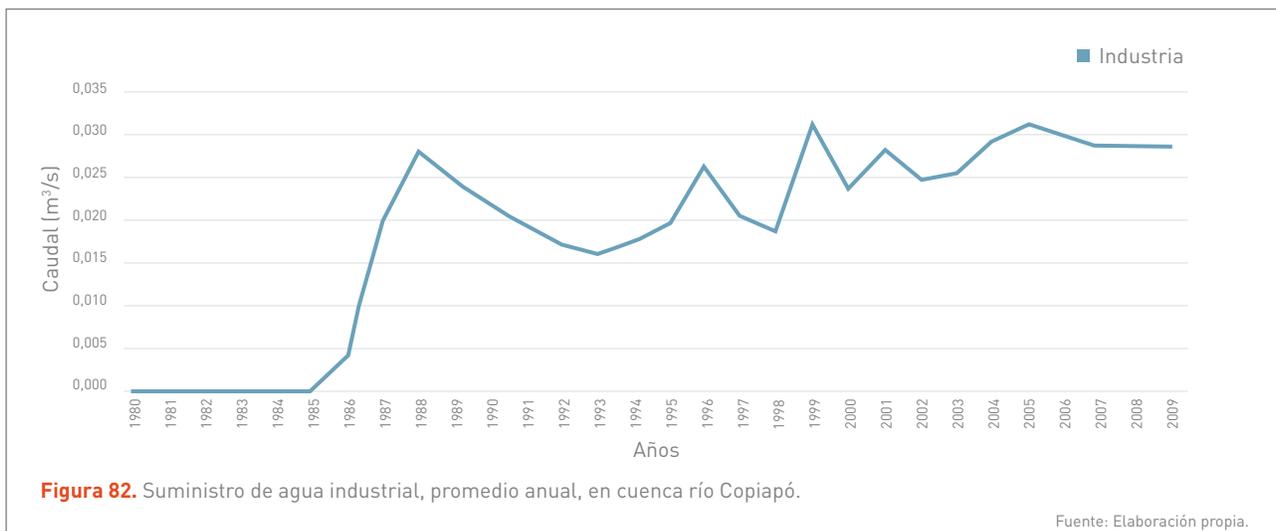














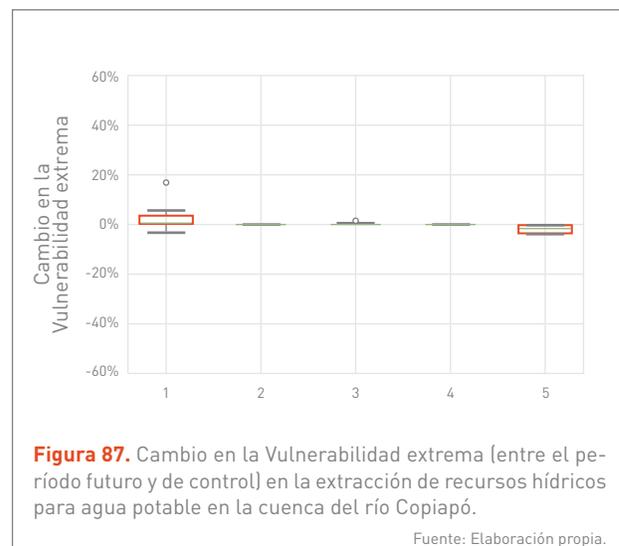
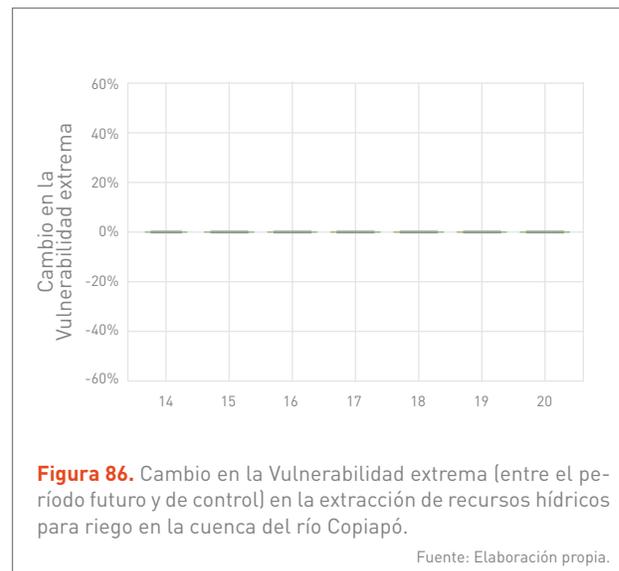
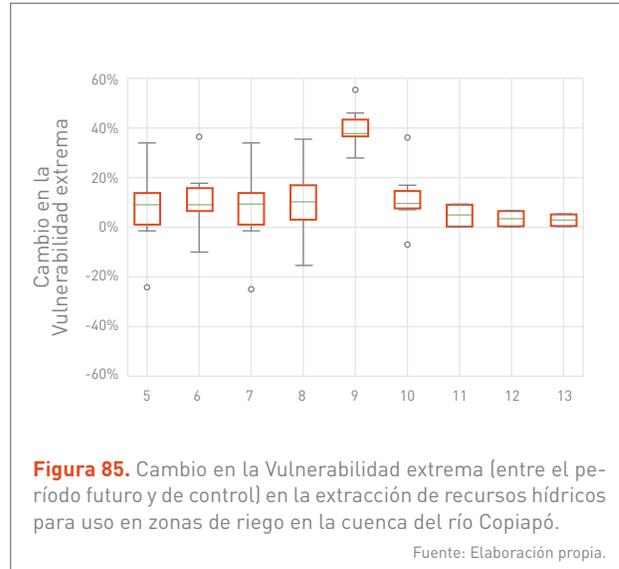
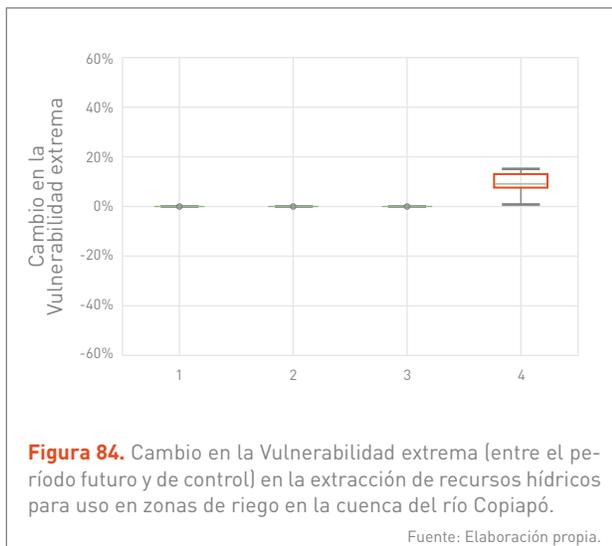
9.2.1.2 CAMBIOS EN VULNERABILIDAD FUTURA

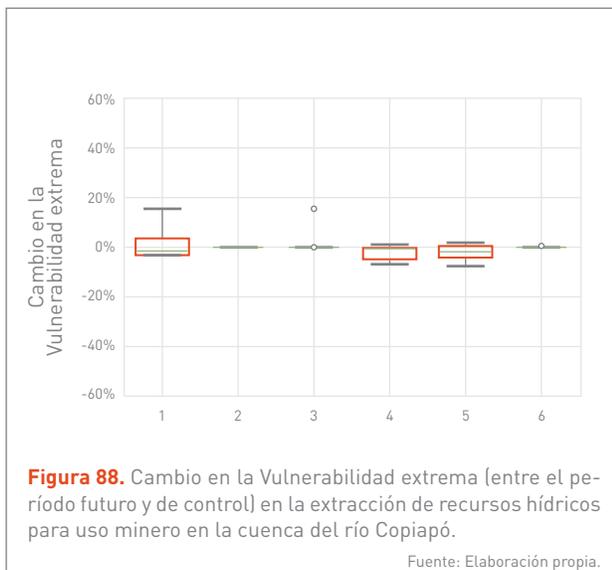
La **Figura 84** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema de los usuarios de riego aguas arriba del embalse Lautaro, los cuales son: 1) regantes de la Junta-Lautaro, 2) regantes del río Jorquera, 3) regantes del río Pulido y 4) regantes del río Manflas.

La **Figura 85** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema de los usuarios de riego aguas abajo del embalse Lautaro hasta Copiapó, los cuales corresponden a: 5) regantes de Lautaro - Capilla, 6) regantes del Capilla - San Antonio, 7) regantes de San Antonio - La Puerta, 8) regantes de La Puerta - La Turbina, 9) regantes de La Turbina - El Yeso, 10) regantes de El Yeso - C. Negras, 11) regantes de C. Negras - Pabellón, 12) regantes de Pabellón - Cerrillos y 13) regantes de Cerrillos - Mal Paso.

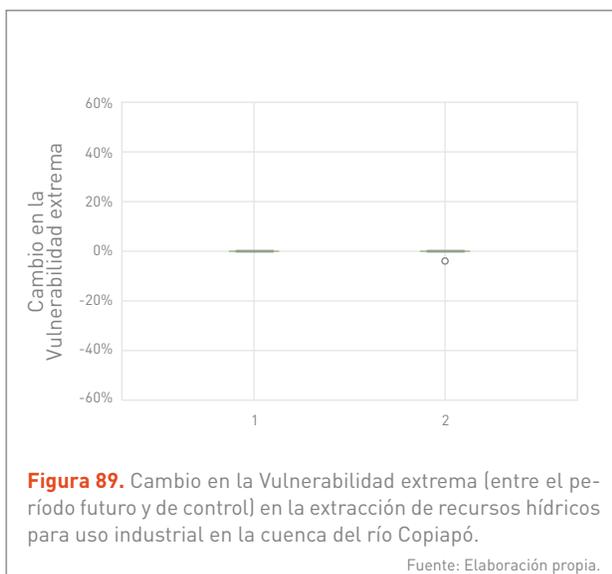
La **Figura 86** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema de los usuarios de riego desde Copiapó hasta Angostura, los cuales corresponden a: 14) regantes de Mal Paso - Palermo, 15) regantes de Palermo - La Florida, 16) regantes de La Florida - Copiapó, 17) regantes de Copiapó - Chamonate, 18) regantes de Chamonate - Colgada, 19) regantes de Colgada - Valle Fértil y 20) regantes de Valle Fértil - Angostura.

La **Figura 87** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema de los usuarios de agua potable de la cuenca entre el embalse Lautaro y Angostura, los cuales corresponden a: 1) S02A_AP, 2) S03B_AP, 3) S04A_AP, 4) S05A_AP y 5) S06A_AP.





La **Figura 88** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema de los usuarios de minería de la cuenca aguas arriba del embalse Lautaro hasta Copiapó, los cuales corresponden a: 1) S01B_Minero, 2) S01C_Minero, 3) S02A_Minero, 4) S03B_Minero, 5) S04A_Minero y 6) S05A_Minero.

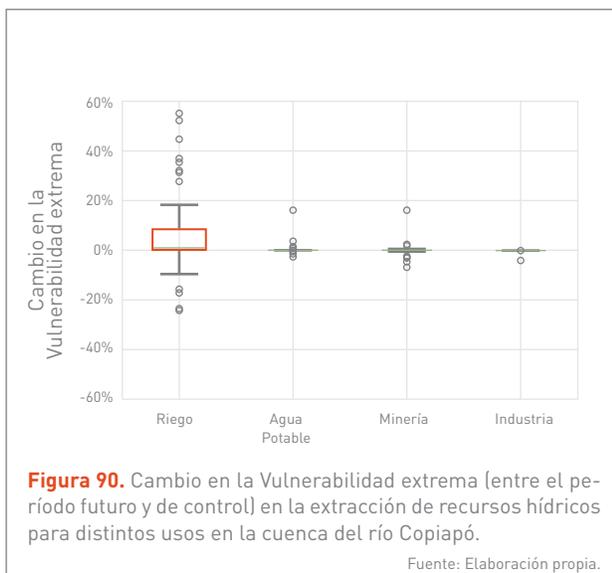


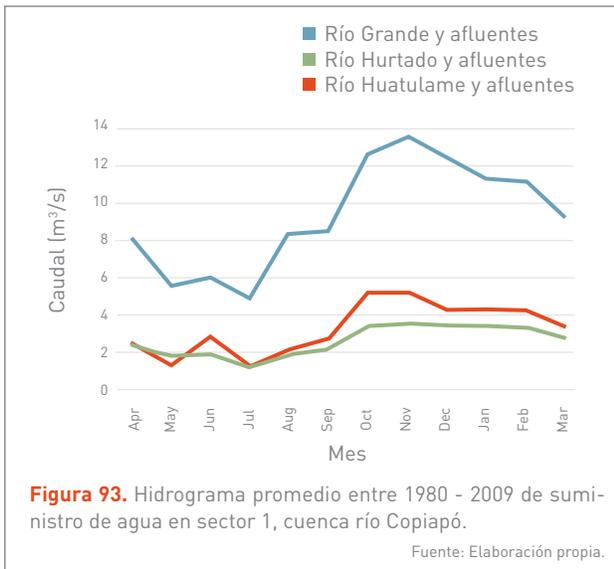
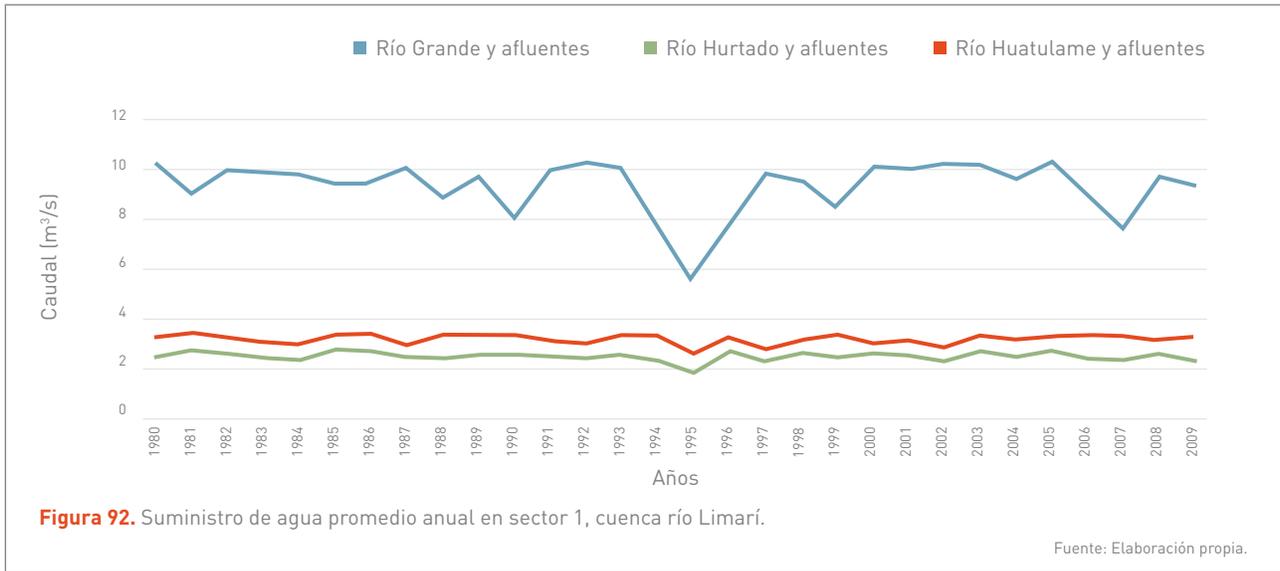
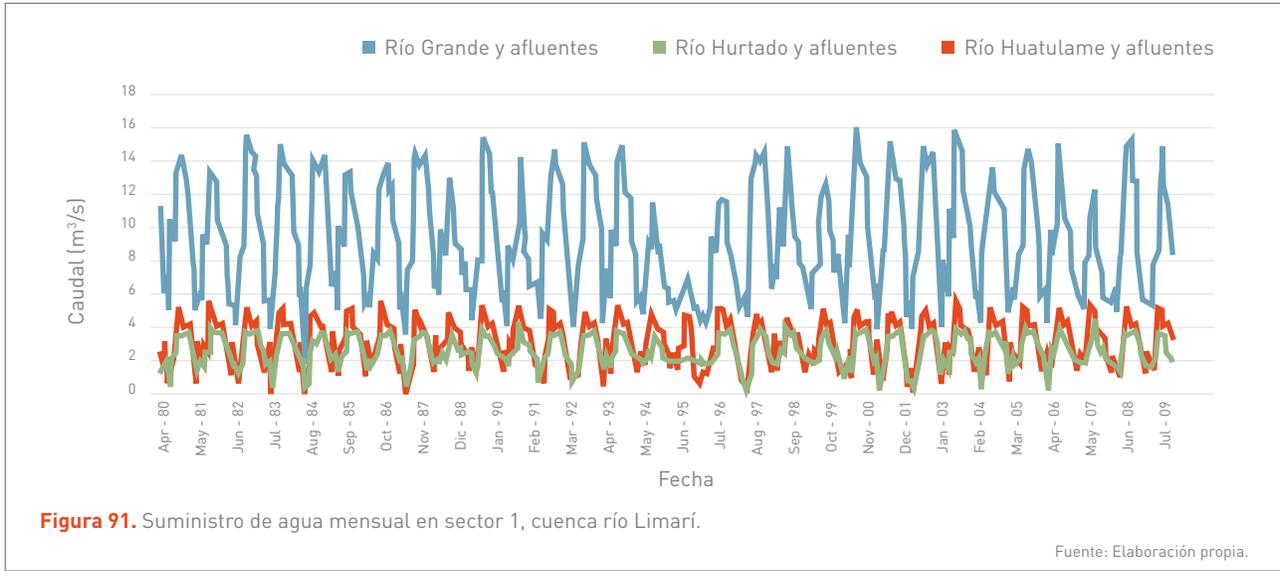
La **Figura 89** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema de los usuarios industriales de la cuenca entre el embalse Lautaro y Copiapó, los cuales corresponden a: 1) S02A_Industriales y 2) S05A_Industriales

9.2.2 RESULTADOS DETALLADOS CUENCA DEL RÍO LIMARÍ

9.2.2.1 VULNERABILIDAD HISTÓRICA

Se definen tres sectores de las zonas de riego de la cuenca del Limarí: sector 1, aguas arriba de embalses; sector 2, entre aguas abajo de embalses y aguas arriba de Ovalle; y sector 3, en la ciudad de Ovalle y alrededores. Los resultados de la Vulnerabilidad histórica se presentan entre la **Figura 91** y la **Figura 102**.





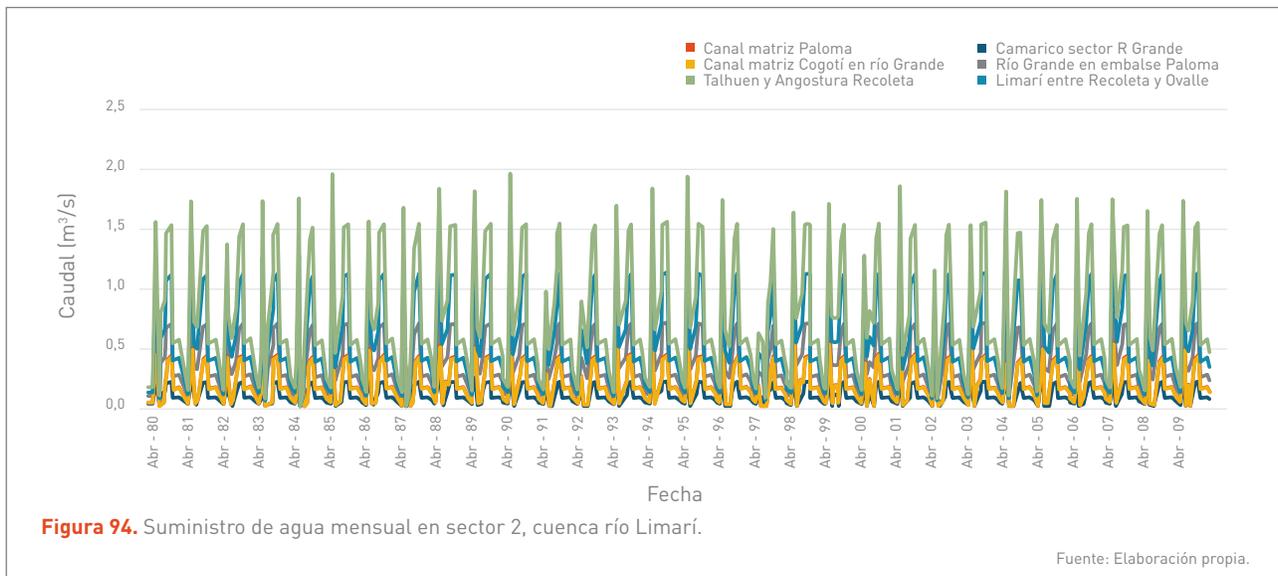


Figura 94. Suministro de agua mensual en sector 2, cuenca río Limarí.

Fuente: Elaboración propia.

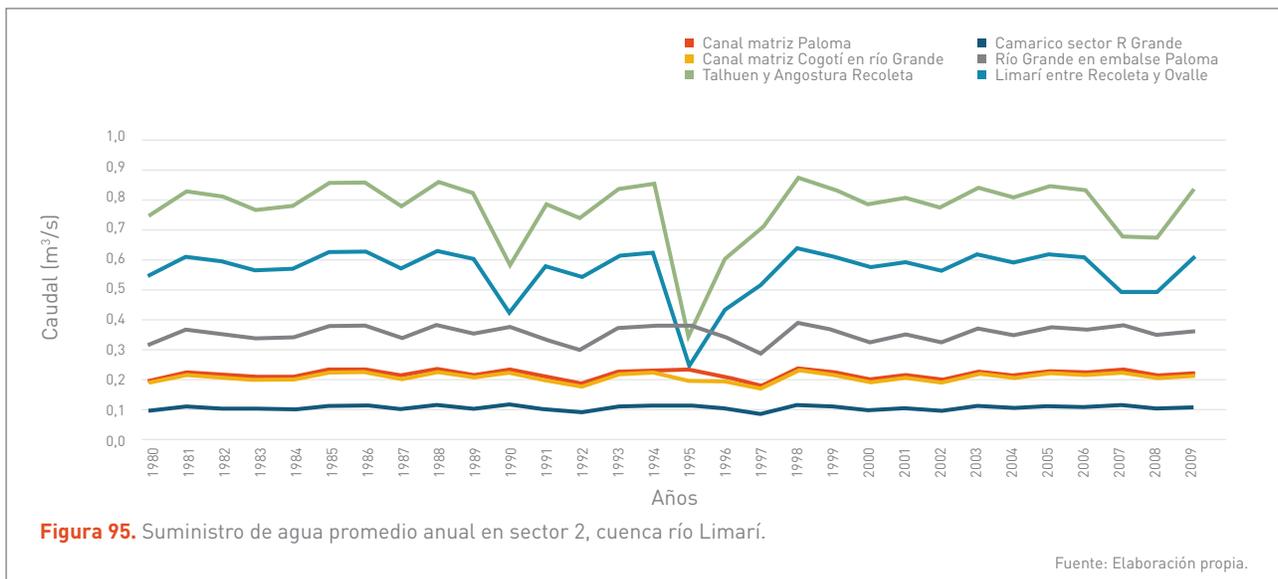


Figura 95. Suministro de agua promedio anual en sector 2, cuenca río Limarí.

Fuente: Elaboración propia.

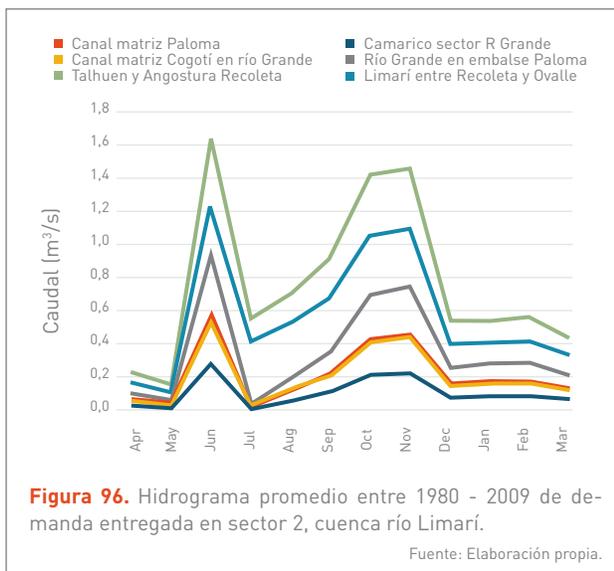
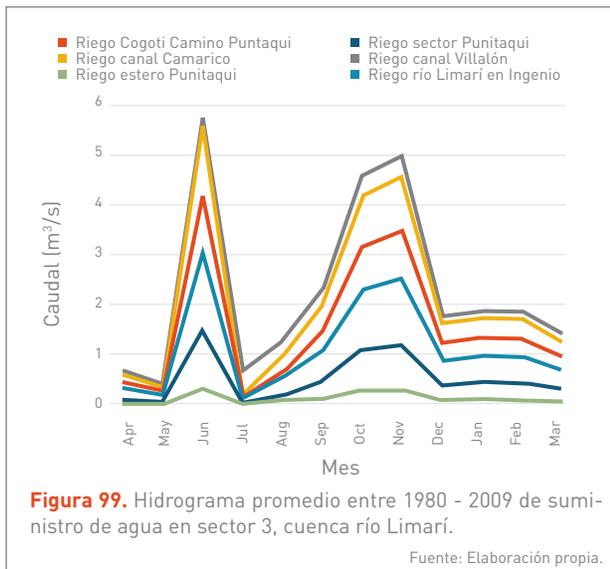
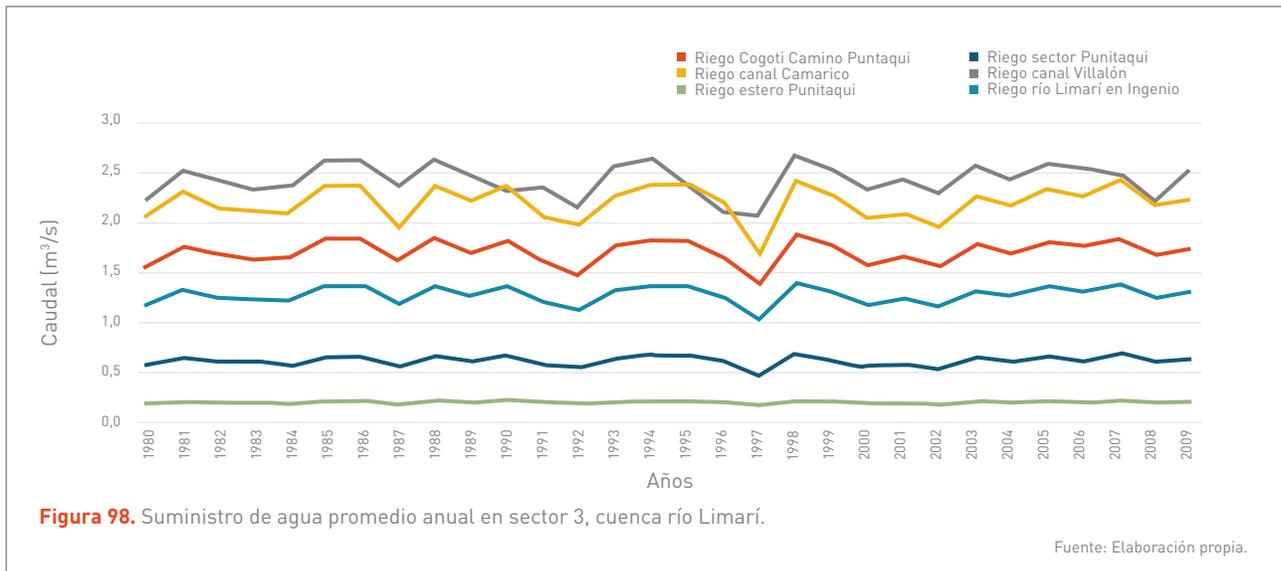
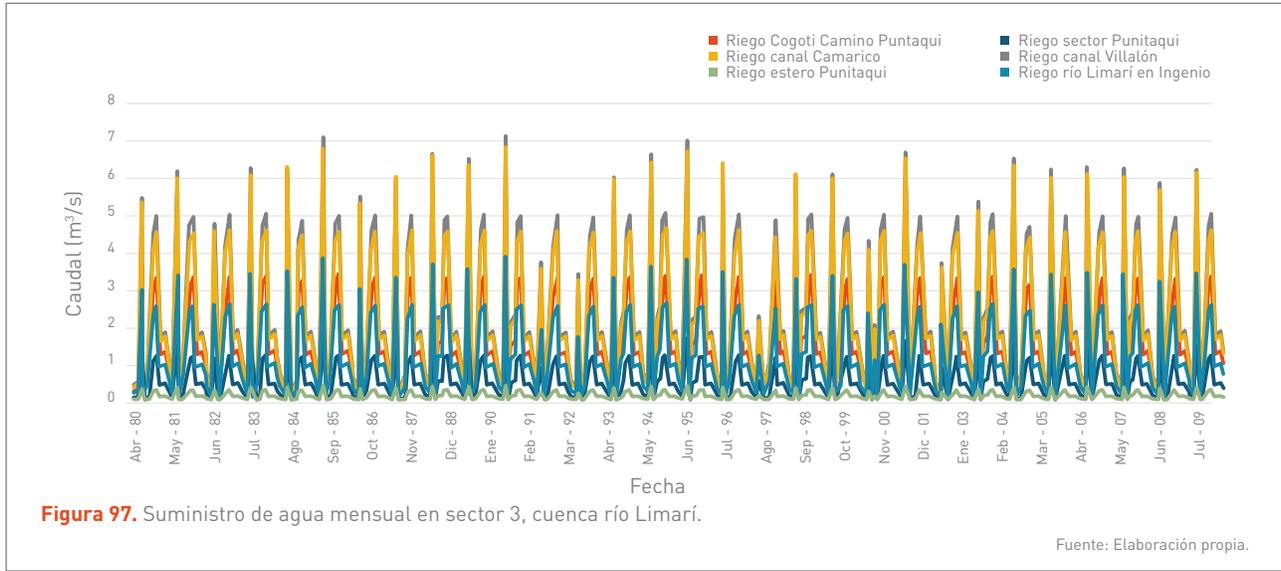
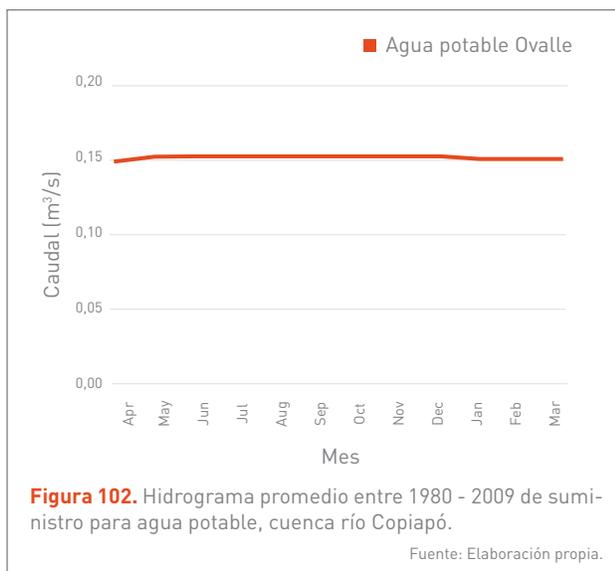
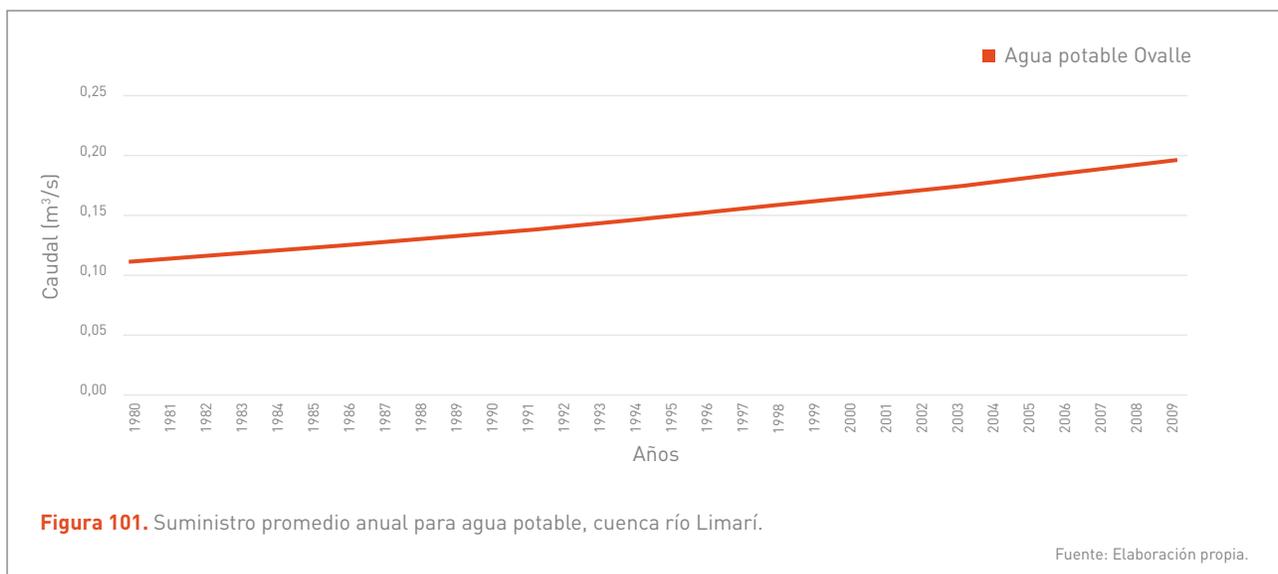
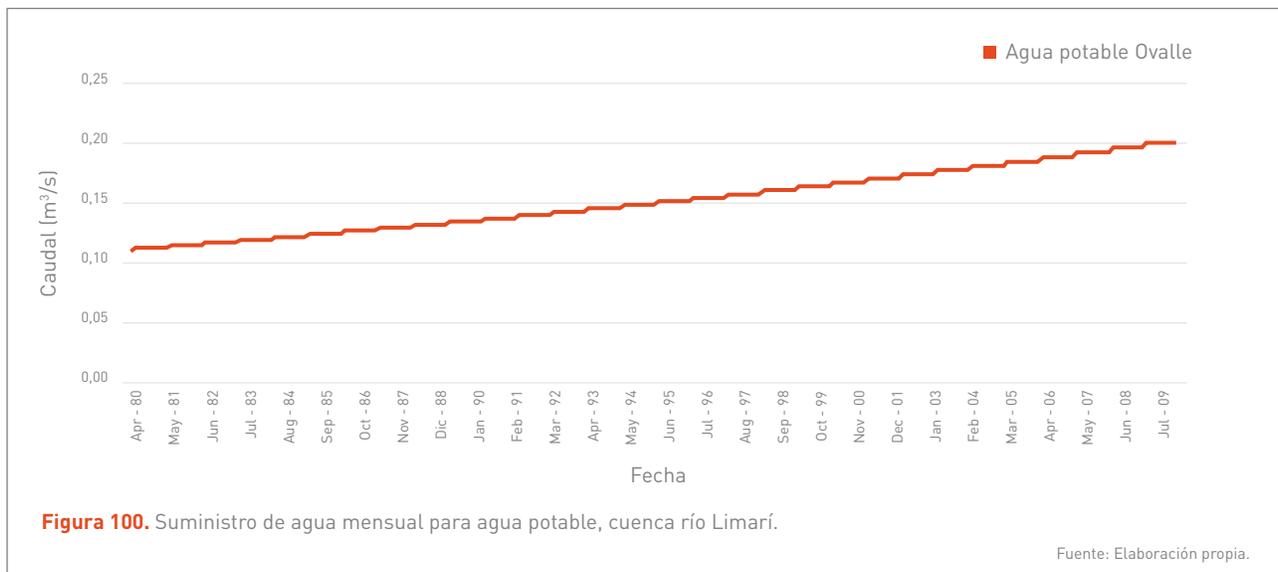


Figura 96. Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 de demanda entregada en sector 2, cuenca río Limarí.

Fuente: Elaboración propia.







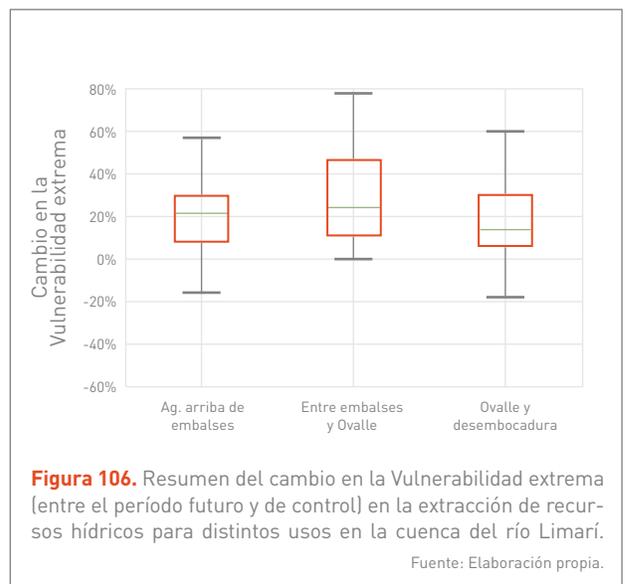
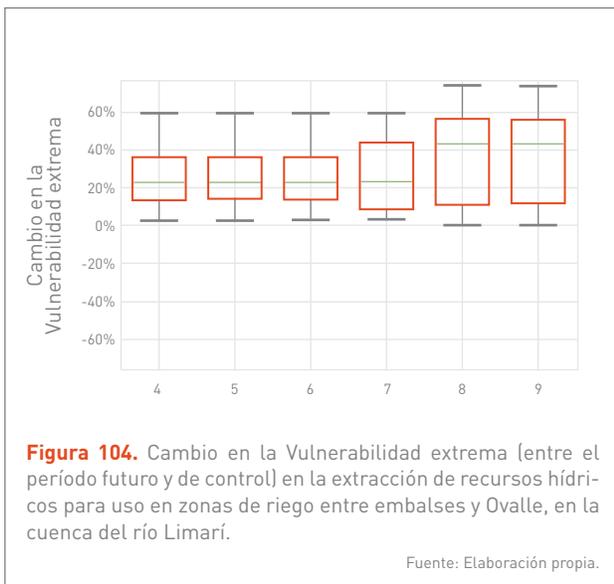
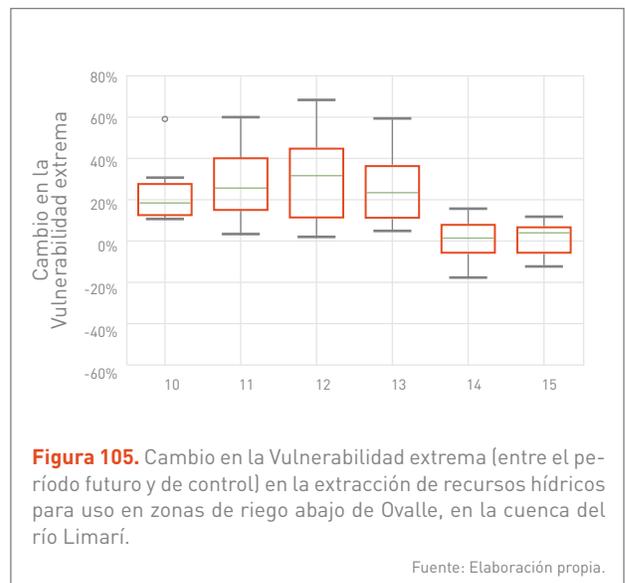
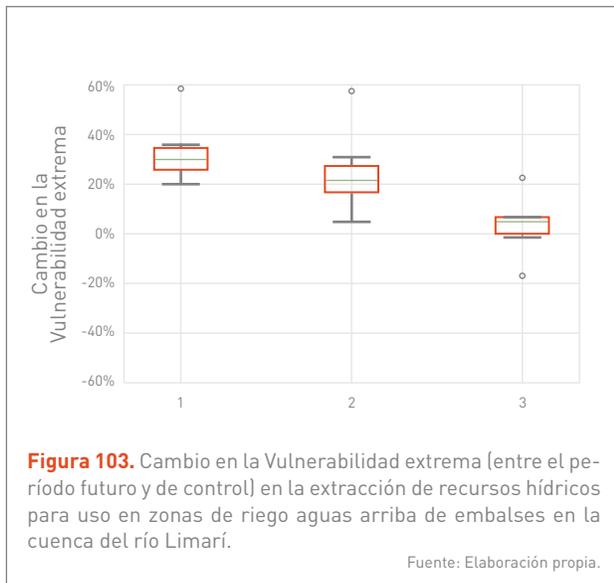
9.2.2.2 CAMBIOS EN VULNERABILIDAD FUTURA

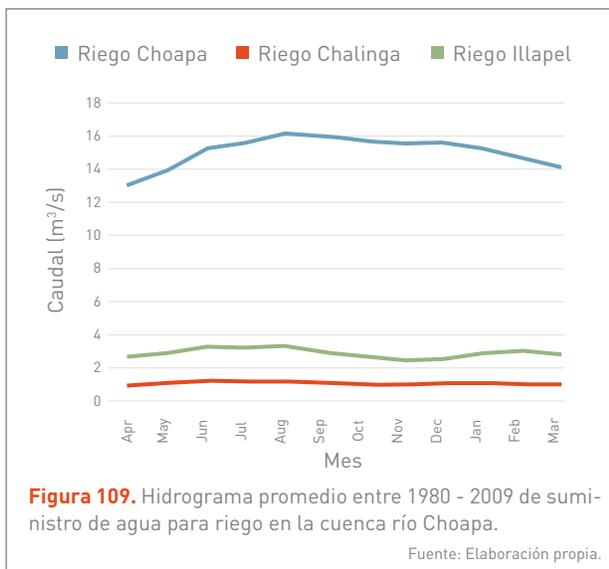
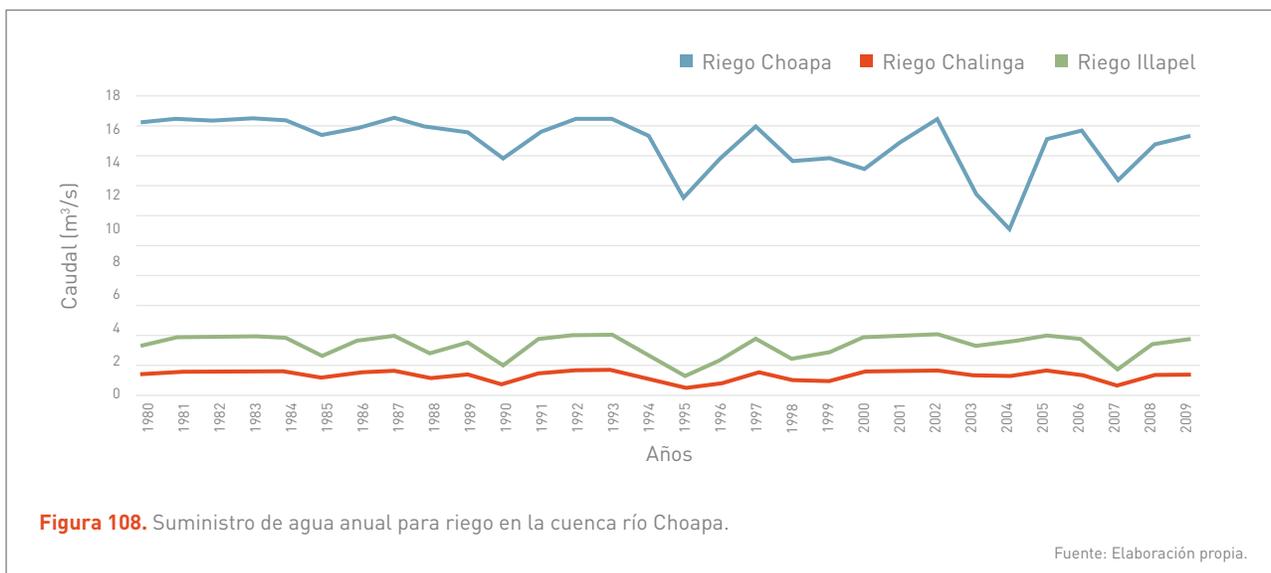
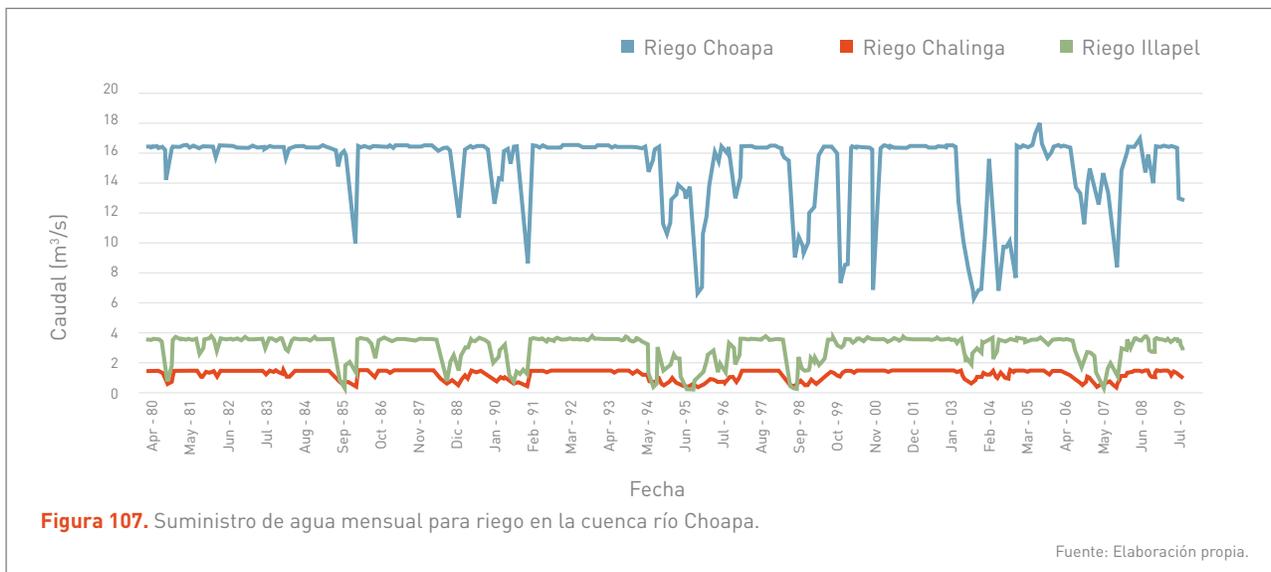
La **Figura 103** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema del sector 1. Los usuarios de agua de este sector de enumeran de acuerdo a la siguiente nomenclatura: 1) regantes en el río Grande y afluentes, 2) regantes en río Huatulame y afluentes, y 3) regantes del río Hurtado y afluentes.

La **Figura 104** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema del sector 2. Los usuarios de agua de ese sector se enumeran de acuerdo a la siguiente nomenclatura: 4) riego

en Camarico, sector río Grande, 5) canal matriz Paloma, 6) regantes en río Grande, en embalse Paloma, 7) canal matriz Cogotí, en río Grande, 8) riego en Limarí, entre Recoleta y Ovalle, y 9) riego en Tralhuén y Angostura Recoleta.

La **Figura 105** muestra el cambio en la Vulnerabilidad media del sector 3. Los usuarios de agua de estos sectores de enumeran de acuerdo a la siguiente nomenclatura: 10) riego sector Punitaqui, 11) riego Cogotí, camino a Punitaqui, 12) riego canal Villalón, 13) riego canal Camarico, 14) riego río Limarí, en Ingenio y 15) riego estero Punitaqui.

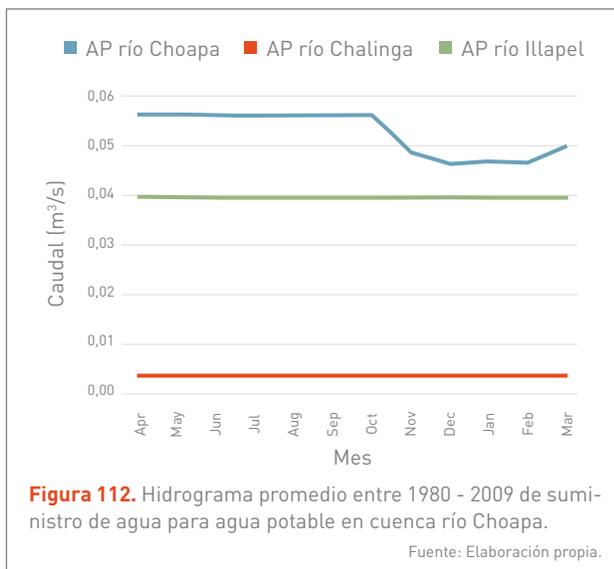
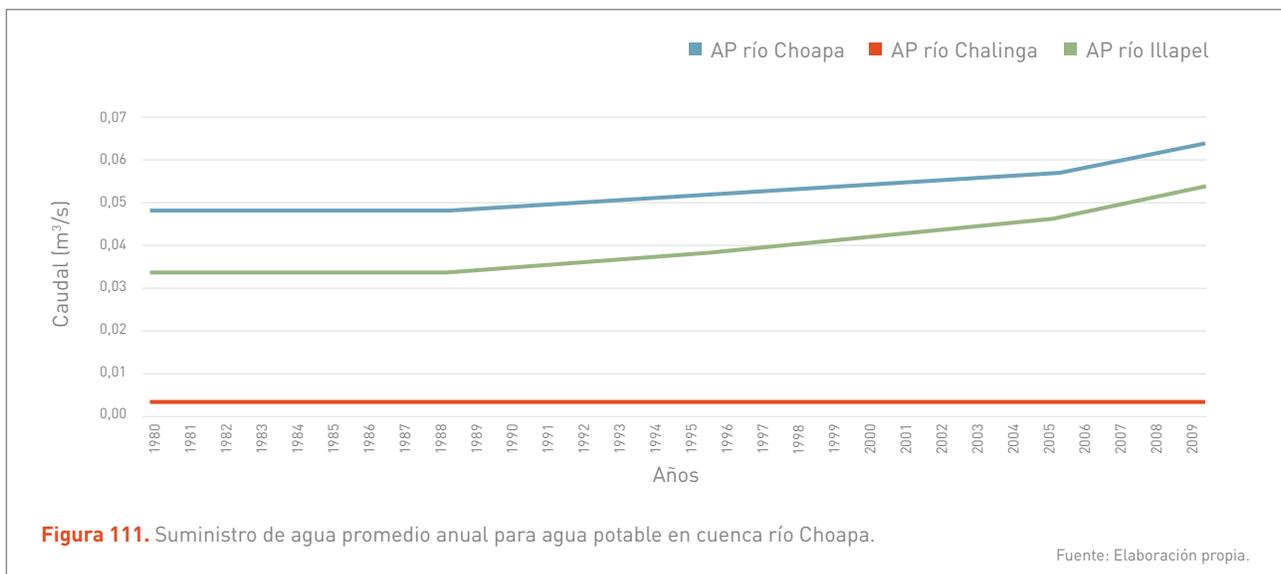
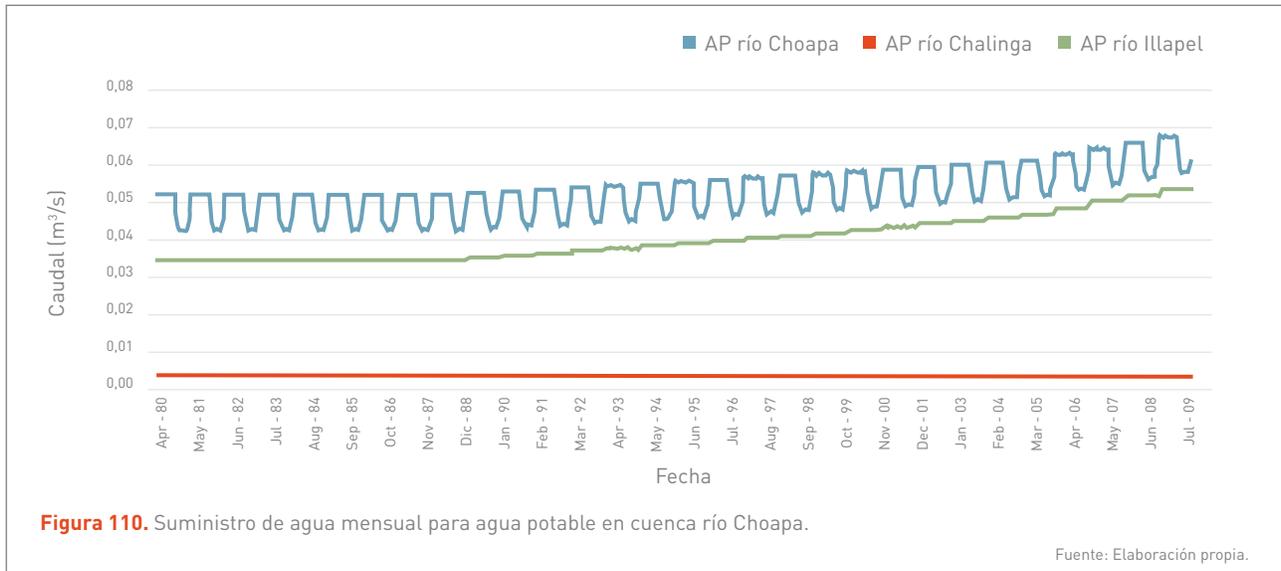


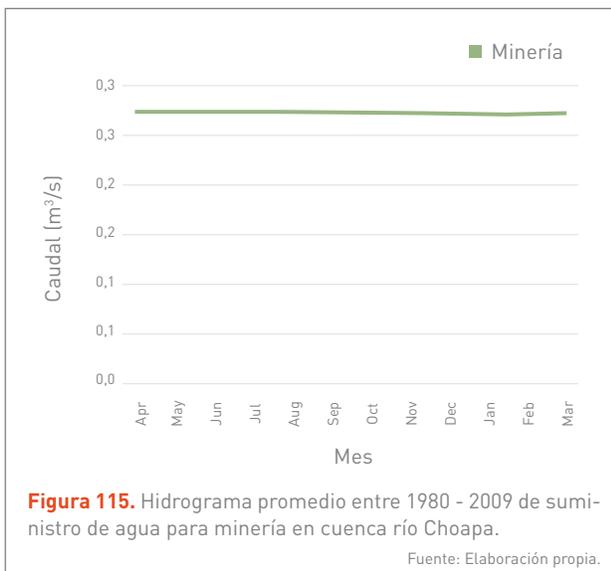
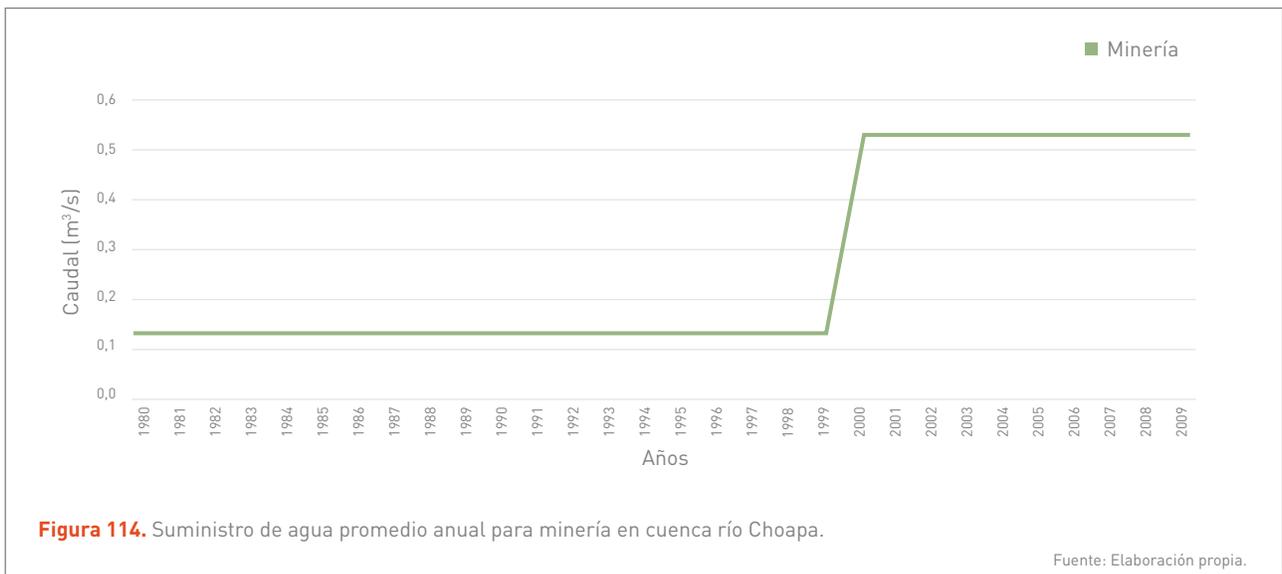


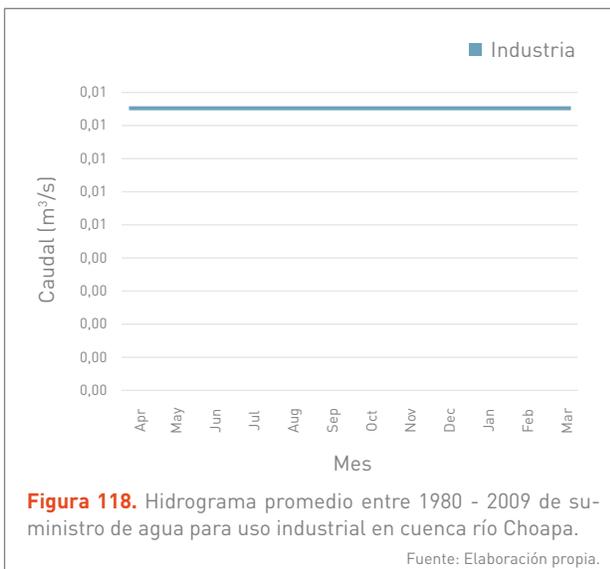
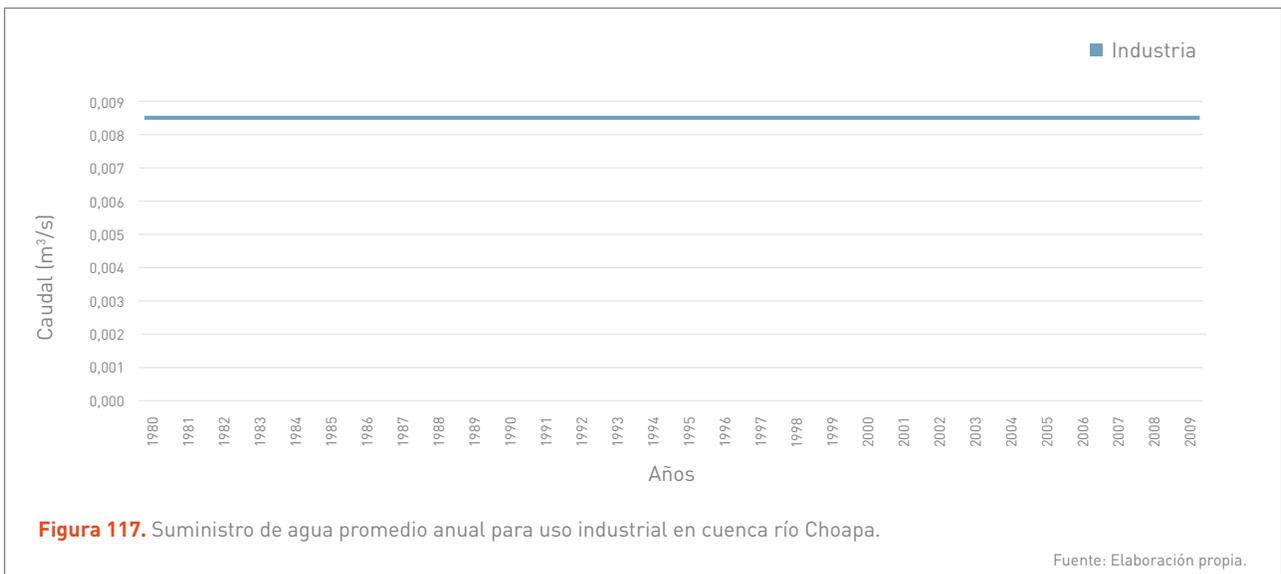
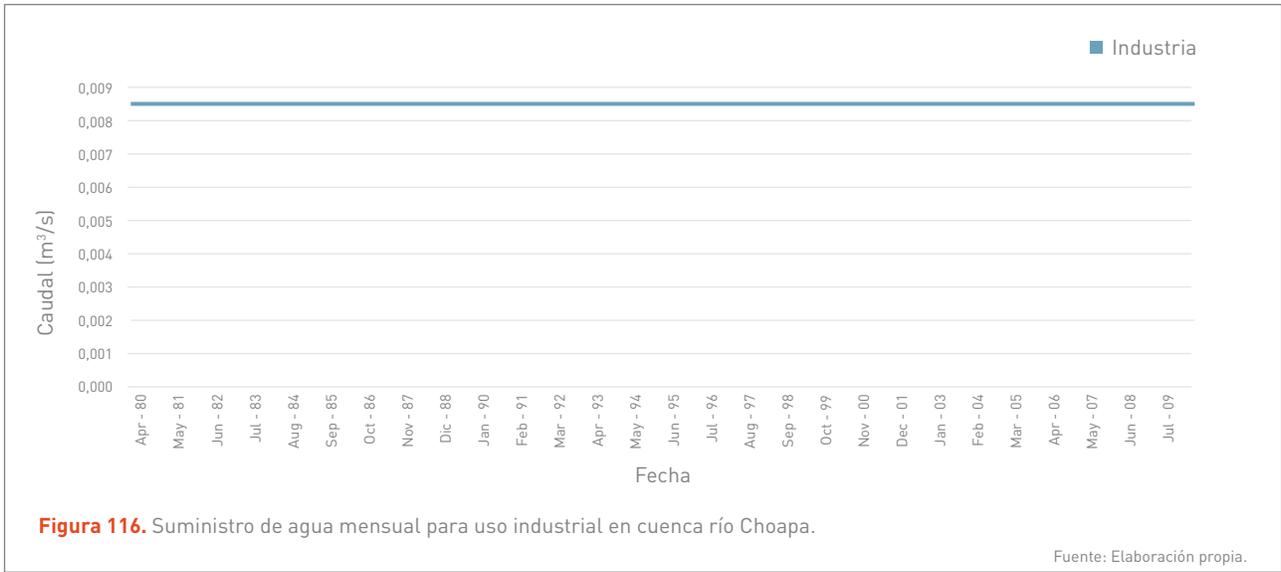
9.2.3 RESULTADOS DETALLADOS CUENCA DEL RÍO CHOAPA

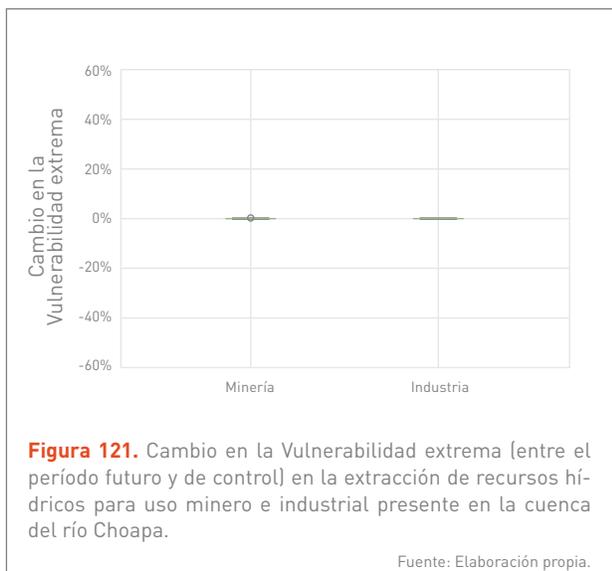
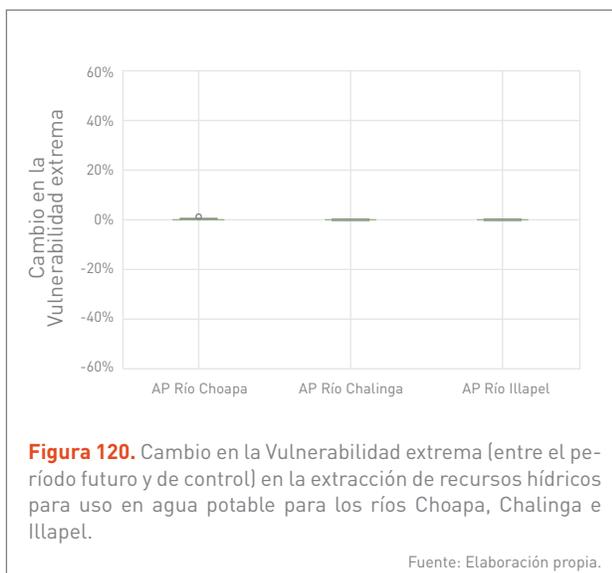
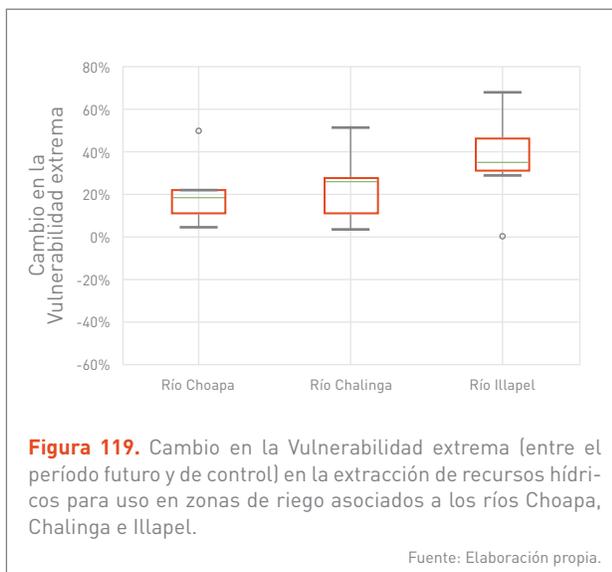
9.2.3.1 VULNERABILIDAD HISTÓRICA

Los resultados de la Vulnerabilidad histórica se presentan a continuación, entre la **Figura 107** y la **Figura 118**.









9.2.3.2 CAMBIOS EN VULNERABILIDAD FUTURA

En términos de Vulnerabilidad extrema, la **Figura 119** muestra el cambio en los caudales disponibles para las zonas de riego vinculadas a los ríos Choapa, Chalinga e Illapel.

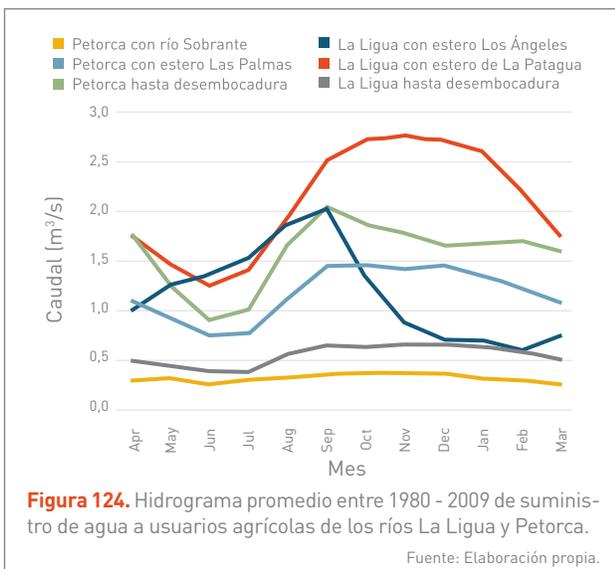
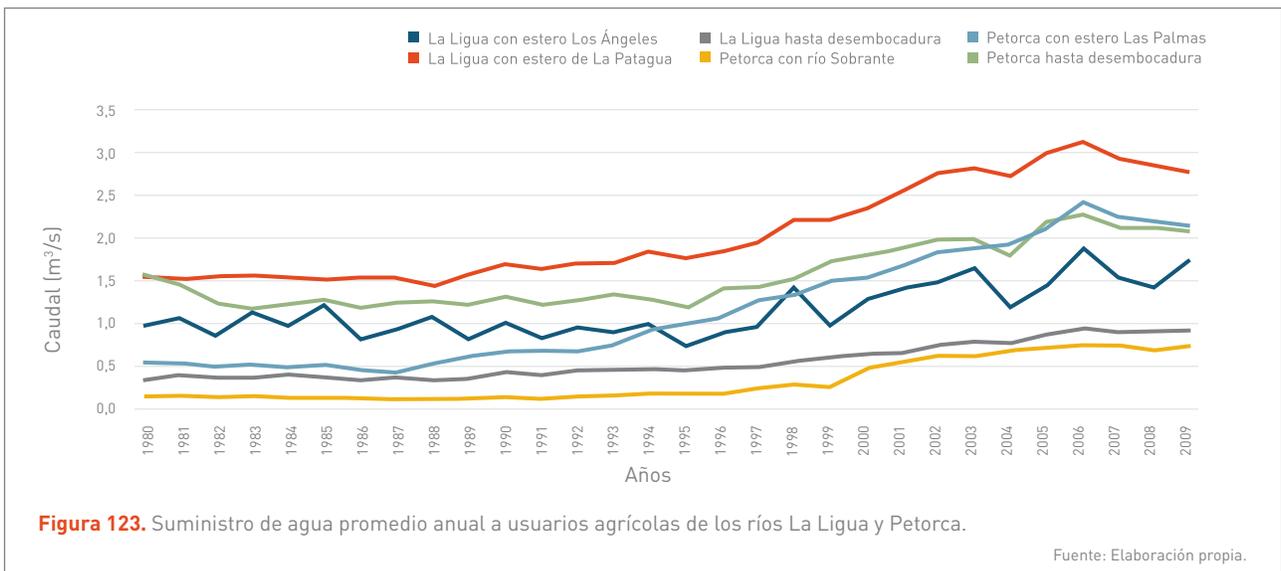
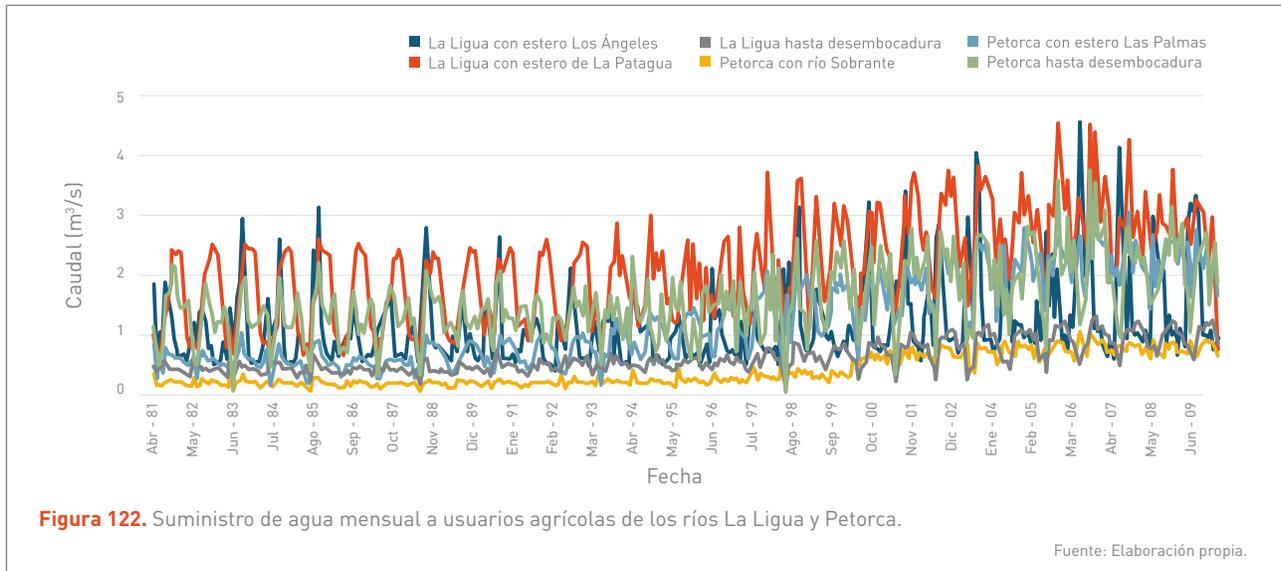
La **Figura 120** muestra el cambio en la Vulnerabilidad media en caudales disponibles para el abastecimiento de agua potable vinculadas a los ríos Choapa, Chalinga e Illapel.

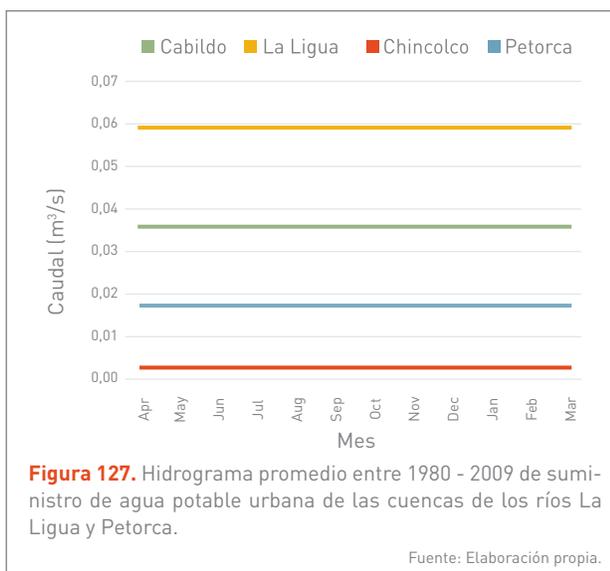
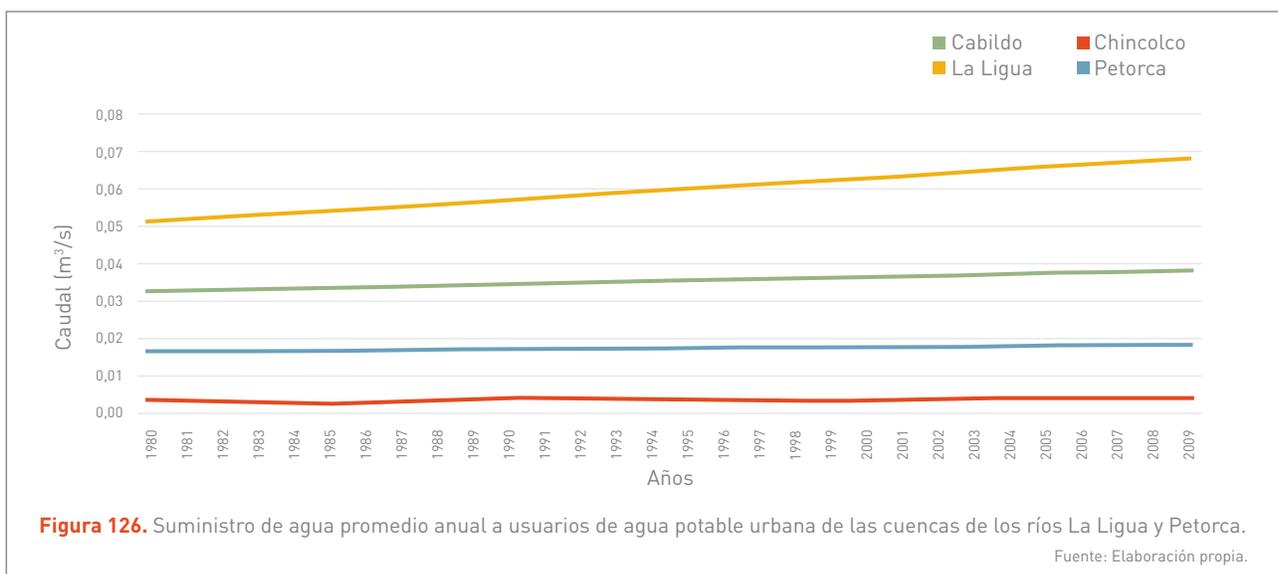
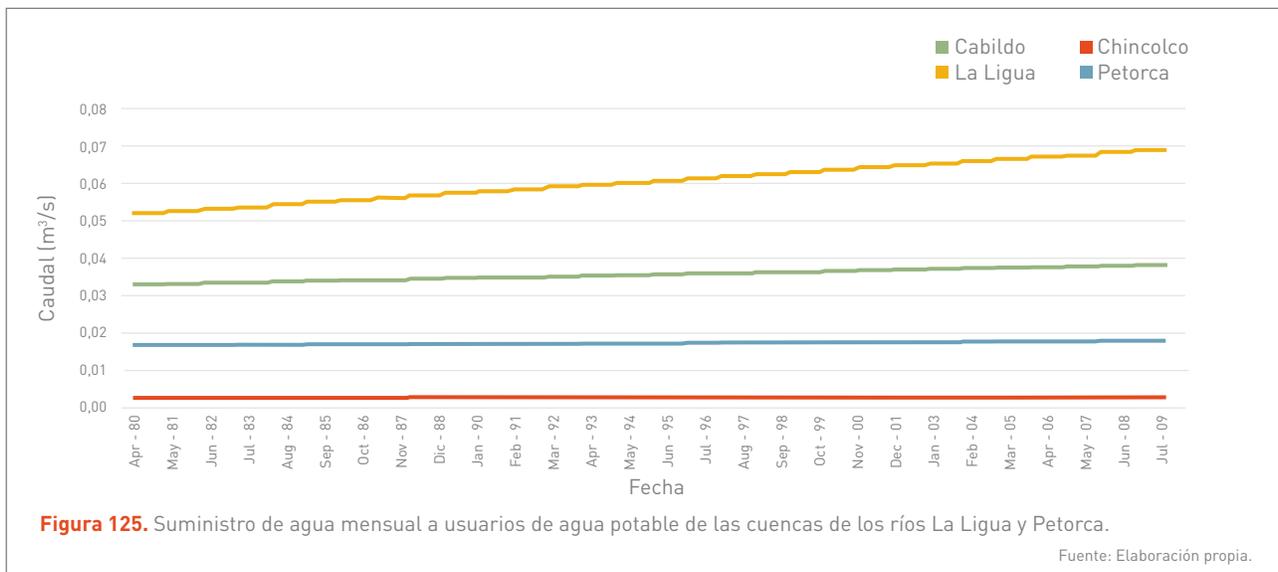
La **Figura 121** muestra el cambio en la Vulnerabilidad extrema para los sectores minería y uso industrial presente en toda la cuenca.

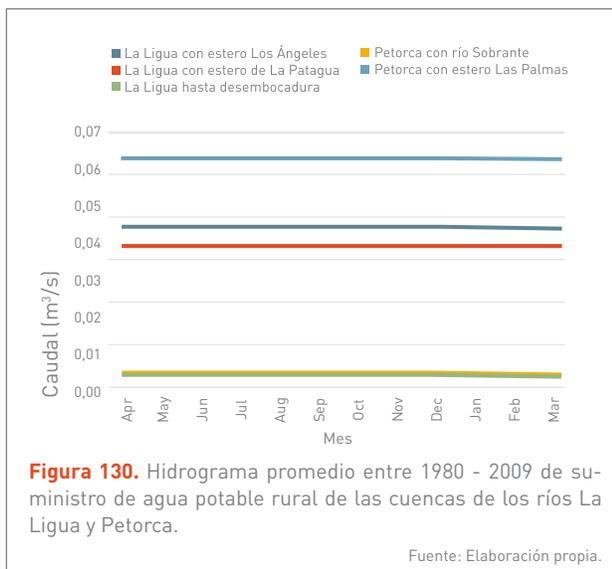
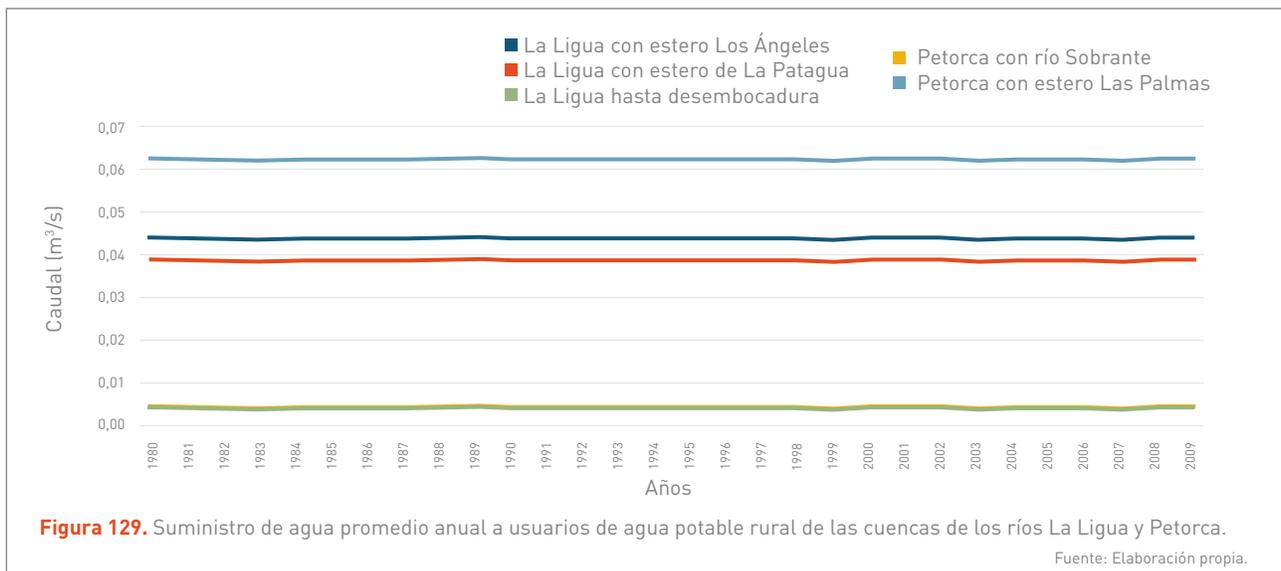
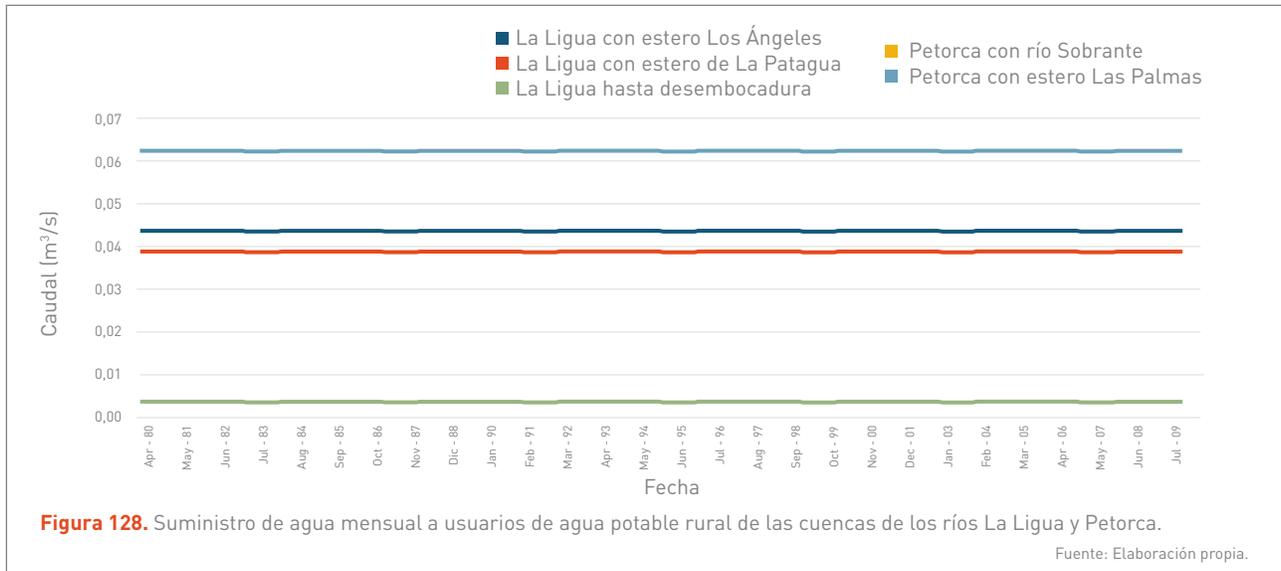
9.2.4 RESULTADOS DETALLADOS CUENCAS DE LOS RÍOS LA LIGUA Y PETORCA

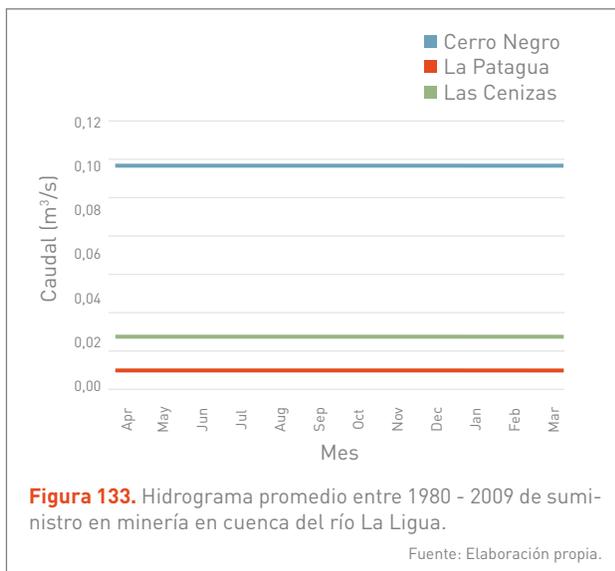
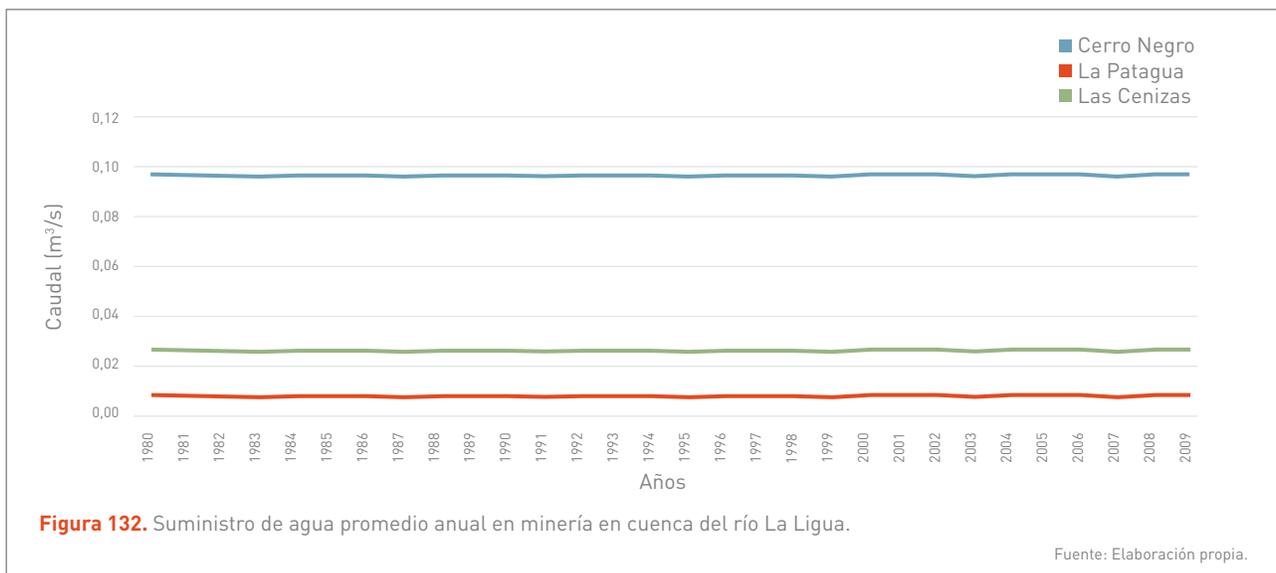
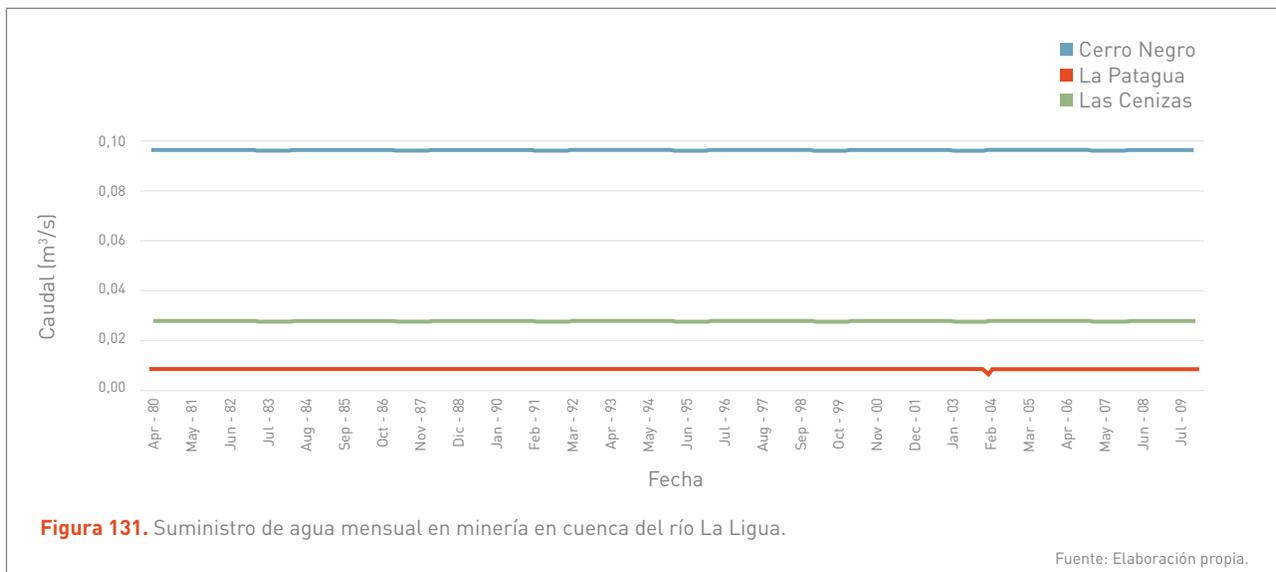
9.2.4.1 VULNERABILIDAD HISTÓRICA

Para los usuarios agrícolas y de agua potable rural se realizó una zonificación de las cuencas. Para esta división, se consideró la extensión de los ríos principales de cada cuenca, por tanto, para la agricultura en La Ligua se tomó los tramos: La Ligua con estero Los Ángeles, La Ligua con estero La Patagua y La Ligua hasta desembocadura. Para Petorca, los tramos son: Petorca hasta confluencia con río Sobrante, Petorca con estero Las Palmas y Petorca hasta desembocadura. Con respecto a los usuarios agrícolas, se evidencia un aumento en el requerimiento de caudal en el tiempo, lo cual se debe al crecimiento de las superficies agrícolas hacia el final del período de análisis. Los resultados de la Vulnerabilidad histórica se presentan entre la **Figura 122** y la **Figura 133** desde la página siguiente.









9.2.4.2 CAMBIOS EN VULNERABILIDAD FUTURA

En la página siguiente se presentan los cambios en la Vulnerabilidad extrema para los diferentes usuarios de las cuencas, teniendo en cuenta aporte superficial y subterráneo. La Figura 134 muestra la Vulnerabilidad extrema en el uso de agua agrícola, donde: 1) La Ligua con estero Los Ángeles, 2) La Ligua con estero La Patagua, 3) La Ligua hasta desembocadura, 4) Petorca con río Sobrante, 5) Petorca con estero Las Palmas y 6) Petorca hasta desembocadura.



La **Figura 135** muestra la Vulnerabilidad extrema para el uso de agua potable rural, donde: 7) La Ligua con estero Los Ángeles, 8) La Ligua con estero La Patagua, 9) La Ligua hasta desembocadura, 10) Petorca con río Sobrante y 11) Petorca con estero Las Palmas.

La **Figura 136** muestra la Vulnerabilidad extrema para el uso de agua potable urbana, donde: 12) Cabildo, 13) Chincolco, 14) La Ligua y 15) Petorca.

La **Figura 137** muestra la Vulnerabilidad media para el uso de agua en minería, donde: 16) Cerro Negro, 17) Las Cenizas y 18) La Patagua.

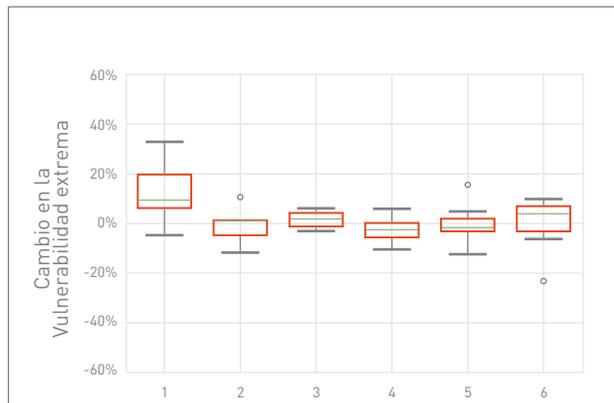


Figura 134. Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en zonas de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.

Fuente: Elaboración propia.

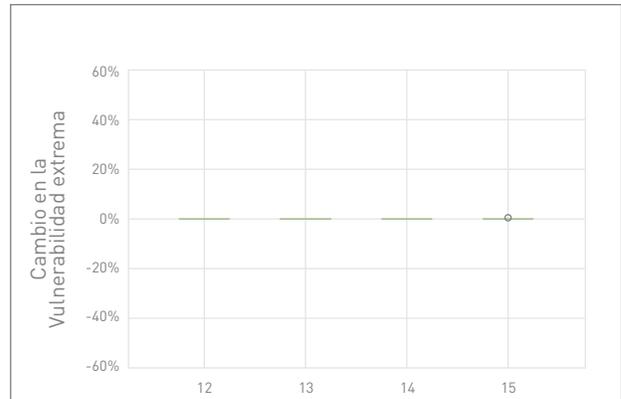


Figura 136. Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso de agua potable urbana en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.

Fuente: Elaboración propia.

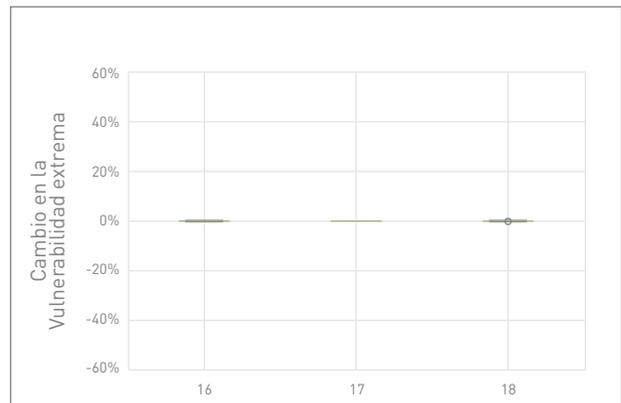


Figura 137. Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso en minería en la cuenca del río La Ligua.

Fuente: Elaboración propia.

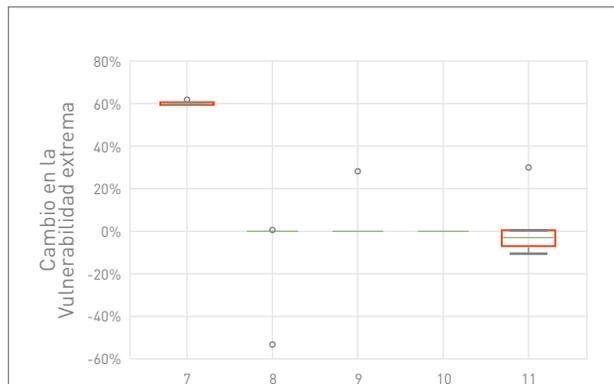


Figura 135. Cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para uso de agua potable rural en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.

Fuente: Elaboración propia.

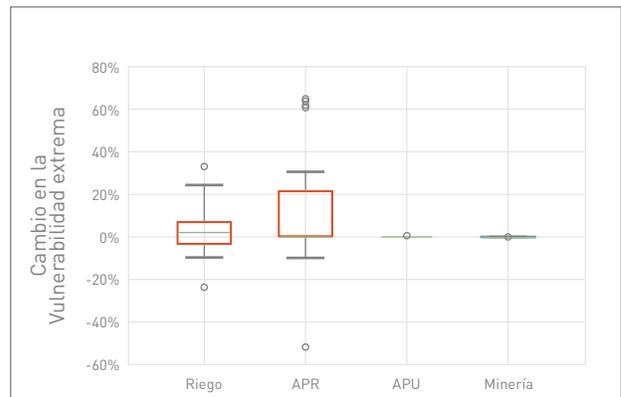


Figura 138. Resumen del cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para distintos usos en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.

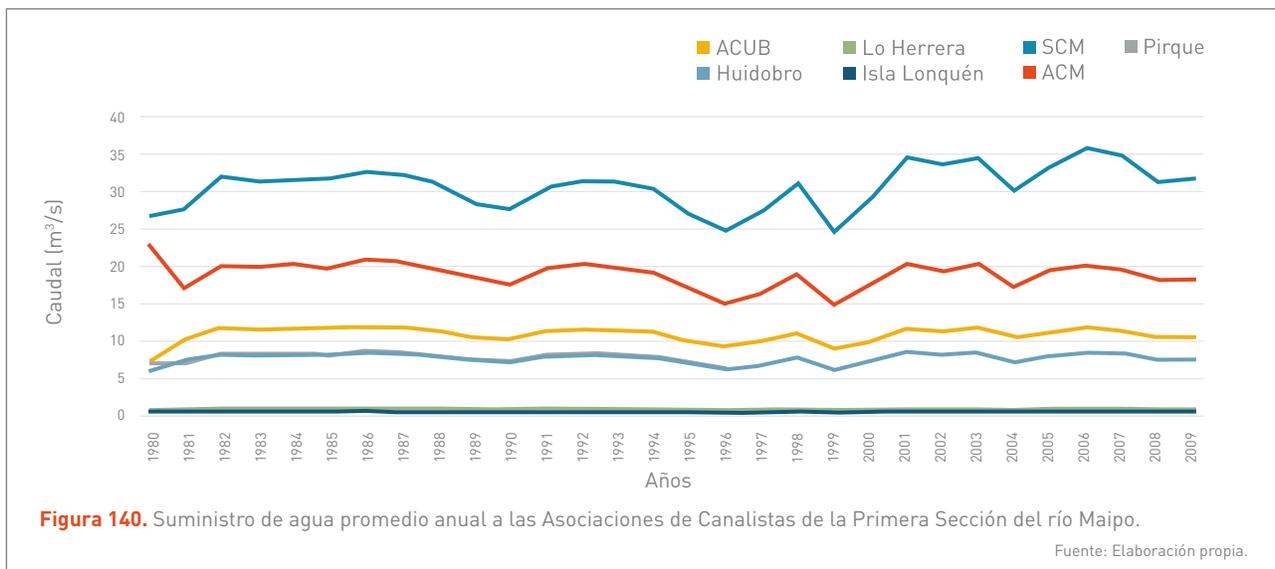
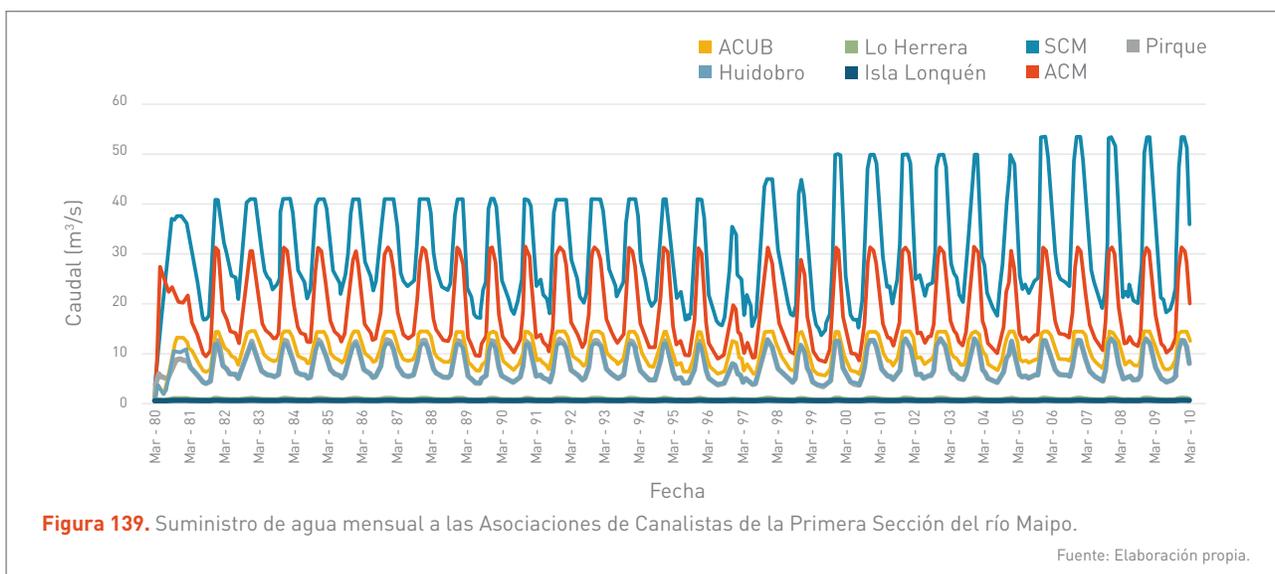
Fuente: Elaboración propia.

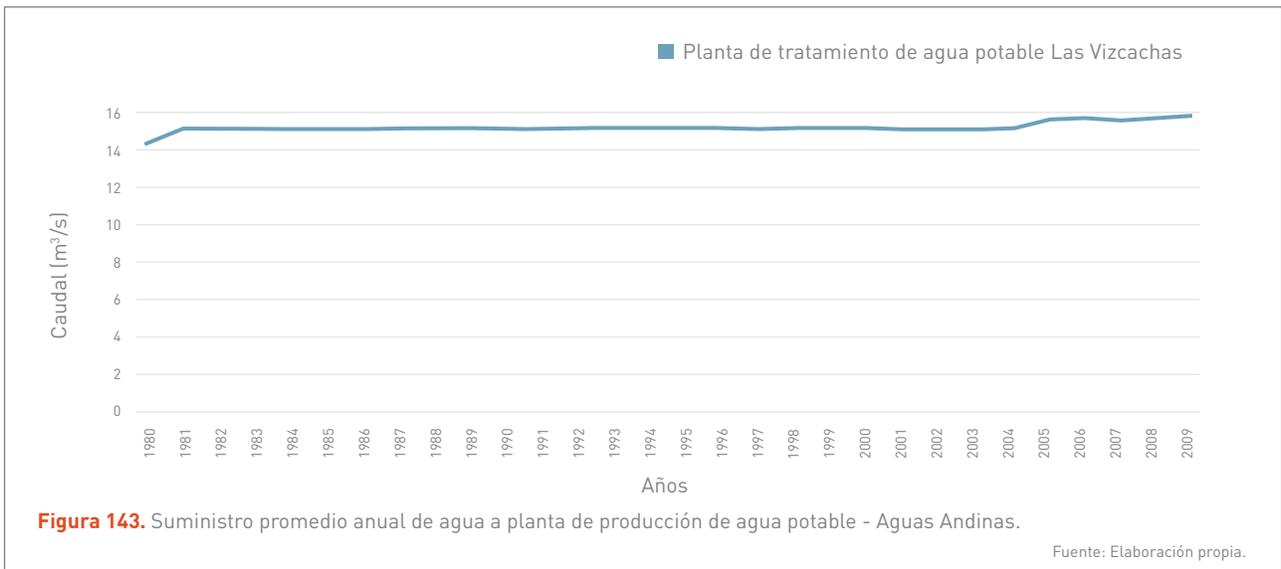
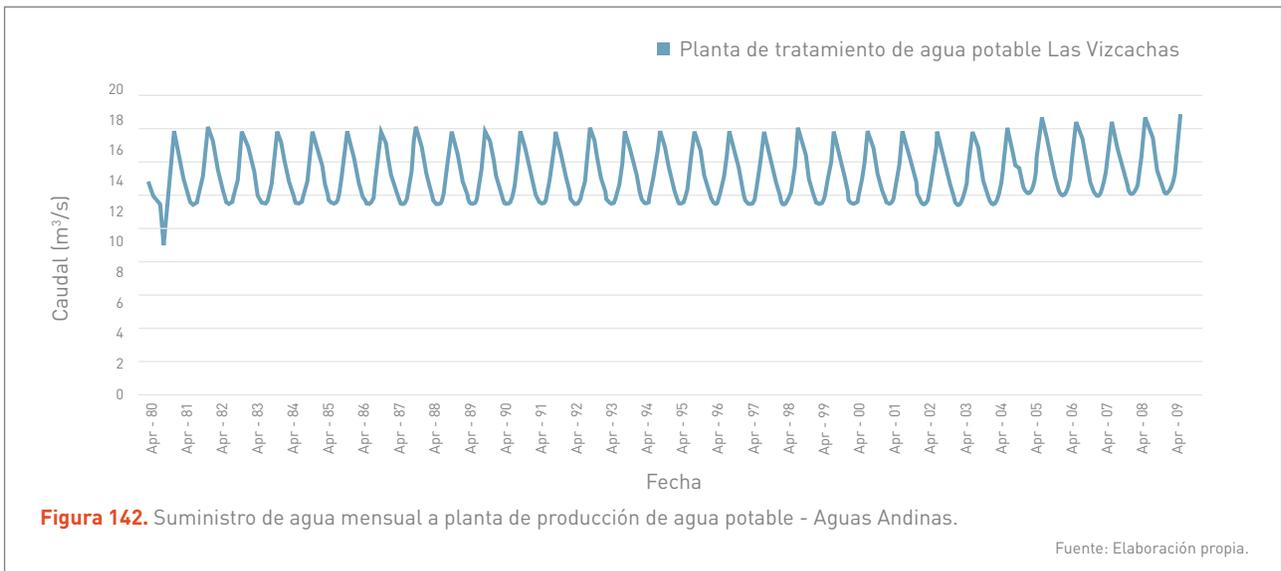
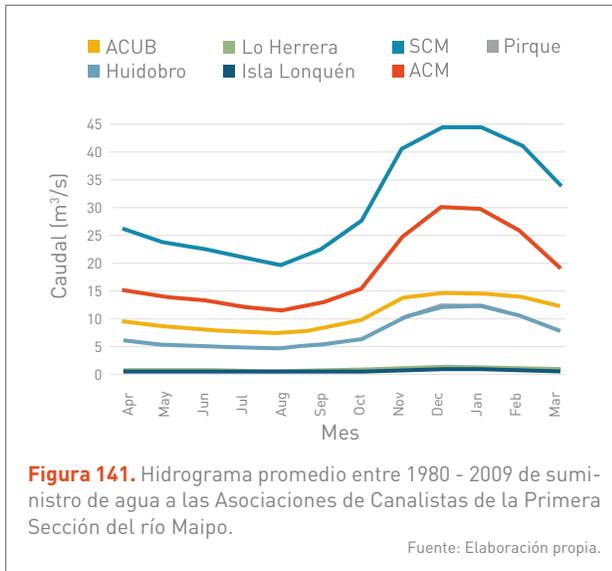


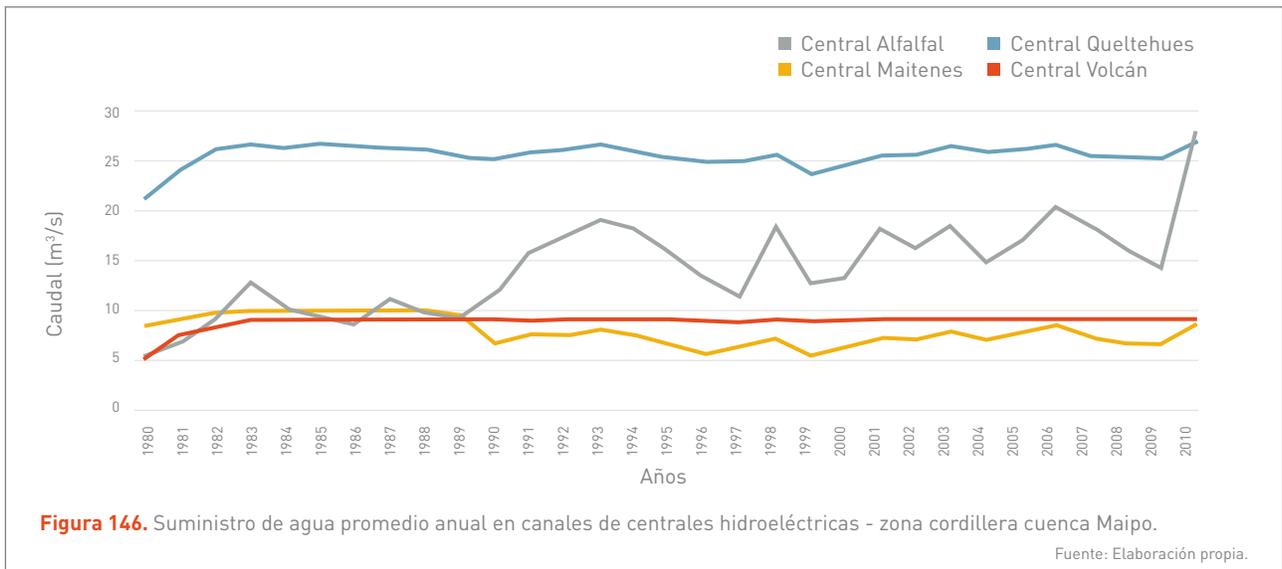
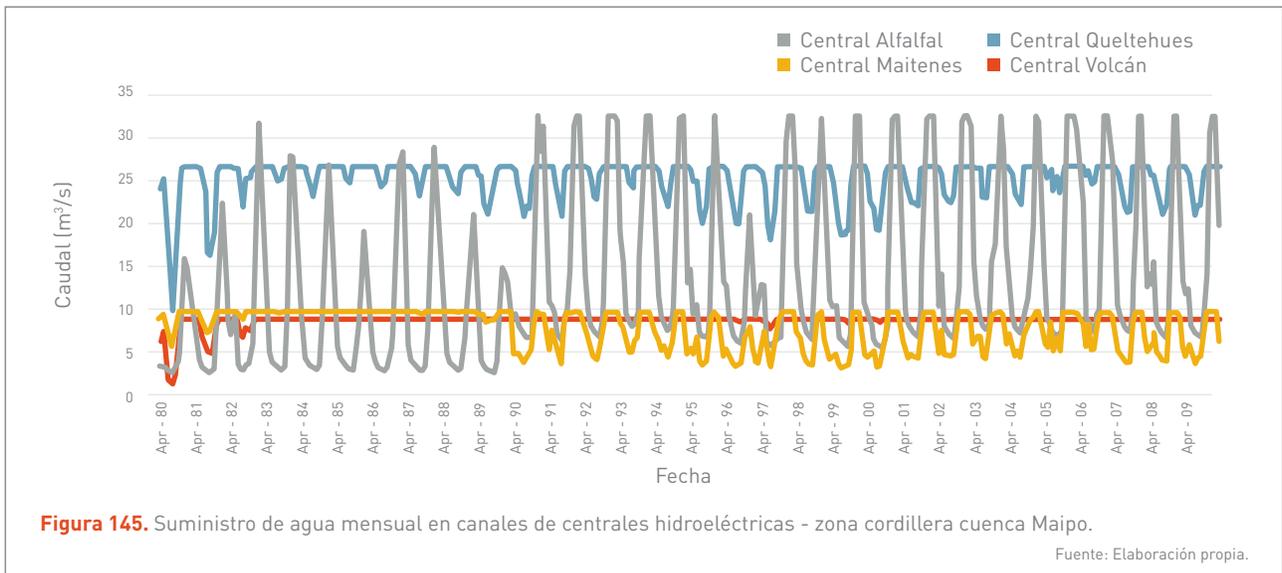
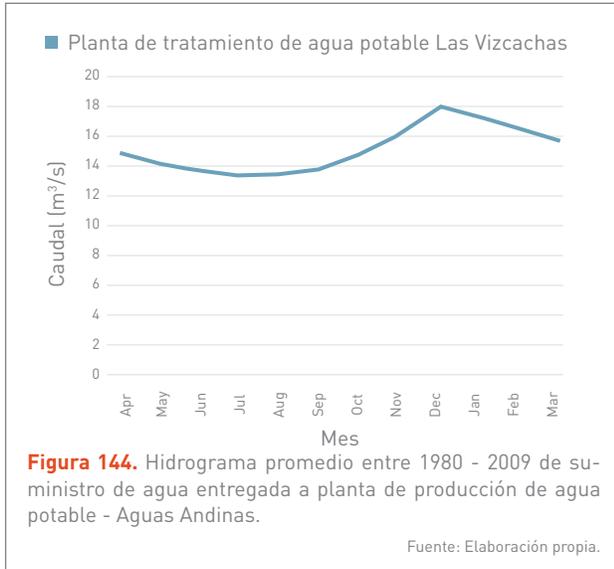
9.2.5 RESULTADOS DETALLADOS CUENCA DEL RÍO MAIPO

9.2.5.1 VULNERABILIDAD HISTÓRICA

Los resultados de la Vulnerabilidad histórica se presentan entre la **Figura 139** y la **Figura 150** desde la página siguiente.







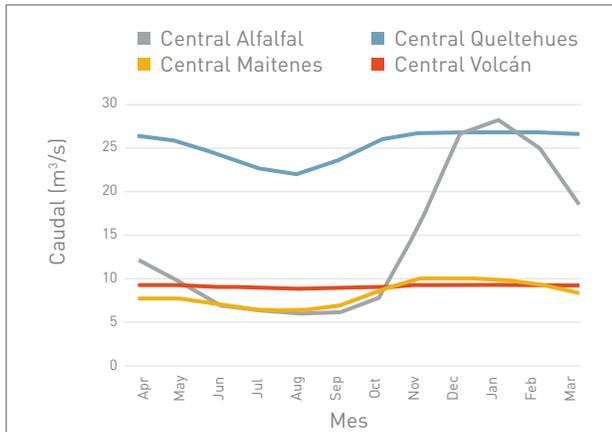


Figura 147. Hidrograma promedio entre 1980 - 2009 del suministro de agua en canales de centrales hidroeléctricas - zona cordillera cuenca Maipo.

Fuente: Elaboración propia.

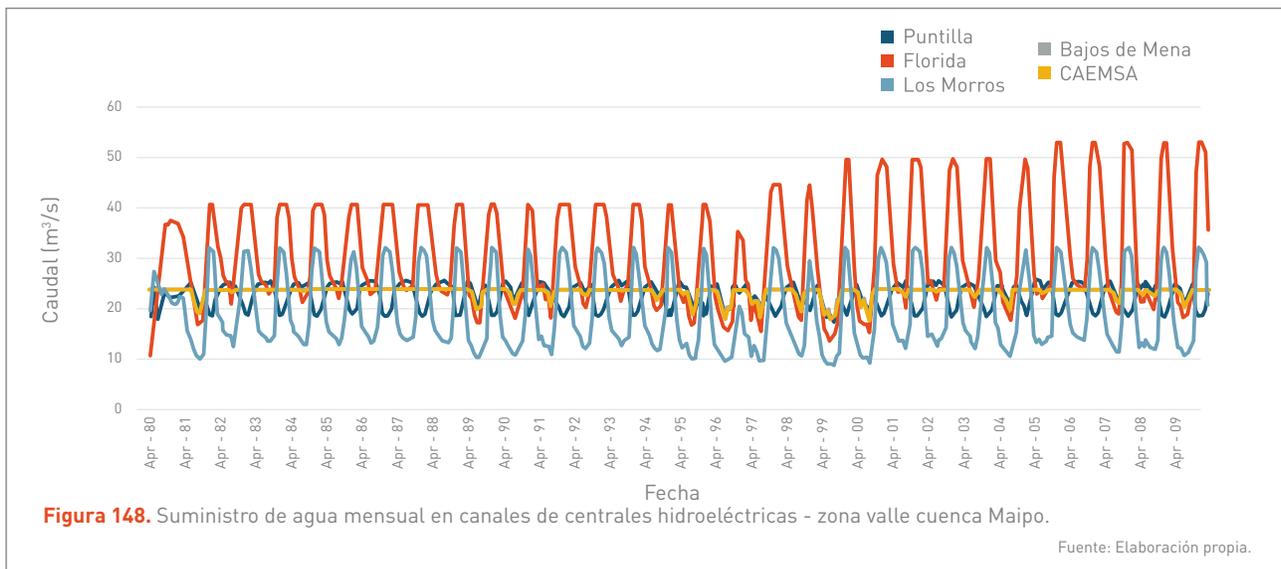


Figura 148. Suministro de agua mensual en canales de centrales hidroeléctricas - zona valle cuenca Maipo.

Fuente: Elaboración propia.

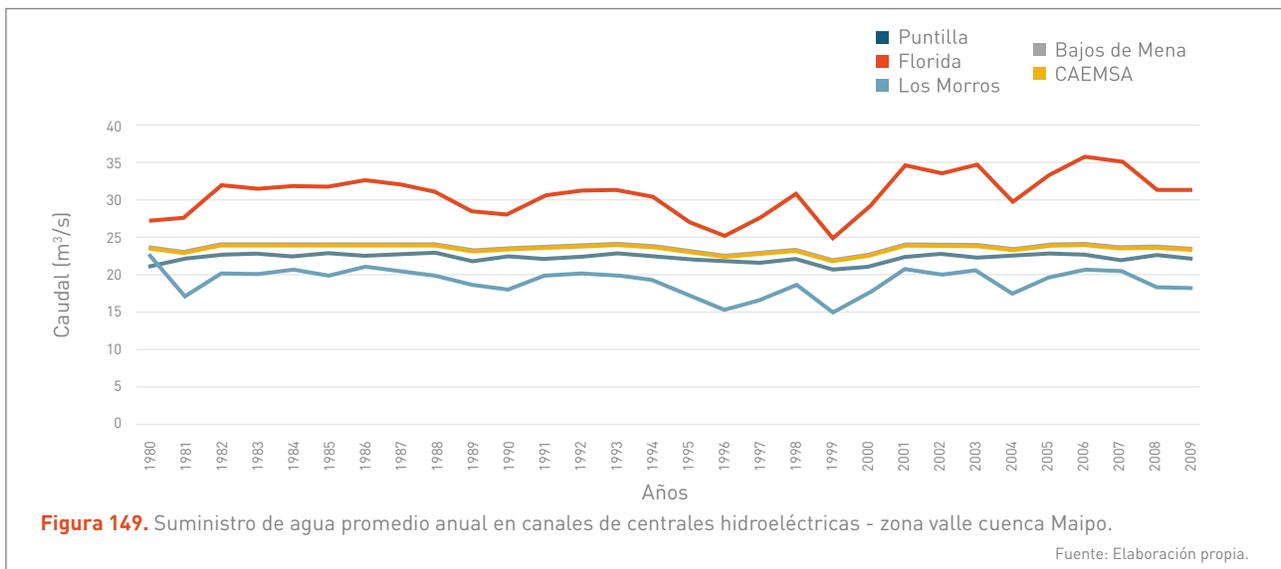
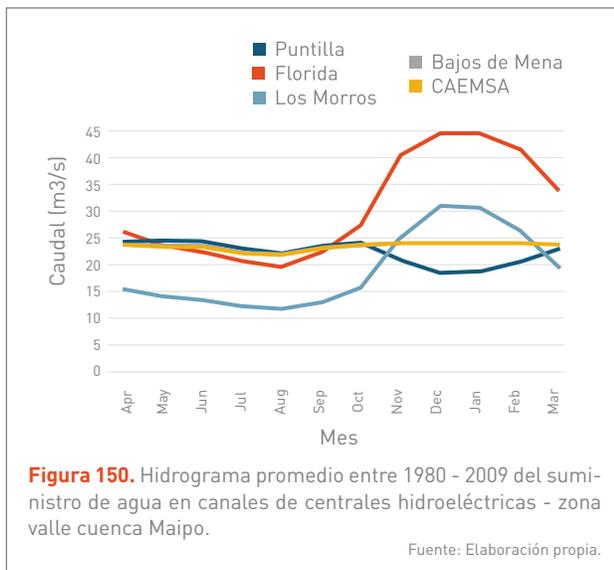


Figura 149. Suministro de agua promedio anual en canales de centrales hidroeléctricas - zona valle cuenca Maipo.

Fuente: Elaboración propia.

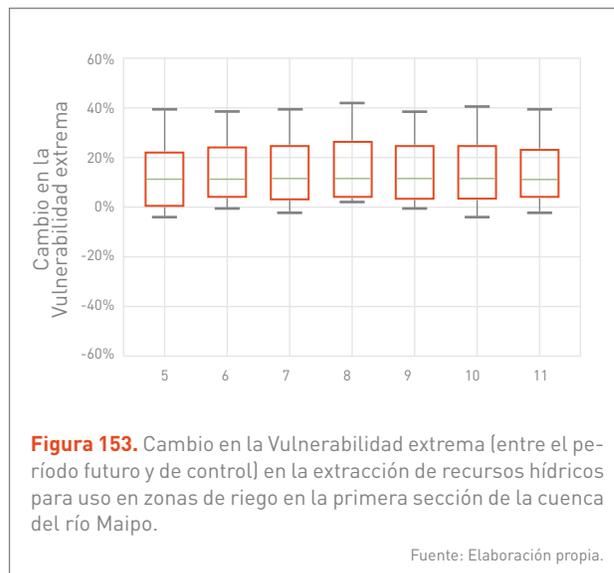
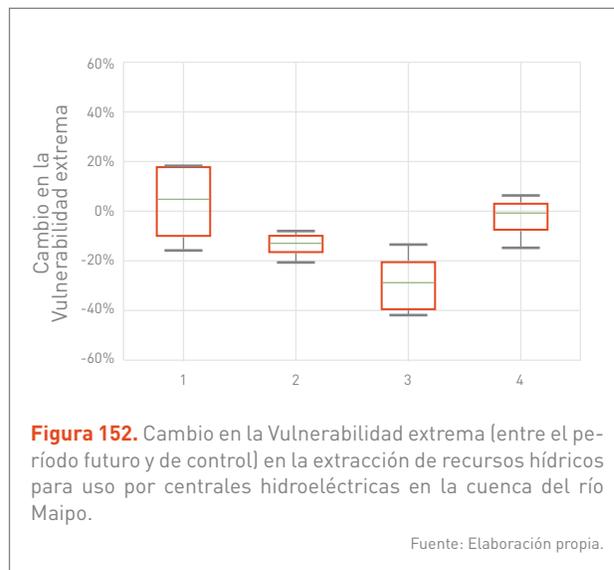
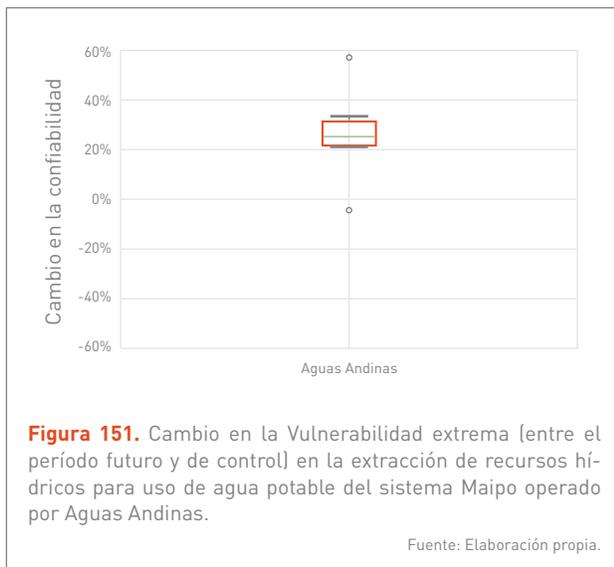


9.2.5.2 CAMBIOS EN VULNERABILIDAD FUTURA

En la **Figura 151** se muestra la vulnerabilidad extrema para el uso de agua potable del sistema Maipo operado por Aguas Andinas.

En la **Figura 152** se muestra la vulnerabilidad extrema para el uso de agua por centrales hidroeléctricas, donde: 1) Central Queltehues, 2) Central Volcan, 3) Central Alfalfa, y 4) Central Maitenes.

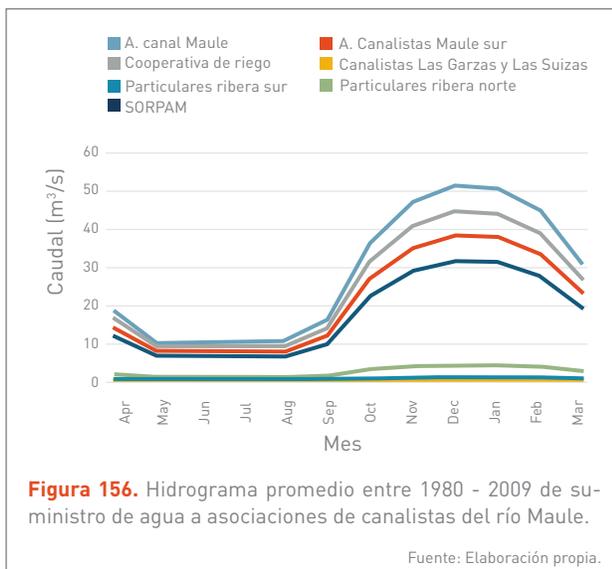
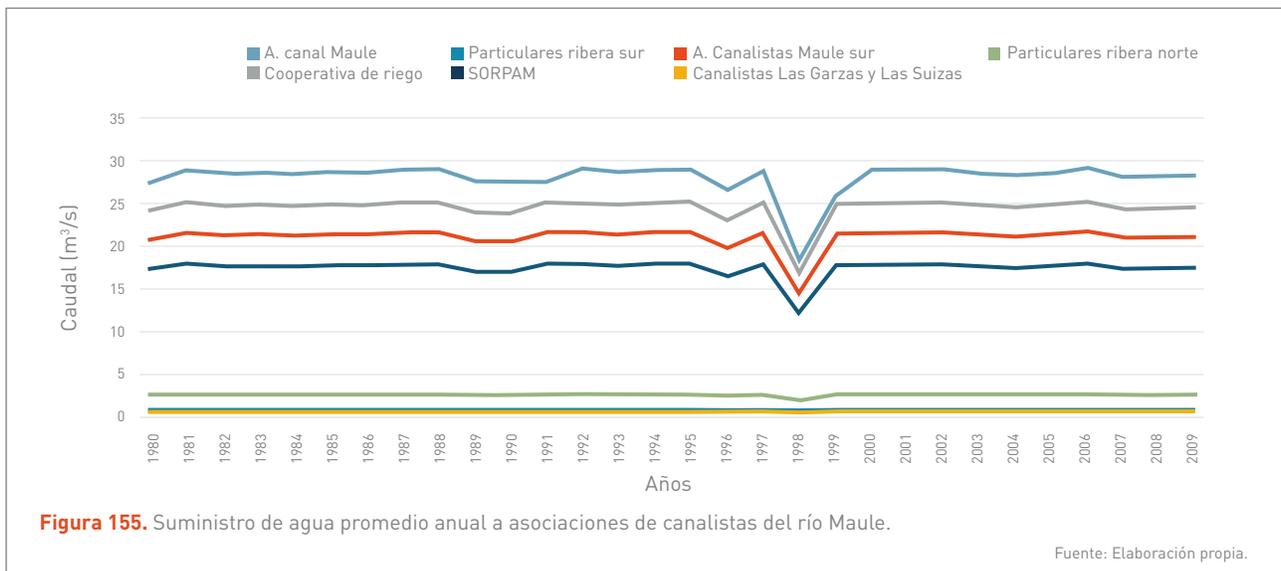
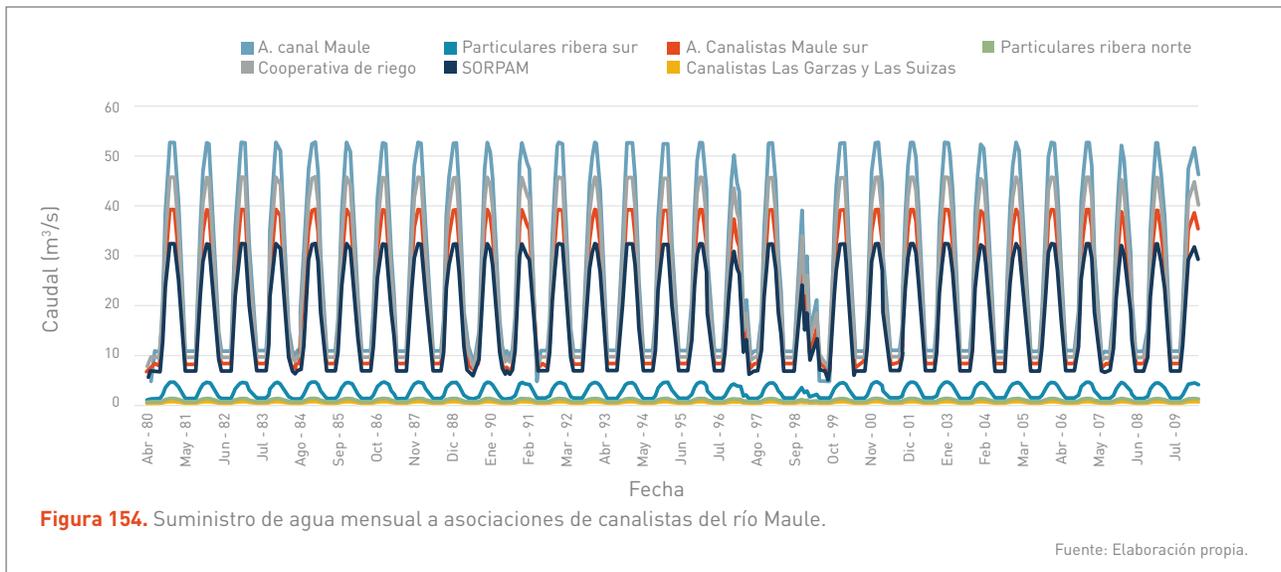
En la **Figura 153** se muestra la vulnerabilidad extrema para el uso de agua para riego, donde las asociaciones de canalistas son: 5) SCM, 6) ACM, 7) Pirque, 8) ACUB, 9) Huidobro, 10) Lo Herrera, y 11) Lonquen.

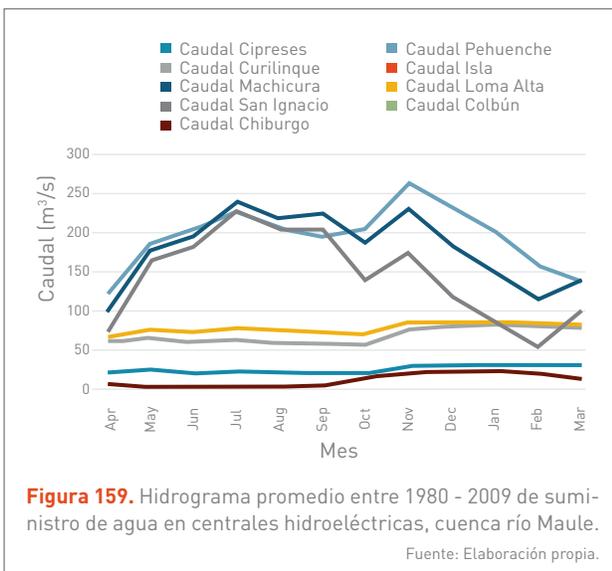
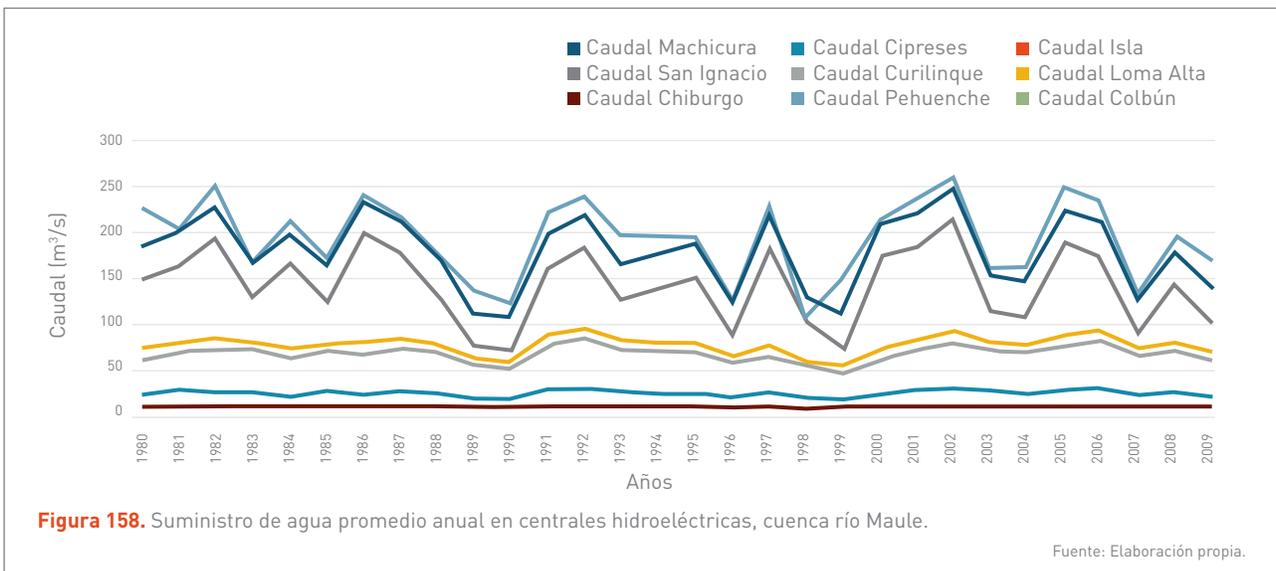
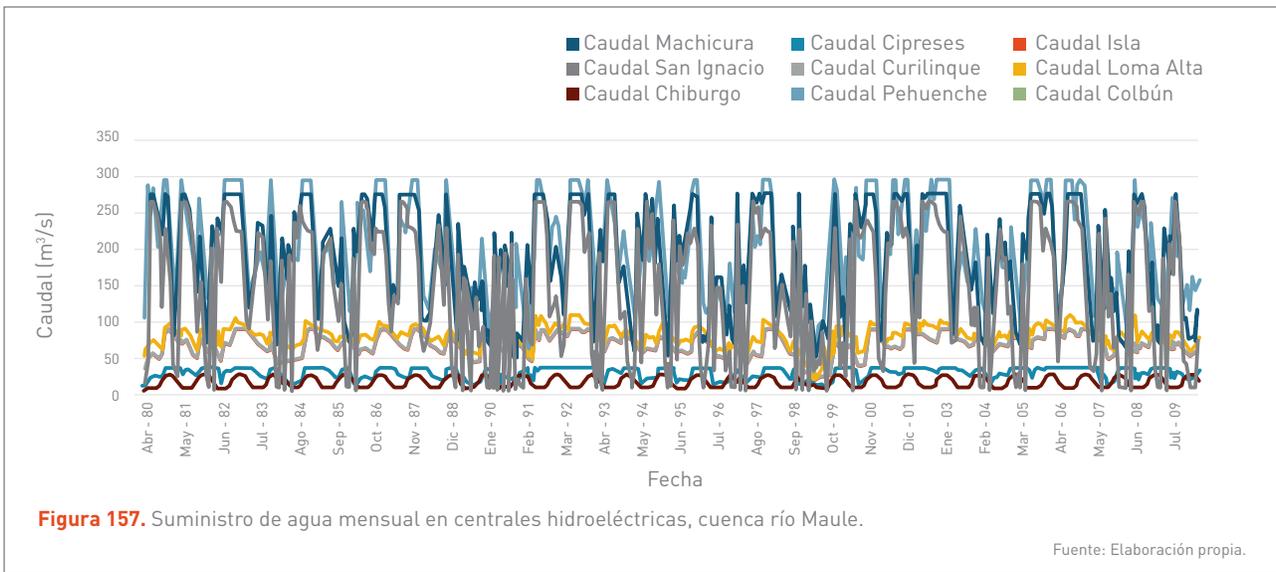


9.2.6 RESULTADOS DETALLADOS CUENCA DEL RÍO MAULE

9.2.6.1 VULNERABILIDAD HISTÓRICA

Los resultados de la Vulnerabilidad histórica se presentan entre la **Figura 154** y la **Figura 159**.



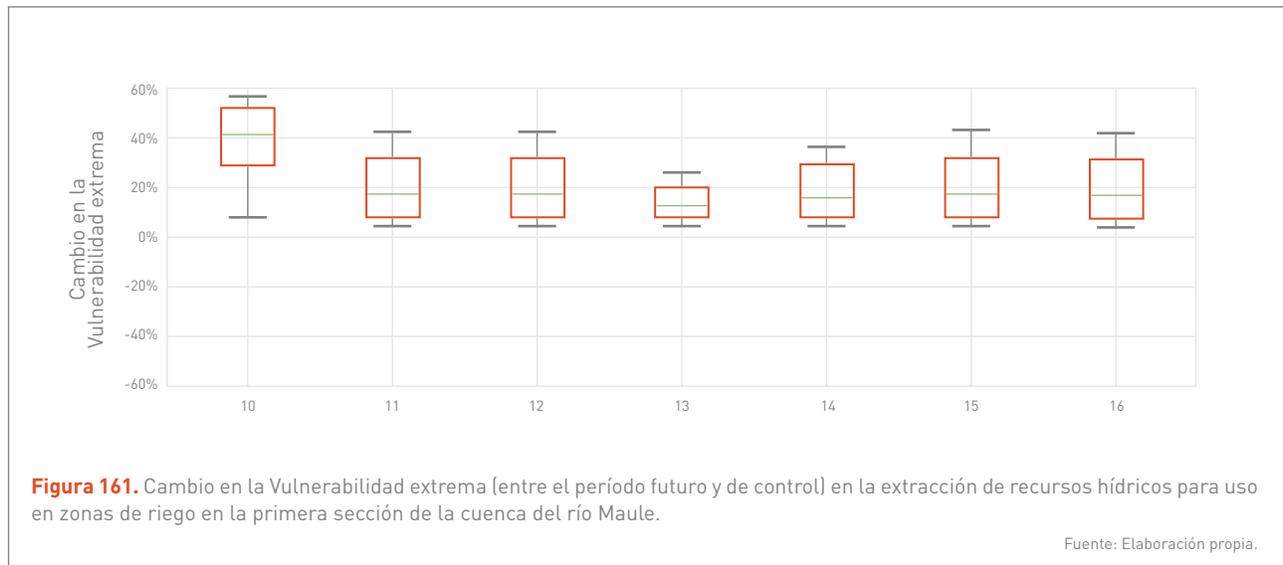
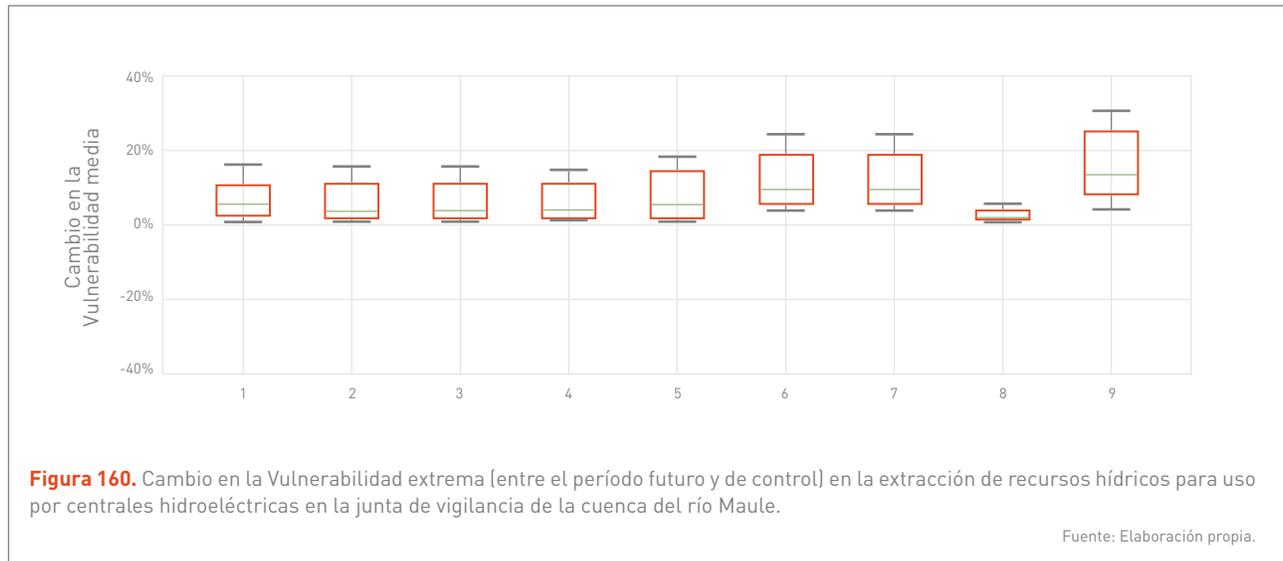




9.2.6.2 CAMBIOS EN VULNERABILIDAD FUTURA

En la **Figura 160** se muestra la vulnerabilidad extrema para el uso de agua por centrales hidroeléctricas, donde: 1) Cipreses, 2) Isla, 3) Curilinque, 4) Loma Alta, 5) Pehuenche, 6) Colbún, 7) Machicura, 8) Chiburgo, y 9) San Ignacio.

En la **Figura 162** se muestra la vulnerabilidad extrema para el uso de agua para riego, donde 10) A. Canal Maule, 11) A. Canalistas Maule Sur, 12) Cooperativa de Riego, 13) Canalistas Las Garzas y Las Suizas, 14) Particulares Ribera Norte, 15) Particulares Ribera Sur, y 16) SORPAM.



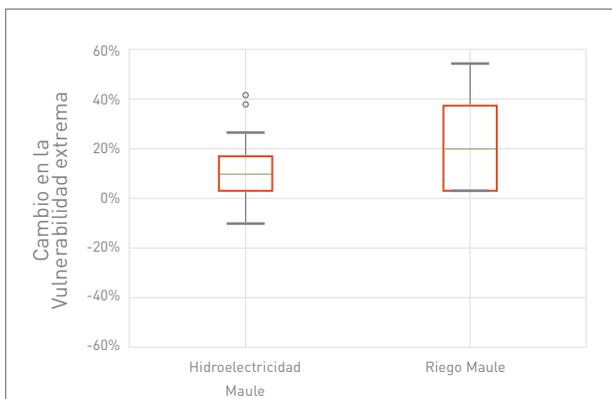


Figura 162. Resumen del cambio en la Vulnerabilidad extrema (entre el período futuro y de control) en la extracción de recursos hídricos para distintos usos en junta de vigilancia de la cuenca del río Maule.

Fuente: Elaboración propia.



