



**GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

# ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA ACUÍFEROS DE LA XII REGIÓN, DE MAGALLANES Y LA ANTÁRTICA

## **INFORME DEFINITIVO ETAPA II**

### **REALIZADO POR:**

ARCADIS CHILE S.A.

CÓDIGO SIT N° 389 DE 2016

**Santiago, Julio 2016**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas  
Sr. Carlos Estévez Valencia

Directora Regional de Aguas  
Sra. Tania González Pizarro

Inspector Fiscal  
**Sra. María Antonieta Rodríguez**

Arcadis Chile S.A.

Jefe de Proyecto  
Sr. Cristian Ortiz Astete

Coordinador de Proyecto  
Sr. Nicolás Starck Fajardo

Profesionales  
Sra. Ximena Orrego  
Sr. Ernesto Ramírez  
Sra. Gabriela Sepúlveda  
Sr. Gonzalo Huerta  
Sr. Javier Uribe  
Sr. Doménico Sciolla  
Sra. Carolina Gómez  
Sr. Leonardo Bravo

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 CONTENIDOS DEL ESTUDIO .....	3
<b>2 ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>5</b>
<b>3 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES .....</b>	<b>6</b>
3.1 DGA, 1986. MAPA HIDROGEOLÓGICO DE CHILE, ESCALA 1:2.500.000, DIGITALIZADO. ....	6
3.2 BALANCE HÍDRICO DE CHILE, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUA, 1987 .....	6
3.3 DGA/AC CONSULTORES, 1991. CATASTRO Y EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS SUBTERRÁNEOS XII REGIÓN, PUNTA ARENAS". MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. ....	7
3.3.1 General .....	7
3.3.2 Hidrología e Hidrogeología .....	7
3.4 ESTUDIO INTEGRAL DE RIEGO Y DRENAJE DE MAGALLANES – XII REGIÓN, ASOCIACIÓN DE PROFESIONALES PROYECTO MAGALLANES LTDA., (1997).....	7
3.5 ESTADÍSTICAS CLIMATOLOGÍA, DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE, (2001) 8	8
3.6 SERNAGEOMIN, 2004. MAPA GEOLÓGICO DE CHILE, ESCALA 1:1.000.000, VERSIÓN DIGITAL.....	8
3.7 CHARRIER, R., PINTO, L., RODRIGUEZ, M.P., 2007. TECTONOSTRATIGRAPHIC EVOLUTION OF THE ANDEAN OROGEN IN CHILE. EN MORENO, T. Y GIBBONS, W., EDS., THE GEOLOGY OF CHILE. THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON, 414 P.....	8
3.8 PEÑA, P., 2009. ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO DE LA CUENCA DE MAGALLANES DURANTE EL CRETÁCICO TEMPRANO. MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO. ....	8
3.9 CATASTRO PÚBLICO DE AGUA (CPA) DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA).....	8
3.10 UGALDE, R., 2014. CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO DE LA ESTRATIGRAFÍA CENOZOICA DE LA SIERRA BAGUALES: LA FORMACIÓN MAN AIKE ("LAS FLORES"), PROVINCIA DE ÚLTIMA ESPERANZA, MAGALLANES. MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO. ....	9
3.11 ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL, PROYECTO MINA INVERNO, REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA.....	9
<b>4 CATASTRO DE USOS Y USUARIOS DEL AGUA.....</b>	<b>10</b>
4.1 TRABAJOS DE GABINETE Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	10
4.1.1 Derechos de aprovechamiento y solicitudes en trámite DGA .....	10
4.1.2 Análisis crítico de derechos de agua .....	15
4.1.3 Organizaciones de usuarios registradas en DGA.....	18
4.1.4 Revisión de expedientes con información de CPA .....	18
4.1.5 Revisión información de derechos CBR, Juzgado de Letras y SAG .....	18
4.2 TRABAJOS DE TERRENO – CATASTRO DE USOS Y USUARIOS DEL AGUA.....	23
4.2.1 Elaboración material de apoyo de terreno .....	23
4.2.2 Descripción trabajo en terreno.....	29

4.2.3	Sistematización de información catastrada – aguas subterráneas.....	31
4.2.4	Catastro de aguas superficiales.....	33
4.2.5	Dificultades en actividades en terreno.....	35
4.3	<b>ANÁLISIS DE INFORMACIÓN CATASTRADA.....</b>	<b>35</b>
4.3.1	Captaciones subterráneas.....	35
4.3.2	Captaciones superficiales.....	39
4.4	CREACIÓN DE BASE DE DATOS FINAL Y PROYECTO SIG.....	39
<b>5</b>	<b>HIDROLOGÍA.....</b>	<b>40</b>
5.1	RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	40
5.1.1	Estudios generales.....	40
5.2	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	51
5.3	CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS.....	56
5.3.1	Análisis de precipitaciones.....	56
5.3.2	Precipitación media.....	60
5.3.3	Análisis de temperatura.....	66
5.3.4	Análisis de evapotranspiración.....	74
5.3.5	Relleno y extensión de la estadística.....	74
5.3.6	RELACIÓN ENTRE VARIABLES METEOROLÓGICAS MEDIDAS EN LA ESTACIÓN JORGE C. SCHYTHE.....	80
5.3.7	Análisis de caudales.....	82
5.3.8	Caudales medios.....	89
5.3.9	Evaluación de la disponibilidad hídrica.....	104
5.3.9.1	Disponibilidad hídrica para infiltración.....	104
5.3.9.2	Estimación de caudales en cuencas sin control fluviométrico.....	111
<b>6</b>	<b>MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO.....</b>	<b>119</b>
6.1	GEOLOGÍA REGIONAL.....	119
6.2	GEOLOGÍA LOCAL.....	127
6.2.1	Estratigrafía de pozos.....	127
6.2.2	Geofísica.....	131
6.3	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	135
6.3.1	Definición de unidades hidrogeológicas.....	135
6.3.2	Construcción de modelo hidrogeológico 3D.....	136
6.4	PARÁMETROS HIDRÁULICOS.....	143
6.5	PIEZOMETRÍA.....	148
6.6	BALANCE HÍDRICO ISLA RIESCO.....	152
<b>7</b>	<b>DESARROLLO DE MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>154</b>
7.1	ASPECTOS GENERALES.....	154
7.2	DOMINIO DE MODELACIÓN.....	154
7.3	CÓDIGO DE MODELACIÓN.....	161
7.4	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	161
7.5	DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL.....	162
7.5.1	DISCRETIZACIÓN ESPACIAL.....	162
7.5.2	Discretización temporal.....	167
7.6	CONDICIONES DE BORDE.....	167
7.6.1	Flujos laterales subterráneos.....	167
7.6.2	Recarga superficial.....	168
7.6.3	Cauces superficiales.....	171
7.6.4	Lagos.....	172
7.6.5	Resumen de las condiciones de borde del modelo de Punta Arenas.....	174
7.6.6	Resumen de las condiciones de borde del modelo Continental Norte.....	174
7.6.7	Resumen de las condiciones de borde del modelo de Tierra del Fuego.....	176

7.7	PROPIEDADES HIDRÁULICAS.....	178
7.8	EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS.....	182
7.9	CONDICIÓN INICIAL.....	184
7.10	PARÁMETROS NUMÉRICOS MOTOR DE FLUJO.....	184
7.11	CALIBRACIÓN MODELO DE FLUJO.....	185
7.11.1	ESTRATEGIA Y PATRÓN DE CALIBRACIÓN.....	185
7.11.2	Resultados del Modelo de Punta Arenas.....	188
7.11.3	Resultados del Modelo Continental Norte.....	190
7.11.4	RESULTADOS DEL MODELO TIERRA DEL FUEGO.....	194
7.11.5	MODELO INTEGRADO AGUAS SUPERFICIALES - AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	196
7.11.6	Piezometrías obtenidas.....	200
7.11.7	Análisis de sensibilidad.....	205
7.12	SIMULACIONES.....	213
7.12.1	Coeficiente de almacenamiento.....	213
7.12.2	Escenarios de simulación.....	215
7.12.3	Criterios para la evaluación de sustentabilidad de escenarios.....	221
7.12.4	Caudales óptimos sustentables.....	228
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>231</b>
8.1	CONCLUSIONES.....	231
8.2	RECOMENDACIONES.....	235

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Área de estudio .....	5
Figura 4-1: Derechos y solicitudes en trámite de agua subterránea.....	12
Figura 4-2: Derechos y solicitudes en trámite de agua superficial .....	13
Figura 4-3: Caudal por uso de agua subterránea y superficial .....	14
Figura 4-4: Caudales y derechos subterráneos otorgados por año vigentes a la fecha ..	15
Figura 4-5: Evolución de caudal subterráneo otorgado en el tiempo .....	16
Figura 4-6: Caudales y derechos superficiales otorgados por año vigentes a la fecha ...	17
Figura 4-7: Evolución de caudal superficial otorgado en el tiempo.....	17
Figura 4-8: Evolución de caudal superficial solicitado en el tiempo .....	17
Figura 4-9: Encuesta de uso aplicada en terreno .....	26
Figura 4-10: Trabajos en terreno Captaciones Subterráneas .....	30
Figura 4-11: Trabajos en terreno Captaciones Superficiales .....	31
Figura 4-12: Catastro captaciones Subterráneas.....	32
Figura 4-13: Captaciones visitadas por semana .....	33
Figura 4-14: Catastro captaciones Superficiales.....	34
Figura 4-15: % de Caudal por uso de agua subterránea .....	36
Figura 4-16: Nivel estático medido en las captaciones.....	38
Figura 5-1: Distritos Agroclimáticos .....	44
Figura 5-2: Promedio mensual de horas al día con temperaturas menores a 0° C. ....	46
Figura 5-3: Total de días con precipitación al año. ....	47
Figura 5-4: Valores medios mensuales y rango mínimo y máximo de la serie de caudales mensuales y caudal ecológico estimado al 20%. ....	48
Figura 5-5: Área del proyecto y vías de acceso. Fuente: Golder, 2010.....	49
Figura 5-6: Caudales medios mensuales en cursos superficiales dentro del área del proyecto. Fuente: Golder, 2010.....	50
Figura 5-7: Distribución climática en el área de estudio.....	54
Figura 5-8: Distritos agroclimáticos en el área de estudio .....	55
Figura 5-9: Ubicación de las estaciones pluviométricas.....	58
Figura 5-10: Disponibilidad de datos de precipitación mensual. ....	59
Figura 5-11: Agrupación de estaciones que siguen un patrón de precipitación. ....	62
Figura 5-12. <b>Precipitación mensual adimensional en grupo "Continental Sur y Noroeste".</b> .....	63
Figura 5-13: <b>Precipitación mensual adimensional en grupo "Tierra del Fuego Norte".</b> ...	63
Figura 5-14: Precipitación mensual adimensional en grupo "Tierra del Fuego Sur". ....	64
Figura 5-15: <b>Mapas con áreas de PP con correlación <math>\rho \geq 0,7</math>.</b> .....	65
Figura 5-16: Ubicación de las estaciones meteorológicas con disponibilidad de datos. ..	67
Figura 5-17: Disponibilidad de datos de temperaturas promedio mensuales.....	68
Figura 5-18: Temperaturas medias mensuales. ....	71
Figura 5-19: Ubicación de las estaciones de evaporación. ....	76
Figura 5-20: Disponibilidad de datos de evaporación mensual. ....	78
Figura 5-21: Evapotranspiración diaria en estación E2.....	79
Figura 5-22: Curva de variación para la evapotranspiración .....	80
Figura 5-23: Precipitaciones totales promedio mensuales.....	81
Figura 5-24: Dispersión entre variables meteorológicas evaluadas.....	82
Figura 5-25: Ubicación de las estaciones fluviométricas con disponibilidad de datos. ....	84
Figura 5-26: Disponibilidad de datos de caudales medios mensuales.....	85
Figura 5-27: Delimitación de subsubcuencas DGA.....	87
Figura 5-28: Cuencas aportantes a estaciones fluviométricas.....	88
Figura 5-29: Producción específica en función de la altura media de la cuenca aportante a la estación fluviométrica.....	90

Figura 5-30: Caudales medios mensuales. ....	92
Figura 5-31: Agrupación de cuencas y estaciones fluviométricas según su magnitud mensual adimensionalizada por la media anual .....	96
Figura 5-32: Caudal mensual adimensional en grupo "Continental Sur, Isla Riesco y Continental Noroeste". Fuente: elaboración propia.....	96
Figura 5-33: Caudal mensual adimensional en grupo "Tierra del Fuego Norte" .....	97
Figura 5-34: Caudal mensual adimensional en grupo "Tierra del Fuego Sur". .....	97
Figura 5-35: Agrupación de estaciones según similitudes en la producción específica de las cuencas con información media mensual. ....	98
Figura 5-36: Producción específica mensual en grupo "Isla Riesco y Continental Norte (oeste)". .....	99
Figura 5-37: Producción específica mensual en grupo "Continental Sur". .....	99
Figura 5-38: Producción específica mensual en grupo "Tierra del Fuego Norte". .....	100
Figura 5-39: Producción específica mensual en grupo "Tierra del Fuego Sur". .....	100
Figura 5-40: Agrupación de estaciones según similitudes en la producción específica de las cuencas con información promedio anual. Los colores representan áreas que pueden clasificarse en un mismo rango de magnitudes. ....	101
Figura 5-41: Agrupación de estaciones según similitudes en la producción específica de las cuencas. ....	103
Figura 5-42: Esquema de la infiltración, escorrentía subterránea y flujo base aportado a zonas húmedas y cursos superficiales. ....	105
Figura 5-43. Esquema de un hidrograma con una magnitud de flujo en superficie y un flujo base que representa todo el flujo en periodo de estiaje o sequía .....	106
Figura 5-44: Caudales adimensionales e intervalo de máximo y mínimo en cada mes para el uso de la distribución uniforme en estaciones del grupo "Continental Norte, Sur e Isla Riesco". .....	112
Figura 5-45. Series de caudales adimensionales obtenidas con la distribución uniforme en estaciones del grupo "Continental Norte, Sur e Isla Riesco". .....	113
Figura 5-46. Series de caudales adimensionales obtenidas con la distribución uniforme en estaciones del grupo "Tierra del Fuego Norte" .....	114
Figura 5-47. Series de caudales adimensionales obtenidas con la distribución uniforme en estaciones del grupo "Tierra del Fuego Sur". .....	114
Figura 5-48: Ubicación de las cuencas sin control fluviométrico en que se estimó caudales .....	116
Figura 5-49: Caudales medios mensuales estimados en cuencas sin control .....	117
Figura 5-50: Caudales mensuales estimados en cuencas sin control utilizando el método de Fiering. ....	118
Figura 6-1. Mapa simplificado de la cuenca estratigráfica de Magallanes. Las isolíneas, en metros, muestran el espesor del relleno sedimentario de la cuenca (Ugalde, 2014). ...	120
Figura 6-2. Cronoestratigrafía de la cuenca de Magallanes (Peña, 2009). .....	124
Figura 6-3. Cronoestratigrafía de la cuenca de Magallanes (Peña, 2009). .....	125
Figura 6-4. Mapa geológico de la zona de estudio. Basado de SERNAGEOMIN, 2004. ...	126
Figura 6-5. Contacto roca – relleno, modificado de AC Consultores / DGA (1991). ....	128
Figura 6-6. Distribución de pozos de ENAP .....	129
Figura 6-7. Distribución de pozos catastrados con información de profundidad. ....	130
Figura 6-8. Distribución de perfiles TEM realizados en la zona de estudio .....	132
Figura 6-9. Perfil TEM L-15, ubicado en la Isla de Tierra del Fuego. La línea superior marca la profundidad del relleno cuaternario, mientras que la línea inferior marca un fuerte cambio resistivo. ....	133
Figura 6-10. Perfil TEM L-4, ubicado en la península de Brunswick. En elipses se marcan las posibles intrusiones salinas. ....	133

Figura 6-11. Perfil TEM L-13, ubicado en la isla de Tierra del Fuego. En elipse se marca posible intrusión salina.....	134
Figura 6-12. Vista hacia el NE del Modelo Hidrogeológico 3D construido para la totalidad del área de estudio. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo.....	138
Figura 6-13. Vista hacia el NE del Modelo Hidrogeológico 3D construido para la Isla de Tierra del Fuego. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo.....	139
Figura 6-14. Vista hacia el N-NE del Modelo Hidrogeológico 3D construido para área Continental Norte del Estrecho de Magallanes. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo. ....	140
Figura 6-15. Vista hacia el NW del Modelo Hidrogeológico 3D construido para la porción de la Península de Brunswick donde se emplaza la ciudad de Punta Arenas. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo. ....	141
Figura 6-16. Vista hacia el NW del Modelo Hidrogeológico 3D construido para la Isla Riesco. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo. ....	142
Figura 6-17. Espesor de la Unidad Hidrogeológica Cuaternaria (relleno sedimentario) (m) .....	143
Figura 6-18. Método Theis (1938). Fuente: Hidrogeología. Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. España. FCIHS.2009. ....	145
Figura 6-19. Método de Neuman (1975). Fuente: Hidrogeología. Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. España. FCIHS.2009. ....	146
Figura 6-20. Método Theis en prueba de recuperación.....	146
Figura 6-21. Mapa Piezométrico del área de estudio.....	150
Figura 6-22. Mapa Piezométrico local de la ciudad de Punta Arenas (Península de Brunswick). ....	151
Figura 6-23. Balance Hídrico general considerado isla Riesco.....	152
Figura 7-1. Domino activo de los modelos numéricos .....	155
Figura 7-2. Criterios de separación de los modelos Punta Arenas y Continental Norte..	156
Figura 7-3. Domino del modelo numérico de Punta Arenas.....	158
Figura 7-4. Domino del modelo numérico Continental Norte.....	159
Figura 7-5. Domino del modelo numérico de Tierra del Fuego .....	160
Figura 7-6. Ejemplo de refinamiento de celdas a través de la técnica <i>Quadtree suavizado</i> .....	163
Figura 7-7. Ejemplo de refinamiento de grilla del modelo de Punta Arenas.....	164
Figura 7-8. Ejemplo de refinamiento de grilla del modelo Continental Norte .....	165
Figura 7-9. Ejemplo de refinamiento de grilla del modelo de Tierra del Fuego.....	166
Figura 7-10. Recarga lateral en el contacto relleno-basamento.....	168
Figura 7-11. Zonas de recarga de los modelos numéricos .....	170
Figura 7-12. Lagos representados en los modelos numéricos .....	173
Figura 7-13. Condiciones de borde del modelo de Punta Arenas.....	175
Figura 7-14. Condiciones de borde del modelo Continental Norte.....	176
Figura 7-15. Condiciones de borde del modelo Tierra del Fuego.....	178
Figura 7-16. Distribución de la conductividad hidráulica calibrada en el modelo de Punta Arenas (Valores en m/día) .....	179
Figura 7-17. Distribución de la conductividad hidráulica calibrada en el modelo Continental Norte (Valores en m/día) .....	180
Figura 7-18. Distribución de la conductividad hidráulica calibrada en el modelo de Tierra del Fuego (Valores en m/día) .....	181
Figura 7-19. Localización de los pozos de bombeo en los tres (3) modelos numéricos .	183



Figura 7-20 .Configuración del paquete SMS y el solver xMD.....	185
Figura 7-21. Pozos de observación utilizados en la calibración de los modelos numéricos .....	187
Figura 7-22. Niveles observados <b>vs</b> niveles calculados en el modelo de Punta Arenas..	190
Figura 7-23. Niveles observados <b>vs</b> niveles calculados en el modelo Continental Norte	193
Figura 7-24. Niveles observados <b>vs</b> niveles calculados en el modelo de Tierra del Fuego .....	196
Figura 7-25. Ajuste de caudales entre las estaciones fluviométricas y los modelos numéricos .....	198
Figura 7-26. Ajuste de caudales entre las estaciones fluviométricas y los modelos numéricos .....	200
Figura 7-27. Piezometría del modelo numérico de Punta Arenas .....	201
Figura 7-28. Detalle de la piezometría del modelo numérico de Punta Arenas en el sector Norte .....	202
Figura 7-29. Piezometría del modelo numérico Continental Norte.....	203
Figura 7-30. Piezometría del modelo numérico Tierra del Fuego .....	204
Figura 7-31. Zonas de conductividad hidráulica en el modelo de Punta Arenas .....	207
Figura 7-32. Gráficos del análisis de sensibilidad del modelo de Punta Arenas .....	208
Figura 7-33. Zonas de conductividad hidráulica en el modelo Continental Norte.....	210
Figura 7-34. Gráficos del análisis de sensibilidad del modelo Continental Norte.....	210
Figura 7-35. Zonas de conductividad hidráulica en el modelo Tierra del Fuego .....	212
Figura 7-36. Gráficos del análisis de sensibilidad del modelo Tierra del Fuego .....	213
Figura 7-37. Zonas de interés con pozos de bombeo en las simulaciones.....	218
Figura 7-38. Gráfico de volumen embalsado en el modelo de Punta Arenas.....	222
Figura 7-39. Gráfico de volumen embalsado en el modelo Continental Norte.....	223
Figura 7-40. Gráfico de volumen embalsado en el modelo Tierra de Fuego.....	224
Figura 7-41. Gráfico de afectación sobre aguas superficiales en el modelo de Punta Arenas .....	225
Figura 7-42. Gráfico de afectación sobre aguas superficiales en el modelo Continental Norte .....	226
Figura 7-43. Gráfico de afectación sobre aguas superficiales en el modelo de Tierra de Fuego .....	226
Figura 7-44. Gráfico de caudales asumidos por los modelos numéricos.....	228

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Derechos otorgados y solicitudes en trámite de agua subterránea por uso de agua .....	14
Tabla 4-2. Derechos otorgados y solicitudes en trámite de agua superficial por uso de agua .....	15
Tabla 4-3. Regularizaciones de agua con sentencias favorables e inscritas .....	21
Tabla 4-4. Uso de agua subterránea .....	35
Tabla 4-5. N° de Captaciones según uso de agua de acuerdo a información del catastro y CPA .....	37
Tabla 4-6. Comparativa Factores de Uso.....	38
Tabla 5-1: Balance Hídrico en las subcuencas aportantes a estaciones fluviométricas...	42
Tabla 5-2: Precipitaciones promedio mensuales período 2002-2014, Estación Jorge C. Schythe.....	51
Tabla 5-3. Información general de las estaciones meteorológicas recopiladas.....	57
Tabla 5-4. Promedios de las series de precipitación (mm).....	61
Tabla 5-5. Información general de las estaciones meteorológicas recopiladas.....	66

Tabla 5-6. Promedios de las series de temperatura (°C).	69
Tabla 5-7. Información general de las estaciones meteorológicas recopiladas.	74
Tabla 5-8: Promedios de las series de evapotranspiración (mm).	79
Tabla 5-9: Coeficientes de determinación (R <sup>2</sup> ) en variables analizadas.	81
Tabla 5-10: Información general de las estaciones fluviométricas recopiladas.	83
Tabla 5-11: Resumen estadístico de los datos fluviométricos de las estaciones consideradas.	89
Tabla 5-12: Resumen de los caudales medios mensuales (m <sup>3</sup> /s).	91
Tabla 5-13. Información para el cálculo de la producción específica.	102
Tabla 5-14: Información para el cálculo de la producción específica.	103
Tabla 5-15: Estaciones fluviométricas por grupo para el ajuste del modelo VE tipo III a sus mínimos mensuales adimensionalizados.	107
Tabla 5-16: Flujo base para 85% y 95% de probabilidad de excedencia, para estaciones <b>del grupo "Continental Norte, Sur e Isla Riesco"</b> (m <sup>3</sup> /s).	108
Tabla 5-17: Flujo base para 85% y 95% de probabilidad de excedencia, para estaciones <b>del grupo "Tierra del Fuego Norte"</b> (m <sup>3</sup> /s).	109
Tabla 5-18: Flujo base para 85% y 95% de probabilidad de excedencia, para estaciones <b>del grupo "Tierra del Fuego Sur"</b> (m <sup>3</sup> /s).	109
Tabla 5-19: Estimación de recarga asociado a unidades hidrogeológicas.	110
Tabla 5-20. Valores utilizados por grupo para la serie con distribución uniforme y uniforme normalizada.	113
Tabla 5-21. Valores para el cálculo del caudal medio anual en cuencas sin control.	116
Tabla 5-22. Valores para el cálculo del caudal medio mensual en cuencas sin control.	116
Tabla 5-23. Valores para el cálculo del caudal mensual en cuencas sin control usando el método de Fiering.	117
Tabla 6-1: Resumen de parámetros hidráulicos obtenidos a partir del análisis de pruebas de bombeo.	147
Tabla 6-2: Balance Hídrico Subterráneo en Isla Riesco	153
Tabla 7-1. Vértices de los modelos numéricos	157
Tabla 7-2. Área de los modelos y número de celdas	162
Tabla 7-3. Recargas asignadas a los modelos numéricos	169
Tabla 7-4. Factores de uso del agua subterránea	182
Tabla 7-5. Pozos de bombeo y caudales asignados a los modelos numéricos	182
Tabla 7-6. Balance de masas en régimen permanente del modelo de Punta Arenas.	188
Tabla 7-7. Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente del modelo de Punta Arenas	189
Tabla 7-8. Balance de masas en régimen permanente del modelo Continental Norte	191
Tabla 7-9. Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente del modelo Continental Norte	193
Tabla 7-10. Balance de masas en régimen permanente del modelo Tierra del Fuego	194
Tabla 7-11. Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente del modelo Tierra del Fuego	195
Tabla 7-12. Caudal superficial base en estaciones fluviométricas	197
Tabla 7-13. Calibración del caudal superficial en los modelos numéricos	199
Tabla 7-14. Promedio de caudales superficiales en estaciones fluviométricas y en los modelos numéricos	199
Tabla 7-15. Multiplicadores utilizados en el análisis de sensibilidad	205
Tabla 7-16. Valores de conductividad hidráulica utilizados en el análisis de sensibilidad del modelo de Punta Arenas	206
Tabla 7-17. Valores de conductividad hidráulica utilizados en el análisis de sensibilidad del modelo Continental Norte	209

Tabla 7-18. Valores de conductividad hidráulica utilizados en el análisis de sensibilidad del modelo de Tierra del Fuego.....	211
Tabla 7-19. Valores de Specific yield en materiales no consolidados (Johnson, 1967) ..	214
Tabla 7-20. Valores de Sy asignados en los modelos numéricos .....	214
Tabla 7-21. Coeficiente de almacenamiento asignado al Escenario 5 .....	215
Tabla 7-22. Caudales de los escenarios simulados (L/s).....	217
Tabla 7-23. Pozos utilizados en las simulaciones.....	219
Tabla 7-24. Características del Escenario Base .....	219
Tabla 7-25. Características del Escenario 1 .....	220
Tabla 7-26. Volumen embalsado.....	221
Tabla 7-27. Diferencia de volumen embalsado en el modelo Punta Arenas.....	222
Tabla 7-28. Diferencia de volumen embalsado en el modelo Continental Norte .....	223
Tabla 7-29. Diferencia de volumen embalsado en el modelo Tierra del Fuego.....	224
Tabla 7-30. Caudal de salida hacia los cauces superficiales en los escenarios .....	225
Tabla 7-31. Caudales asumidos en los escenarios .....	227
Tabla 7-32. Afectación Pozos de terceros.....	228
Tabla 7-33. Caudales óptimos de extracción .....	229
Tabla 7-34. Cumplimiento de criterios en los escenarios de simulación.....	229
Tabla 7-35. Caudal adicional susceptible de extracción.....	229

---

## 1 INTRODUCCIÓN

En el año 1991, la Dirección General de Aguas (DGA) llevó a cabo un estudio hidrogeológico en la región de Magallanes y la Antártica Chilena ("**Catastro y Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos XII Región Punta Arenas 1990–1991**", DGA, 1991) para obtener información relevante de la conformación geológica y del comportamiento del sistema hidrogeológico de la zona, desarrollando un modelo hidrogeológico conceptual de los sistemas acuíferos existentes. Desde esa fecha (1991) no se han realizado nuevos estudios hidrogeológicos de las formaciones acuíferas que rodean el Estrecho de Magallanes.

En el escenario de escasez hídrica que actualmente enfrentan las cuencas localizadas en la zona estepárica de la región, donde la disponibilidad de recursos hídricos superficiales es insuficiente, o en sectores con una alta explotación del recurso, tal como es el caso de Punta Arenas, es que la **DGA licitó el estudio "Actualización de Información y Modelación Hidrológica Acuíferos de la XII Región, de Magallanes y la Antártica"**, cuyo objetivo es actualizar el conocimiento hidrogeológico de la zona, utilizando información hidrológica e hidrogeológica generada en los últimos 20 años para, finalmente, construir un modelo de funcionamiento del sistema.

El desarrollo del presente estudio permitirá obtener una mejor aproximación de la oferta hídrica de la zona en estudio y estructurar, en el corto plazo, un plan hídrico para la Región de Magallanes, utilizando el modelo de funcionamiento del sistema como herramienta técnica que permitirá gestionar, planificar y optimizar los recursos hídricos de la región.

Para dar cumplimiento con los objetivos del estudio, se desarrollaron las siguientes actividades de forma secuencial:

- Recopilación y Análisis de Antecedentes.
- Catastro de Usos y Usuarios de Aguas: Comprende el desarrollo de los trabajos, tanto en gabinete como en terreno, que permiten estimar los principales usos de los recursos hídricos subterráneos así como sus usuarios.
- Hidrología: Comprende la descripción de la hidrografía de la zona en estudio, junto a la caracterización de las variables principales del ciclo hidrológico superficial (precipitación, caudal y evapotranspiración).
- Levantamiento Geofísico: Comprende el levantamiento de 200 estaciones TEM de 100x100 m y 200x200 m de loop, información que dan sustento al modelo hidrogeológico conceptual.
- Elaboración de Modelo Conceptual: Comprende, basado en la información recopilada de las actividades previas, el desarrollo de modelos conceptuales del funcionamiento de los sistemas acuíferos anidados en el área de estudio. Esta actividad es la base para el posterior desarrollo del Modelo Numérico.
- Elaboración de Modelo Numérico: Comprende la construcción de un modelo numérico que simule el funcionamiento hídrico superficial y del acuífero a partir del modelo conceptual elaborado anteriormente. El modelo numérico permitirá observar el funcionamiento de las aguas subterráneas en las áreas en estudio

conforme a distintos escenarios de explotación de los recursos hídricos subterráneos a futuro.

---

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es la determinación de la oferta hídrica de los acuíferos de la duodécima región. Esto se efectuará mediante la actualización del modelo conceptual existente, junto con la creación, calibración y operación de modelos numéricos hidrológicos e hidrogeológicos de operación del sistema.

Asociado con el objetivo general se identifican los siguientes objetivos específicos:

- a) Análisis y sistematización de la información contenida en estudios anteriores de diverso tipo con el fin de generar una base de datos con información relevante para el estudio (catastros de derechos de aguas ya existentes, geología, geofísica, hidroquímica, entre otros).
- b) Generación de SIG con información generada y analizada.
- c) Catastro de usos y usuarios de las cuencas que contienen los acuíferos de interés.
- d) Sectorización de acuíferos en la zona de estudio.
- e) Levantamiento geofísico mediante estaciones TEM.
- f) Caracterización del mecanismo de recarga de acuíferos.
- g) Determinación de la demanda hídrica de acuerdo al uso del recurso.
- h) Implementación de un modelo integrado para las cuencas de interés, determinación de la recarga y demandas históricas (reglas de bombeo).
- i) Actualización, calibración y validación de modelos numéricos de flujos subterráneos en los acuíferos de interés.
- j) Determinación de volumen sustentable de los sectores acuíferos de aprovechamiento común.

---

## 1.2 CONTENIDOS DEL ESTUDIO

Este informe presenta el total de actividades desarrolladas, las cuales fueron separadas en dos Etapas, Etapas I y II, cuyos objetivos se enfocaron de manera secuencial en la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico.

Conforme a lo anterior, este estudio se ha estructurado en 07 Capítulos, los que se resumen a continuación:

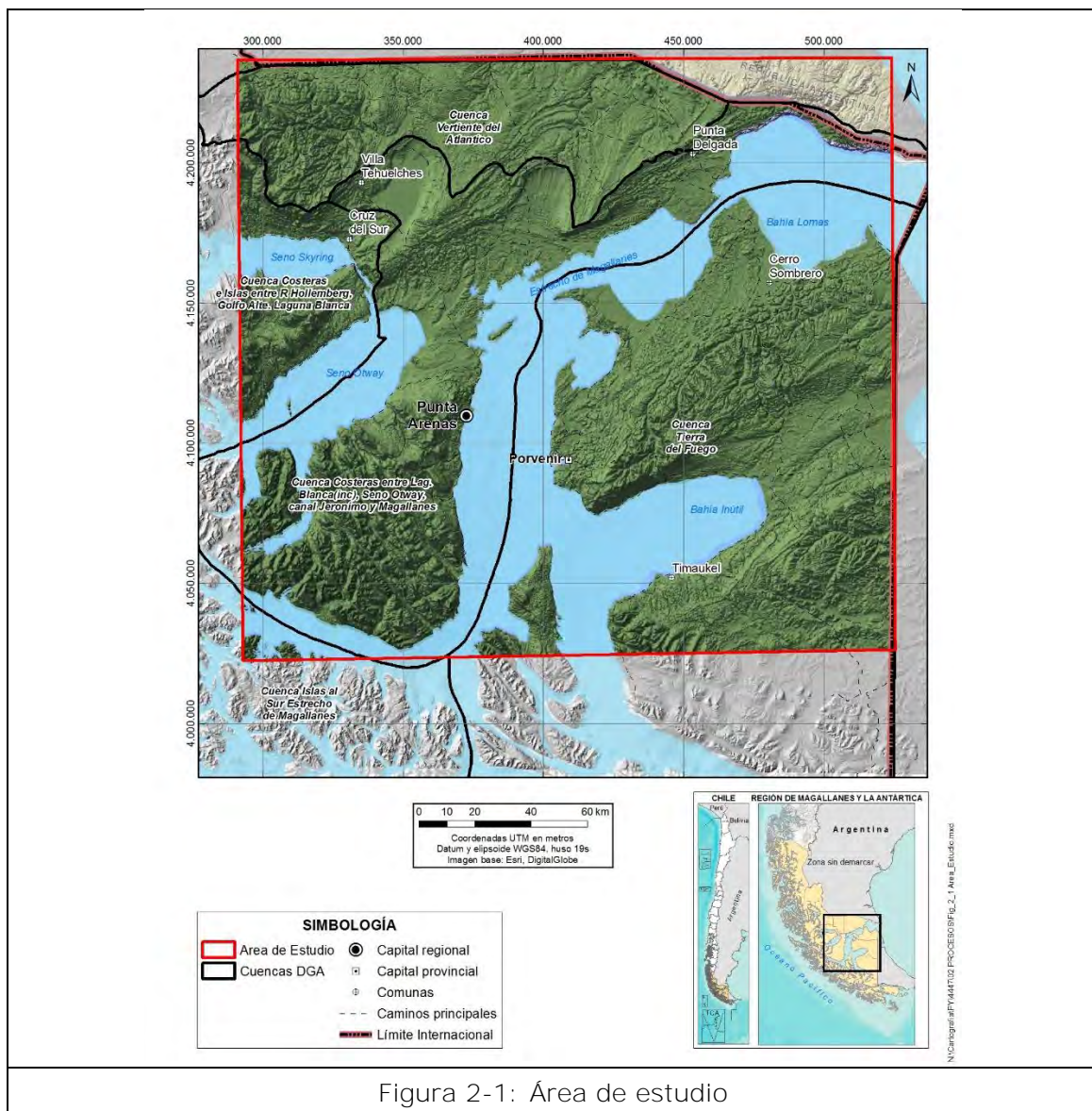
- **Capítulo 1. Introducción y Objetivos:** Corresponde a la introducción, donde se describe la problemática que sustenta la necesidad del estudio, así como los objetivos del mismo.
- **Capítulo 2. Área de Estudio:** Se presenta una breve descripción del área de estudio, basado en los antecedentes disponibles.
- **Capítulo 3. Recopilación y Análisis de Antecedentes:** Se resumen los antecedentes recopilados y revisados considerados para el presente estudio.
- **Capítulo 4. Catastro de Usos y Usuarios:** En este capítulo se describe el catastro de aguas superficiales y subterráneos realizado en terreno. Se resume la recopilación, análisis y sistematización de información, tanto de derechos otorgados, solicitudes en trámite y expedientes de traslado de derechos de aprovechamiento autorizados o en trámite para el área de estudio. Con esto se

determina la demanda de recursos hídricos en los diferentes sectores, definiendo para ello primeramente los usuarios de recursos hídricos y sus usos más comunes.

- **Capítulo 5. Hidrología:** En este capítulo se describen las variables hidrológicas, tales como precipitación y caudal, los que permitirán establecer el balance hidrológico superficial de las diferentes cuencas inmersas en el sector en análisis sirviendo a su vez como antecedentes básicos para la estimación de recarga de aguas subterráneas.
- **Capítulo 6. Modelo Conceptual:** En este capítulo se realiza una descripción de las variables geológicas e hidrogeológicas que dan sustento al modelo conceptual desarrollado. Conforme a lo anterior, se enmarca el sistema dentro de su contexto regional y local, se determinan las distintas unidades hidrogeológicas existentes con sus principales características y se determinan las condiciones de funcionamiento del sistema.
- **Capítulo 7. Modelo Numérico:** Finalmente, en este capítulo se describen los aspectos generales del modelo numérico elaborado, incluyendo el dominio de la modelación, la discretización espacial y temporal considerada, las propiedades hidráulicas y condiciones de borde e iniciales consideradas y la calibración del modelo de flujo.

## 2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la XII Región de Magallanes y Antártica Chilena, y corresponde específicamente al área donde se ubican los 11 sectores definidos en el estudio DGA – 1991, además de la Isla Riesco. Específicamente, estos sectores se ubican en las cuencas definidas por la DGA: (1) Vertiente del Atlántico, (2) Costeras e Islas entre R. Hollemberg, Golfo Almirante, Laguna Blanca, (3) Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes y (4) Tierra del Fuego. En la Figura 2-1 se presenta el área de estudio, incorporando las distintas cuencas a ser analizadas.





---

### **3 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES**

Para la recopilación de antecedentes se analizó, en detalle, el estudio del año 1991, "Catastro y Evaluación de los Recursos Subterráneos XII Región, Punta Arenas", siendo este el principal estudio hidrogeológico del sector. Este estudio fue realizado para el Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas por AC Ingenieros Consultores Ltda., (DGA/AC-1991).

Adicionalmente se consultaron diversas fuentes públicas como la Dirección General de Aguas (DGA), Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), Comisión Nacional de Riego (CNR), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Universidad de Chile y la Empresa Nacional de Petróleo (ENAP), entre otras entidades e instituciones, tanto públicas como privadas.

Este capítulo presenta una breve reseña de los antecedentes recopilados y sus usos dentro del marco del estudio. Adicionalmente, dentro de cada capítulo de estudio básico (catastro, hidrología e hidrogeología) se presenta una revisión de antecedentes de manera específica, la que entrega información más detallada en las áreas analizadas.

---

#### **3.1 DGA, 1986. MAPA HIDROGEOLÓGICO DE CHILE, ESCALA 1:2.500.000, DIGITALIZADO.**

Esta información se utiliza para el diseño de la campaña geofísica.

---

#### **3.2 BALANCE HÍDRICO DE CHILE, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUA, 1987**

Este estudio, desarrollado a nivel nacional, entrega valores medios para las principales variables del ciclo hidrológico superficial y un balance hídrico, a escala regional y nacional. Las estimaciones fueron realizadas utilizando estadísticas de 30 años. Es importante recalcar que este estudio considera toda la región de Magallanes, exceptuando el territorio Chileno Antártico.

---

### **3.3 DGA/AC CONSULTORES, 1991. CATASTRO Y EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS SUBTERRÁNEOS XII REGIÓN, PUNTA ARENAS". MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS.**

#### 3.3.1 General

Este trabajo tiene como fin la identificación cualitativa y cuantitativa de los sistemas acuíferos en la zona, estimando con ello su potencial en cuanto a la disponibilidad y factibilidad técnico-económica de explotación del recurso hídrico.

El estudio DGA/AC 1991, se basa en una recopilación de antecedentes de geología e hidrogeología, principalmente información de sondajes de ENAP, estadísticas pluviométricas, fluviométricas y meteorológicas de la DGA y Conaf, además de calidad química de las aguas y catastro de sondajes. Esta información ha sido complementada con geología levantada en terreno.

Este trabajo incluye estudios sobre la geología y geomorfología, hidrología e hidrogeología de la zona. Para el presente estudio, es de especial interés el estudio hidrogeológico, que presenta perfiles estratigráficos (isla Tierra del Fuego, Isla Brunswick y parte oriental del área continental norte), mapa de detalle de contacto roca relleno, definición de unidades hidrogeológicas y propiedades elásticas de las unidades.

#### 3.3.2 Hidrología e Hidrogeología

El estudio realizó un análisis global de los recursos superficiales y subterráneos, a partir de un catastro de sondajes, un análisis geológico y geomorfológico y una reseña climatológica. También se realizó un análisis de precipitaciones y escurrimientos superficiales considerando tres escenarios (año normal, seco y húmedo) a partir de ellos se calcularon ecuaciones de balance hídrico para evaluar la recarga a la napa en las 50 cuencas consideradas.

---

### **3.4 ESTUDIO INTEGRAL DE RIEGO Y DRENAJE DE MAGALLANES – XII REGIÓN, ASOCIACIÓN DE PROFESIONALES PROYECTO MAGALLANES LTDA., (1997)**

Consistió en el primer estudio integral de riego y drenaje en la región donde, hasta la fecha, el riego sólo había sido utilizado en pequeña escala por algunos ganaderos y por la estación Kampenaike del INIA. El riego en Magallanes es interesante ya que existe un déficit hídrico durante la primavera y verano en las zonas en que se desarrolla la actividad agrícola y principalmente ganadera.

---

### **3.5 ESTADÍSTICAS CLIMATOLOGÍA, DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE, (2001)**

El estudio presenta un resumen de las principales características climáticas en las ciudades más importantes del país, de las cuales resulta de interés las de Punta Arenas, capital de la región de Magallanes.

---

### **3.6 SERNAGEOMIN, 2004. MAPA GEOLÓGICO DE CHILE, ESCALA 1:1.000.000, VERSIÓN DIGITAL.**

Esta información se utiliza para el diseño de la campaña geofísica.

---

### **3.7 CHARRIER, R., PINTO, L., RODRIGUEZ, M.P., 2007. TECTONOSTRATIGRAPHIC EVOLUTION OF THE ANDEAN OROGEN IN CHILE. EN MORENO, T. Y GIBBONS, W., EDS., THE GEOLOGY OF CHILE. THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON, 414 P.**

Corresponde a un resumen de la geología regional de Chile, desde el punto de vista de la formación, relleno y deformación de las cuencas estratigráficas que lo conforman.

---

### **3.8 PEÑA, P., 2009. ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO DE LA CUENCA DE MAGALLANES DURANTE EL CRETÁCICO TEMPRANO. MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO.**

Este trabajo corresponde a una memoria de título, donde se presenta un resumen de la estratigrafía de la cuenca de Magallanes, usando información de pozos de ENAP.

---

### **3.9 CATASTRO PÚBLICO DE AGUA (CPA) DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA)**

Se resume la información de derechos de aprovechamiento y solicitudes en trámite contenida en el Catastro Público de Agua (CPA) de la Dirección General de Aguas (DGA), actualizada hasta octubre de 2014.

---

### **3.10 UGALDE, R., 2014. CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO DE LA ESTRATIGRAFÍA CENOZOICA DE LA SIERRA BAGUALES: LA FORMACIÓN MAN AIKE ("LAS FLORES"), PROVINCIA DE ÚLTIMA ESPERANZA, MAGALLANES. MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO.**

Este trabajo corresponde a una memoria de título, donde se presenta el marco geológico regional de la cuenca de Magallanes, basado en literatura.

---

### **3.11 ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL, PROYECTO MINA INVIERNO, REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA.**

Corresponde al EIA de la Mina Invierno, localizada en la Isla Riesco. El área de estudio de este informe se centra sólo en la Mina Invierno, por lo que su correlación con el resto de la isla es acotada. Es la única fuente de información de esta zona, y de acuerdo a la descripción hidrogeológica presentada, la Isla Riesco es de muy baja importancia hidrogeológica, y de muy baja productividad de pozos. La unidad glaciofluvial somera presenta un comportamiento tipo acuitardo, lo que hace que los pozos emplazados en esta unidad sean de escasa productividad, y que las precipitaciones no se puedan infiltrar a las unidades más profundas, generándose numerosas escorrentías superficiales. Aun así esta unidad presenta un carácter saturado a subsaturado, y la dirección de flujos es similar a la topografía.

---

## **4 CATASTRO DE USOS Y USUARIOS DEL AGUA**

Esta etapa se enfoca en el levantamiento de información en terreno, con el objetivo específico de determinar cuáles son los principales usos de los recursos hídricos de la región y quiénes son sus principales usuarios. Para ello, se consideró información, principalmente de carácter público, relacionada con el otorgamiento de derechos de agua por parte del Estado. Se define, en este capítulo, el estado de los derechos de aguas subterráneas en la región. Con ello, se estiman las demandas hídricas sobre la región, identificando con ello sus principales usos, sus usuarios específicos, la evolución de la demanda a través del tiempo y la condición de las demandas hídricas considerando su condición dentro del proceso de otorgamiento de derechos de aguas por parte del estado.

Las actividades indicadas anteriormente se llevaron a cabo en dos etapas: una primera parte administrativa, relativa al estudio de los derechos de agua, enfocada a definir el estado actual de los derechos de aprovechamiento, sus regularizaciones, ventas y transferencias, en sal cuencas del área de estudio, y; una segunda parte en terreno, asociada principalmente a una verificación en terreno de los distintos usos y usuarios en terreno, mediante el levantamiento de información en la región.

Conforme a lo anterior, la primera parte administrativa fue llevada a cabo mediante el desarrollo de las siguientes actividades: Recopilación, análisis y sistematización de antecedentes, tanto de derechos otorgados, solicitudes en trámite y expedientes de traslado de derechos de aprovechamiento autorizados o en trámite para el área de estudio. Esta información fue recopilada y analizada tanto en gabinete como en las oficinas públicas regionales de la DGA, Tribunales correspondientes y el Conservador de Bienes Raíces, así como de otros organismos e instituciones pertinentes relacionadas con el otorgamiento de los derechos de aguas.

La segunda etapa consistió en la validación de la información levantada en la etapa anterior, mediante el desarrollo de un catastro en terreno donde se verificó, mediante encuestas, la estimación de uso efectivo de derechos de aguas y su replanteamiento de coordenadas efectivas.

Finalmente, con la información disponible de las etapas anteriores, se realizó el análisis de información enfocado a determinar de qué forma se utiliza, tanto las aguas superficiales como subterráneas en la región, quienes son sus principales usuarios, como ha evolucionado las demanda hídricas en la región y el estado de los usos hídricos actuales en terreno.

---

### **4.1 TRABAJOS DE GABINETE Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

#### **4.1.1 Derechos de aprovechamiento y solicitudes en trámite DGA**

Se solicitó, a la Dirección General de Aguas (DGA), la información de derechos de aprovechamiento y solicitudes en trámite en la zona en estudio. En base a ese

requerimiento, la DGA envió a Arcadis el Catastro Público de Agua (CPA) actualizada hasta octubre de 2014.

De acuerdo al registro del CPA, en el área de estudio hay 303 derechos subterráneos otorgados, equivalentes a un caudal de 451 L/s, y 8 solicitudes en trámite, equivalentes a 39 L/s.

Cabe señalar que el área de estudio concentra el 78% del total de derechos subterráneos de la Región.

En la Figura 4-1 se muestran los derechos y solicitudes en trámite de agua subterránea en la zona de estudio. Se observa una concentración de las captaciones en la zona de Punta Arenas.

Con respecto a los derechos superficiales, se registran 313 derechos otorgados, con un caudal de 43.078 L/s. En cuanto a solicitudes en trámite, se registran 27 solicitudes ingresadas, equivalente a 17.425 L/s. En la Figura 4-2 se muestra la localización de los derechos y solicitudes en trámite.

En la Figura 4-3 se muestra el caudal otorgado por uso de agua. En el caso de los derechos de aprovechamiento subterráneo, el 69% del caudal es destinado a riego, mientras que en los derechos superficiales el uso piscicultura representa un 14%. Cabe señalar que en los derechos superficiales, el 76% del caudal otorgado no cuenta con información de uso del agua.

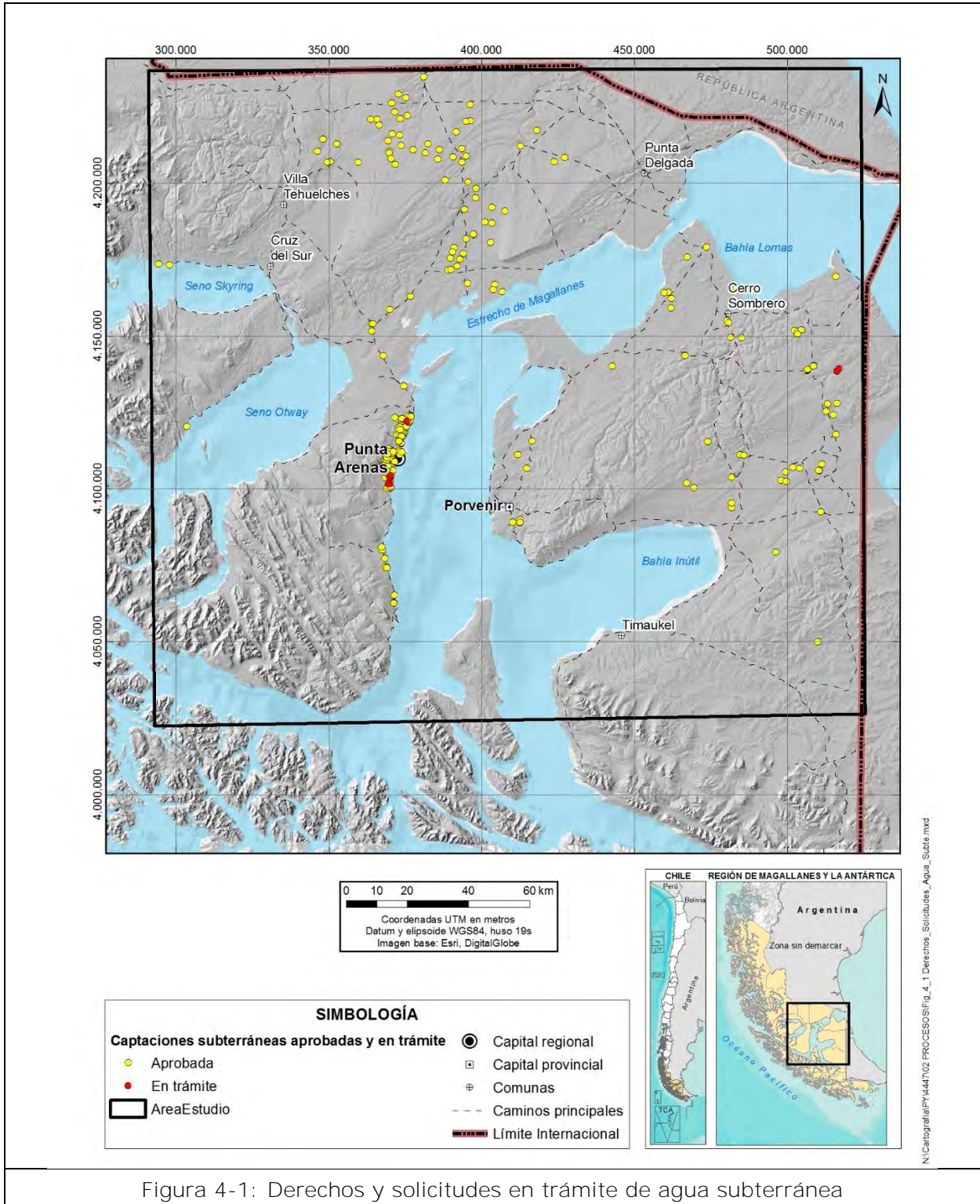


Figura 4-1: Derechos y solicitudes en trámite de agua subterránea

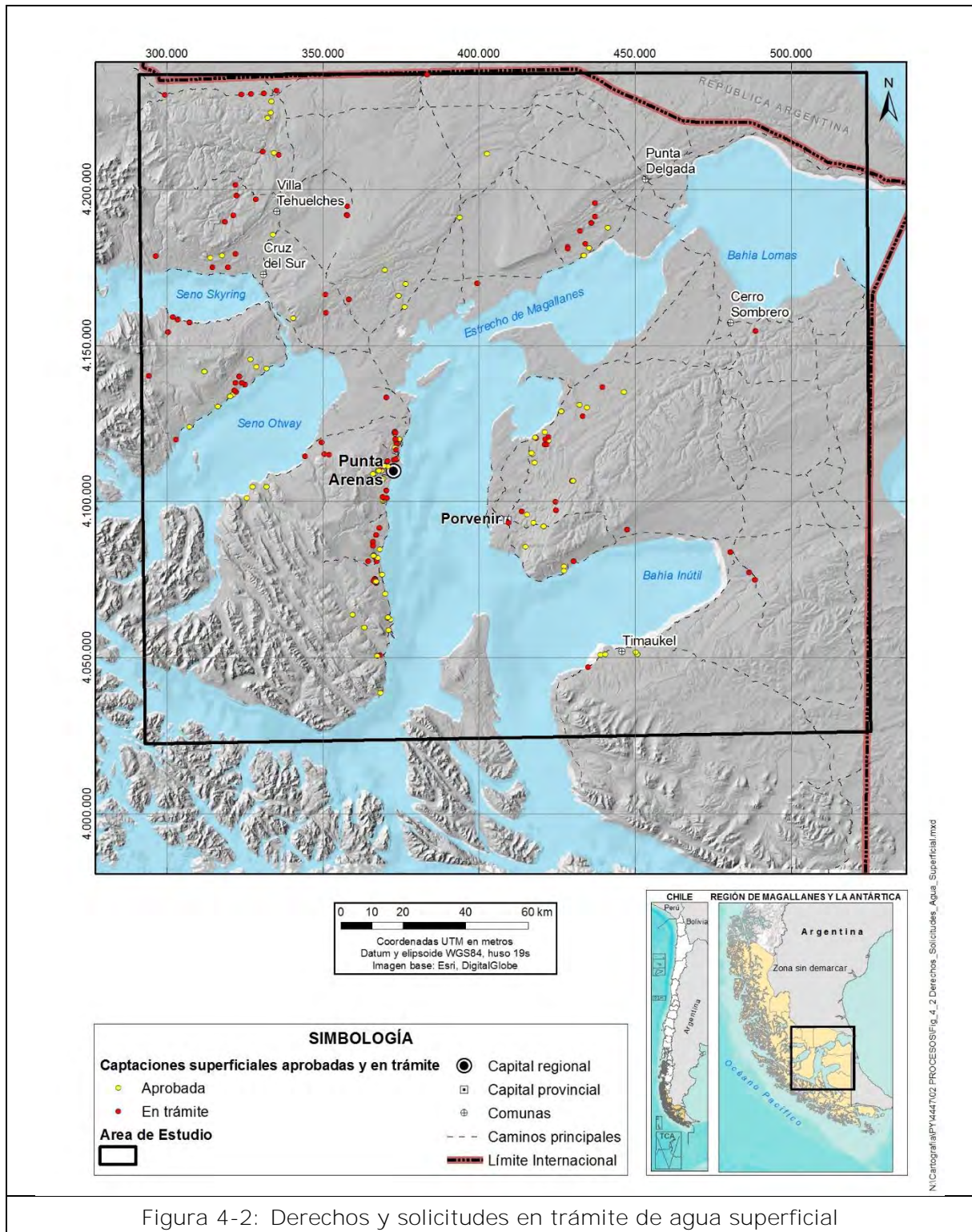
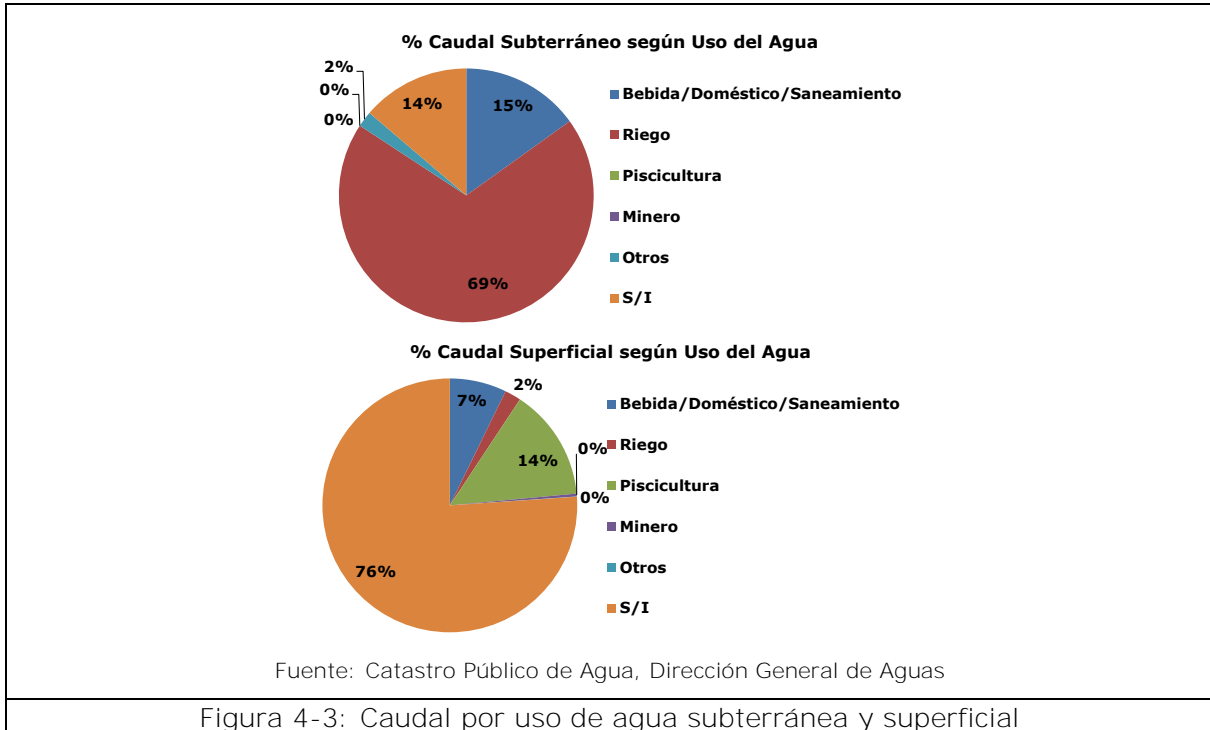


Figura 4-2: Derechos y solicitudes en trámite de agua superficial





En las tablas Tabla 4-1 y Tabla 4-2 se muestran los derechos otorgados y solicitudes en trámite de acuerdo a uso del agua. Como se observa, en los derechos subterráneos la mayor cantidad de derechos se destina a uso Riego (74% del total), seguido por el uso Bebida, Uso Doméstico y Saneamiento. Con respecto a los derechos de aprovechamiento superficial, el 50% no tiene información de uso mientras que el 37% se destinan a Bebida, Uso Doméstico y Saneamiento.

Tabla 4-1. Derechos otorgados y solicitudes en trámite de agua subterránea por uso de agua

Uso del Agua Subterránea	Derechos Otorgados		Solicitudes en trámite	
	Nº Derechos	Q (L/s)	Nº Solicitudes	Q (L/s)
Bebida/Doméstico/Saneamiento	52	68	0	0
Riego	223	312	1	0
Piscicultura	0	0	0	0
Minero	0	0	0	0
Otros	2	9	2	2
S/I	26	62	5	37
<b>Total</b>	<b>303</b>	<b>451</b>	<b>8</b>	<b>39</b>

Fuente: Catastro Público de Agua, Dirección General de Aguas

Tabla 4-2. Derechos otorgados y solicitudes en trámite de agua superficial por uso de agua

Uso del Agua Superficial	Derechos Otorgados		Solicitudes en trámite	
	N° Derechos	Q (L/s)	N° Solicitudes	Q (L/s)
Bebida/Doméstico/Saneamiento	117	3.108	7	4.718
Riego	27	889	4	70
Piscicultura	9	6.135	5	11.000
Minero	4	156	0	0
Otros	1	13	2	5
S/I	155	32.777	9	1.632
<b>Total</b>	<b>313</b>	<b>43.077</b>	<b>27</b>	<b>17.425</b>

Fuente: Catastro Público de Agua, Dirección General de Aguas

#### 4.1.2 Análisis crítico de derechos de agua

En este acápite se realiza un análisis de los derechos de aprovechamiento de agua en el área de estudio a partir de la información del CPA.

A continuación se presentan los gráficos que muestran la tendencia respecto a los derechos y solicitudes en trámite en la zona en estudio. Se analizan, primero, los caudales y derechos de aguas subterráneas y, posteriormente, los caudales y derechos de aguas superficiales.

En la Figura 4-4 se muestra los caudales y número de derechos subterráneos otorgados desde el año 1997 hasta el año 2013. Se puede observar que en el año 2006 hubo un aumento significativo de derechos otorgados, llegando a 191 derechos, equivalente a un caudal de 213 L/s. Lo anterior se explica por el alto ingreso de solicitudes de acuerdo al Artículo 4° Transitorio del Código de Aguas.

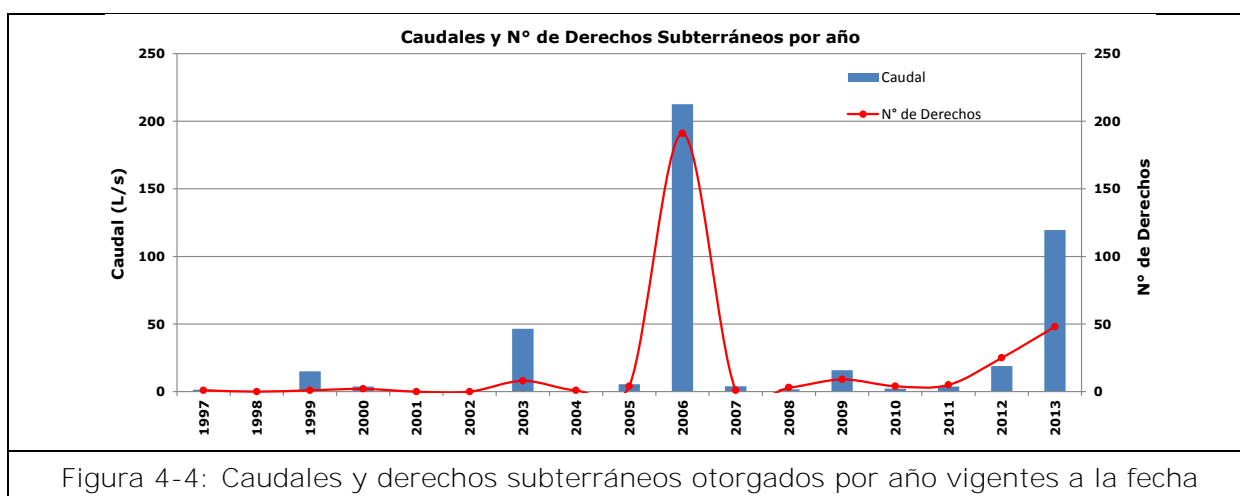
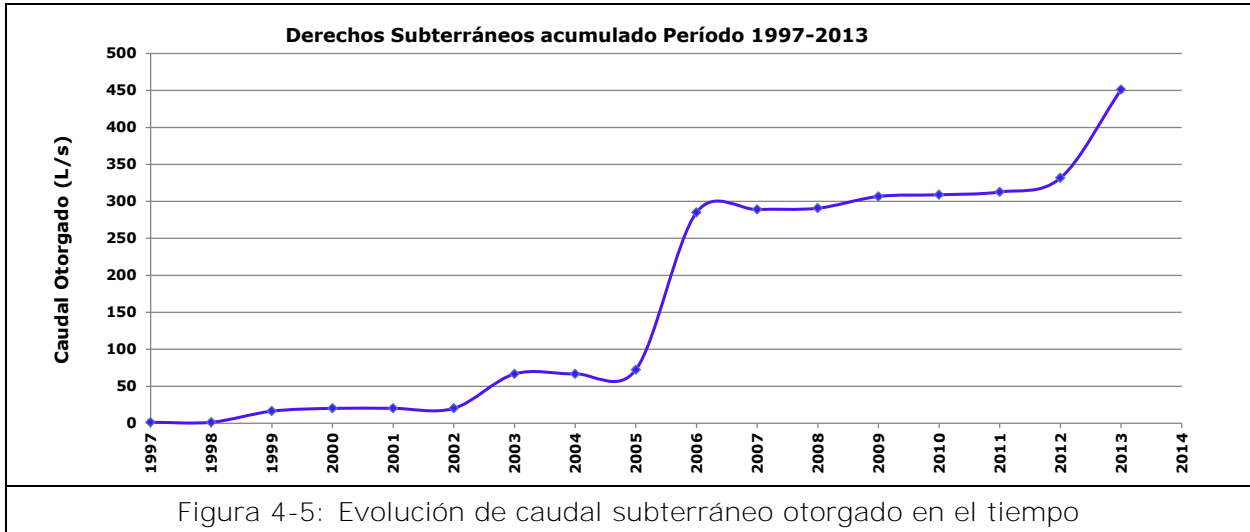


Figura 4-4: Caudales y derechos subterráneos otorgados por año vigentes a la fecha

La evolución del otorgamiento de derechos se muestra en el gráfico de la Figura 4-5. El gráfico muestra que entre los años 1997 y 2005 el caudal otorgado era inferior a 100 L/s,

observándose un aumento considerable en los derechos y caudales otorgados en el año 2006. En el período comprendido entre los años 2007 y 2011, los derechos y caudales otorgados se mantienen relativamente constantes, notándose un incremento importante en los años 2012 y 2013.



Con respecto a las solicitudes en trámite, se observan 2 solicitudes ingresadas en el año 2013, equivalente a 2 L/s, mientras que en el año 2014 se han ingresado 6 solicitudes, totalizando un caudal de 37 L/s.

En cuanto a derechos superficiales, de acuerdo a lo que se observa en la Figura 4-6, los años 1999, 2003 y 2010 son los que presentan mayor cantidad de derechos otorgados, destacando el año 2003, donde se otorgaron 35 derechos con un caudal equivalente de 18.801 L/s, mientras que en el año 2010 los 30 derechos otorgados equivalen sólo a 326 L/s.

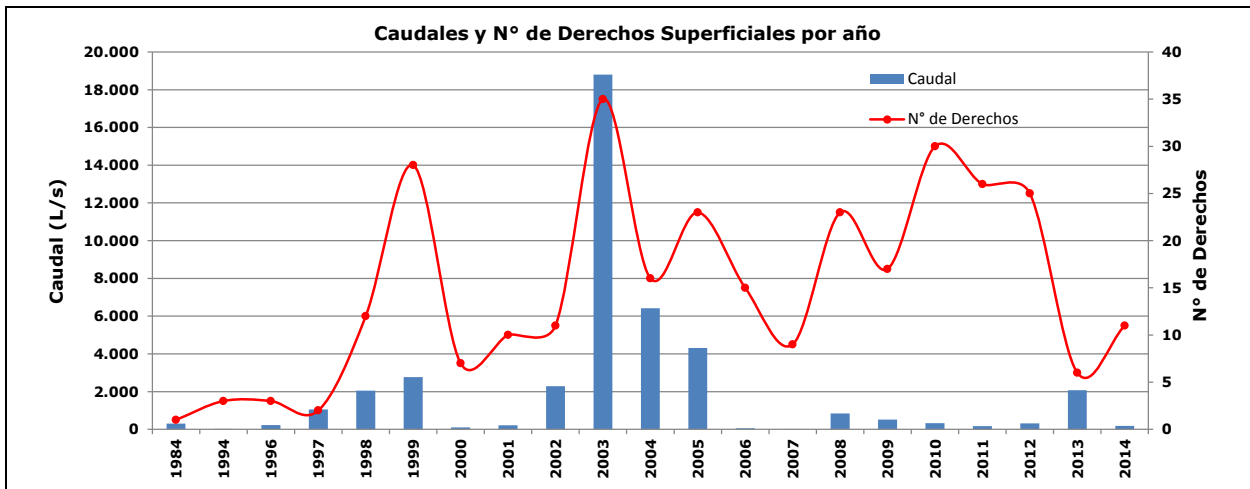
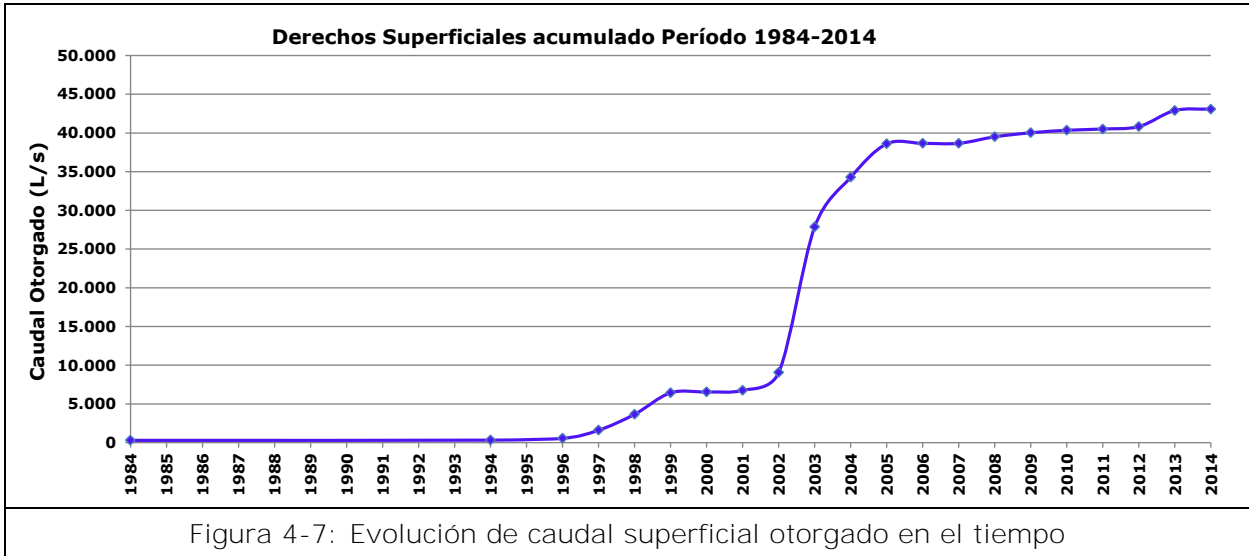
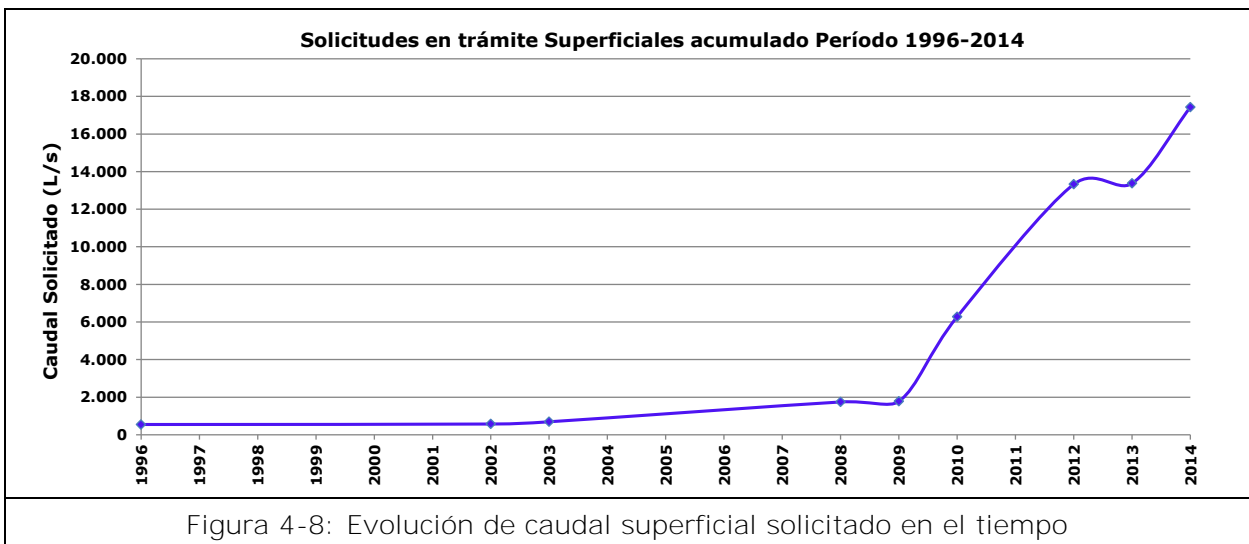


Figura 4-6: Caudales y derechos superficiales otorgados por año vigentes a la fecha

El gráfico de la Figura 4-7 refleja la evolución del caudal otorgado para derechos superficiales. A partir del año 1996 se observa un leve aumento del caudal otorgado, el cual se mantiene estable hasta el año 2002. Entre los años 2003 a 2005 se ve un gran aumento en el otorgamiento de caudal, el cual se vuelve a mantener relativamente constante hasta el año 2013.



Por último, con respecto a las solicitudes en trámite de agua superficial, se tiene un incremento de caudal solicitado entre los años 2009 a 2014 (Figura 4-8).



#### 4.1.3 Organizaciones de usuarios registradas en DGA

De acuerdo a información del Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH) de la DGA, en la XII Región existe una (1) organización de usuarios registrada, correspondiente a la Asociación de Canalistas del Sistema de Regadío Puerto Natales, la que se encuentra fuera del área de estudio.

#### 4.1.4 Revisión de expedientes con información de CPA

Esta actividad corresponde a la revisión de los expedientes digitalizados que tiene la DGA, correspondiente a los derechos subterráneos, en comparación a la información que entrega el CPA. De un total de 303 derechos, 258 cuentan con expediente digital.

Como resultado de la revisión realizada, se corrigió la información de la comuna de 20 derechos. En relación al uso de agua, se pudo agregar información a 8 derechos y además completar la información a otros 89.

El 67% de los derechos del CPA tenía mala la información de ubicación, ya sea por error en el valor de las coordenadas o del datum.

En cuanto a información extra contenida en los expedientes, se tienen 68 pruebas de bombeo, 43 estratigrafías de pozos y 29 habilitaciones, además de información de profundidad en 229 pozos, siendo el 89% del total revisado. La información de pruebas de bombeo, estratigrafía y habilitaciones fue incorporada al SIG como archivo digital.

Finalmente, se entrega base de datos con la revisión realizada y con información extraída de pruebas de bombeo, estratigrafía y habilitación (ANEXO A-01).

#### 4.1.5 Revisión información de derechos CBR, Juzgado de Letras y SAG

El catastro de derechos de aprovechamiento de aguas comprende los derechos de aprovechamiento de aguas constituidos en el área de estudio definida, en atención a lo cual se ha debido efectuar el levantamiento de la información correspondiente, en los Conservadores de Bienes Raíces competentes, esto es Punta Arenas y Porvenir.

Al respecto cabe señalar que el Conservador de Bienes Raíces de Punta Arenas, en especial el Registro de Propiedad de Aguas comenzó a funcionar el año 1983<sup>1</sup>. Por su parte, el Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Raíces Porvenir fue creado en el año 1997, por lo que con anterioridad a ese año, el Conservador competente era únicamente el de Punta Arenas, por lo que las inscripciones de Derechos de Aprovechamiento de Aguas se hacían en forma conjunta en el Registro de Propiedad.

#### **a. Levantamiento del Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Raíces de Punta Arenas.**

---

<sup>1</sup>La institución de los conservadores fue creada el 24 de junio de 1857, cuando se dictó el Reglamento del Registro Conservatorio de Bienes Raíces, en virtud de lo dispuesto en el artículo 695 del Código Civil.

El Registro de Propiedad de Aguas de este Conservador comienza el año 1983. Los libros correspondientes a los Registros de Agua correspondientes a los años 1955 a 1982 se encuentran actualmente en el Archivo Nacional de Santiago, y los correspondientes a los años 1983 en adelante, se encuentran en el Conservador de Bienes Raíces Punta Arenas.

En atención a lo expuesto, el levantamiento de la información relativa al Registro de Propiedad de Aguas de este Conservador se desarrolló paralelamente por dos equipos, uno situado en el Conservador, y otro en el Archivo Nacional, en la forma que a continuación se señala.

#### **a. i. Trabajo desarrollado en el Conservador de Bienes Raíces Punta Arenas.**

Mediante presentación efectuada con fecha 17 de diciembre del año 2014, suscrita por la Inspectora Fiscal del Estudio y por la Abogado Jefe de Proyecto, se informó a doña Pilar Gómez Traver, Conservador de Bienes Raíces de Punta Arenas, que la Dirección General de Aguas adjudicó "Actualización de Información y Modelación Hidrológica Acuíferos de la XII Región, de Magallanes y La Antártica Chilena" (Código ID889-6-LP-14), a la empresa Arcadis. Estudio para el cual se requiere efectuar un levantamiento de los derechos de aprovechamiento de aguas inscritos en el Conservador de Bienes Raíces a su cargo, desde su inscripción original en adelante, hasta determinar él o los titulares vigentes correspondientes a cada derecho. El Conservador para tales efectos, autorizó la permanencia durante los horarios hábiles en las dependencias del Oficio, de dos procuradores, por un período de dos semanas.

Para la recopilación de la información en el Conservador de Bienes Raíces, se revisaron los libros de registro de propiedad de aguas existentes año por año, a partir de 1983 en adelante. De esta forma, en una primera etapa, se levantó toda inscripción de derechos de aprovechamiento de agua o de mercedes de agua en forma anual. La información recopilada en el Conservador era enviada diariamente al equipo de trabajo situado en Santiago, el cual se encargaba de verificar la foja y número de la inscripción, como también el contenido de la misma, y las anotaciones marginales, a fin de revisar las transferencias del derecho de aprovechamiento cuyo título se revisa, y así poder establecer las inscripciones correspondientes a las transferencias o transmisiones de derecho parciales, para determinar todos los derechos vigentes y su historia registral a partir de la inscripción del acto administrativo o resolución que dio origen al derecho de aprovechamiento inscrito inicialmente.

En una segunda etapa, se efectuó una revisión de todos aquellos derechos, en cuyas líneas de posesión inscrita se había detectado error o incongruencia, de forma tal que una vez detectado el error por el equipo jurídico en Santiago, se comunicaba al equipo situado en la Región, para que verificara anotaciones marginales y títulos correspondientes, a fin de esclarecer al máximo la historia registral de cada uno de los derechos de aprovechamiento de aguas catastrado.

Los Registros de Aguas Revisados abarcan desde 1955 al año 2014, la información procesada e incorporada en la base de datos definitiva se presenta hasta el año 2014, esto se refleja en la base de datos (ANEXO A-02).

#### **a. ii. Trabajo desarrollado en el Archivo Nacional.**

Para la recopilación de la información en el Archivo Nacional, se solicitó formalmente esclarecer por parte del Conservador de Bienes Raíces de Punta Arenas, la fecha de inicio del Registro de Aguas de ese Conservador<sup>2</sup>, el cual de acuerdo a lo informado verbalmente por el funcionario Manuel Perenchiguay el Conservador, comenzó a partir del año 1.983.

En razón de ello, se revisaron en el Archivo Nacional, todos aquellos registros de propiedad de aguas los que, por su antigüedad, fueron sido enviados desde el Conservador de Bienes Raíces de Punta Arenas al Archivo. Este es el caso de los libros de Registro correspondientes a los años 1955 a 1982, los cuales fueron revisados y levantados año por año.

Cabe hacer presente que estos registros no corresponden a Libros de Propiedad de Aguas, sino a los Libros de Propiedad propiamente tal los cuales en la última parte de ellos contienen inscripciones de Derechos de Aguas, o bien, en la misma inscripción de la propiedad raíz.

La información recopilada en el Archivo Nacional, se encuentra incluida en la base de datos definitiva, que corresponde a 29 inscripciones (ANEXO A-05).

## **b. Levantamiento del Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Raíces de Porvenir.**

Como se señaló precedentemente, el Registro de Propiedad de Aguas parte en el año 1997, por lo que la información contenida en ese Registro, proviene de aquellos derechos que en conformidad a lo establecido por el artículo 118 del Código de Aguas<sup>3</sup> les corresponde estar inscritos en dicho Conservador.

---

<sup>2</sup> El régimen de inscripción de los derechos de aprovechamiento en los registros de Aguas de los Conservadores de Bienes Raíces se inició con la vigencia de la Ley N° 2139, de 1908, sobre Asociaciones de Canalistas. Posteriormente, el Código de Aguas de 1951 amplió el régimen de inscripción, haciendo exigible la inscripción de todas las nuevas concesiones de mercedes de aguas que se fueran otorgando. Asimismo, el artículo 302 de dicho cuerpo legal, se refiere a las inscripciones practicadas en conformidad a la Ley N° 2.139, reconociéndolas y dando, en consecuencia, continuidad al sistema registral en materia de aguas.

En efecto, el Código Civil Chileno de 1857, respecto a las aguas terrestres, distinguía entre las aguas de dominio público y las aguas de dominio privado. Las primeras, que incluyen los ríos, los grandes lagos que pueden navegarse por buques de más de 100 toneladas, las pluviales que corren por caminos públicos constituyen bienes nacionales de uso público. Las de dominio privado, corresponden a las vertientes que nacen y mueren dentro de una misma heredad, los pequeños lagos, las que corren por cauces artificiales (acueductos), y las fluviales dentro de un propiedad. Enseguida, La Ley N° 2139 del Ministerio de Industria y Obras Públicas, de 20 de noviembre de 1908, sobre Asociaciones de Canalistas, cuyas disposiciones estaban destinadas a regir a las asociaciones formadas por los dueños de canales, que se constituyan en conformidad a su artículo 20, y a otorgarles personalidad jurídica, con el objeto de tomar el agua de la corriente matriz, repartirla entre los accionistas y conservar y mejorar los acueductos; en su artículo 5° estableció por primera vez la obligación de que los actos y contratos traslativos de dominio de regadores de agua, se perfeccionarán por escritura pública y la tradición respecto de ellos, no operara sino por la inscripción del respectivo acto o contrato en un registro especial que se abrirá en cada oficina departamental del conservador de bienes raíces que se llevará conforme al reglamento que dictará el Presidente de la República. Esto es, debía tratarse de regadores de agua, es decir de las aguas que corrieran a partir de la fuente natural por cauces artificiales construidos con finalidades productivas.

<sup>3</sup> El Art. 118 del Código de Aguas establece que *"las inscripciones se practicarán el Conservador de Bienes Raíces que tenga competencia en la comuna en que se encuentre ubicada la bocanada del canal matriz en el cauce natural...tratándose de derechos de aprovechamiento que recaigan sobre aguas embalsadas o aguas subterráneas, las inscripciones deberán hacerse en el Conservador de Bienes Raíces que tenga competencia en*

**c. Información de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Regularizadas a través del artículo 2º Transitorio del Código de Aguas o en trámite de regularización.**

El artículo segundo transitorio del Código de Aguas, establece un procedimiento encaminado a regularizar derechos de aprovechamiento no inscritos, como también derechos inscritos a nombre de un tercero, cuando el solicitante ha utilizado estos derechos por un determinado período, cumpliendo también con los demás requisitos establecidos en la ley.

Se trata de un procedimiento cuya tramitación es de carácter administrativo-judicial. Se inicia en sede administrativa en conformidad a lo establecido por los artículos 130 y siguientes del Código de Aguas, la fase administrativa culmina con un informe técnico que se pronuncia respecto de los aspectos técnicos asociados al procedimiento, que es remitido a los tribunales ordinarios de justicia mediante oficio de la Dirección Regional de Aguas correspondiente, para su tramitación en sede judicial en conformidad a las normas del procedimiento sumario, fase en la cual corresponde al tribunal constatar de acuerdo a los antecedentes y pruebas presentadas, que se ha cumplido con los supuestos previstos en la Ley para su reconocimiento e inscripción.

De la información levantada, es posible concluir que de un total de 3 solicitudes de regularización de derechos de aprovechamiento de aguas por el artículo segundo transitorio, cuyos informes técnicos fueron remitidos a los tribunales ordinarios de justicia, solo 2 obtuvieron sentencia favorable e inscripción (Tabla 4-3).

Tabla 4-3. Regularizaciones de agua con sentencias favorables e inscritas

<b>EXPEDIENTE ADMINISTRATIVO</b>	<b>ROL</b>	<b>JUZGADO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>INSCRIPCIÓN</b>
NR-1202-14	34.111	2do. Letras de Pta. Arenas	Fallada. Sentencia Favorable. Ordena la Regularización del derecho.	Fojas 18 n° 13 año 1.999 del CBR de Pta. Arenas.
NR-1203-24	32.320	2do. Letras de Pta. Arenas	Fallada. Sentencia Favorable. Ordena la Regularización del derecho.	Fojas 3 n° 3 año 1.999 del CBR de Porvenir.

**d. Información de Derechos de Aprovechamiento de Aguas provenientes de planes de distribución de aguas, de predios expropiados total o parcialmente por la Corporación de Reforma Agraria.**

Mediante el Decreto con Fuerza de Ley N° 278 de 1979, artículo 1º letra e), se asigna al Servicio Agrícola y Ganadero, a contar del 15 de Noviembre de 1979, la función de ejecutar los actos relativos a la división de los derechos de aguas derivadas del proceso

*la comuna donde se encuentre ubicado el embalse o el pozo respectivo, pero si el embalse cubriere territorios de dos o más comunas, se inscribirán en aquella donde se encuentre la obra de entrega”.*



de reforma agraria proveniente de la Ley N° 15.020 y 16.640, en conformidad a las normas del Decreto con Fuerza de Ley N° 1-2.603, de 1979<sup>4</sup>, del Ministerio de Agricultura. Posteriormente, el Código de Aguas de 1981, dispuso en su artículo 5° transitorio<sup>5</sup>, normas especiales destinadas a determinar y regularizar la inscripción de los derechos de aprovechamiento señalados, la cual se encuentra vigente hasta la actualidad.

Conforme a lo señalado precedentemente, se procedió a levantar en las oficinas del departamento de Tenencia de Tierras y Aguas del Servicio Agrícola y Ganadero, los planes de distribución de aguas correspondientes a predios expropiados total o parcialmente existentes en el área en estudio. Para el caso en estudio no se encontró antecedente alguno relativo a Proyectos de Parcelación que incluyeran Planes de Distribución de Aguas.

#### **e. Cruce de la información levantada en el CBR, Juzgados de Letras y SAG, con la información de los expedientes digitalizados con que cuenta la DGA versus la información que entrega el CPA.**

La información levantada en el Conservador de Bienes Raíces, corresponde a los títulos de derechos de agua inscritos, esto es<sup>6</sup>: mercedes de agua, concesiones definitivas de derechos de aprovechamiento de aguas, actos administrativos de constitución de derechos, resoluciones constitutivas de derechos de aprovechamiento de aguas. Ahora

---

<sup>4</sup> El Decreto con Fuerza de ley N° 1-2.603, de 1979, del Ministerio de Agricultura, tuvo por finalidad, dictar disposiciones transitorias que permitieran facilitar el trámite de la inscripción de los derechos de aprovechamiento, cuando este requisito no se ha cumplido con anterioridad, como asimismo, facilitar la regularización de los derechos de aprovechamiento de los adquirentes de predios expropiados por la Corporación de la Reforma Agraria y reglamentar las limitaciones que para la enajenación de sus derechos de aprovechamiento, deben tener los propietarios de predios rústicos de pequeña superficie.

<sup>5</sup> "Art. 5°.- La determinación e inscripción de los derechos de aprovechamiento provenientes de predios expropiados total o parcialmente o adquiridos a cualquier título por aplicación de las leyes N°s 15.020 y 16.640, podrá efectuarse de acuerdo con las reglas siguientes: 1.- El Servicio Agrícola y Ganadero determinará, en forma proporcional a la extensión regada, los derechos de aprovechamiento que corresponden a cada predio asignado, a la reserva, a la parte que se hubiere excluido de la expropiación y a la que se hubiere segregado por cualquier causa cuando ello fuere procedente. Cuando la dotación que tenga el predio expropiado total o parcialmente fuere insuficiente para efectuar una adecuada distribución de las aguas, el Servicio podrá incorporar a ella otros derechos de que disponga. 2.- La determinación de los derechos a que se refiere el número anterior se hará mediante resolución exenta, que deberá publicarse en extracto en el Diario Oficial e inscribirse en el Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Raíces competente. 3.- Los interesados podrán reclamar de la resolución del Servicio Agrícola y Ganadero dentro del plazo de 60 días corridos desde la fecha de su publicación en el Diario Oficial, ante el Juez de Letras Civil competente, quien conocerá y fallará de acuerdo con el procedimiento establecido en los artículos 177 y siguientes de este Código. 4.- Los propietarios de los predios comprendidos en la resolución a que se refiere el número 2 podrán inscribir a su nombre los derechos de aprovechamiento establecidos para tales predios con la sola presentación de la inscripción de dominio del inmueble. En este caso, la inscripción de la aludida resolución será suficiente para determinar la cantidad de derechos que corresponde a cada predio y no regirá lo establecido en el artículo 1° transitorio de este Código. El Servicio Agrícola y Ganadero podrá requerir la inscripción de los derechos de aprovechamiento a que se refiere este artículo y comprometer recursos en ello."

<sup>6</sup> El título, esto es, mercedes de agua, concesiones definitivas de derechos de *aprovechamiento* de aguas, actos administrativos de constitución de derechos, resoluciones constitutivas de derechos de aprovechamiento de aguas etc. Dependerán de la antigüedad del título y de la legislación bajo la cual fueron otorgados y/o constituidos.

bien, cada título puede contener uno o más derechos de agua subterránea y/o superficial. De acuerdo a lo precedentemente señalado, el número total de títulos inscritos originalmente, en el Registro de Propiedad del Conservador de Bienes Raíces de Punta Arenas, entre los años 1983 a 2014 inclusive, son 314 inscripciones, y el número total de títulos inscritos originalmente en el Registro de Propiedad del Conservador de Bienes Raíces de Porvenir entre los años 1982 a 2014 inclusive, son 38 inscripciones.

Para determinar los derechos de aprovechamiento que no se encuentran inscritos en los Registros de Propiedad de Aguas de los referidos Conservadores, se ha efectuado un cruce de la siguiente información, la cual se pasa a detallar:

- i. La información recabada de los expedientes administrativos DGA, esto es de las Resoluciones constitutivas de derechos de aprovechamiento de aguas, con las inscripciones existentes en el Conservador de Bienes Raíces respectivo.
- ii. La información recabada de la revisión en tribunales, de las solicitudes de regularización por artículo segundo transitorio, con las inscripciones existentes en el Conservador de Bienes Raíces respectivo con las inscripciones existentes en el Conservador de Bienes Raíces respectivo. Efectuado este cruce de información, se ha determinado que las 2 regularizaciones con sentencia favorable, han sido inscritas en el Conservador.
- iii. La información levantada en el SAG relativa a planes de distribución de aguas de predios expropiados, con las inscripciones existentes en el Conservador de Bienes Raíces respectivo. Efectuado este cruce de información, se ha determinado que no existen derechos distribuidos y asignados por Resoluciones SAG.

---

## **4.2 TRABAJOS DE TERRENO – CATASTRO DE USOS Y USUARIOS DEL AGUA**

Los trabajos en terrenos consistieron en el catastro de captaciones, tanto subterráneas como superficiales, levantando información relevante con los usuarios correspondientes mediante el uso de encuestas. A continuación se detallan las etapas seguidas para la obtención de información, siendo estas: Elaboración de material de apoyo en terreno; Catastro de Aguas Subterráneas, y; Catastro de Aguas Superficiales.

### **4.2.1 Elaboración material de apoyo de terreno**

Considerando los derechos subterráneos otorgados y solicitudes en trámite, se tiene un total de 311 captaciones a catastrar (303 derechos otorgados y 8 solicitudes en trámite, ver Tabla 4-1). Para las labores de terreno se generó una base de datos con los derechos otorgados y solicitudes en trámite.

Los elementos que fueron elaborados con el objetivo de recoger información y de apoyar las actividades de terreno, corresponden a: carta de apoyo, credenciales, encuesta de uso y protocolo de terreno. Lo anterior fue aprobado para su uso por la Inspección Fiscal.

Tanto el protocolo como el material de apoyo en terreno se presentan en los anexos, Anexo A-03, 04 y 05.

A continuación se entrega una descripción de cada uno de los elementos.

- Carta de apoyo: Tiene por finalidad mostrar a las personas encuestadas el respaldo de la autoridad regional, para poder llevar a cabo el levantamiento de información en terreno. La carta se realizó en conjunto con la DGA.
- Credenciales: Fueron confeccionadas de acuerdo al formato regional para cada equipo de terreno, identificando nombre de encuestador, cédula de identidad y firmado por las autoridades correspondientes.
- Encuesta de uso: Se confeccionó de acuerdo a la información que se quería recoger en terreno (Figura 4-9). A continuación se detallan los temas a catastrar:
  - Información general: N° ficha, fecha de visita, N° de expediente.
  - Información del entrevistado: Nombre, dirección, teléfono/email.
  - Información del titular: Nombre, dirección, teléfono, nombre del predio, superficie física, comuna y localidad.
  - Derechos de aprovechamiento de las aguas: Derecho, ejercicio del derecho, fuente del recurso hídrico.
  - Información aguas superficiales: Nombre del canal, superficie regada, comunidad de aguas, acciones, funcionamiento del canal, N° expediente DGA, uso de las aguas, periodo de uso, ubicación (coordenadas UTM WGS 84 Huso 19S), cota.
  - Información aguas subterráneas: Nombre del pozo, superficie regada, ubicación (coordenadas UTM WGS 84 Huso 19S con referencia de medición), cota de terreno y de la clave de entubación con GPS Diferencial, nivel de las aguas (nivel estático, hora y fecha de medición), tipo de captación, uso de las aguas, periodo de uso, características y estado de la captación, características de la bomba.
  - Para uso Agrícola: Tipo de cultivo, sistema de riego, variedad, superficie, captación, funcionamiento del sistema de riego.
- Protocolo de terreno: Se realizó con el objetivo de describir las principales actividades que se desarrollan en terreno para un buen desempeño durante el levantamiento de información. El protocolo describe lo siguiente:
  - Respaldo DGA: Descrito en el punto anterior y necesario para una mejor llegada a las personas.
  - Equipamiento de terreno: Corresponde a los equipos y materiales que utilizan los equipos de terreno (pozómetro, GPS, cámara fotográfica digital, huincha de medir).
  - Itinerarios de visitas.
  - Visitas en terreno.
  - Visita de pozos que no estén en base de datos.

- o Sistematización de información de terreno.

En la Figura 4-9 se muestra la encuesta de uso realizada en terreno.

**CATASTRO DE USUARIOS DE AGUA**

**\*CATASTRO CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA \***

Nº FICHA \_\_\_\_\_

Nº EXPEDIENTE DGA (Superficial y/o Subterráneo)

**I. INFORMACIÓN ENTREVISTADO**

Nombre:
Dirección:
Teléfono/email:

**II. INFORMACIÓN PROPIETARIO DE LAS AGUAS**

Nombre Completo:	
Dirección:	
Teléfono/email:	
Nombre del predio:	
Superficie Física (Ha):	Rol de la propiedad:
Comuna:	Localidad:



**III. DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS**

Posee derechos de agua legalmente constituidos:
<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> PEN
Ejercicio del Derecho:
<input type="checkbox"/> Continuo <input type="checkbox"/> Discontinuo <input type="checkbox"/> Alternado (detalle)
Fuente del recurso hídrico:
<input type="checkbox"/> Canal <input type="checkbox"/> Pozo <input type="checkbox"/> Noria <input type="checkbox"/> Vertiente <input type="checkbox"/> Otro (especifique)

**IV. INFORMACIÓN AGUAS SUPERFICIALES**

Nombre canal:	
Superficie Regada (Há):	
Comunidad de aguas y Distrito:	
Acciones:	Funcionamiento Canal (Hr/Turno):
Nº Expediente DGA:	
Uso de las Aguas:	
<input type="checkbox"/> Riego <input type="checkbox"/> Agua Potable <input type="checkbox"/> Minería <input type="checkbox"/> Industrial <input type="checkbox"/> Otro (especifique)	
Período de Uso:	
Coordenadas UTM (WGS 84, Huso 19, entrega predial)	
UTM Norte _____ (m)    UTM Este _____ (m)    Cota _____ (m snm)	

Figura 4-9: Encuesta de uso aplicada en terreno

**V. INFORMACIÓN AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Nombre del Pozo: \_\_\_\_\_

Superficie Regada (Ha): \_\_\_\_\_

**Referencia de la medición (Foto)**

Coordenadas UTM RWGS 84, Huso 19) Norte \_\_\_\_\_ (m) Este \_\_\_\_\_ (m)

Cota Referencia \_\_\_\_\_ (m snm) Cota Terreno \_\_\_\_\_ (m snm)

Nivel de las Aguas en Captación

Nivel Estático \_\_\_\_\_ (m) Hora y fecha cese bombeo \_\_\_\_\_

**Hora y fecha medición nivel estático:** \_\_\_\_\_

Tipo de Captación:

Pozo  Noria  Dren  Zanja  Puntera  Otro (especifique) \_\_\_\_\_

Uso de las Aguas:

Riego  Agua Potable  Minería  Industrial  Otro (especifique) \_\_\_\_\_

Periodo de Uso: \_\_\_\_\_

Características de la captación:

**Diámetro de Pozo/Noria/Puntera** \_\_\_\_\_ (m) **Profundidad de Pozo/Noria/Puntera** \_\_\_\_\_ (m)

Longitud Dren \_\_\_\_\_ (m) Radio Dren \_\_\_\_\_ (m)

Longitud 1 Pozo Zanja \_\_\_\_\_ (m) Longitud 2 Pozo Zanja \_\_\_\_\_ (m)

Tipo de Revestimiento \_\_\_\_\_ (sin revestimiento, hormigón, ladrillo, PVC, Acero, otro)

Año Construcción \_\_\_\_\_

Estado de la Captación:

Buena  Regular  Mala  Desolación

Características de la Bomba:

Tipo Bomba \_\_\_\_\_

Potencia \_\_\_\_\_ (HP) Diámetro de Salida \_\_\_\_\_ (mm) Profundidad \_\_\_\_\_ (m)

**VI. INFORMACIÓN DE CULTIVO, SISTEMA DE RIEGO, SUPERFICIE**

	Tipo Cultivo	Sistema de Riego	Varietal	Superficie (há)	Captación (subterránea/superficial)
(a)					
(b)					
(c)					
(d)					
(e)					

2

Figura 4-9: Encuesta de uso aplicada en terreno (continuación)



#### 4.2.2 Descripción trabajo en terreno

A cada profesional de terreno se le entregó la base de datos con la información de las captaciones a ser catastradas, ordenadas de sur a norte. Asimismo, se les entregó una planilla impresa con información de cada expediente, cuyo objetivo fue apoyar la búsqueda en terreno de las captaciones, y láminas impresas con detalle de predios y captaciones, para que se complementaran en terreno, de acuerdo a la información proporcionada por el encargado de la captación.

Cada equipo en terreno contó con los siguientes equipos y materiales:

- Vehículo: Camioneta 4x4.
- Pozómetro: Utilizado para la medición del nivel del agua, con un alcance de 60 m con indicador de luz y sonido ajustable.
- GPS Móvil Geo-XT Serie 6000: Utilizado en la obtención de coordenadas UTM y cotas de las captaciones.
- Cámara Fotográfica Digital: Utilizada para captar gráficamente cada captación en diversos ángulos.
- Huincha de medir: Utilizado en la medición de diámetro y otras características de la captación.

Los trabajos en terreno comenzaron el día 26 de noviembre con una inducción a los equipos, en dónde se les explicó los siguientes puntos:

- Encuesta de Uso: Llenado de todos los ítems que contiene la encuesta. Con mayor énfasis se les detalló la información que maneja la DGA habitualmente y el proceso de ingreso de una solicitud de agua hasta la obtención del derecho. Además se explicó la manera de medir el nivel estático, la cota de referencia y la de terreno de manera tal de contar con información valiosa para futuras modelaciones y el respaldo fotográfico.
- Uso del GPS: Cómo manejar el GPS, en primera instancia a través de manuales y posteriormente con mediciones en terreno. Además se les enseñó a descargar los archivos para enviarlos a Santiago para procesarlo y corroborarlos.
- Uso del Pozómetro: Se detalló su uso y la correcta medición de los niveles.

Posterior a la inducción comenzaron las visitas a las captaciones, acompañados por la especialista de Arcadis.

Las actividades en terreno se describen a continuación:

- Uso del GPS para ubicar punto de captación.
- Una vez identificado el predio y el titular o administrador de la obra de captación, se le informa sobre el estudio que se está realizando y se solicita permiso para visitar la propiedad.
- Se desarrolla el proceso de consultas, mediciones y fotografías, con el objetivo de identificar la obra y se aplican las encuestas necesarias para recopilar la mayor cantidad de información.



- Para complementar la información, se toman fotografías, que permiten identificar tanto la obra de captación como su entorno.
- Se completan las láminas impresas con los predios digitalizados para actualizar el uso específico de cada captación.

En los casos en que se encuentren captaciones que no estén contenidas en la base de datos del catastro, se realiza la encuesta y se consulta el número de expediente de la DGA, verificando si la captación está en uso. Para aquellos pozos en los que no sea posible asignar número de expediente, se les denomina de acuerdo a la nomenclatura PZ-00i (i= 1,..., n).

Una vez que la encuesta es aplicada, la información se ingresa a una base de datos de Terreno y enviada para chequear el avance.

En las Figura 4-10 y Figura 4-11 se presentan algunas fotografías tomadas durante los trabajos en terreno.



Figura 4-10: Trabajos en terreno Captaciones Subterráneas



#### 4.2.3 Sistematización de información catastrada – aguas subterráneas

Se visitaron 323 captaciones subterráneas, de las cuales 200 pudieron ser catastradas. La cantidad de captaciones visitadas es mayor a la base original dado que se encontraron más captaciones dentro de un mismo predio. El detalle de las captaciones nuevas se muestra en el Anexo A-02

En la Figura 4-12 se puede visualizar la ubicación y situación de las captaciones. El avance por semana, se presenta en la Figura 4-13.

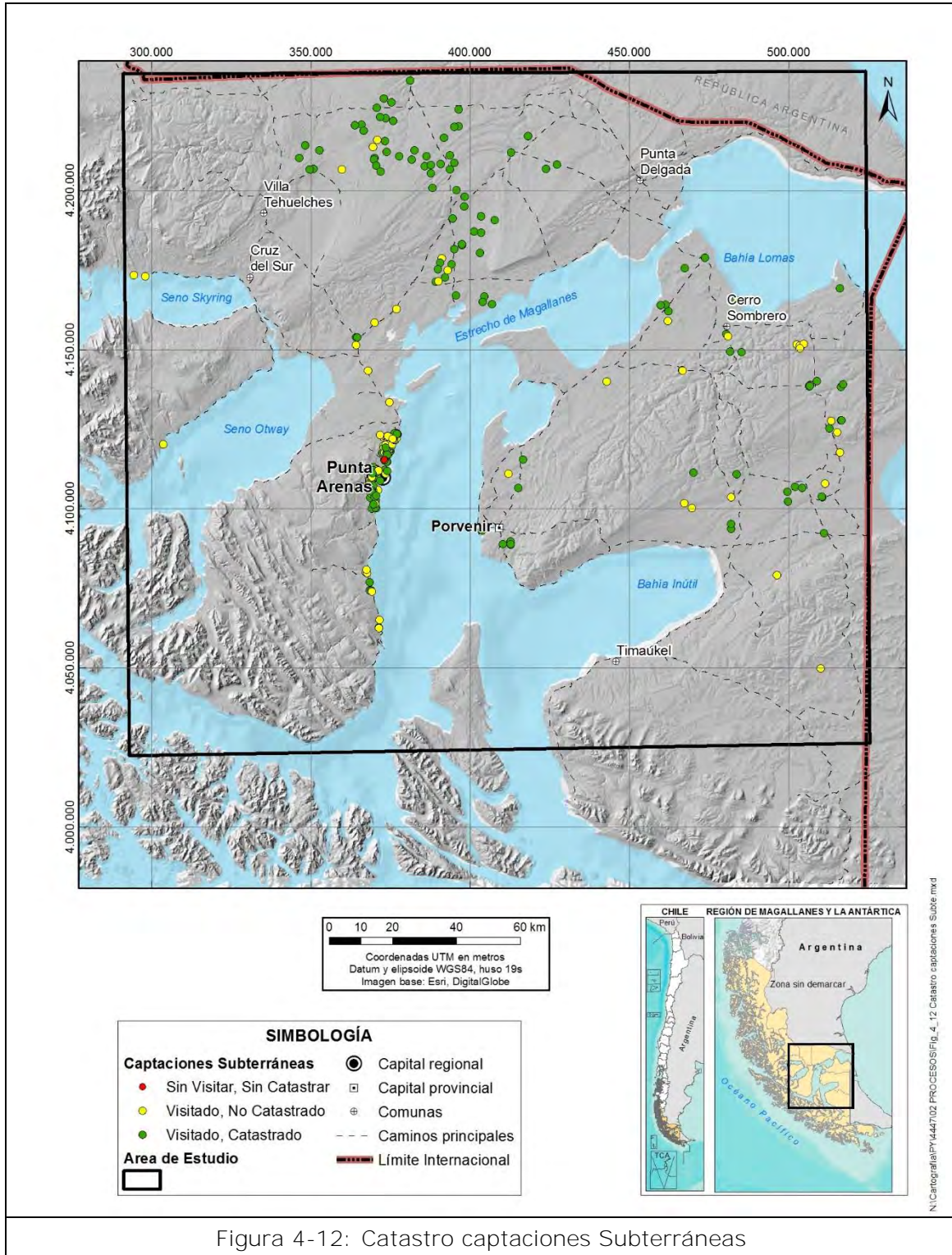
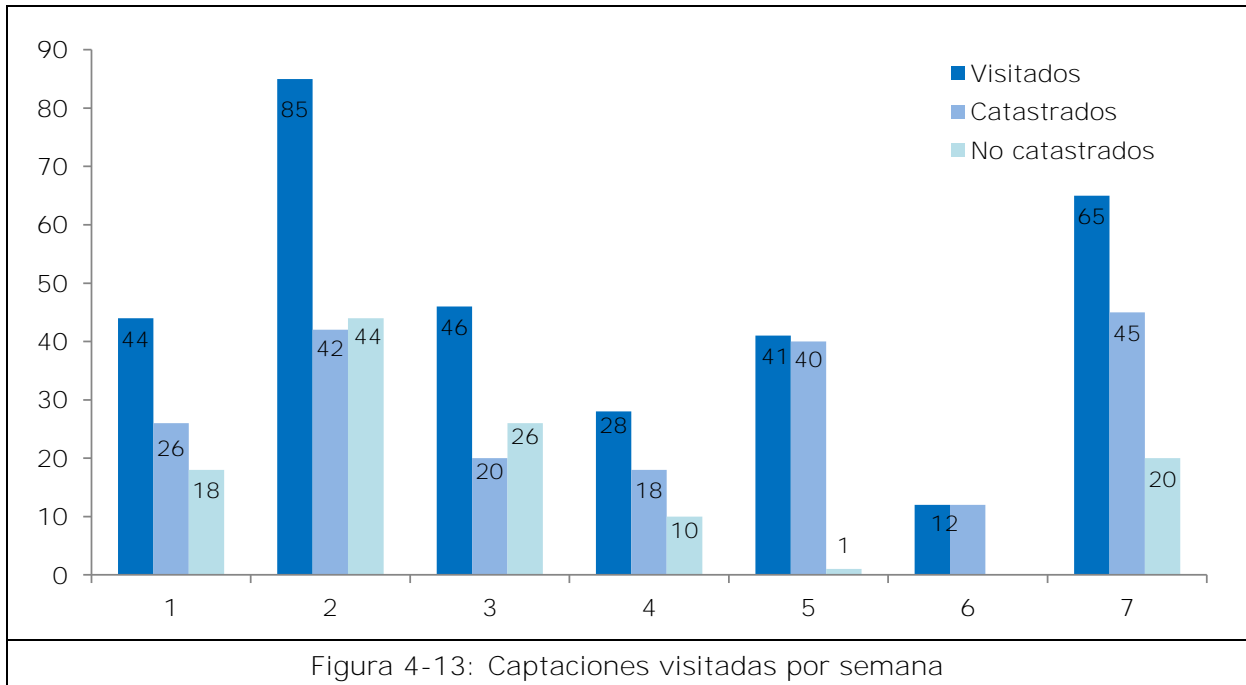


Figura 4-12: Catastro captaciones Subterráneas

El detalle de las captaciones catastradas, así como la información levantada en terreno se presentan en el Anexo A – 04 Sistematización de Información.



#### 4.2.4 Catastro de aguas superficiales

En relación a las extracciones superficiales, se visitaron 295 derechos, de los cuales 161 se catastraron. De estas captaciones, se constató que sólo 31 tienen alguna obra asociada.

Cabe señalar que en muchos puntos visitados se da la situación que se localiza más de un derecho, con mismo expediente, ya que corresponden a extracciones permanentes y también eventuales.

Se consideraron como visitados aquellos puntos a los cuales no se logró medir las coordenadas, y como catastrados a aquellos puntos en los que sí se logró medir su coordenada.

La ubicación de las captaciones superficiales y el resultado del trabajo en terreno se muestra en la Figura 4-14.

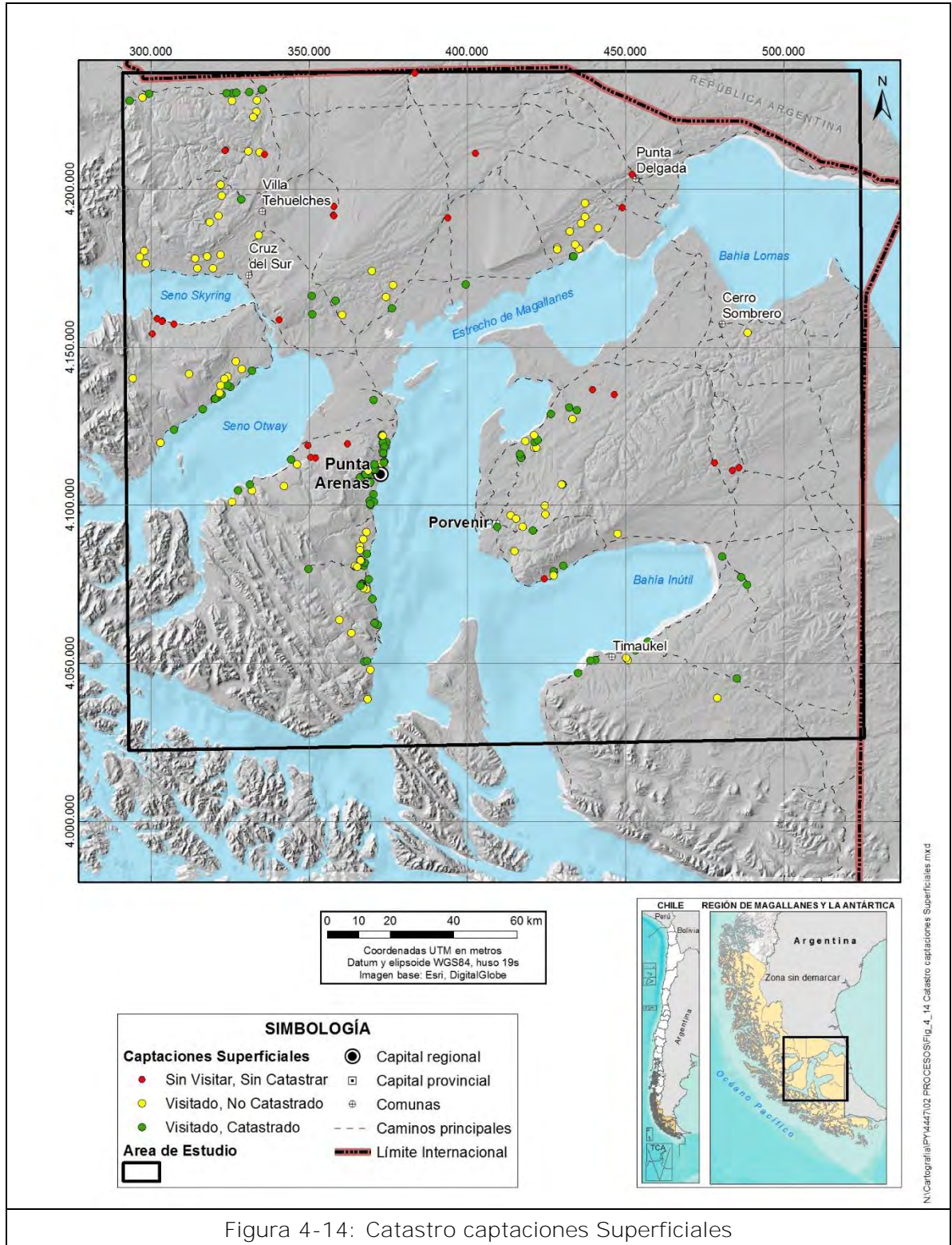


Figura 4-14: Catastro captaciones Superficiales

#### 4.2.5 Dificultades en actividades en terreno

En terreno se observaron una serie de dificultades en lo que respecta al catastro de pozos, lo que da cuenta de que, del total de captaciones visitadas, sólo un porcentaje (63%) logró ser catastrada de forma oportuna.

En este sentido, el mayor problema encontrado en terreno es el que muchas de las captaciones subterráneas posibles de catastrar se ubican en el interior de parcelas, las cuales son habitadas de forma esporádica o, en su defecto, son habitadas por personas que trabajan fuera de las mismas, haciendo imposible su catastro durante horario regular.

### 4.3 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN CATASTRADA

En este capítulo se realiza un análisis de la información recopilada en terreno, enfocado en determinar el uso del agua en la zona de estudio.

#### 4.3.1 Captaciones subterráneas

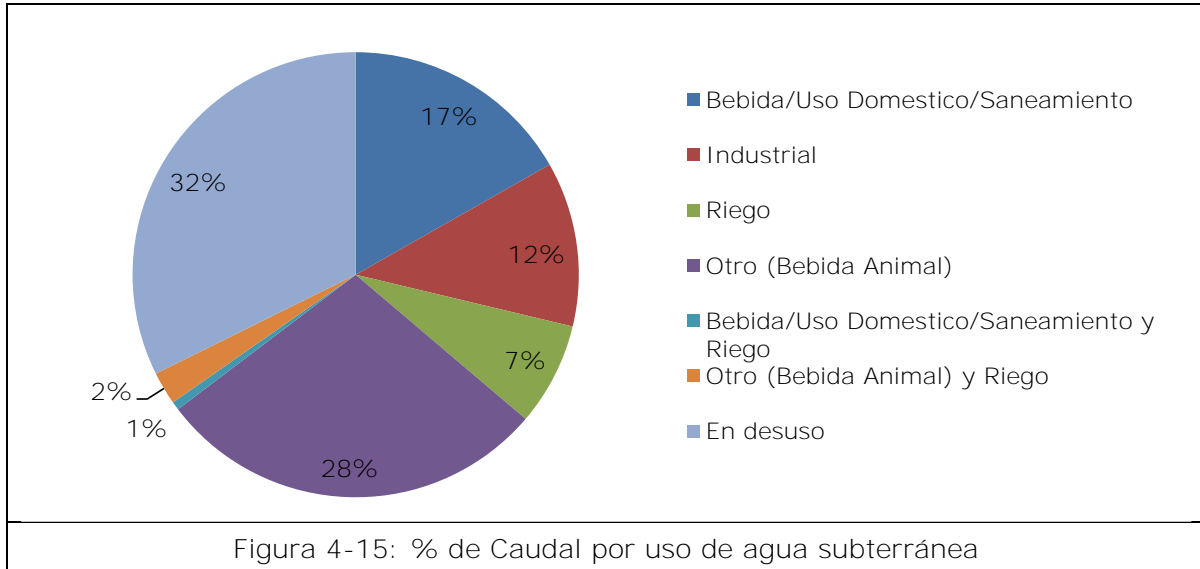
Del total de captaciones catastradas, se tiene información referente al uso de agua de 195 captaciones, lo que equivale al 98% del total catastrado.

De este total de captaciones catastradas, con información de uso (195), 62 captaciones no están en uso actualmente, de acuerdo a lo declarado por el entrevistado, equivalente a un caudal de 108 L/s (este caudal corresponde al valor de caudal otorgado en base a la información del CPA).

Como se observa en la Tabla 4-4 y Figura 4-15, el caudal otorgado se usa principalmente para bebida animal, mientras que el 32% no está en uso. Otro uso relevante es el Doméstico, equivalente al 17% del caudal total otorgado. En cuanto a cantidad de captaciones, la mayor cantidad se destina a uso doméstico.

Tabla 4-4. Uso de agua subterránea

Uso de agua	Caudal (L/s)	Nº captaciones
Bebida/Usó Doméstico/Saneamiento	56	49
Industrial	40	12
Riego	25	42
Otro (Bebida Animal)	95	26
Bebida/Usó Doméstico/Saneamiento y Riego	2	3
Otro (Bebida Animal) y Riego	8	1
En desuso	108	62
Total	334	195



De las captaciones catastradas, 6 están en situación de Pendiente según el registro del CPA. Dichas captaciones están en uso, equivalente a 39 L/s (valor de acuerdo a la información de caudal solicitado).

Al analizar la información de uso de agua registrada en el CPA (Tabla 4-1, Capítulo 4.1.1), y contrastarla con la información catastrada (Tabla 4-5), se puede mencionar que de las 4 captaciones catastradas sin información de uso en el CPA, 3 tienen uso destinado a riego y 1 a uso doméstico. En relación a las captaciones que están en desuso, de acuerdo al CPA, 44 captaciones estarían destinada a uso de riego y 4 a uso doméstico.

Se puede señalar también que en sólo 40 captaciones coincide el uso de agua registrado en el CPA con el uso señalado en terreno, y en 78 captaciones se da el caso de que el uso no es el mismo. Como se muestra en la Tabla 4-1 (Capítulo 4.1.1), de acuerdo al registro del CPA la mayor cantidad de derechos se destinaría a riego.

En la Tabla 4-5 se resume lo mencionado en los párrafos anteriores, en donde se destacan los usos que coinciden en ambas fuentes de información.

Cabe señalar que en terreno se catastraron 13 captaciones que no tienen registro en la DGA. De estos pozos, 5 se usan para consumo doméstico y 1 para bebida animal, mientras que 6 están en desuso y 1 no tiene información.

Para estimar el caudal de uso de las captaciones subterráneas, se calculó un factor de uso en base al caudal otorgado (información del CPA), y al periodo en que se usa la captación.

Tabla 4-5. N° de Captaciones según uso de agua de acuerdo a información del catastro y CPA

Uso Terreno	Uso en CPA				Total
	B/UD/S	Otros Usos	Riego	S/I	
Otro (Bebida Animal)	1		22	2	25
Otro (Bebida Animal) y Riego			<b>1</b>		1
B/UD/S	<b>4</b>	1	37	2	44
B/UD/S y Riego	<b>1</b>		<b>2</b>		3
Riego	7	1	<b>32</b>	2	42
Industrial	7	1	1	3	12
En desuso	4		44	8	56
S/I	1		3		4
Total	25	3	142	17	187

Del catastro se tiene información de periodo de uso de solo 19 captaciones que se destinan a riego, las cuales se utilizan principalmente en los meses de verano, ciertos días de la semana y algunas horas al día. Usando dicha información se tiene que el factor de uso para riego es aproximadamente 0,1.

Para agua potable el periodo de uso es permanente en el año, todos los días, y se consideró un promedio de 10 horas diarias. En base a dichos supuestos, el factor de uso para agua potable estimado es de 0,4.

Finalmente, en base a los factores de uso calculados, se estima que el caudal de extracción para agua potable es de 23 l/s, mientras que para riego es de 4 l/s.

Es importante señalar que los factores de uso descritos fueron estimados en base a la información recopilada en terreno y que, dada la falta de información entregada por los usuarios, principalmente asociada al desconocimiento en el uso propio de sus captaciones subterráneas, se debe tener precaución al momento de utilizar directamente estos factores de uso. En este sentido, comparando los mismos con estudios en otras regiones, se observan diferencias considerables entre dichos factores (ver Tabla 4-6). Considerando lo anterior, se consideró prudente considerar un factor de uso mayor a los disponibles, que permitiesen disponer de una mayor seguridad ante extracciones futuras. En este sentido, se considerarán para el presente estudio los factores de uso propuestos en la cuarta columna de la tabla siguiente.



Tabla 4-6. Comparativa Factores de Uso

Uso	Factor de Uso	Factor de Uso <sup>7</sup>	Factor de Uso (Asumido)
Agua Potable y Doméstico	0,4	0,75	0,7
Riego	0,1	0,2	0,2
Industrial	-	0,3	0,4
Minero	-	0,75	0,5
Otro	-	0,1	0,5

Cabe señalar que en esta estimación no se consideró el uso para bebida animal ni industrial.

En relación al tipo de captación, el 55% son pozos, mientras que el 42% corresponde a noria. Del total de captaciones, el 77% se encuentra en buen estado.

Con respecto al nivel estático, se tiene información de 161 captaciones, de las cuales 30 son surgentes. Más del 60% de las captaciones tiene un nivel estático menor a 5 m. En el gráfico de la Figura 4-16 se muestra la cantidad de captaciones según valor de nivel estático.

Las captaciones que no cuentan con medición de nivel corresponden, principalmente, a las que se encontraban selladas o secas.

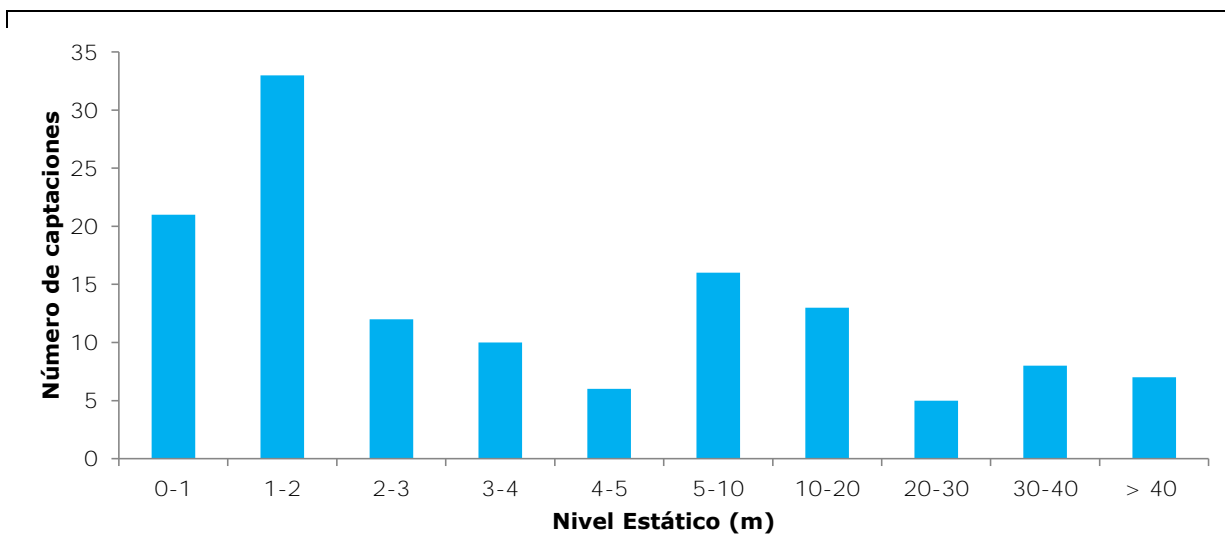


Figura 4-16: Nivel estático medido en las captaciones

<sup>7</sup> Evaluación de los Recursos Subterráneos de la Cuenca del Río Aconcagua. DGA, 2011

### 4.3.2 Captaciones superficiales

Con respecto a las captaciones superficiales, del total catastrado se tiene información de uso de sólo 7 extracciones, de las cuales 3 se usan para riego, 3 para bebida animal y 1 para agua potable.

---

## 4.4 CREACIÓN DE BASE DE DATOS FINAL Y PROYECTO SIG

La información recopilada en terreno se cruzó con la información del CPA, generándose una base de datos con información actualizada, considerando el uso actual de la captación y las coordenadas corregidas. Esta información se consolidó como material base para el Sistema de Información Geográfica.

Junto con recopilar datos base, como redes de drenaje, red vial, límites administrativos, modelos de elevación digital, se ha reunido y/o generado información temática como ubicación de estaciones pluviométricas y pluviométricas, cuencas hidrográficas, ubicación de derechos de agua, etc. Asimismo, se digitalizó información proveniente desde el estudio DGA/AC-91, donde se encuentran elementos tales como geología simplificada, unidades hidrogeológicas y perfiles geológicos.

Este material, en conjunto con figuras y mapas generados para el presente informe, se encuentra en el Anexo B.

Como apoyo a las actividades de terreno, principalmente al catastro de captaciones subterráneas, se diseñaron láminas para ser impresas en formato A1, escala 1:5.000. Éstas contienen una imagen satelital Google Earth de 2m de resolución como base, sumado a la ubicación de las captaciones y la delimitación de predios del SAG.

---

## 5 HIDROLOGÍA

Este capítulo presenta una caracterización y análisis de las variables hidrometeorológicas, de modo de comprender y evaluar el régimen hídrico que define el sistema superficial.

Se presenta una recopilación y revisión de los antecedentes relacionados con evaluación hidrológica de la región, una caracterización climatológica para comprender la formación y condiciones generales del origen del sistema hidrológico, una caracterización y análisis de las variables hidrometeorológicas principales (precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudales y finalmente una evaluación de la cantidad de agua disponible para infiltración al acuífero.

---

### 5.1 RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Existe un número menor de estudios en la zona relacionados con la disponibilidad y aprovechamiento de recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, de las cuales se presenta un resumen de los aspectos más relevantes, poniendo énfasis en los temas relacionados con las recargas a los acuíferos en la XII región.

Los estudios generales sobre aspectos básicos de la hidrografía de la zona son el "Balance Hídrico de Chile" (1987), de la DGA, el "Catastro y Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos XII Región Punta Arenas" (1991) y, el "Estudio Integral de Riego y Drenaje de Magallanes – XII Región" (1997).

Además, se revisaron otros estudios de carácter local con diversos fines, los que aportan antecedentes de interés. De los diversos estudios encontrados que se relacionan con el tema, los que han resultado de mayor relevancia y que serán analizados en los puntos siguientes, son:

- "Estadística Climatología", Dirección Meteorológica de Chile, marzo 2001.
- "Informe técnico N°6: Reserva del Río del Oro Para la Conservación Ambiental y el Desarrollo Local de la Cuenca", División de Estudios y Planificación, Dirección General de Agua, octubre 2009.
- Resumen Meteorológico Estación "Jorge C. Schythe" (53°08' S; 70°53'O; 6 m.s.n.m.) Año 2002-2014

#### 5.1.1 Estudios generales

##### Balance Hídrico de Chile, Dirección General de Agua, 1987

Este estudio consideró toda la región de Magallanes, exceptuando el Territorio Chileno Este estudio consideró toda la región de Magallanes, exceptuando el Territorio Chileno Antártico. Se debe tener en cuenta que el balance hídrico del sector de las islas, ubicadas al oeste de la región, tiene sólo un carácter referencial.

Con respecto a las precipitaciones, estas presentan una dispersión importante. Estas varían de forma espacial, en un rango que va de los 200 mm en la zona estepas a los

3.000 mm en las islas costeras. Al considerar la distribución mensual, esta es homogénea entre el invierno y el verano, por lo que no es posible distinguir claramente una temporada de lluvias. Pese a lo anterior, algunas estaciones pluviométricas registran el 80% del caudal anual en invierno, mientras que la mayoría de las estaciones presentan valores cercanos al 55%. Los caudales específicos son más bien bajos, siendo menores que 30 L/s/Km<sup>2</sup> y los coeficientes de escorrentía obtenidos en las cuencas principales se estima con un valor de 0,6.

A nivel regional, la evaporación de tanque anual y la temperatura media anual en la zona son de las más bajas del país y se encuentran alrededor de los 1000 mm y los 5°C respectivamente.

La evaporación en cuerpos de agua se estimó a partir de mediciones directas en tanques evaporimétricos tipo U.S Weather Bureau Clase A, existentes en el país. Mientras que la evapotranspiración en superficies naturales se estimó de forma indirecta a partir del método de Turc, el cual permitió estimar la evapotranspiración real a partir de la precipitación media anual y la temperatura media anual. Este último término resulta ser el de mayor importancia.

El método de bandeja de evaporación permite medir de forma empírica la pérdida de agua líquida producto de la transformación de ésta en vapor. Al ser empírico, los valores obtenidos responden al conjunto de factores que condicionan su magnitud (radiación solar, condiciones de ventilación, humedad, etc.). Por su aparente simplicidad, su uso se encuentra extendido en distintas zonas alrededor del mundo, existiendo varios tipos de diseño. Se debe considerar que la evaporación medida en el tanque puede diferir significativamente de aquella en un cuerpo de agua adyacente o de la vegetación circundante, debido a las condiciones de borde de la instrumentación. Para ajustar sus mediciones al valor real que tendrían en estos casos se utilizan coeficientes de corrección empíricos conocidos como coeficientes de bandeja ( $k_{pan}$ ), coeficientes de embalse o coeficientes de tanque. Estos coeficientes pueden variar en función de las dimensiones, material y posición relativa del instrumento, así como del clima y vegetación de la zona. Valores referenciales se encuentran tabulados en Shuttleworth (1993<sup>8</sup>).

El método de Turc, por su parte, permite realizar una estimación de la magnitud de evaporación en cierta área. La expresión que se utiliza está basada en ciertos parámetros empíricos y presenta buenos resultados en climas húmedos, aun cuando se han realizado adaptaciones para su aplicabilidad en climas áridos (Shuttleworth, 1993). Para mejorar tanto las mediciones como las estimaciones de evaporación y evapotranspiración, es recomendable contar con mediciones alternativas e independientes. Dos métodos precisos para medir la evaporación, aunque pueden llegar a ser costosos, son el de balance de energía (relación de Bowen) y el de correlación de Eddy. Para estimar la evaporación y evapotranspiración se recomienda el uso de los métodos de Penman y Penman-Monteith,

---

<sup>8</sup> Shuttleworth, W. (1993). Chapter 4: Evaporation. En: Maidment D.R. Handbook of hydrology. New York.

respectivamente, que han sido testeados en diferentes lugares y climas dando buenos resultados (McMahon *et al.*, 2013<sup>9</sup>).

Considerando un balance hídrico en régimen natural a nivel regional, los aportes totales en forma de precipitación media anual se estimaron en 2.713 mm, que equivalen a un gasto continuo de 11.748 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 10.124 m<sup>3</sup>/s se transforman en escurrimiento superficial. La evapotranspiración real del sistema en superficies naturales se estima en 370 mm anuales y en lagos en 5,71 mm. Transformados en gastos continuos equivalentes, estos valores corresponden a 1.604 m<sup>3</sup>/s y 24,7 m<sup>3</sup>/s de evaporación en superficies naturales y en lagos. Estos valores que incluyen a todas las islas de la parte oeste, resultan ser poco representativos de la zona de estudio, ya que esta tiene una proporción mayor de estepa, donde menos precipita.

Los valores promedio anuales antes mencionados fueron estimados en base a un balance hídrico de aportes y consumos en la zona, tomando como referencia los registros de precipitaciones, caudales y evaporación de 30 años, desde 1951 hasta 1980. La Tabla 5-1 presentan el balance hídrico de las subcuencas aportantes a las estaciones fluviométricas consideradas que quedan dentro del área de estudio.

Tabla 5-1: Balance Hídrico en las subcuencas aportantes a estaciones fluviométricas.

<b>Subcuenca</b>	<b>Superficie (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Pp (mm/año)</b>	<b>Caudales (mm/año)</b>	<b>Evapotrans piración real (mm/año)</b>	<b>Evaporación (mm/año)</b>
Río San Juan	1.256	841	474	356	-
Río Rubens en ruta 9	500	1.003	593	360	-
Río penitente en Morro Chico	1.747	500	195	300	-
Río Oro en Bahía Felipe	561	450	174	250	-
Río Oscar en Bahía Felipe	500	385	126	250	-
Río Side en Cerro Sombrero	863	330	84	250	-
Río Grande en Tierra del Fuego	2.138	680	320	320	60

[Fuente: BHCH (DGA, 1987)]

Como se puede apreciar, la región presenta un comportamiento variado, en algunas zonas precipita 300 mm/año, lo que es comparable con la ciudad de Santiago, en otras zonas se registran precipitaciones que son más de 3 veces este valor. Por otro lado, la precipitación que se traduce en un caudal de salida oscila entre un 60% a un 25%.

<sup>9</sup> McMahon, T. A., Peel, M. C., Lowe, L., Srikanthan, R., and McVicar, T. R.: Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 1331-1363, doi: 10.5194/hess-17-1331-2013, 2013.

---

## Catastro y Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos XII Región Punta Arenas, (1991)

El estudio realizó un análisis global de los recursos superficiales y subterráneos, a partir de un catastro de sondajes, un análisis geológico y geomorfológico y una reseña climatológica. También se realizó un análisis de precipitaciones y escurrimientos superficiales considerando tres escenarios (año normal, seco y húmedo) a partir de ellos se calcularon ecuaciones de balance hídrico para evaluar la recarga a la napa en las 50 cuencas consideradas.

En el balance se destacó la influencia del fuerte viento en la región, que persiste durante todo el año y produce una evapotranspiración de magnitud importante, esto no es consistente con lo señalado en el Balance Hídrico de Chile. Todo lo anterior permitió obtener una visión hidrogeológica global a partir de la información disponible.

Respecto al estudio hidrológico, los escenarios definidos: normal, húmedo y seco se definen con una probabilidad de excedencia de 50%, 15% y 85%. Debido a la escasa estadística fluviométrica existente en ese momento, se completó y amplió la estadística en la estación San Juan en Desembocadura, la cual sirvió de base para generar la estadística en el resto del área de estudio, utilizando correlación en las cuencas controladas y transposición de caudales en las no controladas.

El clima de la zona queda definido por la presencia del frente polar antártico. En verano, el frente polar se ubica alrededor de los 60° y durante el invierno se desplaza entre los 45° y 50°. Así la zona magallánica permanece durante el invierno inmersa en el frente polar, registrándose las menores temperaturas y velocidades del viento, con las humedades relativas más altas. En verano se observan frecuentes temporales de viento, chubascos de escasa intensidad y un incremento en la temperatura que es atenuado por la presencia de los vientos, cuya principal componente es hacia el Oeste.

El clima de la zona Magallánica hacia la cordillera Patagónica Occidental es del tipo templado frío lluvioso sin estación seca, y hacia el Noreste, donde se desarrolla la estepa fría magallánica (incluyendo la zona norte de Tierra del Fuego) es semiárido frío con lluvias invernales. La vegetación en la cordillera Patagónica y en la península de Brunswick es del tipo bosque pluvial frío de fiordos y de estepa patagónica en la planicie.

Se trazaron curvas Isoyetas para los 3 escenarios considerados. Las precipitaciones tienden a disminuir en la dirección Noreste, desde valores superiores a los 1000 mm anuales en el extremo sur de la península de Brunswick hasta valores inferiores a los 200 mm en los sectores más secos, como Morro Chico.

Este estudio es el primero de los estudios con carácter hidrogeológicos en la Región de Magallanes. El estudio entrega valores de recarga por unidad hidrogeológica y caracteriza los acuíferos en la zona de estudio.

## Estudio Integral de Riego y Drenaje de Magallanes – XII Región, Asociación de profesionales Proyecto Magallanes Ltda., (1997)

Consistió en el primer estudio integral de riego y drenaje en la región, donde hasta la fecha el riego sólo había utilizado en pequeña escala por algunos ganaderos y por la estación Kampenaike del INIA. El riego en Magallanes es interesante ya que existe un

déficit hídrico durante la primavera y verano en las zonas en que se desarrolla la actividad agrícola y principalmente ganadera.

El análisis integrado de los parámetros climáticos permitió definir cuatro distritos agroclimáticos, estos distritos son mostrados en la Figura 5-1.

En el distrito N° 1 es posible desarrollar una cierta cantidad de cultivos anuales, hortalizas y praderas artificiales, quedando excluidos los frutales de clima templado y las especies exigentes en calor o sensibles a heladas. El distrito N° 2 presentan una amplitud menor que la del distrito N° 1, siendo posibles algunos cultivos y hortalizas con mayores limitaciones. Debido a la presencia de mayores precipitaciones posee muy buenas características para praderas naturales mejoradas y artificiales.

El distrito N° 3 es semejante al distrito N° 1 pero con un régimen hídrico mucho más seco, que actúa como fuente limitante para el crecimiento de cultivos y principalmente praderas. El distrito N° 4 corresponde a una franja intermedia entre los distritos 1 y 3 que presenta una mayor exposición a los vientos, entre los 4 distritos existentes en la zona, es el más fresco pero no el más helado, aun cuando se producen 85 heladas al año, estas no son tan intensas por efecto del mar.

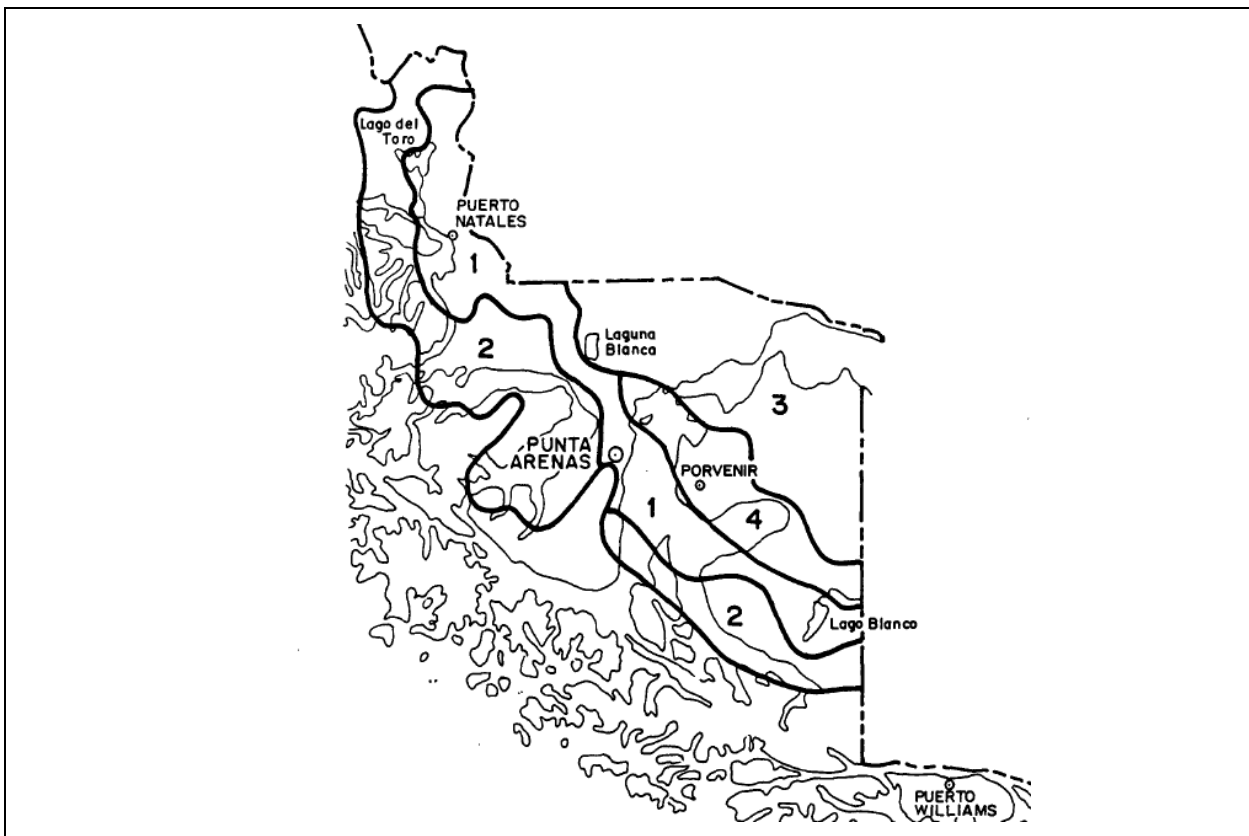


Figura 5-1: Distritos Agroclimáticos

[Fuente: Estudio Integral de Riego y Drenaje de Magallanes – XII Región (1997)]

Por otro lado, se caracterizó la fluviometría del área de estudio, con el fin de estimar las disponibilidades de recursos hídricos en las cuencas de la región, a nivel de caudales medios mensuales. En la zona Oeste, los ríos Baguales, Vizcachas y las Chinas presentan un régimen hidrológico nival, con un peak entre octubre y noviembre. En la zona intermedia, los ríos Rubens, Penitente, Grande en Isla Riesco, San Juan y grande en Tierra del Fuego presentan un régimen pluvio-nival, con un peak entre abril y Julio y otro a comienzo de la primera. En la este, los ríos oro, Oscar y Side presentan un régimen pluvial con caudales máximos producidos entre julio y septiembre.

También se evaluaron los recursos de aguas subterráneas en la zona magallánica, que a diferencia del caso típico de la zona central donde los sistemas acuíferos en su mayoría se desarrollan en los rellenos fluviales del Cuaternario, es la importancia acuífera que tienen los depósitos del Terciario Superior, con una presencia predominante de napas artesianas. Estos depósitos, y las cuencas artesianas que se desarrollan en ellos, están directamente relacionados con la evolución global de la geología de la Cuenca de Magallanes. El área de estudio se dividió en zonas hidrogeológicas similares a las del Catastro y Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos XII Región Punta Arenas (1991).

Respecto del uso del agua, el estudio señala que en la región de Magallanes actualmente no existe riego a una escala significativa y en los pocos sectores que se riega, tampoco existe un conocimiento y un manejo adecuado de esta labor. Las acciones de riego realizadas en la región han sido básicamente obras de iniciativa privada de los estancieros. Sin embargo, en 1994 se inició la construcción de un proyecto de riego que cuenta con participación estatal tanto en su financiamiento como en la ejecución de las obras civiles.

El estudio hace mención de la eficiencia de los diversos métodos de riego. En particular señala que el riego por aspersión, que normalmente logra eficiencias de aplicación considerablemente mayores que el riego por tendido. Sin embargo en esta zona, considerando las altas velocidades del viento, es poco probable que se alcancen eficiencias típicas para este método (75 a 80%). En las áreas de estudio se estima que se pueden conseguir eficiencia de aplicación del orden 65 al 68%, como máximo.

#### Estadísticas Climatología, dirección Meteorológica de Chile, (2001)

El estudio presenta un resumen de las principales características climáticas en las ciudades más importantes del país, de las cuales resulta de interés las de Punta Arenas, capital de la región de Magallanes. Como fuente de datos fueron utilizados registros horarios (temperatura, humedad relativa y viento), cada tres horas (fenómenos significativos) y diarios (precipitación) de cada uno de los elementos meteorológicos registrados en la estación meteorológica considerada. Estos registros fueron obtenidos desde la base de datos de la Dirección Meteorológica de Chile. El período considerado para la gran mayoría de los registros va de los años 1970 a 2000.

La Figura 5-2 presenta el promedio mensual de horas al día con temperaturas menores a 0° C. Se aprecia que durante los meses de verano el número de horas es mínimo, sin



embargo en los meses de invierno y particularmente en junio y en julio la mayor parte del día presenta temperaturas menores que 0° C.

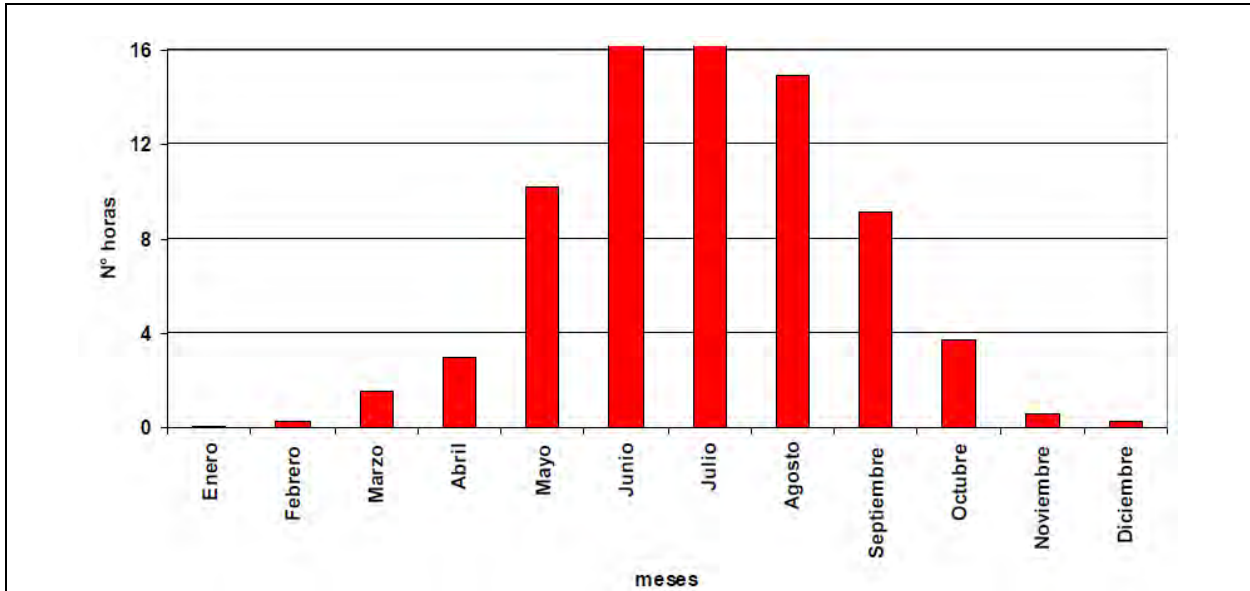


Figura 5-2: Promedio mensual de horas al día con temperaturas menores a 0° C.

Las precipitaciones anuales para el periodo considerado son en promedio de 395 mm. En Punta Arenas llueve frecuentemente. La Figura 5-3 muestra el número total de días con precipitación al año. Se puede observar que al menos llueven 130 días por año. Esta cifra se considera importante.

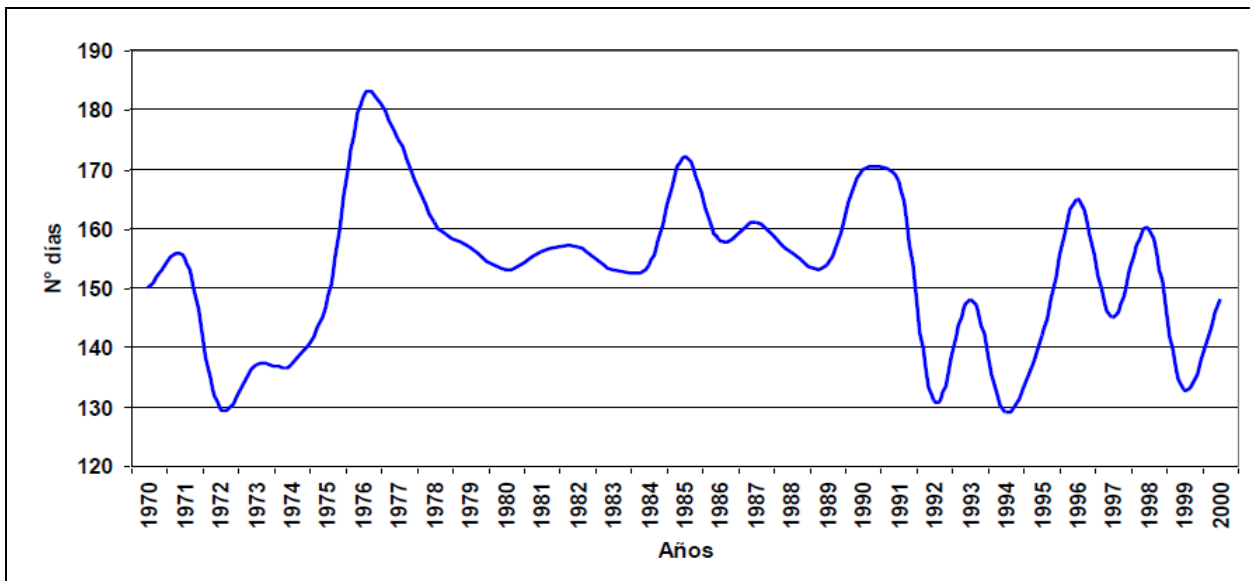


Figura 5-3: Total de días con precipitación al año.

El estudio muestra como la precipitación sólida (nieve) es una variable relevante a considerar, ya que la temperatura en la zona es particularmente baja y se ubica en promedio bajo los cero grados, sobre todo entre mayo a septiembre.

Informe Técnico N°6, Reserva del Río del Oro Para la Conservación Ambiental y el Desarrollo Local de la Cuenca”, División de Estudios y Planificación, Dirección General de Agua, (2009)

El informe analizó la situación en que se encuentra el Río Del Oro, que está ubicado en la región de Magallanes, al extremo sur de la península de Brunswick, aproximadamente a 70 Km. al sur de Punta Arenas. Es un río pequeño que tiene una longitud aproximada de 30 Km, corre en dirección sur y desemboca finalmente en el estrecho de Magallanes. La cuenca hidrográfica de río Del Oro es de 293 Km<sup>2</sup>, no tiene lagos o lagunas interiores y los puntos de máxima altura alcanzan los 800 msnm.

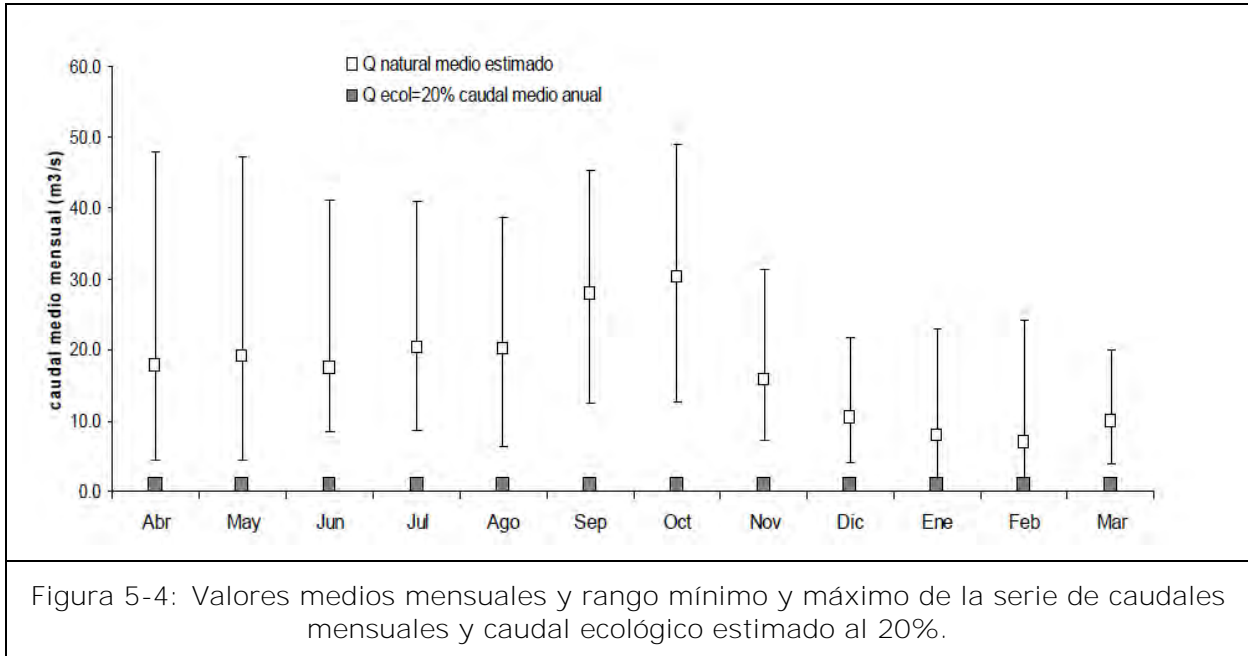
La situación del río del Oro en cuanto al nivel de explotación del recurso hídrico es nula. Producto de esto y del difícil acceso al sector se está frente a un río con características ambientales prístinas. Sin embargo, se estaba evaluando el otorgamiento derechos de aprovechamiento no consuntivos en trámite que agotarían la disponibilidad de este recurso en el cauce principal y en uno de sus efluentes más importantes, con solicitudes de 22 y 8 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

De todas las estaciones fluviométricas de la península de Brunswick, la estación con mayor registro (39 años), y además la que tiene mayor proximidad a la cuenca de río Del Oro es la estación Río San Juan en Desembocadura, por lo que resultó natural utilizar los datos de esta estación como referencia o patrón para las estimaciones de caudales en río Del Oro. El caudal medio anual observado en la estación Río San Juan en Desembocadura es de 17,79 m<sup>3</sup>/s. El área aportante es de 870 Km<sup>2</sup> y su caudal específico es por lo tanto de 20,44 l/s/Km<sup>2</sup>.

Se calcularon los caudales medios anuales, mensuales y caudal ecológico para los dos puntos de la cuenca de río Del Oro en que existen derechos solicitados, haciéndose una transposición por área aportante. La Figura 5-4 muestra la situación de los caudales estimados en comparación a los caudales ecológicos estimados como el 20% del caudal medio anual.

El río Del Oro se modificaría totalmente en el caso de mantener el caudal ecológico máximo permitido por la DGA, correspondiente al 20% del caudal medio anual. Con un caudal ecológico calculado de esta forma, el río se conservaría sólo el 3% del tiempo en condiciones equivalentes a la del río natural. Si el caudal ecológico fuera el 40% del caudal medio anual, la situación cambia parcialmente y en ese caso el río se conserva el 16% del tiempo.

Desde el punto de vista de la conservación del río, el desempeño del caudal ecológico se vislumbró como poco satisfactorio, así esta medida es de poco impacto en la conservación ambiental del río, ya que como se observó en la figura anterior, estos valores son casi siempre excedidos en la distribución normal del cauce.



Como solución a esta situación el estudio propone un caudal de reserva importante, por lo que sólo se otorgara un caudal de uso eventual. Sólo en el caso que el caudal ecológico sumado al caudal de reserva sea sobrepasado en el cauce, se podrá extraer el caudal eventual, preservando de esta forma las condiciones naturales del río.

El estudio presenta la dificultad para definir el caudal ecológico en una de las cuencas del área de estudio, ya que bajo la forma tradicional de definirlo, no se lograrían los objetivos de conservación buscados.

**Golder Associates, 2010. Estudio de Impacto Ambiental "Proyecto Mina Invierno". Servicio de Evaluación Ambiental.**

El EIA "Proyecto Mina Invierno" se presentó para poder explotar yacimientos de carbón sub-bituminoso en Isla Riesco, los que fueron adquiridos en el marco de una licitación internacional realizada por CORFO el año 2007.

El Proyecto se localiza en los terrenos de la Estancia Invierno, ubicada en la parte sureste de la Isla Riesco, en la costa que bordea el seno Otway, comuna de Río Verde, Provincia de Magallanes, Región de Magallanes y Antártica Chilena. El yacimiento, se encuentra ubicado aproximadamente a unos 130 km, al noroeste de la ciudad de Punta Arenas y a unos 40 km de la localidad de Río Verde, a una altitud media de 120 msnm (Figura 5-5).



Dentro de los elementos que interesan de este trabajo está la hidrología, que se orientó a estimar los caudales medios y máximos para distintos periodos de retorno en cursos superficiales, así como el balance hídrico de 2 lagunas en el área de influencia del proyecto.

Los caudales medios anuales y mensuales (Figura 5-6) se estimaron utilizando los resultados de un estudio previo, realizado por Harambour (2007). Los caudales máximos se estimaron utilizando la formula racional y un modelo regional de escorrentías. Para ambos casos se requirió un procesamiento previo de los datos de precipitación máxima en 24 y 48 horas, con el objetivo de obtener un valor de excedencia para distintos periodos de retorno.

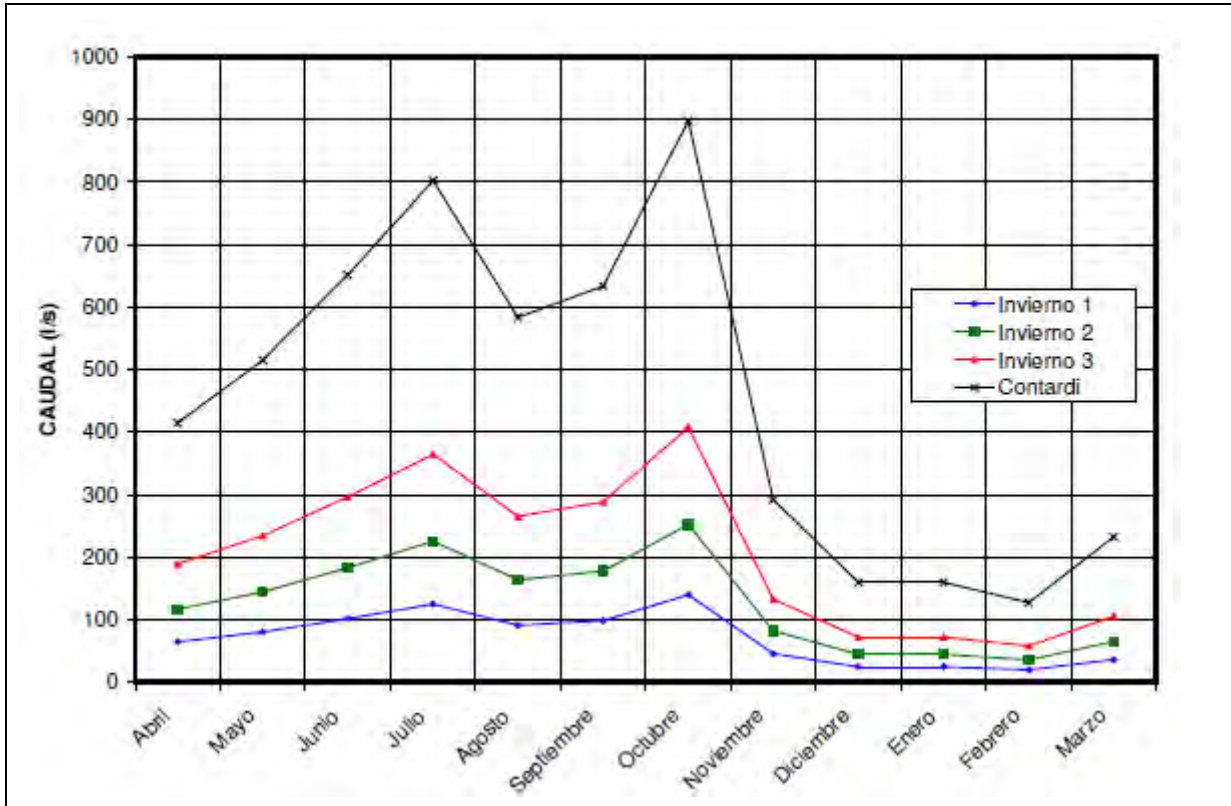


Figura 5-6. Caudales medios mensuales en cursos superficiales dentro del área del proyecto. Fuente: Golder, 2010.

En relación al balance en las lagunas, éste se realizó para laguna Mediana (0,5 Km<sup>2</sup>, 124.000 m<sup>3</sup>) y laguna Larga (4,3 Km<sup>2</sup>, 328.000 m<sup>3</sup>). En la laguna Mediana se concluyó que sólo existe flujo potencial de salida entre los meses de abril y octubre, dado que la cota el resto de meses es inferior al punto de descarga. La laguna Larga tendría potencialmente un flujo de salida durante todo el año. Estas descargas de las lagunas serían prácticamente todas superficiales, debido a que según los estudios realizados, el fondo de estos cuerpos presenta una permeabilidad baja a muy baja para permitir la infiltración y recarga el/los acuíferos.

## Resumen Meteorológico Estación "Jorge C. Schythe" (53°08' S; 70°53'O; 6 m.s.n.m.) Año 2002-2014, Anales Instituto Patagonia, Universidad de Magallanes, (2003-2015)

Los informes muestran un resumen de las mediciones de distintas variables meteorológicas realizadas en la estación Jorge C. Schythe, ubicada en la ciudad de Punta Arenas. El período disponible corresponde a los años 2002-2014, para el cual se cuenta con datos con resolución mensual de temperatura, humedad relativa, precipitaciones (agua, agua-nieve y nieve), evaporación, insolación, nubosidad, radiación solar y viento.

Los estudios, al presentar las precipitaciones en sus distintas formas, permiten comprender de mejor manera el comportamiento de la hidrología del sector de Punta Arenas.

Tabla 5-2: Precipitaciones promedio mensuales período 2002-2014, Estación Jorge C. Schythe.

Mes	Agua (mm)	Agua-nieve (mm)	Nieve (cm)	Total (mm)	Evaporación (mm)
Enero	40,1	0,0	0,0	40,1	128,9
Febrero	29,9	0,0	0,0	29,9	116,0
Marzo	57,3	1,3	0,0	57,8	104,8
Abril	73,2	1,3	0,0	73,8	70,3
Mayo	42,6	7,0	4,4	49,3	45,1
Junio	42,5	7,3	13,1	56,2	25,6
Julio	29,1	10,8	12,7	50,6	29,2
Agosto	47,7	5,3	7,0	56,4	27,6
Septiembre	39,3	4,9	0,5	43,3	64,9
Octubre	34,9	9,7	0,3	41,0	102,1
Noviembre	31,8	0,5	0,0	32,0	104,1
Diciembre	44,8	0,0	0,0	44,8	113,2
<b>Anual</b>	<b>513,2</b>	<b>36,7</b>	<b>25,3</b>	<b>575,3</b>	<b>932,0</b>

[Fuente: Elaboración propia, en base a Anales Instituto Patagonia (Universidad de Magallanes, 2003-2015)]

De la Tabla 5-2 se desprende que los meses que presentan mayor precipitación sólida corresponden al período comprendido entre mayo y agosto, alcanzando sus máximos valores en junio y julio.

## 5.2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El clima de la región de Magallanes está determinado por 3 factores principales: la circulación atmosférica, la influencia del océano Pacífico y el relieve.

La circulación atmosférica general es influenciada por el frente polar austral, el cual se produce por la colisión de masas de aire frío del anticiclón antártico con las masas de aire más cálido provenientes del anticiclón semipermanente del Pacífico sur, lo que influye en el desarrollo de las corrientes de chorro. Estas corrientes provenientes del oeste,

corresponden a flujos de aire de alta velocidad producidos en las capas superiores de la atmósfera, los que vienen cargados de humedad, lo que se traduce en altas precipitaciones en la costa oeste de la región. La humedad de la masa de aire se va perdiendo en el trayecto, debido a los efectos de la topografía de la zona, llegando al sector Atlántico como una masa de aire más seca y con mayor temperatura.

Según la Dirección Meteorológica de Chile (2008), la región de Magallanes presenta 5 tipos de clima, de los cuales sólo 2 se encuentran de manera predominante en el área de estudio: clima continental trasandino con degeneración esteparia (Cfc) y clima de estepa fría (BSk), los cuales se describen a continuación.

- **Clima continental trasandino con degeneración esteparia (Cfc):** Este clima se localiza al oriente de la Cordillera de la Patagonia, extendiéndose desde la Cordillera del Paine hacia el sur y sureste, cubriendo la Península de Brunswick y el sector sur de Tierra del Fuego.

Debido a lo señalado anteriormente, las precipitaciones disminuyen notoriamente en relación a las laderas occidentales de la Cordillera patagónica y región de los canales, pues las masas de aire llegan con poco contenido de humedad después de atravesar las cumbres cordilleranas. Estas ocurren todo el año, pero sus montos anuales son del orden de 250 a 400 mm, o sea un 10% de los registros de la costa occidental. La distribución de las precipitaciones durante el año es aproximadamente homogénea, pero se pueden identificar los meses de otoño (abril y mayo) como los más lluviosos. Un segundo máximo puede presentarse entre noviembre y enero. En el invierno las precipitaciones son casi exclusivamente de nieve.

La continentalidad hace que las temperaturas en general desciendan encontrándose valores medios anuales de 6° a 7° C. A su vez, aumentan las amplitudes térmicas: la anual es del orden de 9° a 10° C y la diaria cercana a 7° C en Punta Arenas. A pesar de la latitud, las temperaturas de invierno no son exageradamente bajas, por cuanto las temperaturas medias de los meses de invierno son superiores a 1° C, con lo que la permanencia de suelos cubiertos de nieve no se muy prolongada en los sectores más bajos cercanos al mar. Las temperaturas mínimas medias sí son inferiores a 0° entre junio y agosto.

Otra característica de este clima es la persistencia del viento de dirección suroeste y oeste, con una intensidad media de 15 a 20 km/hr.

- **Clima de estepa fría (BSk):** Corresponde a la zona fronteriza comprendida desde el norte de Cerro Guido hasta cubrir la mitad norte de Tierra del Fuego.

- **Clima frío de hielo por altura (EFH):** Corresponde a un área que recibe abundantes precipitaciones, producto del enfriamiento adiabático de las masas de aire que circulan. Sus bajas temperaturas no permiten el derretimiento de nieves, ni siquiera en verano.

- **Clima frío de tundra por altura (ETH):** En este clima predominan también las temperaturas bajas. En el mes más cálido se presentan temperaturas entre 0 °C y 10 °C, lo que condiciona el predominio de vegetación herbácea.

- **Clima frío de tundra isotérmico (ETi):** Similar al clima frío de tundra por altura, con temperaturas que no superan los 10 °C en los meses más cálidos. El carácter de isotérmico denota que la amplitud térmica anual no sobrepasa los 5° C.

En la Figura 5-7 se muestra la distribución climática en el área de estudio.

Las precipitaciones continúan disminuyendo a medida que la zona se aleja de la cordillera patagónica, generándose montos anuales que varían entre 500 mm en el sector norte cercano a la cordillera, hasta unos 250 mm en el extremo oriental del estrecho de Magallanes y en la parte norte de Tierra del Fuego. Estas se distribuyen homogéneamente durante el año, con máximos que ocurren en verano y otoño. Lo que llueve en los 4 meses más lluviosos es equivalente al 40% del total anual y las precipitaciones invernales son de carácter nival.

Entre diciembre y marzo la temperatura media supera los 10° C y en los meses de invierno sólo es del orden de 2° C, lo que define una amplitud térmica anual de 8° a 9° C. La amplitud diaria debe aumentar en relación a la de los climas del oeste, por efecto de la mayor distancia al océano en la dirección del viento predominante, estimándose también en unos 8° a 9° C.

Las menores cantidades de precipitación, que definen entre 6 y 12 meses secos, con totales de agua caída inferior a 40 mm y las bajas temperaturas, es lo que le dan el carácter de estepa, asociándose al tipo de suelo que sólo permite un tipo de vegetación propio de este clima.



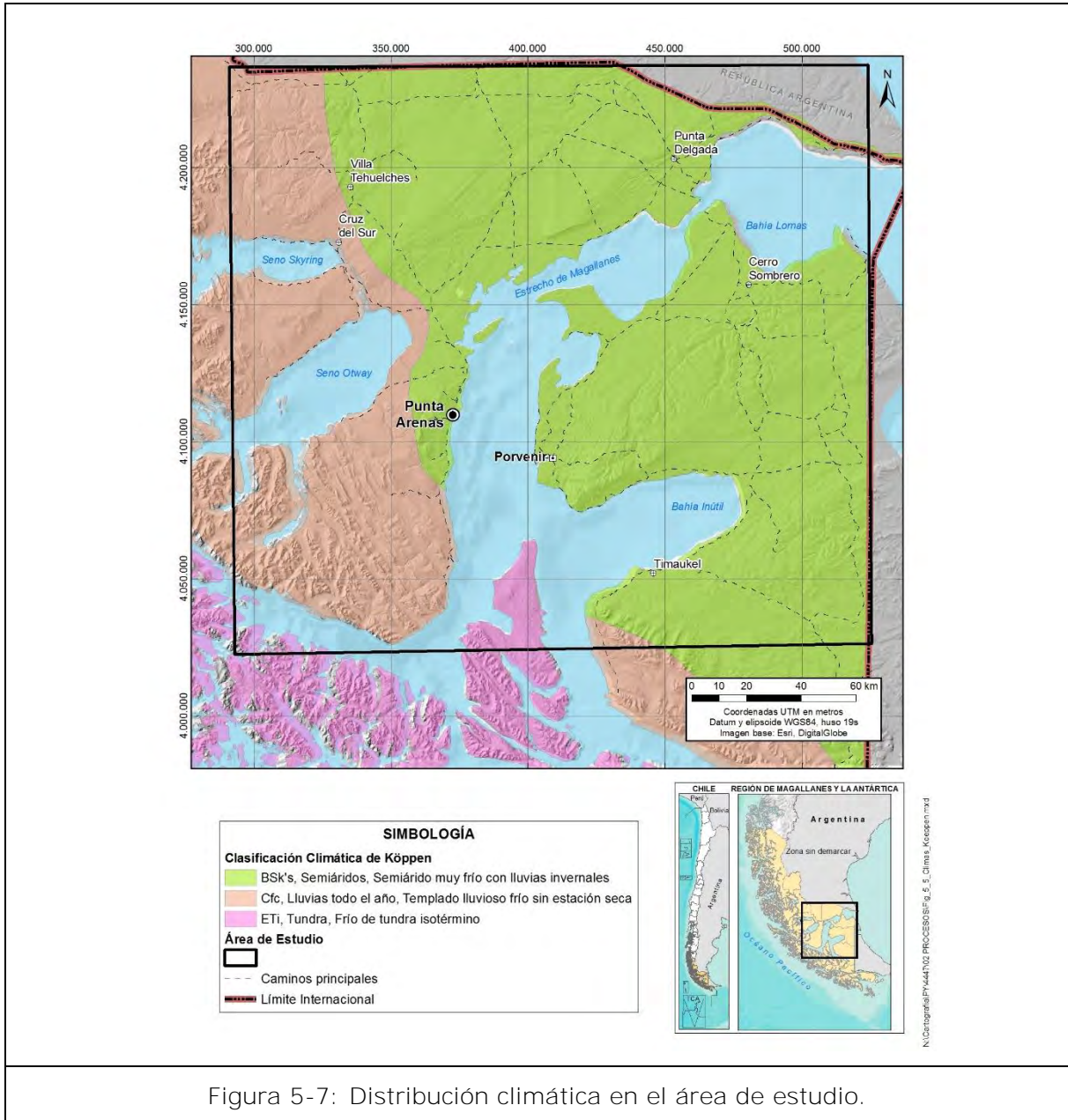


Figura 5-7: Distribución climática en el área de estudio.

[Fuente: Elaboración propia.]

Dentro de las distintas zonas climáticas, es posible identificar distritos agroclimáticos (Figura 5-8), los cuales son delimitados y caracterizados en base a las condiciones hídricas y térmicas registradas, empleando datos de temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitaciones, entre otros.

Según el Estudio Integral de Riego y Drenaje de Magallanes – XII Región (1997), en el área de estudio se pueden identificar cuatro distritos agroclimáticos, Puerto Natales – Punta Arenas (N°1), Río Verde (N°2), Cerro Sombrero (N°3) y Cameron (N°4), cuya distribución se muestra en la siguiente figura.

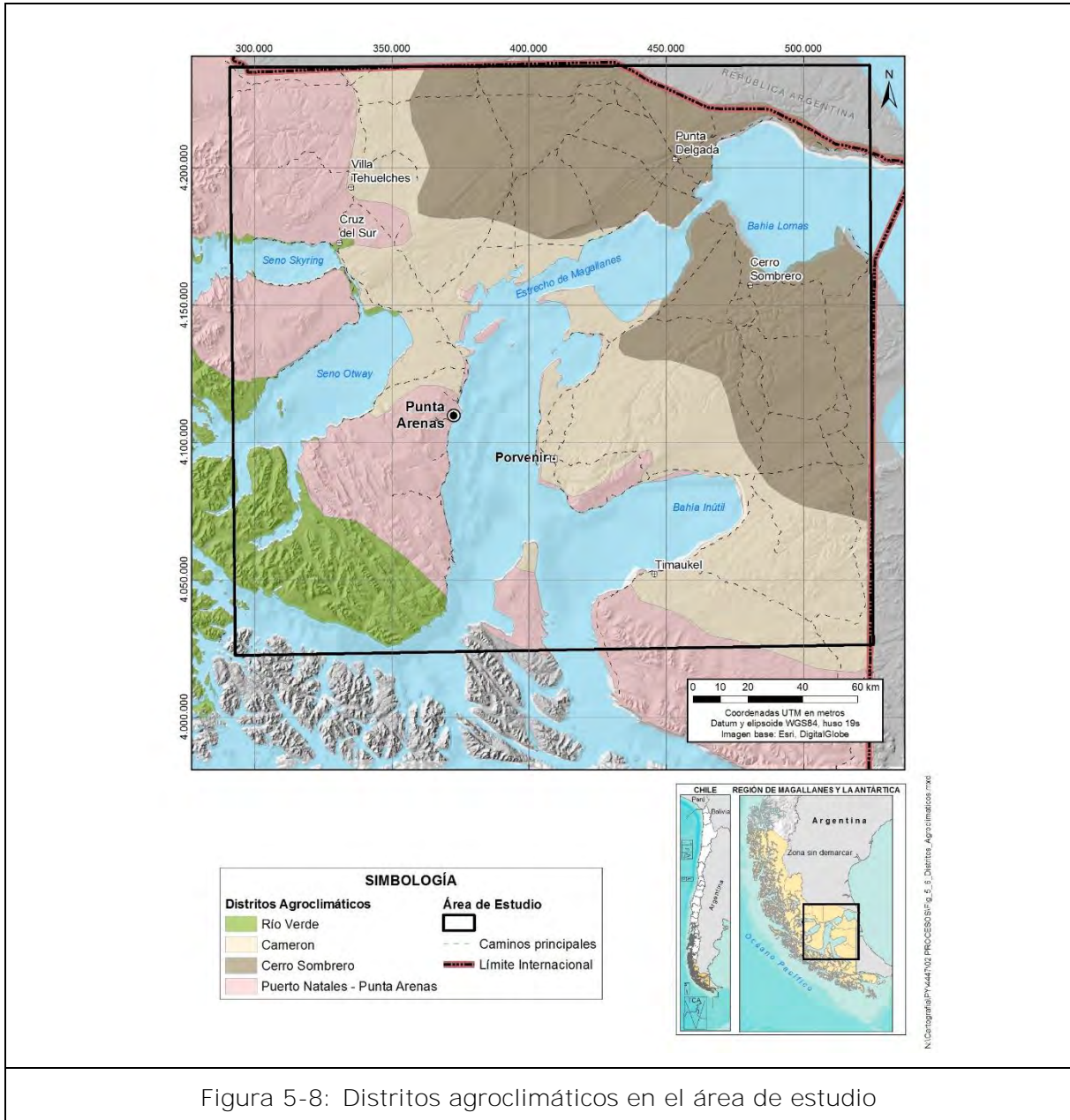


Figura 5-8: Distritos agroclimáticos en el área de estudio

[Fuente: Elaboración propia.]

El Distrito N°1 comprende las localidades de Puerto Natales, Rubens, Punta Arenas y Estancia Vicuña, presentando condiciones térmicas de veranos frescos e inviernos rigurosos. Si bien las precipitaciones son relativamente homogéneas durante el año, se producen 7 meses secos, entre octubre y abril del siguiente año, debido al aumento de la evapotranspiración en el sector.

El Distrito N°2 incluye las localidades de Sección Lazo, Río Verde, Bulnes y Puerto Arturo, presentando menores temperaturas que las registradas en el Distrito N°1. A pesar que el régimen hídrico es más húmedo que en el caso anterior, de igual manera, presenta una temporada seca entre los meses de diciembre y febrero.

El Distrito N°3 corresponde a la zona más oriental de la región, a ambos lados del Estrecho de Magallanes y desde Morro Chico en el límite con Argentina hasta Faro Punta Dúngenes al oriente. En la parte sur se extiende hasta las localidades de Onaisin y San Sebastián. Las condiciones térmicas son similares a las del Distrito N°1, pero con un régimen hídrico considerablemente más seco. En este caso, la distribución mensual de las precipitaciones es relativamente homogénea con una temporada seca de 8 meses, entre septiembre y abril del siguiente año.

El Distrito N°4 incluye a las localidades de Porvenir, Sección Russfin y Río Grande en Tierra del Fuego, junto al límite con Argentina. A pesar de ser el distrito más fresco, debido a una mayor exposición a los vientos, no es el más helado, por el efecto regulador del mar. Con respecto a las condiciones hídricas, no es tan seco como el Distrito N°3, con 7 meses secos, entre octubre y abril.

---

## **5.3 CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS**

En este capítulo se presenta un análisis y caracterización de las variables meteorológicas y pluviométricas, lo cual permitirá comprender de mejor manera el comportamiento espacial y temporal de las distintas variables y evaluar la relación entre ellas, información que será utilizada como datos de entrada y de calibración en la modelación hidrológica.

### 5.3.1 Análisis de precipitaciones

Existen datos de precipitaciones en 33 estaciones pluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA), con registros compilados a escala mensual. Se realizó una presentación y cuantificación de los registros de pluviometría existentes dentro de la zona de estudio, caracterizando la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

#### Disponibilidad de Datos

En la Tabla 5-3 se presenta la información básica de las estaciones meteorológicas, específicamente código de Banco Nacional de Aguas (BNA), ubicación y vigencia o fecha de suspensión. En la Figura 5-9 se presenta un mapa con la ubicación de las estaciones, usando la nomenclatura de la primera columna de la Tabla 5-3.

La Figura 5-10 muestra gráficamente la cantidad de datos de precipitación mensual disponible. Para el análisis se consideraron los registros mensuales que tenían más de 20 días con información, donde se puede observar que la mayor densidad de datos se produce para el período comprendido entre los años 1990 y 2015.

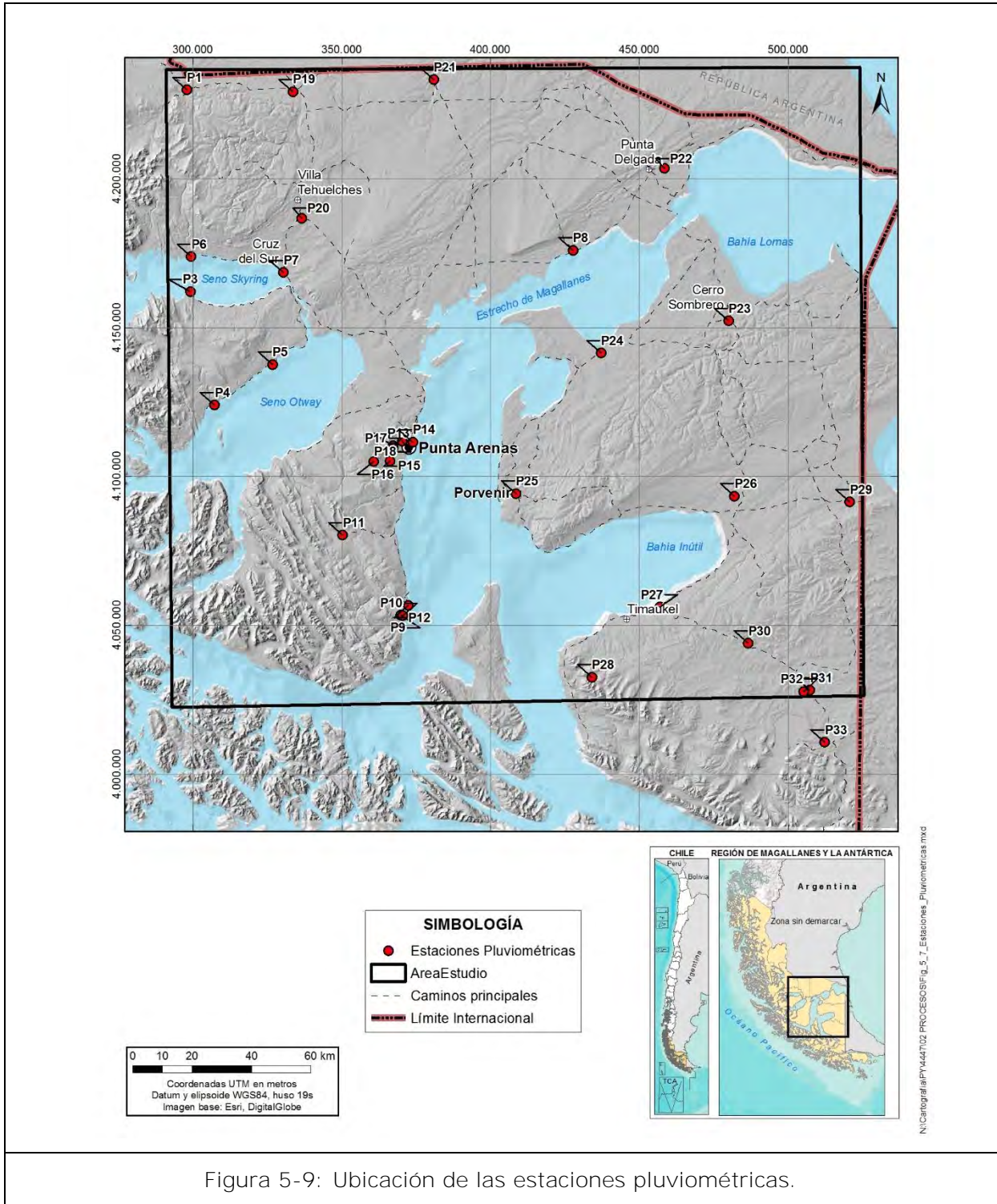
Es importante señalar que de las 33 estaciones distribuidas en el área de estudio, sólo 3 ya no se encuentran vigentes: Rubens ruta N°9, La Baglina y Sección Río Grande.

Tabla 5-3. Información general de las estaciones meteorológicas recopiladas.

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altitud	Estado
P1	Rubens ruta N°9	12400002-5	4.230.002	297.830	190	jul-06
P2	Río Tranquilo en ruta N°9	12400003-3	4.253.629	282.066	30	V
P3	Rocallosas	12440001-5	4.162.179	299.117	10	V
P4	Río Grande en Isla Riesco	12448001-9	4.124.019	307.172	5	V
P5	Isla Riesco	12449001-4	4.137.663	326.674	5	V
P6	Río Pérez	12452002-9	4.173.915	299.313	5	V
P7	Río Verde	12454001-1	4.168.577	330.369	10	V
P8	San Gregorio	12530001-4	4.176.105	427.694	3	V
P9	Río San Juan desembocadura	12582001-8	4.053.377	369.815	8	V
P10	San Juan	12582002-6	4.053.228	370.410	5	V
P11	Lago Parrilar	12582003-4	4.080.360	350.238	320	V
P12	La Baglina	12583001-3	4.056.709	372.348	10	jun-75
P13	Río Las Minas en Bt. Sendos	12586001-K	4.110.376	367.170	185	V
P14	Punta Arenas	12586004-4	4.111.588	373.784	5	V
P15	Laguna Lynch	12586005-2	4.105.116	366.150	180	V
P16	Cerro Mirador	12586006-0	4.104.957	360.582	580	V
P17	Las Minas	12586007-9	4.109.595	367.169	155	V
P18	Canal de trasvase est. Llau-Llau	12586009-5	4.111.815	370.260	80	V
P19	Río Penitente en Morro Chico	12622001-4	4.229.416	333.580	170	V
P20	Villa Tehuelche	12622002-2	4.186.900	336.525	190	V
P21	Teniente Merino	12640001-2	4.233.483	380.892	160	V
P22	Monte Aymond	12680001-0	4.203.572	458.358	160	V
P23	Cerro Sombrero	12802002-0	4.152.320	480.035	30	V
P24	Bahía San Felipe	12806004-9	4.141.557	437.074	10	V
P25	Porvenir	12809001-0	4.094.270	408.481	35	V
P26	Onaisin en María Cristina	12815001-3	4.093.447	481.975	30	V
P27	Cameron	12816001-9	4.056.145	456.893	10	V
P28	Río Caleta en Tierra del Fuego	12820001-0	4.032.551	434.080	280	V
P29	San Sebastián	12863001-5	4.091.429	520.752	20	V
P30	Russfin	12873001-K	4.043.924	486.606	225	V
P31	Río Grande en Tierra del Fuego	12876001-6	4.028.146	507.378	100	V
P32	Sección Río Grande	12876002-4	4.027.725	505.162	130	dic-11
P33	Pampa Huanaco	12876003-2	4.010.672	512.318	150	V

V= Vigente

[Fuente: DGA] \*Datum WGS84 Huso 19S



Nro.	Estación Pluviométrica	1964-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2015
P1	Rubens ruta N°9						
P2	Río Tranquilo en ruta N°9						
P3	Rocallosas						
P4	Río Grande en Isla Riesco						
P5	Isla Riesco						
P6	Río Perez						
P7	Río Verde						
P8	San Gregorio						
P9	Río San Juan desembocadura						
P10	San Juan						
P11	Lago Parrilar						
P12	La Baglina						
P13	Río Las Minas en Bt. Sendos						
P14	Punta Arenas						
P15	Laguna Lynch						
P16	Cerro Mirador						
P17	Las Minas						
P18	Canal de trasvase est. Llau-Llau						
P19	Río Penitente en Morro Chico						
P20	Villa Tehuelche						
P21	Teniente Merino						
P22	Monte Aymond						
P23	Cerro Sombrero						
P24	Bahía San Felipe						
P25	Porvenir						
P26	Onaisin en María Cristina						
P27	Cameron						
P28	Río Caleta en Tierra del Fuego						
P29	San Sebastián						
P30	Russfin						
P31	Río Grande en Tierra del Fuego						
P32	Sección Río Grande						
P33	Pampa Huanaco						

Número de meses con datos válidos por año: ■ <8; ■ = 8-9; ■ = 10-11 y ■ =12.

Figura 5-10: Disponibilidad de datos de precipitación mensual.

(En naranja se muestran las estaciones que poseen menos de 10 años de datos en los últimos 30 años)

[Fuente: Elaboración propia.]

### 5.3.2 Precipitación media

A partir de la información recopilada, se obtuvieron las precipitaciones promedio mensuales y anual para cada estación, estadísticos que son presentados en la Tabla 5-4. Para tener información más representativa, se consideró toda la información de los meses disponibles de las estaciones que tuvieran más de 10 años de mediciones en los últimos 30 años (Figura 5-10), mientras que en el caso anual, la estimación se realizó para los años que tuvieran más de 10 meses registrados para cada año. Como el área de estudio presenta precipitaciones durante todo el año, se identificaron los años con más de 10 meses de datos de manera de reducir la subestimación del promedio anual, pero dando una holgura de 2 meses para poder contar con una muestra representativa para el periodo evaluado.

Para los valores anuales, los puntos que presentan mayores magnitudes corresponden a Las Minas (P17), Lago Parrillar (P11) y Río Las Minas en Bt. Sendos (P13), superando los 800 mm en promedio. Es importante señalar que, a pesar de que estas estaciones se ubican en la Península de Brunswick, esta zona no presenta un comportamiento homogéneo, donde algunos puntos registran valores cercanos al 45% de los valores máximos. Las estaciones que presentan los promedios más bajos son Teniente Merino (P21), Cerro Sombrero (P23), San Gregorio (P8) y Monte Aymond (P22), con niveles inferiores a los 300 mm por año. Estas se encuentran en torno a la sección oriental del Estrecho de Magallanes, exceptuando Teniente Merino, que se ubica en la pampa de la región, el sector más árido del área de estudio.

Los promedios mensuales máximos muestran una mayor frecuencia en marzo y abril, mientras que los mínimos no presentan una tendencia clara. A pesar de lo anterior, en promedio, los mínimos estimados alcanzan un 47% del máximo registrado para cada estación.

Es importante señalar, que la región de Magallanes presenta precipitaciones en forma de agua, agua-nieve y nieve, las cuales no se consideran en los valores presentados en la siguiente tabla.

Tabla 5-4. Promedios de las series de precipitación (mm).

No.	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANU
P1	49	48	<u>18</u>	26	33	39	48	47	47	40	45	<b>63</b>	520
P3	59	54	56	<b>74</b>	72	48	52	51	65	<u>43</u>	48	56	673
P5	<b>54</b>	37	36	34	44	31	30	<u>26</u>	31	27	29	45	423
P6	<b>67</b>	49	40	<u>32</u>	46	47	50	45	46	54	51	66	579
P7	<b>41</b>	40	34	35	32	22	21	<b>19</b>	24	22	22	33	347
P8	26	23	20	20	21	17	<u>17</u>	24	26	26	21	<b>31</b>	274
P10	<b>74</b>	71	54	50	59	56	44	42	51	63	<b>40</b>	67	656
P11	<b>97</b>	90	65	60	75	64	62	59	65	67	<u>58</u>	88	845
P13	<b>104</b>	74	77	59	67	61	66	53	58	78	<b>46</b>	91	844
P14	<b>57</b>	51	43	44	53	39	36	33	38	40	<u>32</u>	50	518
P15	53	<b>57</b>	34	<u>25</u>	32	36	34	34	40	29	31	53	473
P17	<b>108</b>	84	72	61	69	62	78	56	65	64	<b>47</b>	87	857
P18	<b>99</b>	62	63	45	68	51	53	41	44	35	<b>31</b>	68	659
P20	37	37	32	25	30	<u>23</u>	25	27	25	27	26	<b>38</b>	351
P21	22	<b>29</b>	20	16	19	14	<u>10</u>	15	21	18	18	28	230
P22	24	26	24	18	19	19	<b>18</b>	24	<b>33</b>	30	28	32	296
P23	25	24	20	17	<u>16</u>	18	17	22	26	27	<b>29</b>	28	269
P24	36	34	28	25	26	<u>23</u>	26	33	38	<b>42</b>	33	40	402
P25	34	29	25	25	25	24	<b>19</b>	22	28	32	25	<b>35</b>	323
P26	38	30	21	18	20	19	<u>17</u>	22	34	<b>39</b>	30	34	325
P27	<b>56</b>	37	32	24	29	27	<u>22</u>	23	30	35	31	43	387
P29	<b>34</b>	31	22	21	<u>16</u>	21	20	24	30	34	27	34	313
P30	<b>59</b>	36	32	<u>25</u>	29	31	30	33	41	58	37	54	477
P32	39	39	35	28	<u>22</u>	31	25	32	37	<b>52</b>	45	43	414
P33	38	27	23	<u>18</u>	21	27	26	22	31	39	31	<b>41</b>	346

El valor mayor de cada estación se encuentra destacado en negrita y el menor en cursiva y subrayado.

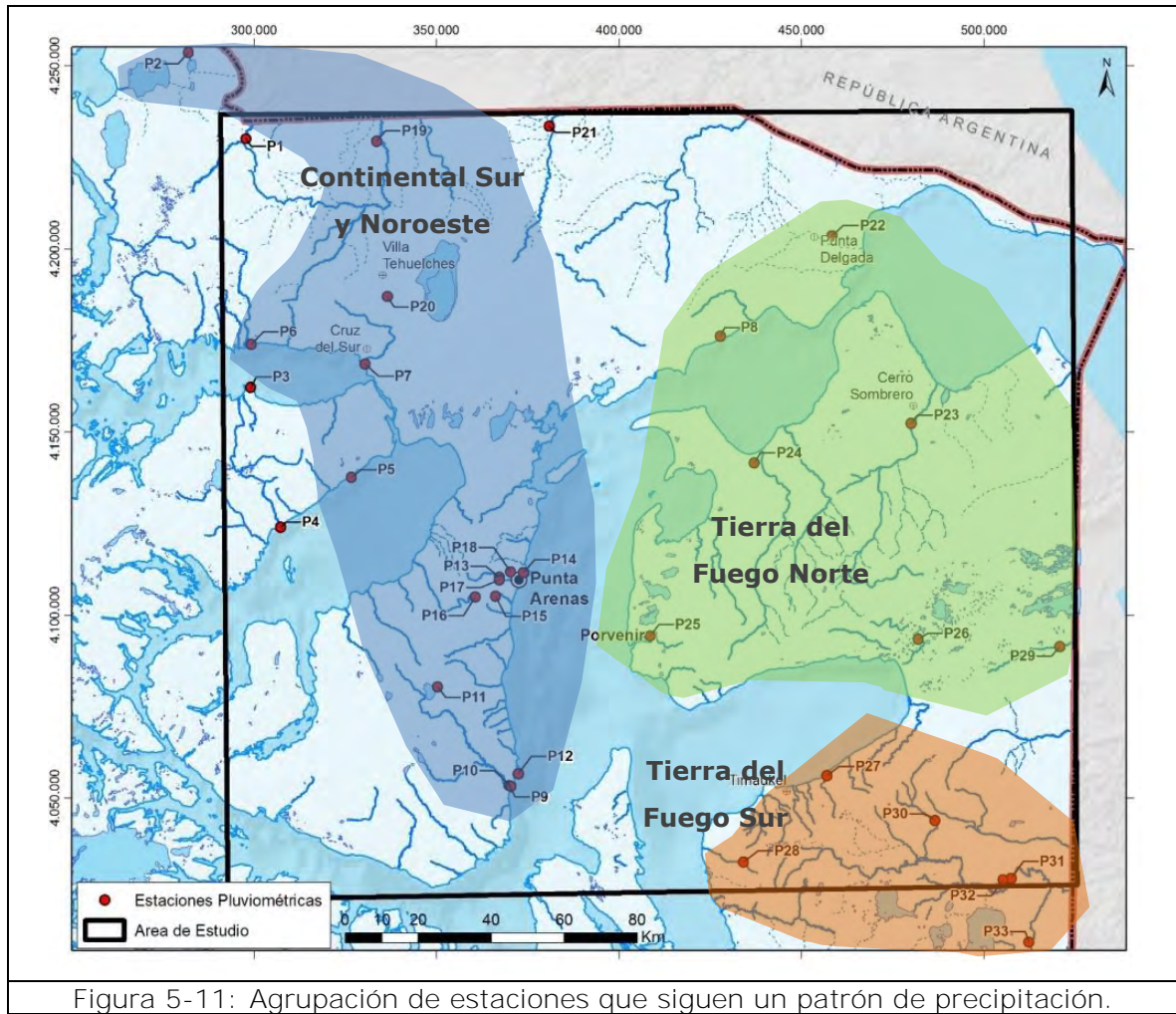
[Fuente: Elaboración propia.]

### Caracterización espacial

A nivel mensual se identificaron 3 grupos de estaciones (Figura 5-11) que siguen un patrón consistente: 1) Continental Sur y Noroeste e Isla Riesco, 2) Tierra del Fuego Norte y 3) Tierra del Fuego Sur. Un grupo menor de estaciones que prácticamente no guardan relación con el resto a esta escala temporal.

La comparación de las estaciones para su agrupación se hizo sobre la variable precipitación adimensionalizada, obtenida de dividir el valor mensual por el total anual. Las principales características de los grupos se resumen a continuación.





**1) Continental Sur y Noroeste.** En este grupo la precipitación tiene un máximo en el mes de abril, en que en promedio cae entre un 11% y un 16% del total anual (Figura 5-12). La proporción cae para todas las estaciones desde este máximo en abril hasta julio, a partir del que se mantiene relativamente estable hasta diciembre-enero. En febrero vuelve a caer, a valores en torno al 7% anual, para luego repuntar para llegar al máximo.

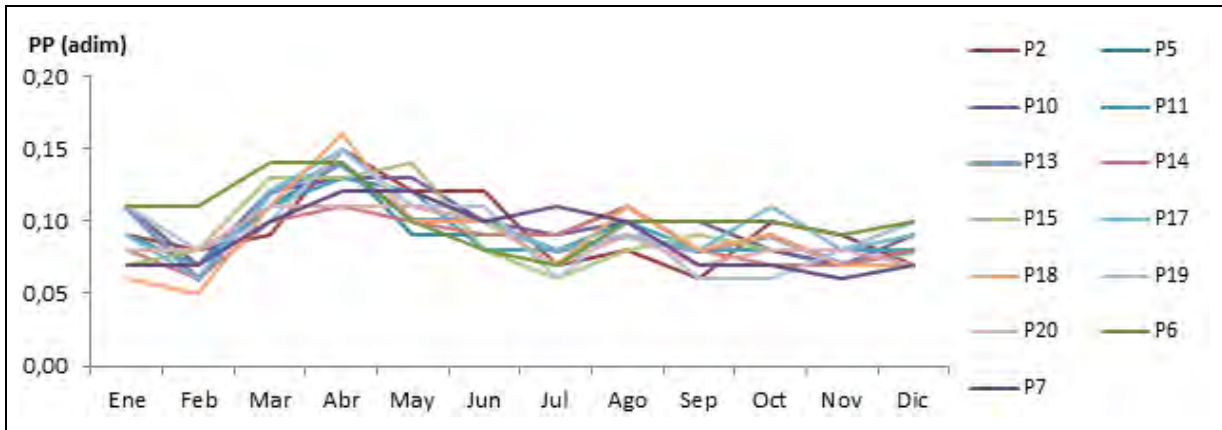


Figura 5-12. Precipitación mensual adimensional en grupo "Continental Sur y Noroeste".

[Fuente: Elaboración propia.]

**2) Tierra del Fuego Norte.** El patrón de lluvias en este grupo de estaciones muestra un máximo en el mes de marzo, en el orden de 11% a 13% del total anual (Figura 5-13). Luego la magnitud promedio decrece hasta julio, se mantiene estable hasta octubre y remonta hasta enero. En febrero, al igual que el grupo anterior, se presenta una caída de los valores, para luego repuntar alcanzando su máximo.

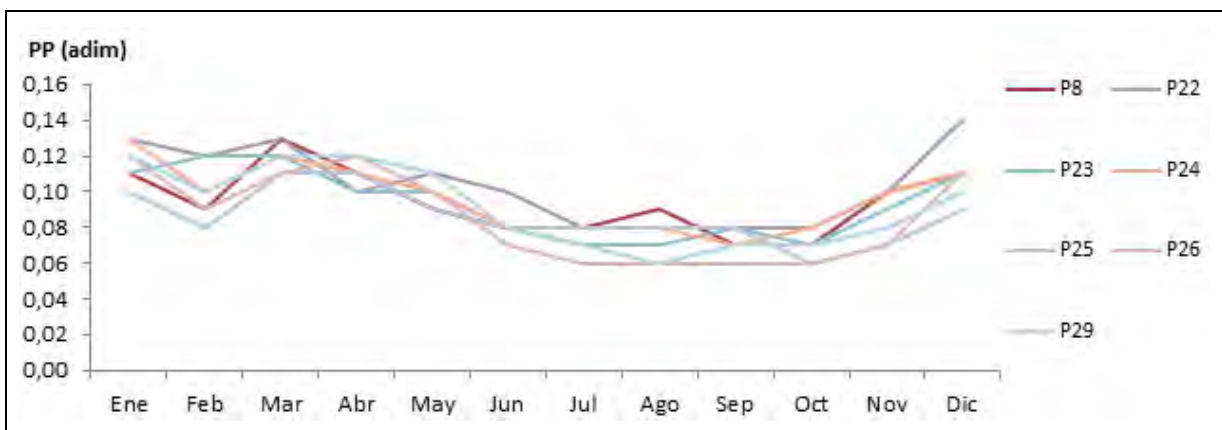


Figura 5-13: Precipitación mensual adimensional en grupo "Tierra del Fuego Norte".

[Fuente: Elaboración propia.]

**3) Tierra del Fuego Sur.** Las precipitaciones en esta zona se asemejan en forma a las de "Continental Sur y Noroeste", sin embargo las magnitudes difieren. Los máximos se dan en el mes de abril, en el rango de 10% a 15% del total anual (Figura 5-14), con una posterior caída hasta julio (5% a 7% del total anual). Después de un periodo julio - septiembre relativamente estable, a partir de octubre se inicia un aumento del agua caída

hasta enero. Este aumento es seguido de la misma bajada observada en los grupos anteriores para el mes de febrero.

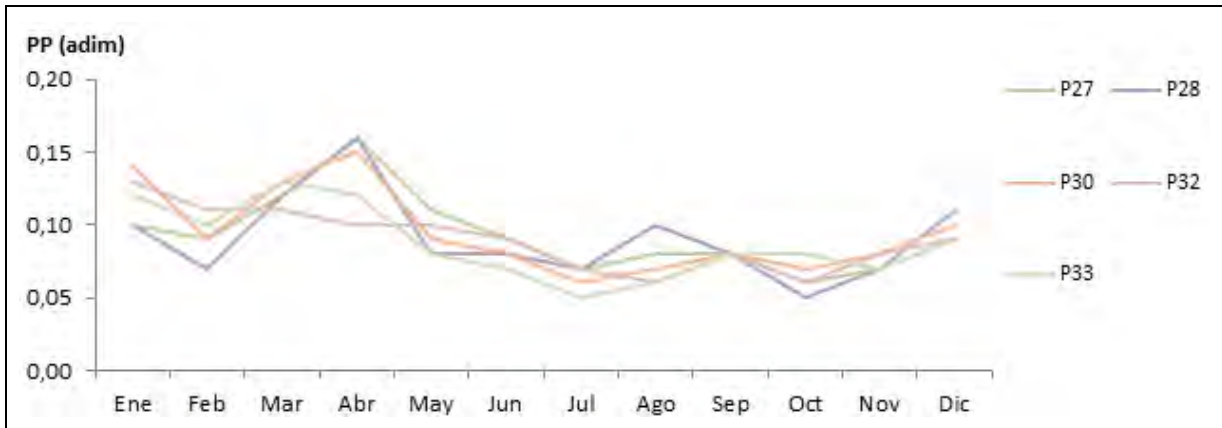


Figura 5-14: Precipitación mensual adimensional en grupo "Tierra del Fuego Sur".

[Fuente: Elaboración propia.]

A **nivel anual**, la correlación entre estaciones de precipitación se estudió a través de mapas, que muestran cómo se conectan aquellas estaciones que mantienen un **coeficiente de correlación ( $\rho$ ) igual o mayor a 0,70** (19 estaciones) para un mínimo de 10 pares de datos comunes (Figura 5-15).

No se observó un patrón repetitivo, que permitiese agrupar ciertas áreas como ocurre en el análisis a nivel mensual. Las magnitudes interanuales registradas en las estaciones no mantienen una relación alta y consistente en el tiempo. Estaciones vecinas, a menos de 5 km de distancia, pueden llegar a presentar coeficientes de correlación por debajo de 0,40.

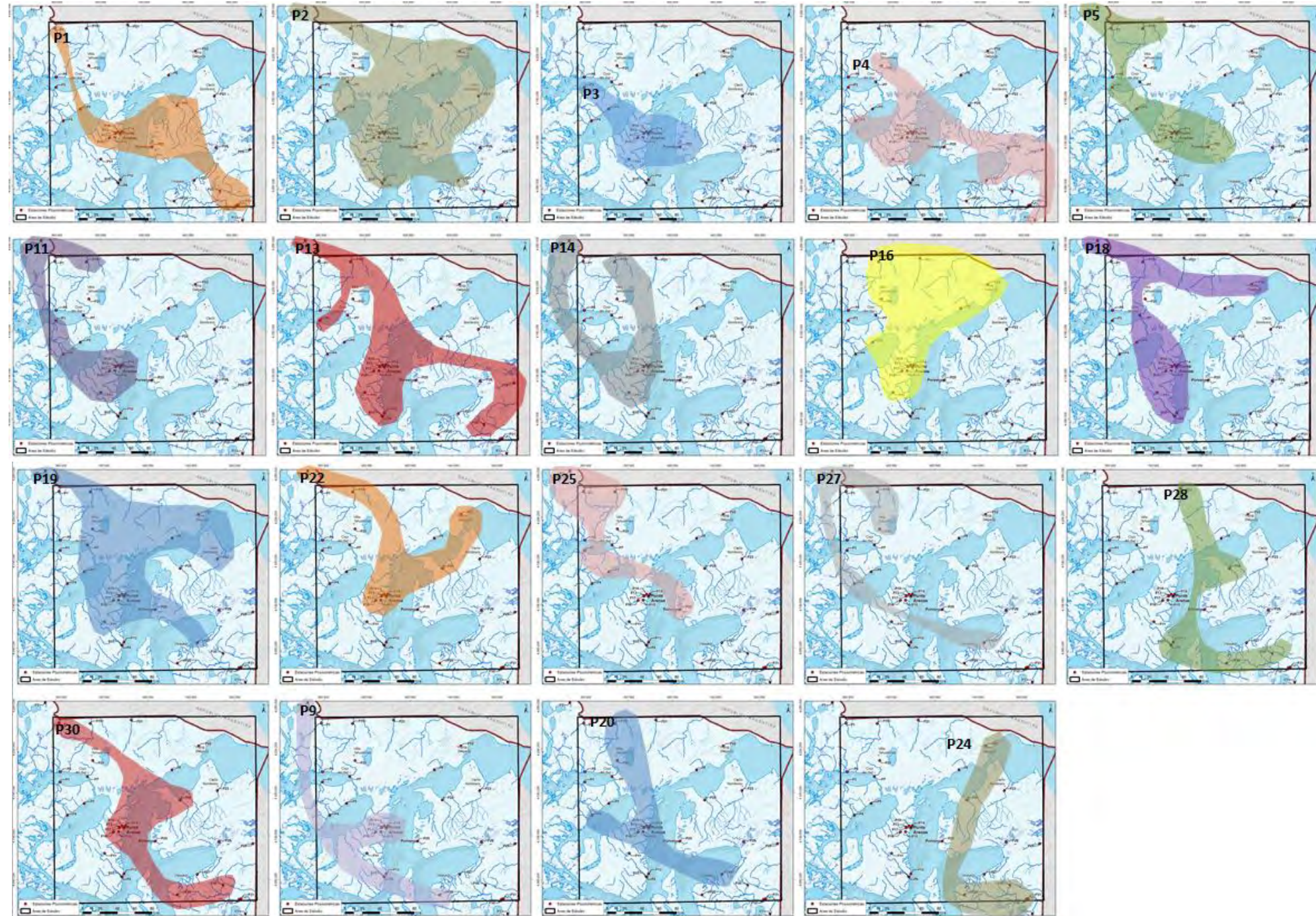


Figura 5-15: Mapas con áreas de PP con correlación  $\rho \geq 0,7$ .

### 5.3.3 Análisis de temperatura

El análisis de temperatura se realizó con estadísticas de temperaturas promedio mensuales en 14 estaciones meteorológicas pertenecientes a la DGA y 1 perteneciente a la DMC. Se realizó una presentación y cuantificación de los registros de temperatura existentes dentro de la zona de estudio, evaluando la evolución de esta variable durante el año y estimando la amplitud térmica anual mediante los promedios mensuales mínimos y máximos.

#### Disponibilidad de datos

En la Tabla 5-5 se presenta la información básica de las estaciones meteorológicas con datos de temperatura, específicamente código BNA, ubicación y vigencia o fecha de suspensión. En la Figura 5-16 se presenta un mapa de ubicación de las estaciones con la nomenclatura utilizada en la primera columna de la Tabla 5-5.

En la Figura 5-17 se puede ver de forma gráfica la cantidad y calidad de los datos de temperaturas mensuales disponibles. En este caso, a diferencia del criterio empleado en el caso de las precipitaciones, se utilizaron los datos mensuales que tenían más de 10 días con información, de manera de obtener una serie de tiempo más completa. Como se puede observar, la mayor densidad de datos se sitúa a partir del año 2000 hasta el 2015, donde del total de estaciones, 5 presentan menos de 60 datos mensuales en los últimos 30 años. Estos puntos de monitoreo fueron eliminados de los posteriores análisis ya que poseen una cantidad insuficiente de datos.

Tabla 5-5. Información general de las estaciones meteorológicas recopiladas.

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altitud msnm	Estado
T1	Puerto Natales	12293001-7	4.262.509	259.643	45	V
T2	Río Grande en Isla Riesco	12448001-9	4.124.151	307.352	5	V
T3	Isla Riesco	12449001-4	4.137.663	326.674	5	V
T4	Río Pérez en Desembocadura	12452001-0	4.173.599	298.306	20	V
T5	Río Pérez	12452002-9	4.173.700	299.282	5	V
T6	Punta Arenas	12586004-4	4.111.588	373.784	5	V
T7	Penitente Alto	12620000-5	4.212.189	316.845	290	V
T8	Villa Tehuelche	12622002-2	4.186.900	336.525	190	V
T9	Monte Aymond	12680001-0	4.220.376	458.426	160	V
T10	Bahía San Felipe	12806004-9	4.141.691	437.266	10	V
T11	Porvenir	12809001-0	4.094.375	408.675	35	V
T12	Onaisin en María Cristina	12815001-3	4.093.579	482.174	30	V
T13	Russfin	12873001-K	4.043.098	487.528	225	V
T14	Pampa Huanaco	12876003-2	4.010.799	513.113	150	V
T15	Carlos Ibáñez, Punta Arenas Ap.	520006	4.125.583	376.275	39	V

V= Vigente

[Fuente: DGA y DMC] \*Datum WGS84 Huso 19S.

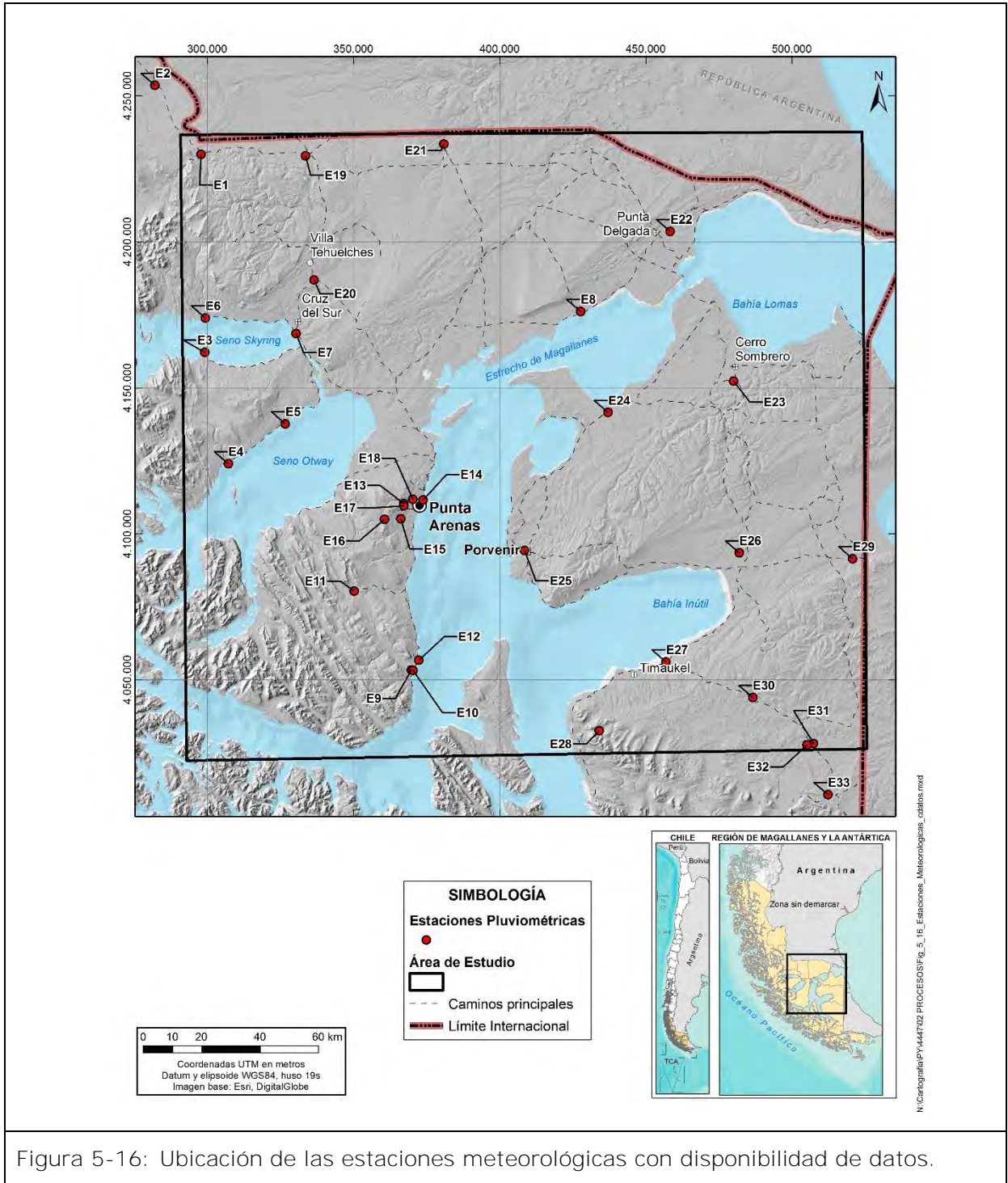


Figura 5-16: Ubicación de las estaciones meteorológicas con disponibilidad de datos.

[Fuente: Elaboración propia.]

Nro.	Estación Meteorológica	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2015
T1	Puerto Natales					
T2	Rio Grande en Isla Riesco					
T3	Isla Riesco					
T4	Rio Perez en Desembocadura					
T5	Rio Perez					
T6	Punta Arenas					
T7	Penitente Alto					
T8	Villa Tehuelche					
T9	Monte Aymond					
T10	Bahía San Felipe					
T11	Porvenir					
T12	Onaisin en Maria Cristina					
T13	Russfin					
T14	Pampa Huanaco					
T15	Carlos Ibañez, Punta Arenas Ap.					

Número de meses con datos válidos por año: ■ <8; ■ = 8-9; ■ = 10-11 y ■ =12.

Figura 5-17: Disponibilidad de datos de temperaturas promedio mensuales.  
 (En naranja se muestran las estaciones que poseen menos de 5 años de datos en los últimos 30 años)

[Fuente: Elaboración propia]

## Promedios mensuales

Para el análisis de la temperatura en el área de estudio, es importante señalar que esta variable depende de una serie de condiciones del lugar evaluado, dentro de las cuales destacan la latitud, la elevación y los efectos de grandes cuerpos de agua. A pesar de esto, las estaciones disponibles presentan condiciones homogéneas, debido a que no presentan diferencias de elevación mayores (menos de 200 metros entre la mínima y la máxima), se ubican en la región más austral del país y en la zona existe una gran cantidad de accidentes geográficos costeros y lacustres.

En la Tabla 5-6 se presentan los promedios obtenidos para cada estación, tomando como referencia los meses según el año hidrológico de la zona, de manera de facilitar la comparación con el resto de las variables meteorológicas. Del análisis se desprende que la temperatura presenta un comportamiento consistente con las estaciones del año, donde el mes más cálido corresponde a enero, mientras que los mínimos se registran en los meses de junio y julio. Con respecto al promedio anual, la estación más fría es Pampa Huanaco, lo que se explica porque se ubica más alejada de la costa, por lo que el efecto termorregulador del mar pierde intensidad y porque es la estación que se encuentra más al sur en el área de estudio.

Para la evaluación de la amplitud anual, se considera un criterio similar al empleado en las precipitaciones promedio anuales, donde se utilizan sólo los períodos en los cuales la estación presente al menos 10 meses con registros, de manera de obtener una muestra que pueda representar la variabilidad entre los distintos meses, con una extensión suficiente. Como la amplitud térmica anual no muestra variaciones mayores entre las estaciones, para profundizar el análisis, en la Figura 5-18 se muestra la variabilidad mensual para cada estación.

Tabla 5-6. Promedios de las series de temperatura (°C).

Nro.	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANU	AMPLITUD ANUAL
T1	6,8	3,7	<i><u>1,3</u></i>	1,9	2,9	5,3	7,0	8,5	9,6	<b>10,9</b>	10,8	9,3	6,5	10,8
T3	7,3	4,6	<i><u>2,6</u></i>	2,6	3,3	5,3	7,1	8,4	9,7	<b>10,7</b>	10,6	9,3	6,8	8,8
T6	6,9	4,4	2,3	<i><u>2,1</u></i>	3,1	5,0	6,8	8,4	9,8	<b>10,7</b>	10,5	8,9	6,6	9,4
T8	6,4	3,4	<i><u>0,8</u></i>	0,8	1,9	4,2	6,5	7,9	9,2	<b>10,2</b>	10,2	8,6	5,8	10,6
T9	6,2	2,9	0,1	<i><u>-0,3</u></i>	1,7	4,4	6,5	8,4	10,1	<b>11,3</b>	11,0	9,2	6,2	12,6
T10	6,2	3,6	1,6	<i><u>1,4</u></i>	2,8	5,2	6,8	8,5	10,0	<b>11,2</b>	10,6	8,9	6,4	10,8
T11	6,8	4,5	2,5	<i><u>2,2</u></i>	3,0	5,0	6,7	8,4	10,2	<b>10,9</b>	10,8	9,0	6,7	9,4
T12	6,3	3,4	<i><u>1,3</u></i>	1,4	2,6	4,6	6,5	7,9	9,8	<b>10,9</b>	10,4	8,8	6,1	10,5
T14	4,4	2,1	0,2	<i><u>-0,2</u></i>	0,8	3,1	4,9	6,6	8,0	<b>8,9</b>	8,3	7,3	4,5	10,0
T15	6,1	3,6	1,6	<i><u>1,3</u></i>	2,2	4,1	6,4	8,3	9,8	<b>10,7</b>	10,2	8,4	6,0	10,1

El valor mayor de cada estación se encuentra destacado en negrita y el menor en cursiva y subrayado.

[Fuente: Elaboración propia.]

Es importante señalar que a pesar que en la Tabla 5-6 se indica que el promedio máximo de temperatura se produce en el mes de enero en todos los puntos evaluados, en la



Figura 5-18 se puede notar que esto no implica que los niveles máximos se registren en dicho período, si no que en algunos casos las temperaturas son mayores en febrero, pero se compensan con valores mínimos más bajos. Además, es posible notar que si bien la amplitud térmica promedio anual mayor se produce en Monte Aymond (T9), la estación Puerto Natales (T1) es la que muestra una mayor amplitud general, con máximos que bordean los 15°C y mínimos bajo cero.

En base a los antecedentes recopilados, en la Tabla 5-2 se indica que los meses con mayores niveles de nieve caída corresponden a mayo, junio, julio y agosto. El análisis de los registros mensuales disponibles muestra que de las estaciones evaluadas, sólo Isla Riesco (T3) y Porvenir (T11) no presentan temperaturas bajo cero, por lo que se infiere que al menos el resto de las estaciones podría contar con precipitaciones sólidas, lo cual permitiría caracterizar de mejor manera las condiciones del área de estudio. Cabe señalar que no se cuenta con mediciones de nieve para otros puntos, lo que no permite identificar la distribución espacial de otros tipos de precipitación.

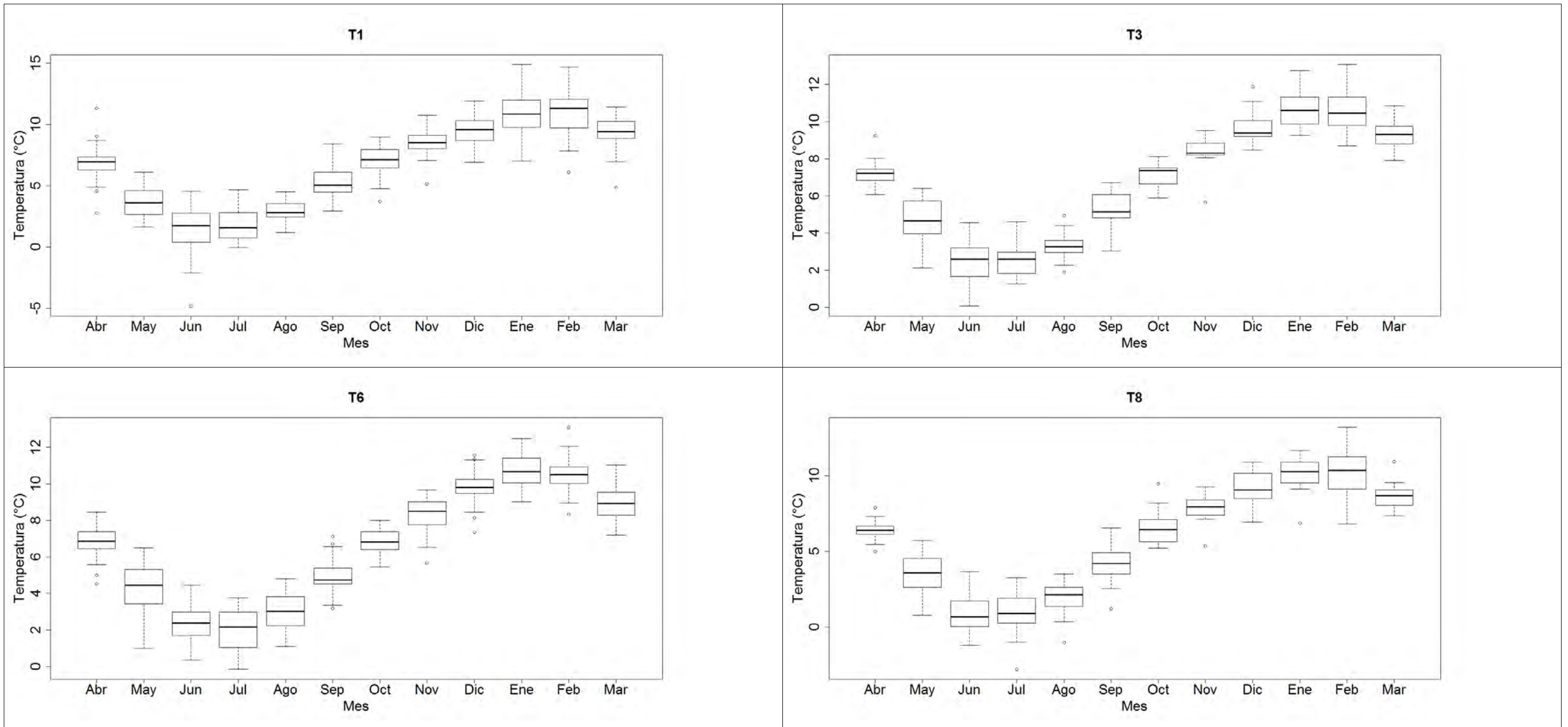


Figura 5-18: Temperaturas medias mensuales.

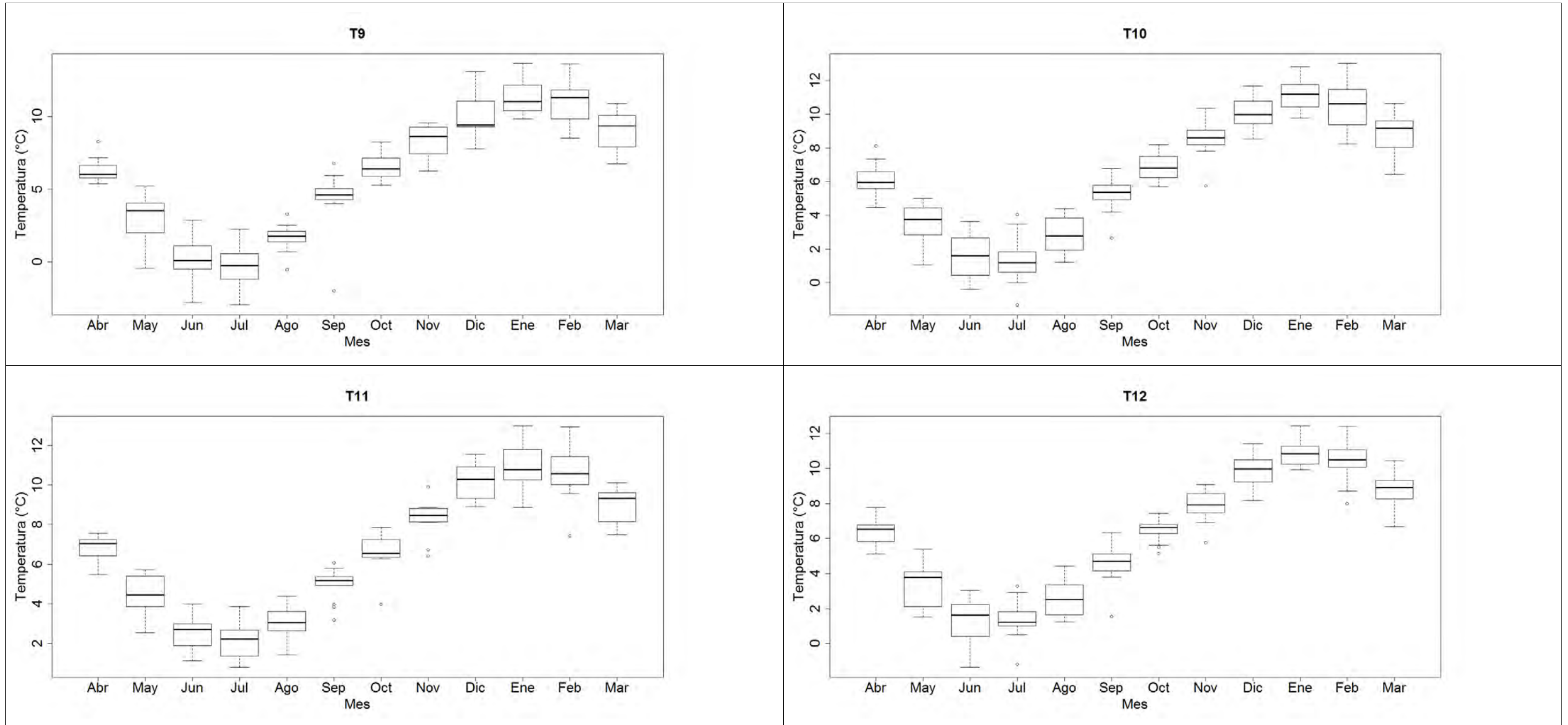


Figura 5-18: Temperaturas medias mensuales (continuación).

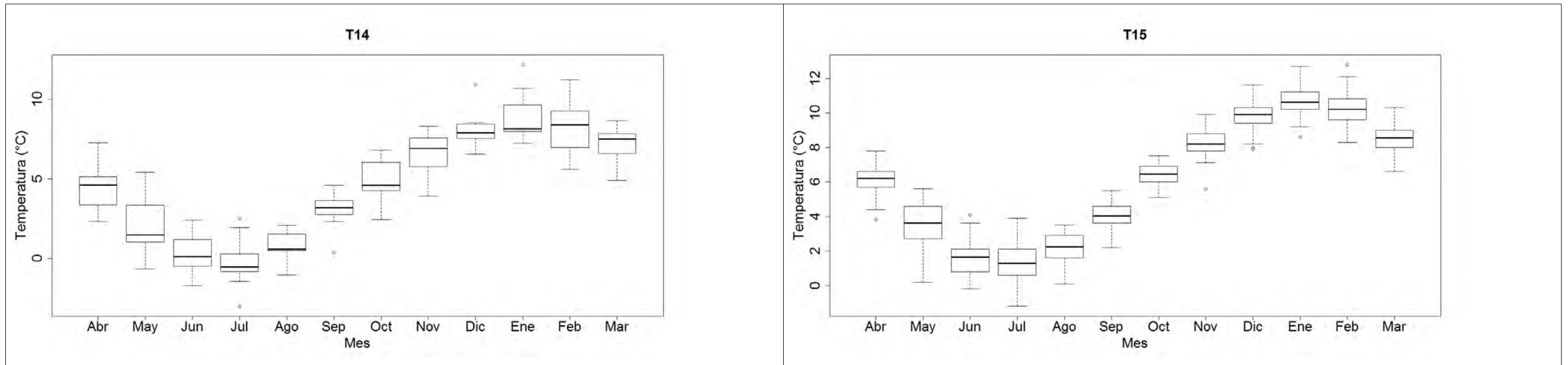


Figura 5-18: Temperaturas medias mensuales (continuación).

### 5.3.4 Análisis de evapotranspiración

El análisis de la evapotranspiración se realizó en base a la estadística de evaporación diaria en 7 estaciones meteorológicas pertenecientes a la DGA y los registros de temperatura analizados en la sección 5.3. Se realizó una presentación y cuantificación de los registros de evaporación en la zona de estudio, luego se rellenaron los datos faltantes a nivel diario a partir de relaciones indirectas utilizando la temperatura y finalmente se analizaron los estadísticos de las series.

#### Disponibilidad de datos

En la Tabla 5-7 se presenta la información básica de las estaciones meteorológicas con datos de evaporación, específicamente código BNA, ubicación y vigencia o fecha de suspensión. En la Figura 5-19 se presenta un mapa de ubicación de las estaciones con la nomenclatura utilizada en la primera columna de la Tabla 5-7.

En la Figura 5-20 se puede ver de forma gráfica la cantidad y calidad de los datos de evaporación mensual disponible. Se utilizaron los datos mensuales que tenían más de 20 días con información. Como se puede observar ninguna estación posee un año con una medición completa. Se puede decir que la evaporación no ha sido registrada continuamente en los periodos de interés para el presente estudio.

Tabla 5-7. Información general de las estaciones meteorológicas recopiladas.

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altitud msnm	Estado
E1	Puerto Natales	12293001-7	4.265.460	674.153	45	V
E2	Punta Arenas	12586004-4	4.112.238	374.378	5	V
E3	Villa Tehuelche	12622002-2	4.187.031	336.717	190	2006
E4	Bahía San Felipe	12806004-9	4.141.691	437.266	10	2003
E5	San Sebastián	12863001-5	4.091.766	522.556	20	1997
E6	Russin	12873001-K	4.043.098	487.528	225	1998
E7	Pampa Huanaco	12876003-2	4.010.799	513.113	150	2005

V= Vigente

[Fuente: DGA] \* WGS 84 - H19S.

### 5.3.5 Relleno y extensión de la estadística

Dada la ausencia de datos en algunos periodos, es necesario realizar un relleno para la modelación hidrológica, ya que para el 28% de los días no se tiene información en ninguna estación. Para el relleno y extensión de las series de evaporación se utilizó la expresión propuesta por Blaney-Criddle, en función de la temperatura  $T$  (°C), el porcentaje de horas de sol  $p$  y un coeficiente de ajuste  $c$ .

$$ETP = c \cdot p \cdot (0,46 \cdot T + 8)$$

El porcentaje de horas de sol  $p$ , se calculó teóricamente con la siguiente relación:

$$p = 3,8197 \cdot 2 \cdot a \cos(-\tan(\phi) * \tan(0,4092797 \cdot \text{sen}(0,0172 \cdot \text{día} - 1,39)))$$



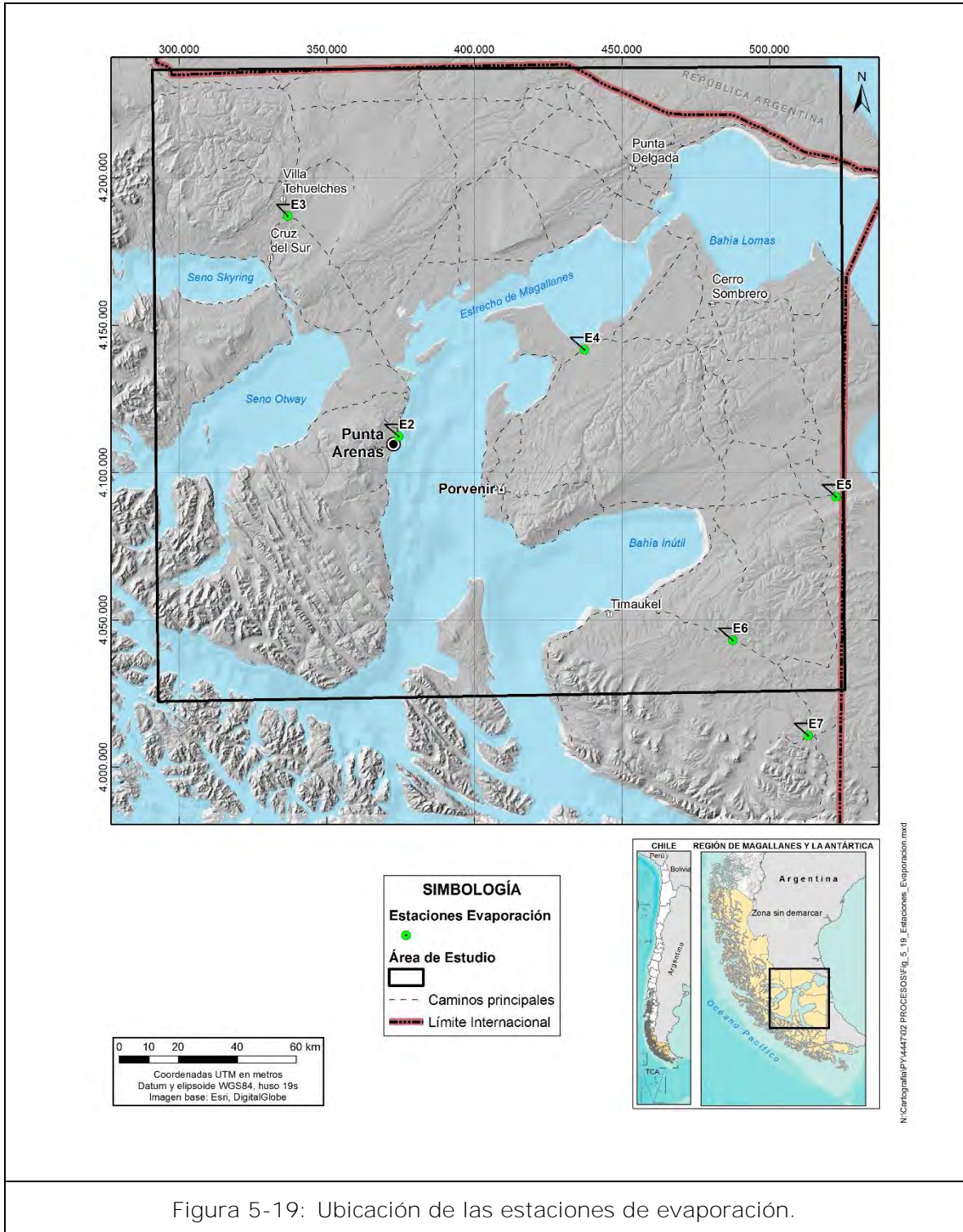


Figura 5-19: Ubicación de las estaciones de evaporación.

[Fuente: Elaboración propia.]

Donde  $\phi$  es la latitud del lugar en RAD, que en el área de estudio tiene un valor de -0,2944 y día es el número del día del año. La temperatura se calculó como el promedio entre el valor máximo y el mínimo diario.

Las series originales fueron corregidas por un coeficiente de 0,70, correspondiente al coeficiente de bandeja del evaporímetro. En la Figura 5-21 se presenta la serie original de evapotranspiración para la estación E2 y la serie generada, se eligió esta estación ya que posee el registro más completo y con ella se calibró el parámetro  $c$  igual a 1,4. Como se observa en la figura, la evaporación tiene un ciclo anual con máximas en verano y mínimas en invierno, este comportamiento medio es bien representado por la ecuación de Blaney-Criddle, sin embargo la serie original presenta una variabilidad importante que no es representada por la ecuación, por esto motivo se agregó una variabilidad aleatoria calculada a partir de una distribución normal con media cero y desviación estándar igual a la presente en la estadística original respecto a la media móvil de 60 días.





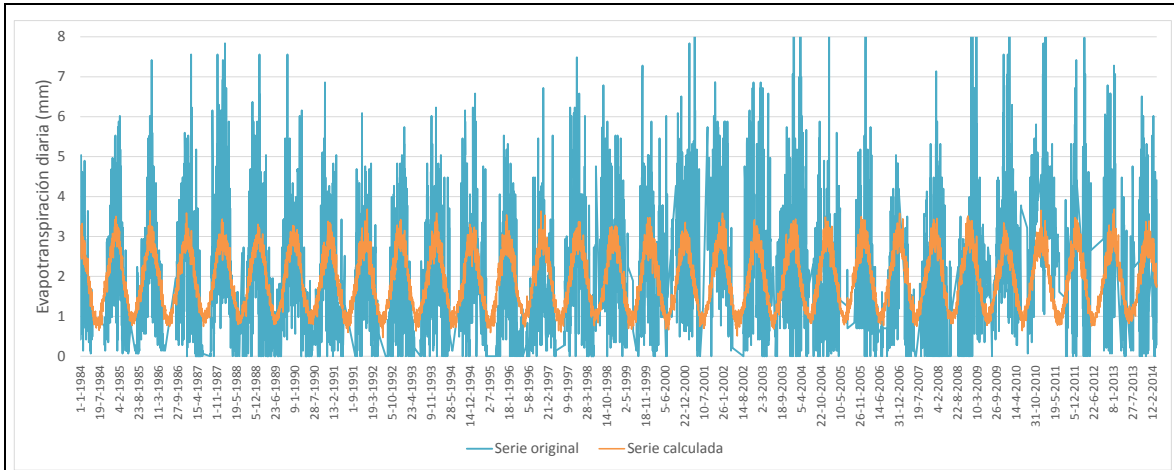


Figura 5-21: Evapotranspiración diaria en estación E2

[Fuente: Elaboración propia]

Los días sin información de las series originales fueron rellenados con las series generadas. Se utilizó la temperatura medida en la estación más cercana a la estación de evaporación para realizar el relleno.

### Evaporación media

A partir las series rellenadas de evapotranspiración se obtuvieron los promedios mensuales y anuales para cada estación (Tabla 5-8). Los registros de evapotranspiración rellenados se muestran en la Figura 5-22. El análisis de la evapotranspiración media en las estaciones rellenadas permite caracterizar el régimen de evapotranspiración en el área de estudio a lo largo del año. En promedio, la evapotranspiración mínima ocurre en el mes de junio con valores cercanos a 30 mm. Los máximos mensuales ocurren durante enero y febrero, con valores alrededor de los 90 mm.

Tabla 5-8: Promedios de las series de evapotranspiración (mm).

No.	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANU
E1	48	39	<i>33</i>	38	45	54	71	78	87	<b>94</b>	73	71	733
E2	45	35	<i>32</i>	35	42	49	71	80	81	<b>88</b>	73	64	695
E3	48	39	<i>31</i>	36	43	50	66	80	87	<b>88</b>	73	63	705
E4	48	38	<i>31</i>	35	43	50	69	84	89	<b>91</b>	74	70	722
E5	46	37	<i>30</i>	34	41	49	64	78	<b>88</b>	84	72	67	692
E6	46	36	<i>28</i>	32	40	49	66	77	<b>90</b>	89	72	67	691
E7	47	40	<i>32</i>	36	43	50	65	76	<b>86</b>	85	71	64	694

El valor mayor de cada estación se encuentra destacado en negrita y el menor en cursiva.

[Fuente: Elaboración propia.]

En la Figura 5-22 se presenta la variación de la evapotranspiración media anual. Se observa que la curva presenta una variabilidad no importante en su valor medio anual, oscilando entre un mínimo de 433 mm en la estación E5 y 961 mm en E2.

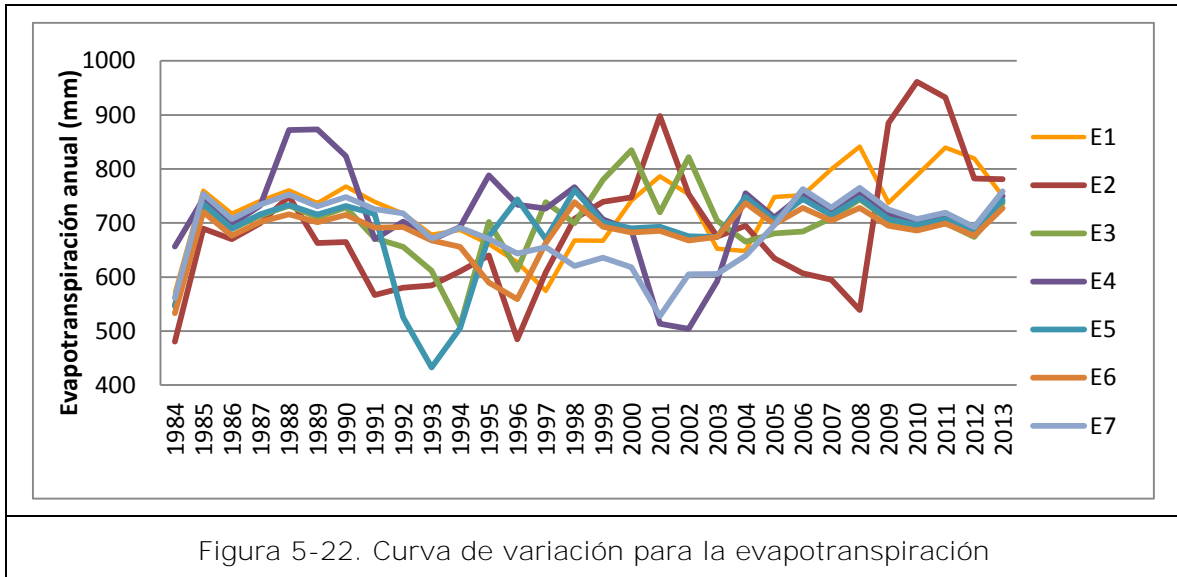


Figura 5-22. Curva de variación para la evapotranspiración

[Fuente: Elaboración propia.]

### 5.3.6 RELACIÓN ENTRE VARIABLES METEOROLÓGICAS MEDIDAS EN LA ESTACIÓN JORGE C. SCHYTHE

En esta sección se incluye una evaluación de la relación entre las distintas variables monitoreadas en la estación Jorge C. Schythe. La elección de este punto se basa en que registra mediciones de manera continua de temperatura, humedad, precipitaciones en estado de agua, agua-nieve y nieve, entre otras.

En la Figura 5-23 se presentan las precipitaciones promedio mensuales para el período comprendido entre los años 2002-2014. De manera similar a lo observado en la sección 5.3.2, las magnitudes máximas se producen en abril y marzo. En estos meses de mayor precipitación, ésta se presenta en los 3 estados descritos. Para los meses entre mayo y agosto predomina la precipitación nival (en hasta un 25%, como ocurren en el mes de julio). A pesar que esta información se incluye implícitamente en los registros de caudales, no se puede considerar directamente en la estimación de la recarga, puesto que no se cuenta con los registros que permitan caracterizar el comportamiento temporal y espacial de la nieve.

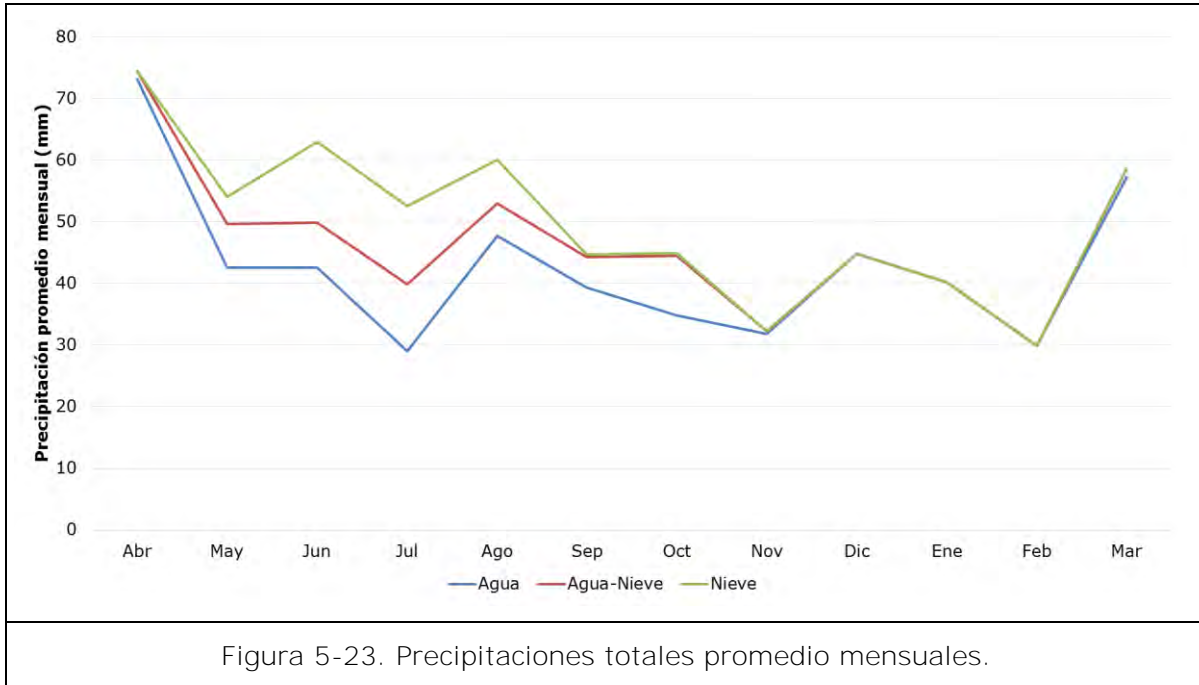


Figura 5-23. Precipitaciones totales promedio mensuales.

Tabla 5-9: Coeficientes de determinación ( $R^2$ ) en variables analizadas.

Variable	Temperatura	Humedad	Evaporación	Radiación Solar
Temperatura	-	0,51	0,58	0,73
Humedad	0,51	-	0,42	0,65
Evaporación	0,58	0,42	-	0,51
Radiación Solar	0,73	0,65	0,51	-

[Fuente: Elaboración propia.]

Según los coeficientes de determinación estimados (Tabla 5-9), las variables que presentan un mejor ajuste son la temperatura y la radiación solar, lo que se explica, en parte, porque uno de los factores determinantes de la temperatura es la incidencia de los rayos solares.

La Figura 5-24 muestra una matriz de correlaciones para las 4 variables meteorológicas consideradas. La diagonal de la matriz muestra el nombre de las variables correspondientes a cada fila y columna. La temperatura se lee en la primera fila y en la primera columna, la humedad se lee en la segunda fila y en la segunda columna, la evaporación se lee en la tercera fila y en la tercera columna y la radiación se lee en la cuarta fila y en la cuarta columna.

Al comparar las correlaciones entre las distintas variables (Figura 5-24), se puede notar que la humedad presenta correlaciones negativas con respecto a la temperatura, a la evaporación y a la radiación. Esto se produce porque a mayor radiación, mayor temperatura y por ende, mayor evaporación, lo que se traduce en una condición más seca.

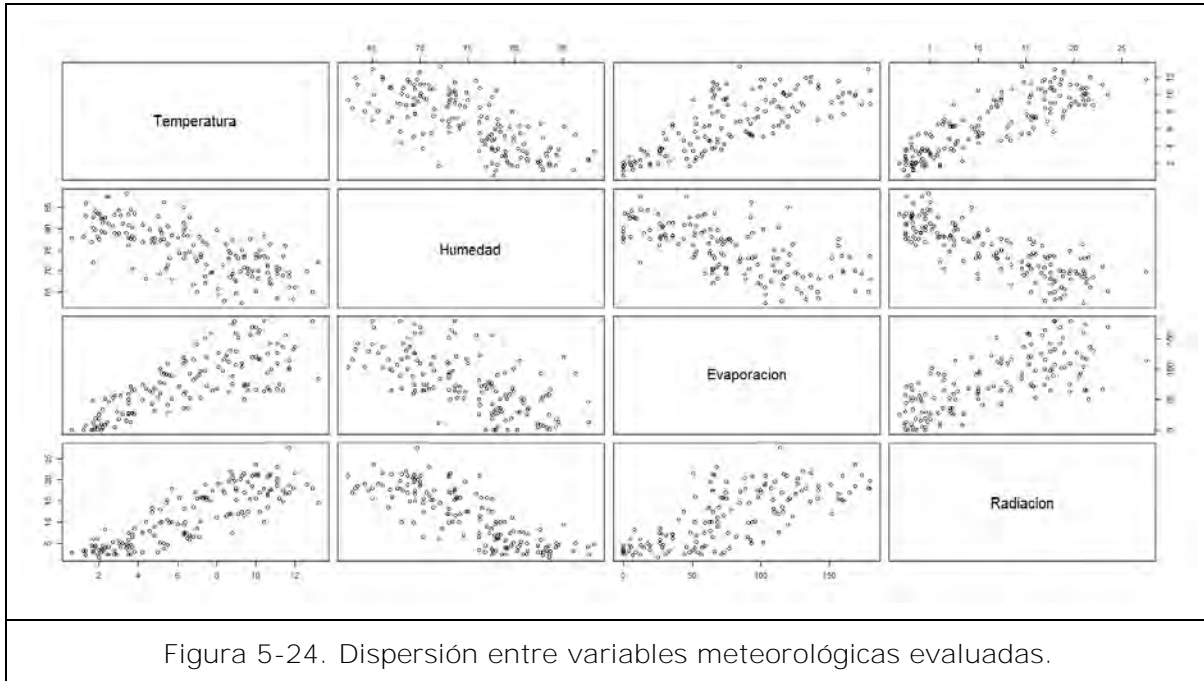


Figura 5-24. Dispersión entre variables meteorológicas evaluadas.

[Fuente: Elaboración propia.]

### 5.3.7 Análisis de caudales

Se analizaron los datos de caudales disponibles en 23 estaciones fluviométricas de la DGA a nivel mensual y diario. Se realizó una presentación y cuantificación de los registros fluviométricos existentes dentro de la zona de estudio, estimando los promedios mensuales, de manera de poder comparar la relación entre las distintas variables antes mencionadas.

#### Disponibilidad de datos

En la Tabla 5-10 se presenta la información básica de las estaciones fluviométricas, específicamente código BNA, ubicación y vigencia o fecha de suspensión. En la Figura 5-25 se presenta un mapa de ubicación de las estaciones con la nomenclatura utilizada en la primera columna de la Tabla 5-10.

En la Figura 5-25 se presenta un mapa de ubicación de las estaciones con la nomenclatura utilizada en la primera columna de la Tabla 5-10. Se puede observar que la red cubre una proporción importante de los cauces principales en el área de estudio. De la información de caudales medios mensuales obtenida de la base del BNA de la DGA se utilizaron los datos mensuales que tenían más de 10 días con información, descartando el resto.

La Figura 5-26 muestra de forma gráfica la cantidad y calidad de los datos de caudales medios mensuales disponibles después de realizar el primer filtro. Como se puede observar, la red ha crecido de forma discontinua, principalmente a comienzos de la

década de los 80 donde se incorporaron 11 estaciones y entre los años 2003 a 2006, cuando se incorporaron 10 estaciones más. Así, la mayor densidad de datos ocurre a partir del año 1980 y especialmente desde el año 2004 hasta el 2015. Se observa que del total de estaciones, 2 presentan menos de 85 datos mensuales en los últimos 30 años, estas estaciones fueron eliminadas de los posteriores análisis ya que poseen una cantidad insuficiente de datos. También fue eliminada la estación Q9, ya que corresponde a un canal de trasvase.

Tabla 5-10: Información general de las estaciones fluviométricas recopiladas.

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altitud msnm	Estado
Q1	Río Grande en isla Riesco	12448001-9	4.123.924	307.156	5	V
Q2	Río Pérez en desembocadura	12452001-0	4.173.369	298.110	20	V
Q3	Río Grande en seno Otway	12561001-3	4.112.786	345.599	22	V
Q4	Río Calete en seno Otway	12563001-4	4.101.162	325.102	15	V
Q5	Río San Juan en desembocadura	12582001-8	4.053.271	369.809	8	V
Q6	Río Tres Brazos antes Bt. Sendos	12585001-4	4.094.528	367.855		V
Q7	Río Legnadura antes Bt Sendos	12585002-2	4.100.909	368.291		N-2002
Q8	Río las Minas en Bt. Sendos	12586001-K	4.110.366	367.175	185	V
Q9	Canal de trasvase estero Llau-Llau	12586009-5	4.111.722	370.262	80	V
Q10	Río Rubens en ruta N 9	12600001-4	4.231.187	298.022	180	V
Q11	Río Penitente en Morro Chico	12622001-4	4.231.383	334.588	170	V
Q12	Río Ci-Aike antes frontera	12660001-1	4.233.291	427.229	142	V
Q13	Río Side en cerro Sombrero	12802001-2	4.153.144	481.090	10	V
Q14	Río Oscar en bahía San Felipe	12805001-9	4.143.830	449.044	10	V
Q15	Río Oro en bahía San Felipe	12806001-4	4.144.123	439.555	10	V
Q16	Río Caleta en Tierra Del Fuego	12820001-0	4.031.397	434.096	280	V
Q17	Río Cullen en frontera	12861001-4	4.144.525	524.601		V
Q18	Río San Martín en San Sebastián	12863002-3	4.092.125	523.036		V
Q19	Río Chico en ruta Y-895	12865001-6	4.066.859	520.280		V
Q20	Río Herminita en ruta Y-895	12872001-4	4.037.712	521.361		V
Q21	Río Grande en Tierra del Fuego	12876001-6	4.028.051	507.388	100	V
Q22	Río Catalina en Pampa Guanacos	12876004-0	4.011.535	513.054		V
Q23	Río Rasmussen en frontera (estancia Vicuña)	12878001-7	4.014.064	522.544		V

V= Vigente

[Fuente: DGA] \*Datum WGS84 Huso 19S

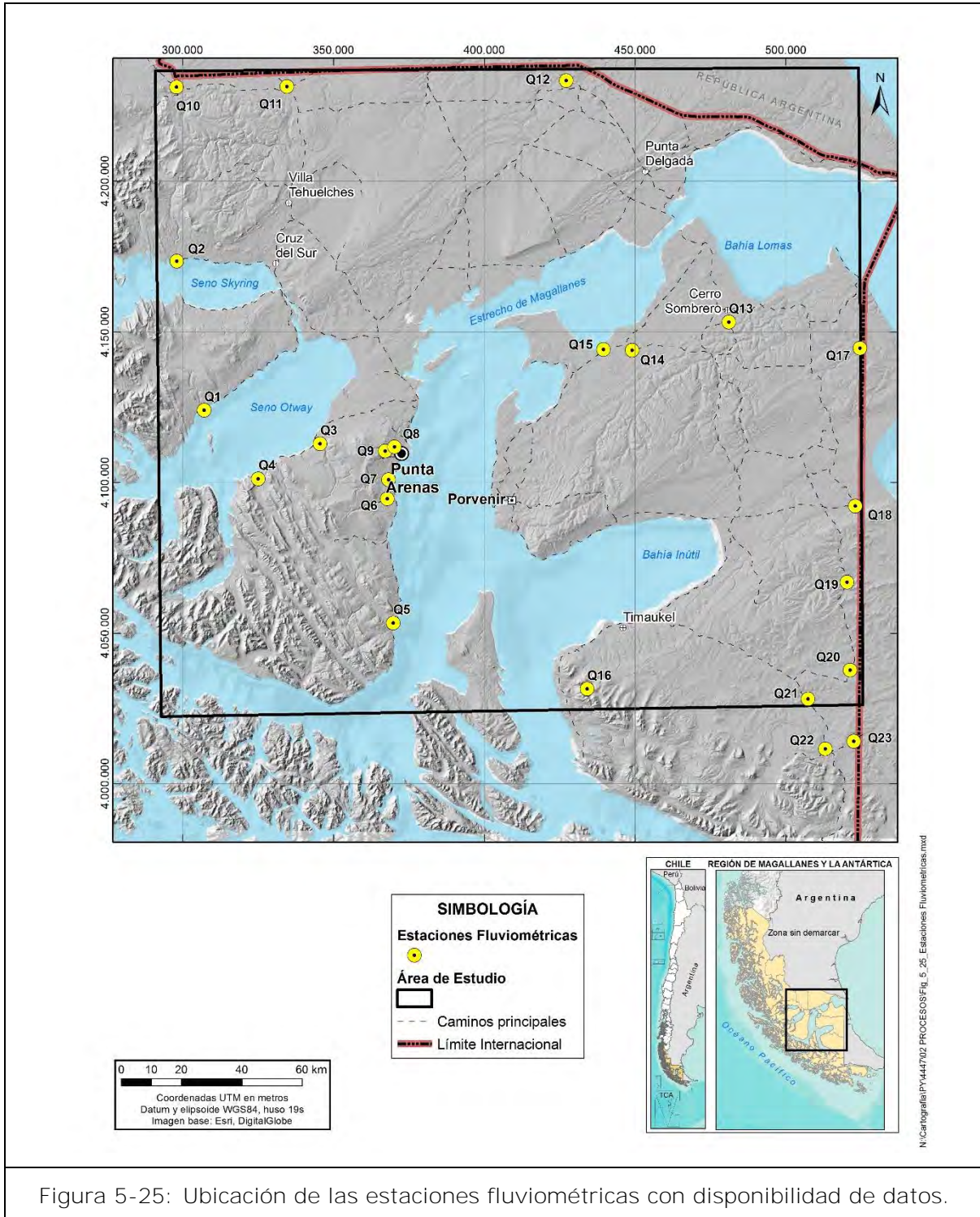


Figura 5-25: Ubicación de las estaciones fluviométricas con disponibilidad de datos.

[Fuente: Elaboración propia]





## Cuencas aportantes a estaciones fluviométricas

La primera delimitación de cuencas y subcuencas hidrográficas de la DGA data de fines de la década del 70, basada en datos y métodos análogos disponibles en la época. Luego, con el desarrollo de tecnologías digitales, en la segunda mitad de la década de los 90 se identifican, clasifican y generan 3 coberturas SIG; cuencas, subcuencas y subsubcuencas, estableciendo así una base de datos con relaciones topológicas apropiadas. Finalmente, el año 2003 se corrigen las delimitaciones de estas coberturas a través del uso de imágenes satelitales y es esta versión de coberturas que se dispone hasta el día de hoy y asimismo se define como la delimitación administrativa oficial de la DGA (Análisis crítico de la definición de cuencas del Banco Nacional de aguas, DGA 2013).

Sin embargo, en algunas zonas del país, esta delimitación sigue siendo deficiente desde el punto de vista físico, por ejemplo, en el área del presente estudio se presentan delimitaciones de subsubcuencas en el mar (Figura 5-27), lo que induciría a error ya que la superficie se encuentra sobreestimada.

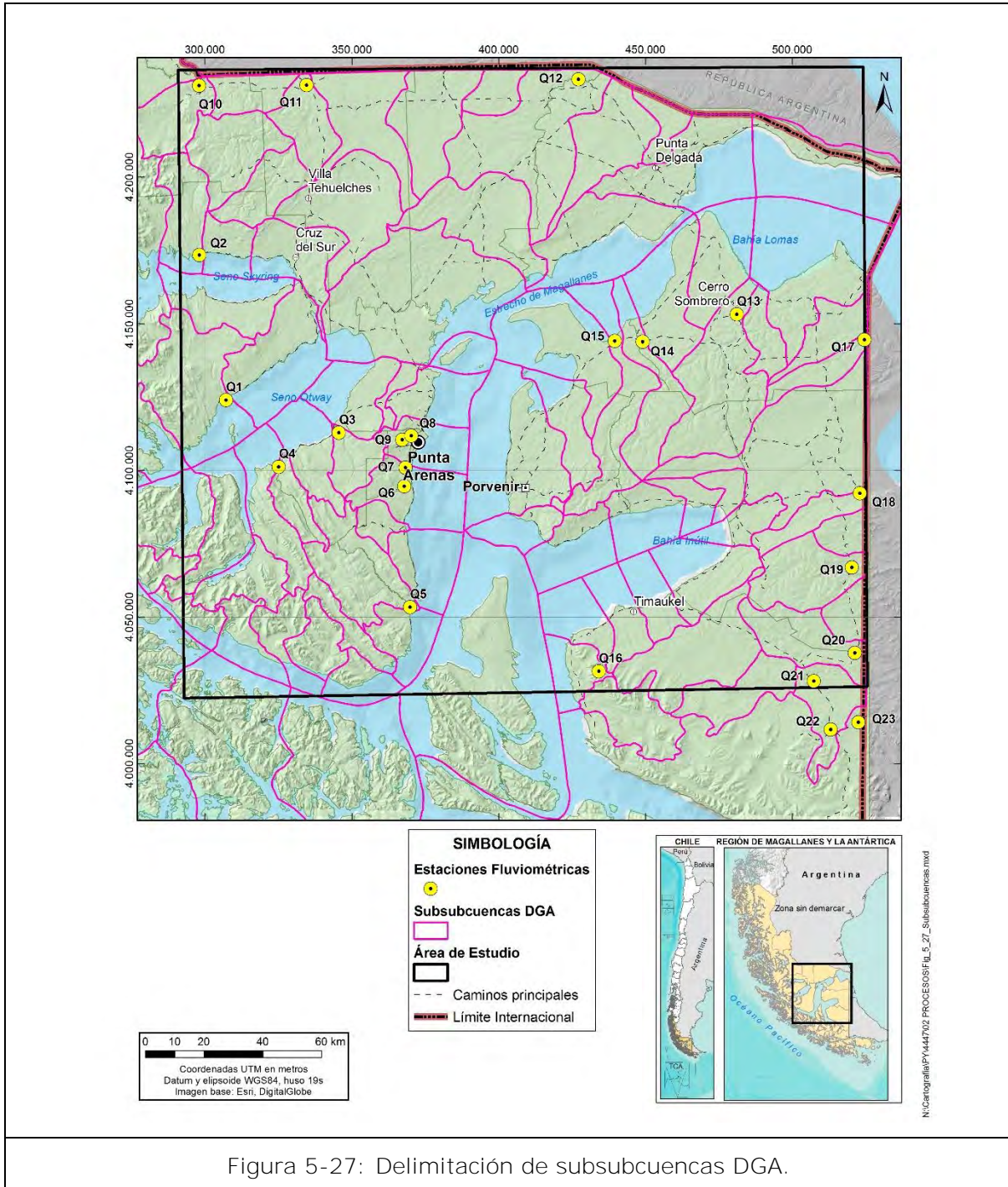
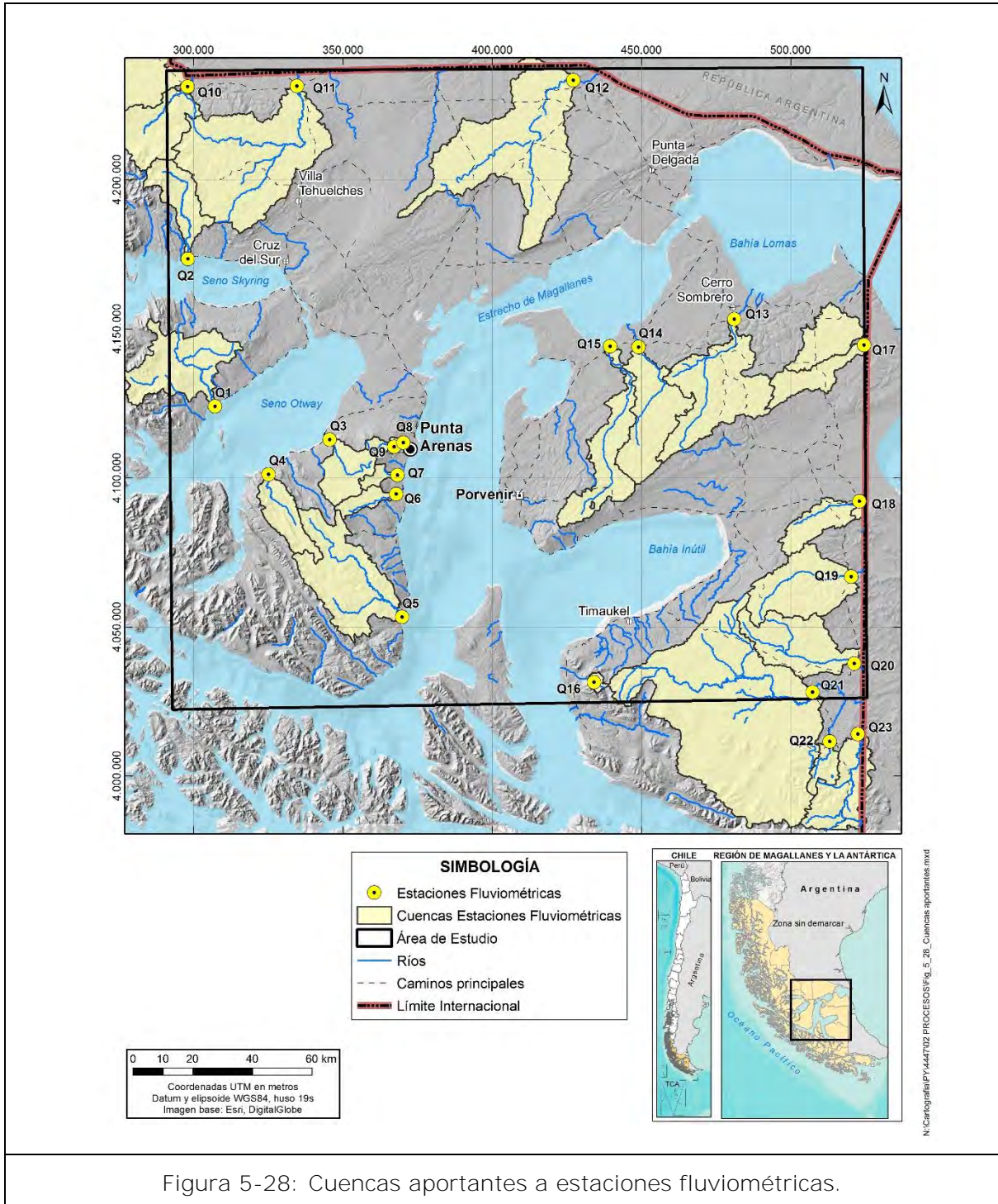


Figura 5-27: Delimitación de subsubcuencas DGA.

[Fuente: Elaboración propia.]

En el presente estudio es posible mejorar esta definición de las cuencas, gracias a las nuevas tecnologías SIG y mejores modelos de elevación digital disponibles en el mercado. Así, se han definido a partir del modelo SRTM de 90 m de resolución espacial y las herramientas de geoprocésamiento del software ArcGis, las cuencas aportantes a las estaciones fluviométricas presentes en el área de estudio (ver Figura 5-28).

Sin perjuicio de lo anterior, en zonas planas y/o donde la delimitación DGA se aprecie coherente desde un punto de vista físico, se evaluara utilizar estas cuencas ya definidas para los cálculos y modelaciones hidrológicas.



### 5.3.8 Caudales medios

Se realizó un análisis de las propiedades estadísticas de las series de caudales medios mensuales, obteniendo los caudales medios anuales y la producción específica, los cuales se presentan en la Tabla 5-11. Las áreas aportantes de las cuencas afluentes, junto a las alturas características, fueron determinadas utilizando las cuencas definidas por Arcadis en la Figura 5-28. Los caudales medios anuales están comprendidos entre 100 L/s y 29 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado la producción específica varía entre 0,2 y 45,6 L/s/Km<sup>2</sup>, con un promedio de 16 L/s/Km<sup>2</sup>. Estos resultados se pueden explicar en parte debido a la variabilidad de la precipitación. La representatividad de los valores calculados se puede evaluar con los años de registros completos observados en la última columna de la Tabla 5-11.

Los valores que presenten pocos años resultan menos representativos, ya que los años de registro pueden coincidir con periodos de sequias o inundaciones.

Tabla 5-11: Resumen estadístico de los datos fluviométricos de las estaciones consideradas.

No.	Caudal medio anual (m <sup>3</sup> /s)	Área aportante (Km <sup>2</sup> )	Altura del centroide (msnm)	Altura media (msnm)	Pendiente media (%)	Producción específica (L/s/Km <sup>2</sup> )	Años de registro completo
Q1	19,6	616,9	210	364,8	14,34	30,3	16
Q2	7,9	306,7	393	491,6	14,87	29,5	13
Q3	6,2	266,7	180	376,7	8,13	23,5	6
Q4	10,6	258,2	393	412,2	20,09	44,0	5
Q5	18,6	816,0	465	348,1	15,50	24,0	21
Q6	2,1	97,6	429	382,4	10,68	20,5	18
Q8	0,9	34,8	558	466,8	11,52	22,8	14
Q10	11,5	496,3	314	426,0	13,16	24,1	23
Q11	14,3	1452,6	399	449,3	9,04	10,1	21
Q12	0,3	1524,9	175	210,0	2,41	0,2	5
Q13	1,5	822,9	245	225,5	7,11	1,7	26
Q14	2,1	574,4	254	271,2	5,94	3,6	24
Q15	3,2	527,65	385	303,27	7,45	6,0	26
Q16	1,1	23,4	410	447,1	22,84	45,6	7
Q17	0,1	234,9	208	165,1	2,75	0,4	7
Q18	0,7	244,4	94	142,2	4,57	2,4	7
Q19	4,5	595,0	315	309,2	7,27	7,4	6
Q20	2,7	543,0	253	234,1	4,80	3,5	5
Q21	28,9	2904,3	153	261,1	8,76	9,9	21
Q23	7,4	436,1	344	293,8	12,17	17,4	8

[Fuente: Elaboración propia.]

La Figura 5-29 muestra la producción específica en función de la altura media de la cuenca aportante a la estación fluviométrica.

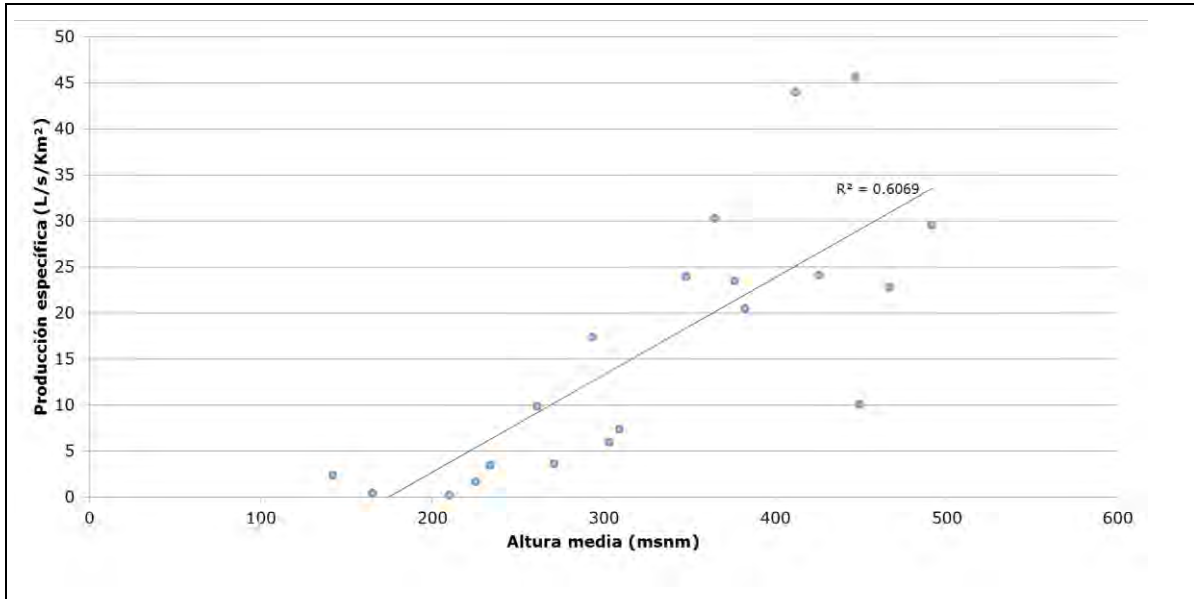


Figura 5-29. Producción específica en función de la altura media de la cuenca aportante a la estación fluviométrica.

[Fuente: Elaboración propia.]

El  $R^2$  entre la altura media de la cuenca y la producción específica es igual a 0,6. A mayor altura la producción tiende a ser mayor. Los valores más altos de producción específica se observan en cuencas altura media alrededor de los 450 msnm, donde el máximo se registra en la estación Río Caleta en Tierra del Fuego (Q16). Esta estación drena las intensas precipitaciones que llegan a ser de hasta 1000 mm y caen en la parte sur de la Isla de Tierra del Fuego, donde se genera una escorrentía alta.

A partir de los datos de caudales medios mensuales se obtuvieron los promedios correspondientes a cada mes del año para cada estación (Tabla 5-12). Los mayores caudales medios anuales ocurren en la estación Río Grande en isla Riesco (Q1), Río San Juan en desembocadura (Q5) y Río Grande en Tierra del Fuego (Q21). Estas estaciones poseen áreas aportantes grandes y además se ubican en la zona donde las precipitaciones son más altas. De un total de 23 estaciones, 6 superan los 10 m<sup>3</sup>/s como caudal promedio anual.

Observando el régimen de caudales medios mensuales, se aprecia que los caudales máximos se ubican de forma preferente entre los meses de septiembre y octubre, mientras que los caudales mínimos se ubican mayoritariamente entre enero y marzo.

Tabla 5-12: Resumen de los caudales medios mensuales (m<sup>3</sup>/s).

No.	ABR	MAR	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	AN
Q1	21,5	23,1	19,2	17,1	20,1	24,9	<b>26,1</b>	24,1	17,1	14,6	<u>12,3</u>	17,1	19,8
Q2	9,3	7,7	6,5	<u>5,5</u>	6,7	8,2	11,6	<b>12,4</b>	11,1	8,5	6,7	7,6	8,5
Q3	7,8	6,6	8,2	4,8	7,6	<b>14,7</b>	12,1	4,4	2,1	<u>0,9</u>	1,1	2,8	6,1
Q4	14,5	12,1	11,6	8,5	9,4	15,5	<b>15,7</b>	11,4	8,3	6,3	<u>6,1</u>	8,8	10,7
Q5	20,5	20,2	22,1	23,1	21,6	32,2	<b>33,3</b>	17,5	11,7	8,2	<u>7,4</u>	11,2	19,1
Q6	1,8	2,0	3,2	3,2	2,7	3,7	<b>4,2</b>	1,6	0,8	0,5	<u>0,4</u>	0,8	2,1
Q8	0,9	0,9	1,3	1,3	1,0	1,3	<b>1,8</b>	0,5	0,3	0,3	<u>0,2</u>	0,5	0,9
Q9	0,2	0,2	<b>1,3</b>	0,4	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	<b>0,0</b>	0,0	0,1	0,3
Q10	11,8	11,3	10,6	12,2	12,9	18,2	<b>20,0</b>	13,6	9,2	6,7	<u>5,4</u>	7,7	11,6
Q11	9,3	11,3	12,6	17,0	20,3	26,8	<b>33,8</b>	16,5	8,1	5,2	<u>4,5</u>	6,3	14,3
Q12	0,2	0,2	0,2	0,3	0,9	<b>1,3</b>	0,3	0,1	0,1	0,1	<u>0,1</u>	0,2	0,3
Q13	1,0	1,2	1,9	2,8	<b>3,2</b>	2,5	1,4	0,8	<u>0,7</u>	0,8	0,9	0,9	1,5
Q14	1,4	1,9	2,7	3,5	3,4	<b>3,6</b>	2,3	1,4	1,2	1,0	<u>1,0</u>	1,1	2,0
Q15	2,2	3,0	4,4	<b>5,4</b>	4,5	5,3	4,1	2,4	2,0	1,7	<u>1,6</u>	1,7	3,2
Q16	1,2	1,0	1,4	1,3	1,7	<b>2,3</b>	1,5	0,7	0,6	0,4	<u>0,4</u>	0,6	1,1
Q17	0,0	0,0	0,1	0,2	<b>0,2</b>	0,1	0,1	0,0	0,0	<u>0,0</u>	0,0	0,0	0,1
Q18	0,3	0,4	0,8	1,4	<b>2,2</b>	1,3	0,6	0,3	0,2	0,2	<u>0,2</u>	0,2	0,7
Q19	3,4	4,1	6,5	7,0	6,6	<b>8,1</b>	4,4	3,2	2,7	2,8	2,8	<u>2,6</u>	4,5
Q20	1,6	2,0	2,4	4,7	5,3	<b>5,5</b>	2,3	1,6	1,4	1,5	1,4	<u>1,1</u>	2,6
Q21	18,8	28,6	30,2	34,2	37,1	48,0	<b>51,2</b>	36,6	24,1	16,1	13,2	<u>12,1</u>	29,2
Q23	5,9	6,2	8,4	7,0	7,6	14,9	<b>17,5</b>	7,9	4,3	3,2	<u>2,8</u>	3,9	7,5

El valor mínimo de cada estación se muestra en cursiva, mientras que el valor máximo se muestra en negrita.

[Fuente: Elaboración propia.]

En la Figura 5-30 se muestra el comportamiento mensual de los caudales para las estaciones que cuentan con más de 15 años de registros completos. En este caso, se puede apreciar, que si bien el mes que presenta una mayor frecuencia de promedios máximos corresponde a octubre, en ciertos casos este comportamiento obedece a la alteración provocado por la presencia de valores altos puntuales, como los valores extremos indicados en los diagramas. Para los promedios mínimos, no se observa esta condición, puesto que los caudales más bajos se concentran en el mes de febrero.

Al comparar las estaciones, se observa que Río Side en Cerro Sombrero (Q13) y Río Grande en Tierra del Fuego (Q21) son las que tienen una distribución más simétrica para los registros mensuales, mientras que Río Oro en bahía San Felipe (Q15) es la más sesgada.

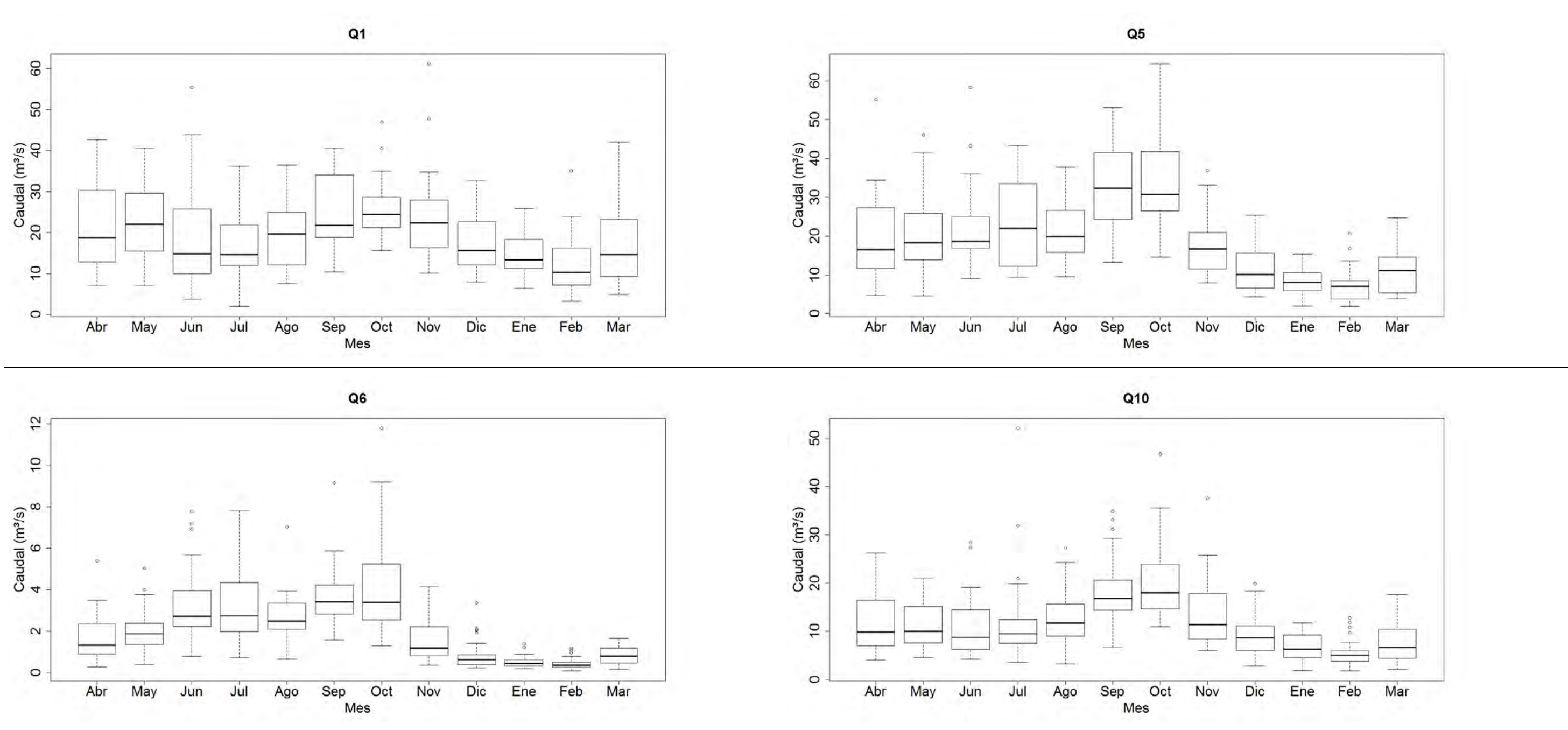


Figura 5-30: Caudales medios mensuales.

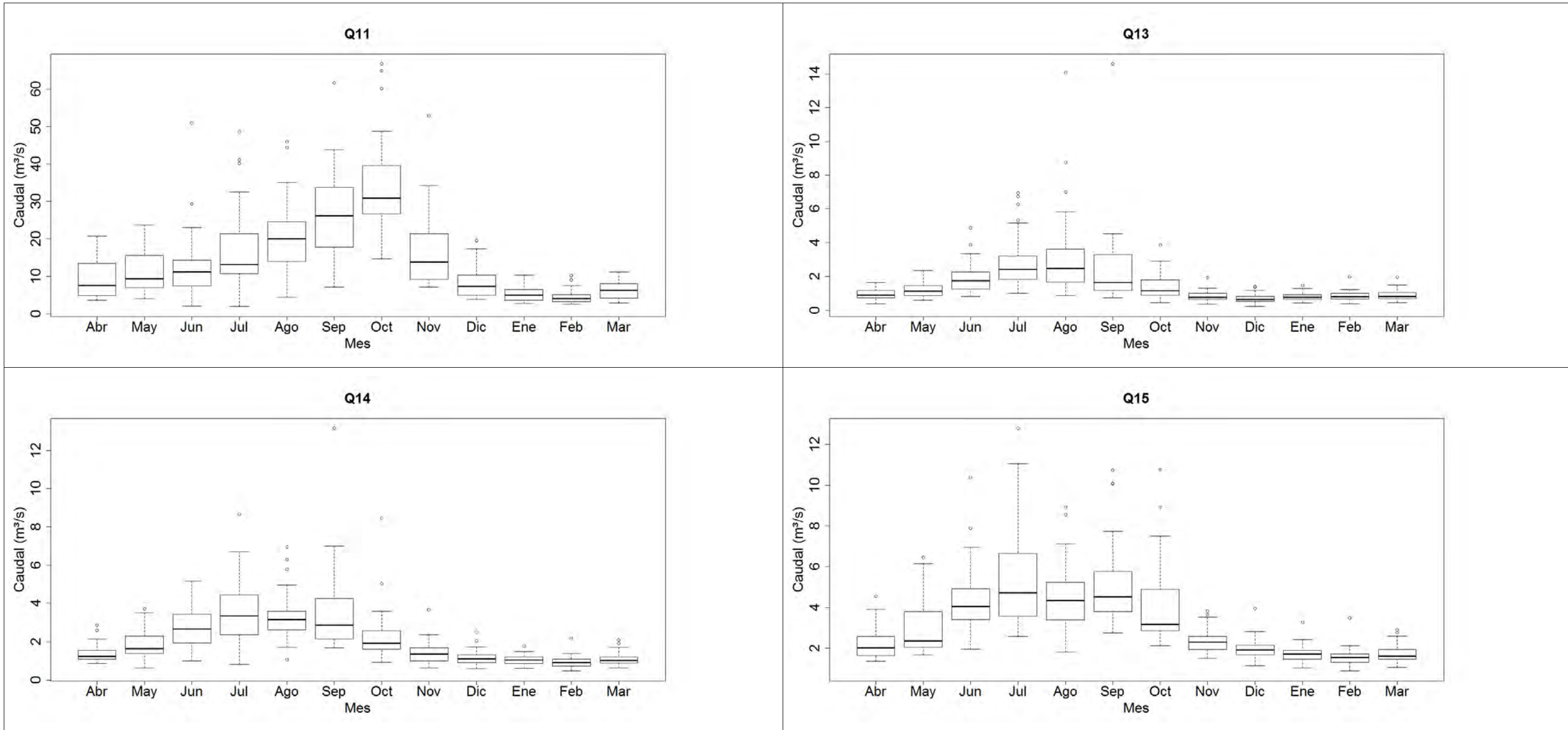


Figura 5-30: Caudales medios mensuales (continuación).



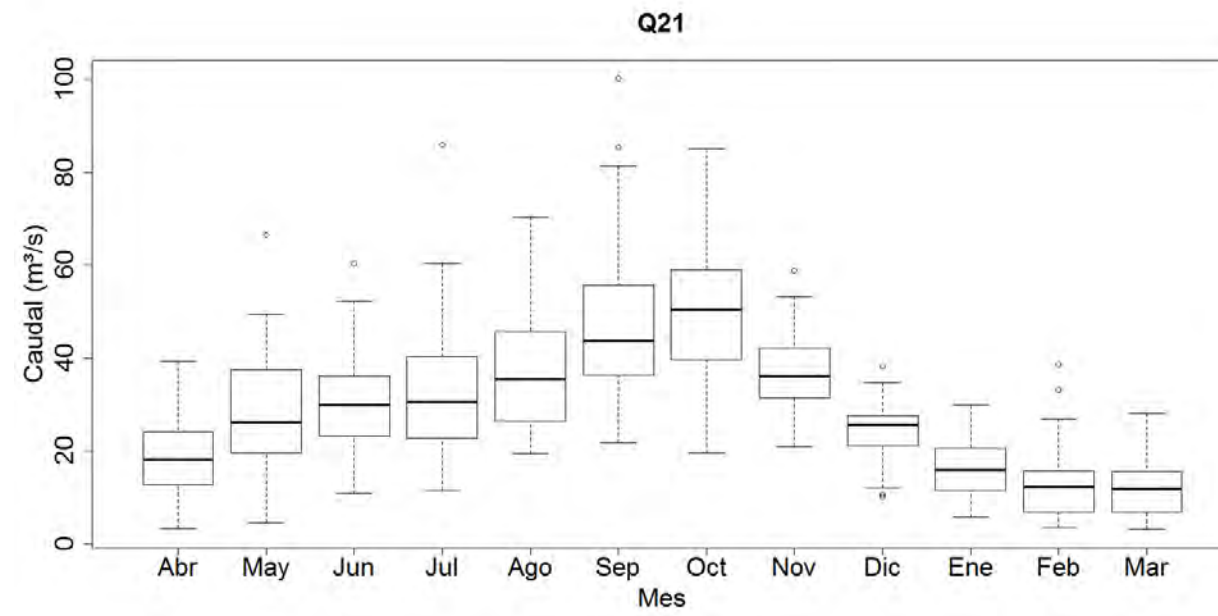


Figura 5-30: Caudales medios mensuales (continuación).

## Caracterización espacial y producción específica

En esta sección se busca identificar similitudes espaciales, del mismo modo que con la precipitación. Estas similitudes pueden ser tanto por la estacionalidad de la escorrentía como por la producción específica de las cuencas.

Para comparar los datos estacionales se trabajó con caudales mensuales adimensionalizados, obtenidos de dividir el valor mensual por el valor medio anual. Por su parte, la producción específica ( $q_i$ ,  $L/s/Km^2/mm/año$ ), permite entender cómo las cuencas producen una escorrentía  $Q_i$  ( $L/s$ ) a partir de dos variables explicativas relevantes como son su superficie ( $A_i$ ,  $Km^2$ ) y la precipitación que cae sobre ellas ( $P_i$ ,  $mm/año$ ). La expresión se escribe como:

$$q_i = \frac{Q_i}{P_i \cdot A_i}$$

El subíndice  $i$  representa a una cuenca del grupo definida en la zona.

A **nivel mensual** es posible realizar una agrupación de las estaciones en zonas, teniendo en cuenta su estacionalidad. La agrupación resultante tiene las mismas características de la precipitación (Figura 5-31) con tres grupos bien definidos: 1) Continental Sur, Isla Riesco y Continental Noroeste; 2) Tierra del Fuego Norte y 3) Tierra del Fuego Sur.

**1) Continental Sur, Isla Riesco y Continental Noroeste.** Este grupo presenta un caudal punta entre septiembre y octubre (Figura 5-32), seguido de una recesión hasta febrero. La escorrentía tiene un repunte paulatino de marzo a agosto.

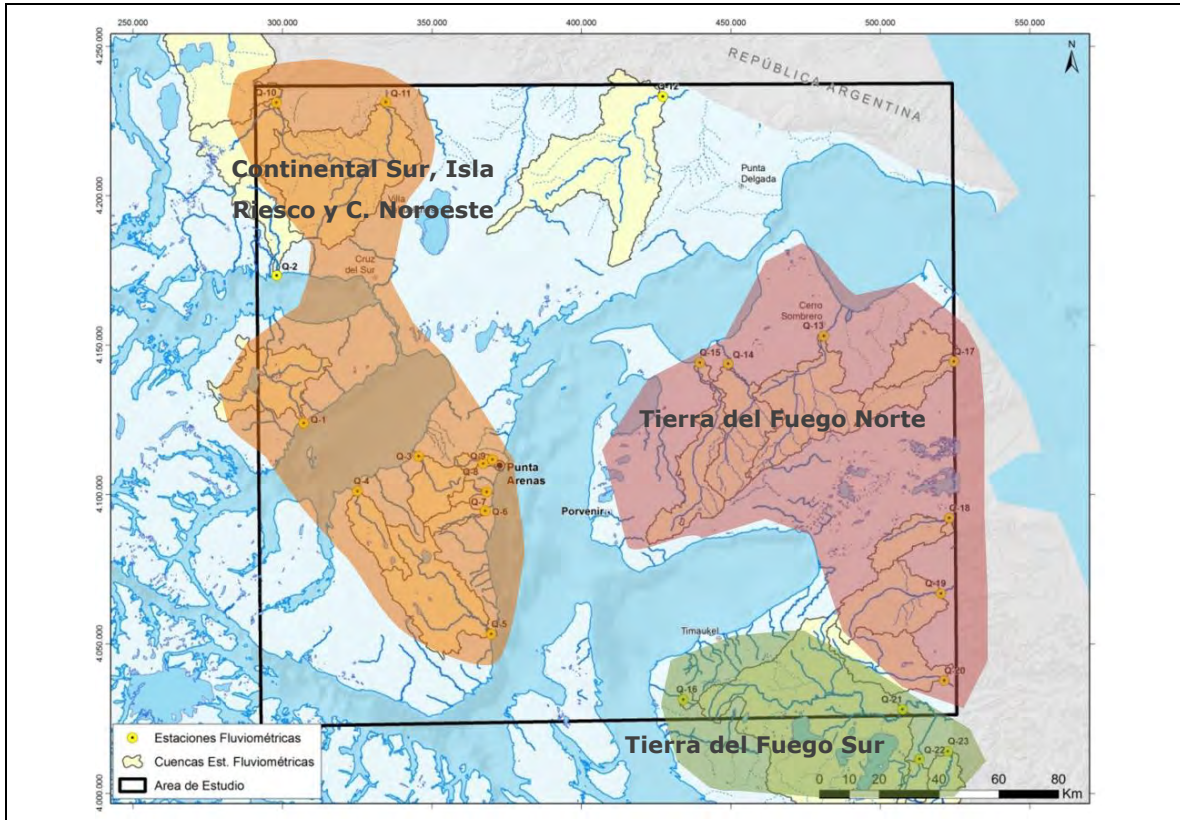


Figura 5-31: Agrupación de cuencas y estaciones fluviométricas según su magnitud mensual adimensionalizada por la media anual

[Fuente: Elaboración propia.]

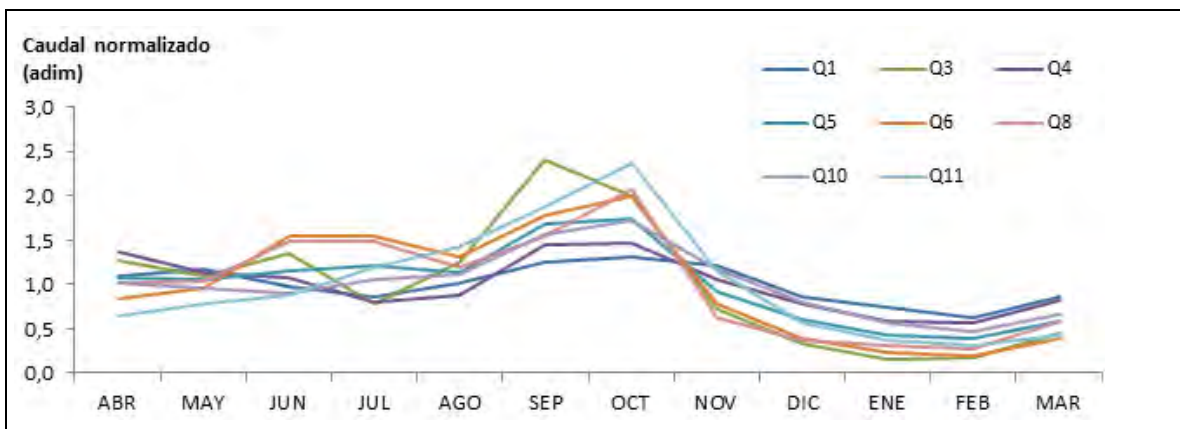


Figura 5-32: Caudal mensual adimensional en grupo "Continental Sur, Isla Riesco y Continental Noroeste". Fuente: elaboración propia.

[Fuente: Elaboración propia.]

**2) Tierra del Fuego Norte.** Este grupo presenta un caudal punta en agosto (Figura 5-33) aunque para algunas estaciones del grupo se observa relativamente plano el tramo junio-septiembre. Después de septiembre viene una rápida recesión de 2 meses, en que a partir de noviembre se mantiene constante hasta abril, donde comienza a repuntar hasta alcanzar su peak.

**3) Tierra del Fuego Sur.** Este grupo presenta sus caudales máximos en septiembre y/o octubre, seguido de una recesión hasta el mes de febrero (Figura 5-34). A partir de marzo comienza a aumentar la magnitud de los escurrimientos hasta alcanzar los valores más altos.

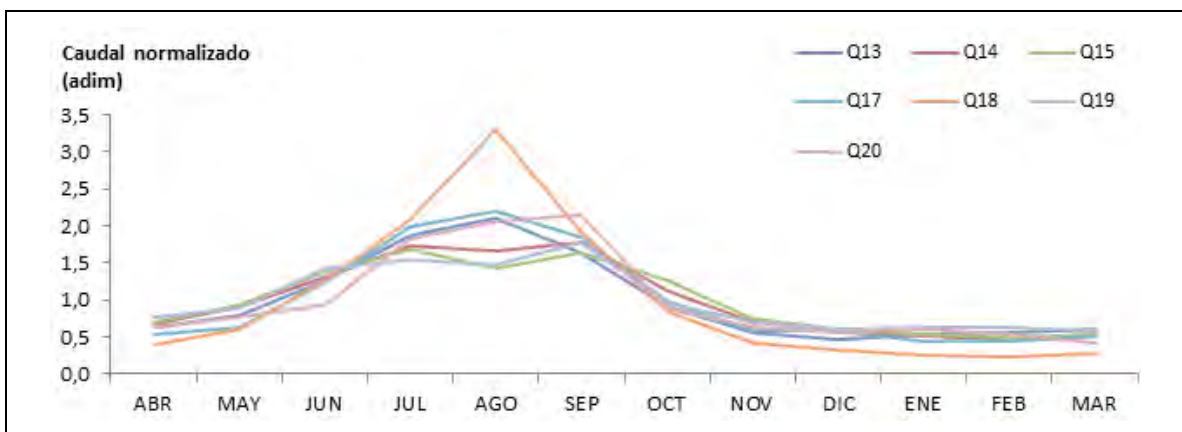


Figura 5-33: Caudal mensual adimensional en grupo "Tierra del Fuego Norte"

[Fuente: Elaboración propia.]

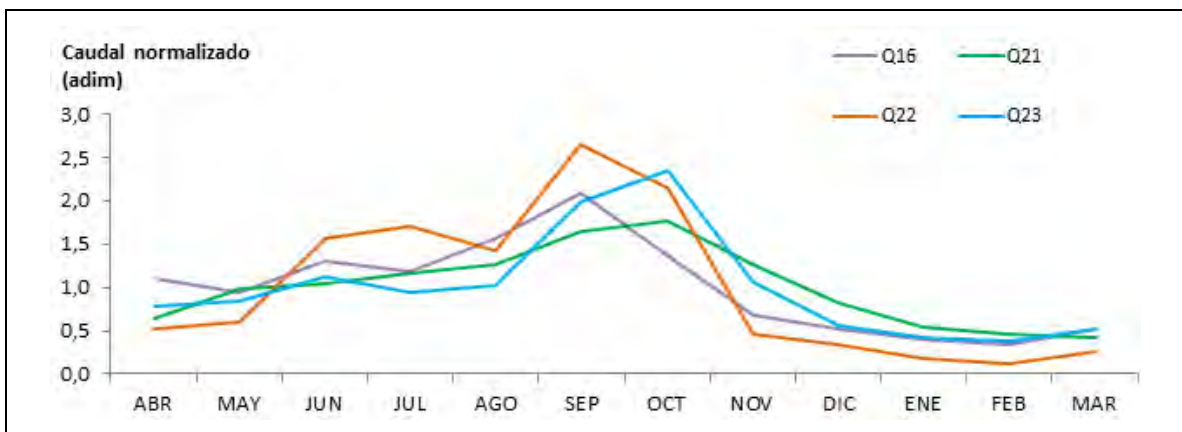


Figura 5-34: Caudal mensual adimensional en grupo "Tierra del Fuego Sur".

[Fuente: Elaboración propia.]

La búsqueda de relaciones por producción específica se hizo con la información tanto a nivel mensual como anual. A **nivel mensual**, se identificaron grupos de cuencas que presentan variaciones mes a mes comparables entre sí, aunque con superficies que son menos extensas que para el caso de la estacionalidad. Los grupos identificados (Figura 5-35) fueron: 1) Isla Riesco y Continental Norte (oeste), 2) Continental Sur, 3) Tierra del Fuego Norte y 4) Tierra del Fuego Sur.

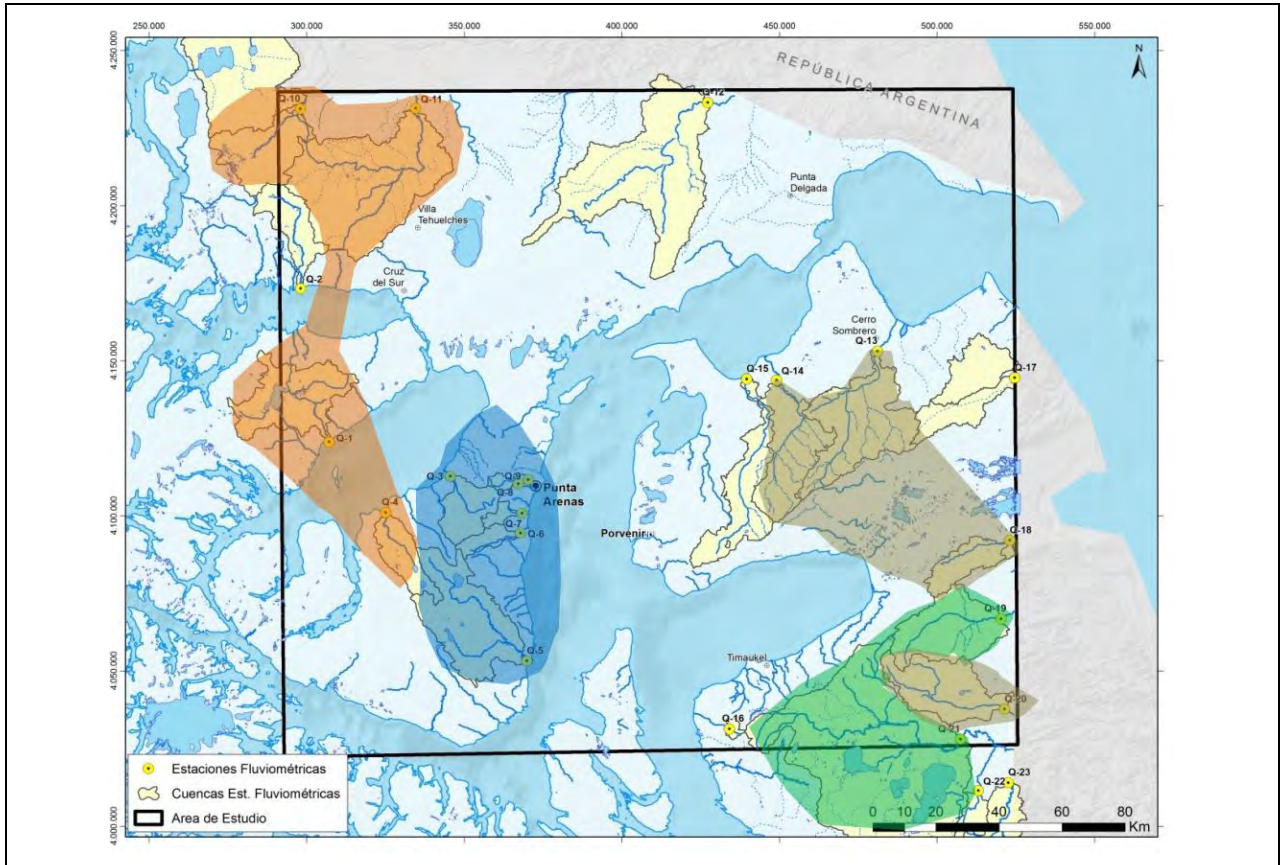


Figura 5-35: Agrupación de estaciones según similitudes en la producción específica de las cuencas con información media mensual.

[Fuente: Elaboración propia.]

**1) Isla Riesco y Continental Norte (oeste).** Algunas de estas cuencas presentan un *peak* de producción específica en septiembre, con valores poco mayores a  $2,0 \text{ L/s/Km}^2/\text{mm/a}$ , para luego decaer de forma constante hasta enero (Figura 5-36). Sus valores se mantienen de manera general en un rango de  $0,2$  a  $0,8 \text{ L/s/Km}^2/\text{mm/a}$  hasta agosto, donde se produce el repunte abrupto. Otras estaciones de este grupo se comportan de manera similar, sin embargo el *peak* lo presentan en octubre, con valores entre  $1,0$  y  $1,6 \text{ L/s/Km}^2/\text{mm/a}$ .

**2) Continental Sur.** Las cuencas de este grupo presentan 2 máximos de producción específica, uno global y otro local. El máximo global se presenta en el mes de octubre, con

valores bastante homogéneos, en el rango de 0,74 a 1,0 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a (Figura 5-37). Entre octubre y noviembre se produce una fuerte caída de la producción específica, a valores en el rango de 0,18 – 0,31 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a, que se mantiene hasta marzo donde comienza a subir para llegar al otro máximo (local), en el mes de mayo, con valores entre 0,46 y 0,56 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a.

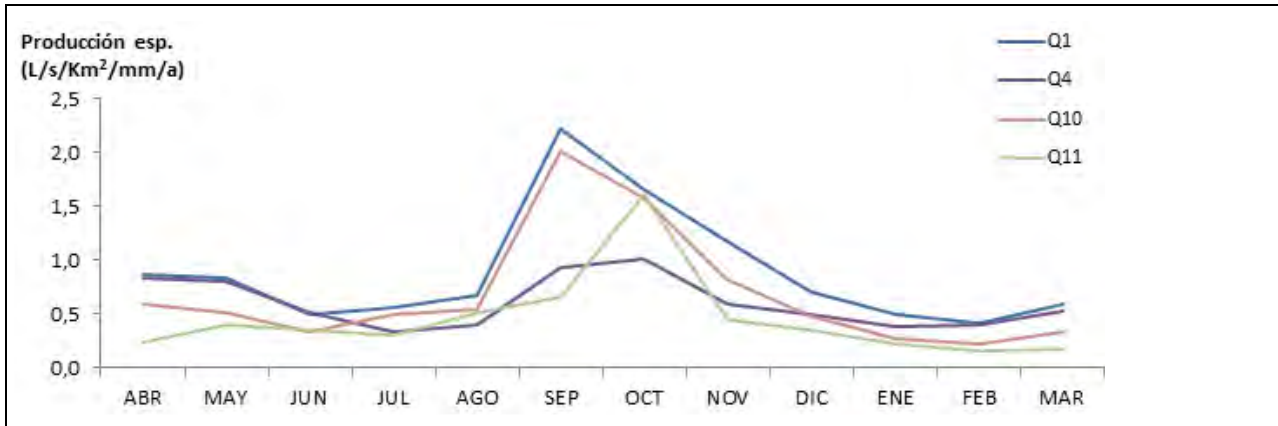


Figura 5-36: Producción específica mensual en grupo "Isla Riesco y Continental Norte (oeste)".

[Fuente: Elaboración propia.]

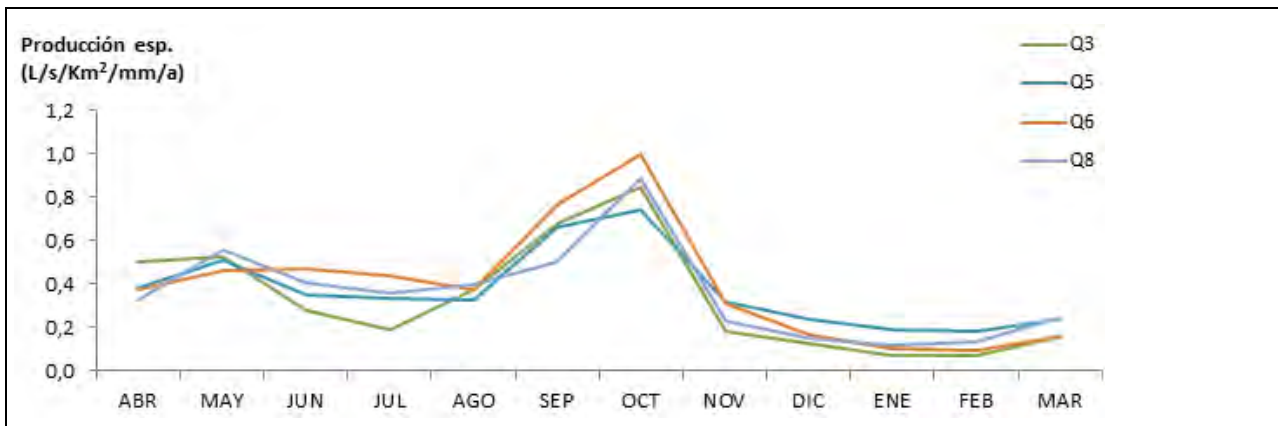


Figura 5-37: Producción específica mensual en grupo "Continental Sur".

[Fuente: Elaboración propia.]

**3) Tierra del Fuego Norte.** Las cuencas de este grupo presentan un máximo de producción específica en los meses de agosto o septiembre (Figura 5-38). Estos máximos alcanzan valores en un rango de 0,16 a 0,31 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a. Luego de este *peak*, los valores decrecen de forma casi constante hasta marzo, alcanzando valores de 0,03 – 0,05 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a, para luego repuntar, también de forma constante, a partir de abril.

**4) Tierra del Fuego Sur.** A este grupo pertenecen 2 cuencas, cuyos máximos de producción específica se encuentran en septiembre y octubre (Figura 5-39), con valores de

0,61 y 0,67 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a respectivamente. De forma similar a "Tierra del Fuego Norte", estos valores comienzan a decaer hasta marzo (0,11 – 0,15 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a), para iniciar la recuperación en abril.

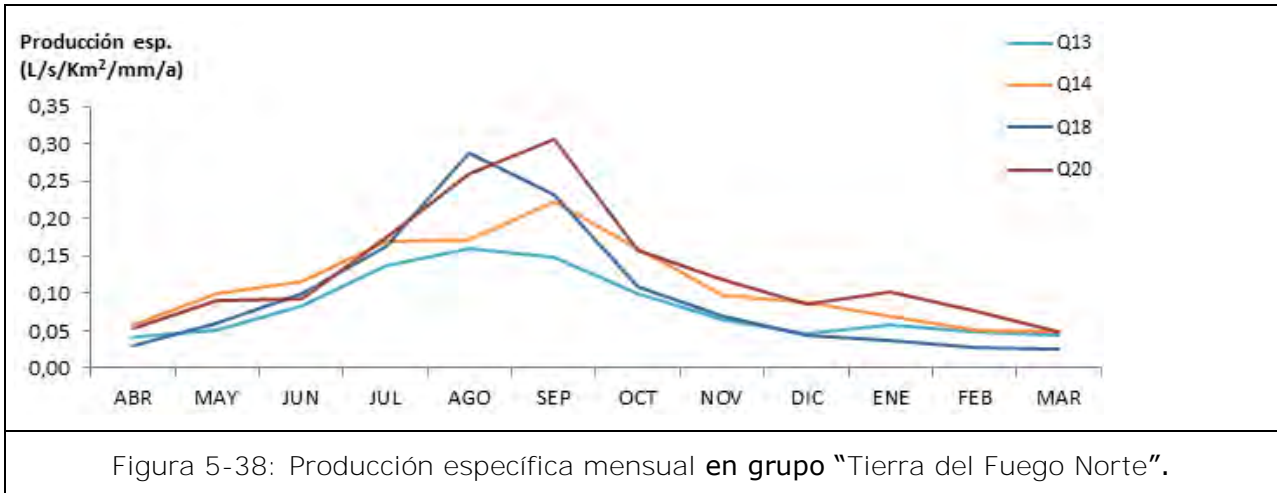


Figura 5-38: Producción específica mensual en grupo "Tierra del Fuego Norte".

[Fuente: Elaboración propia.]

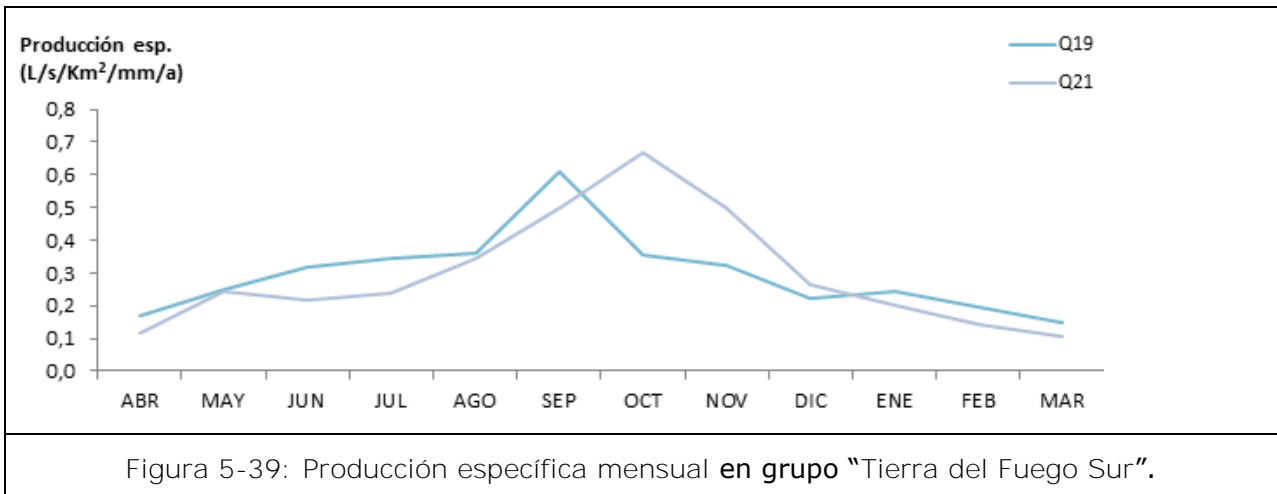


Figura 5-39: Producción específica mensual en grupo "Tierra del Fuego Sur".

[Fuente: Elaboración propia.]

Al usar la información **promedio anual** de las producciones específicas, se observa escasa relación espacial de las cuencas con sus vecinas (Figura 5-40 y Tabla 5-13). Existe una amplia dispersión de valores, en el rango desde casi cero en la estación fluviométrica Q12 (Río Ci-Aike antes frontera, en sector Continental Norte) hasta el máximo cercano a 0,16 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a en la estación fluviométrica Q16 (Río Caleta en Tierra Del Fuego, ubicada en la parte sur de esta isla).

En la Figura 5-41 se presentan gráficamente las magnitudes de producción específica estimadas a partir de la información de la Tabla 5-13. En este gráfico se descartaron las estaciones fluviométricas Q16, Q1 y Q8, por tener valores sustancialmente mayores,

dificultando su asociación con otras cuencas. La cuenca controlada en la estación Q15 no se asoció a ningún rango debido a que su magnitud está alejada de sus más próximas.

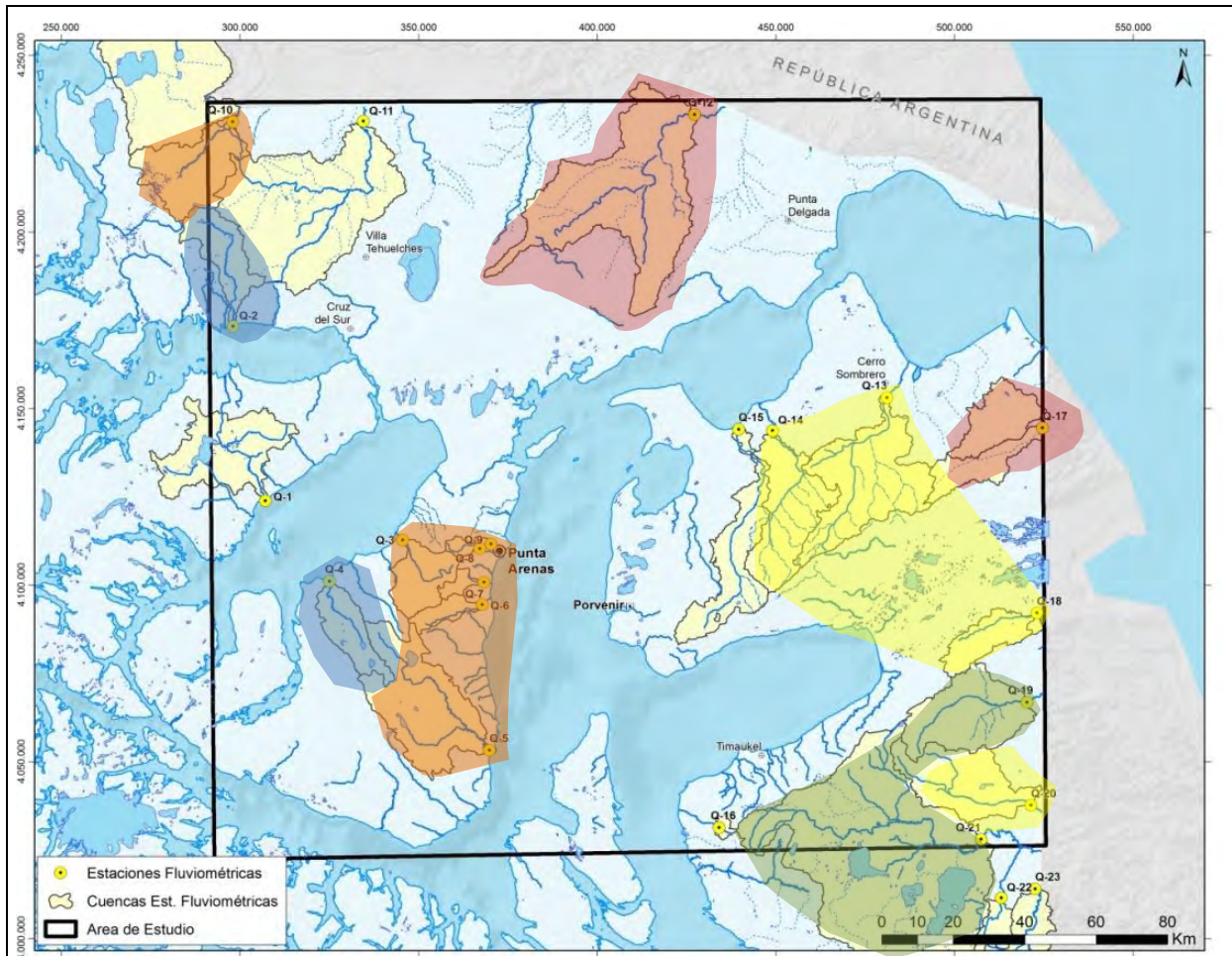


Figura 5-40: Agrupación de estaciones según similitudes en la producción específica de las cuencas con información promedio anual. Los colores representan áreas que pueden clasificarse en un mismo rango de magnitudes.

[Fuente: Elaboración propia.]



Tabla 5-13. Información para el cálculo de la producción específica.

<b>No.</b>	<b>Q medio anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área aportante (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Estaciones PP en área</b>	<b>Precipitación (mm/a)</b>	<b>Prod. Específica (L/s/Km<sup>2</sup>/mm/a)</b>
Q1	19,6	616,9	P4	315,4	0,101
Q2	7,9	306,7	P6	476,2	0,054
Q3	6,2	266,7	P16	617,2	0,038
Q4	10,6	258,2	P11	774,4	0,053
Q5	18,6	816	P11 (cabecera), P9, P10, P12 (desembocadura)	668,8	0,034
Q6	2,1	97,6	P16, P15, P11	591	0,036
Q8	0,9	34,8	P13	407,6	0,063
Q10	11,5	496,3	P1	738,1	0,031
Q11	14,3	1452,6	P19	738,1	0,013
Q12	0,3	1524,9	P8, P21, P22	446,7	0
Q13	1,5	822,9	P23	249	0,007
Q14	2,1	574,4	P24	334,6	0,011
Q15	3,2	527,65	P24	334,6	0,018
Q16	1,1	23,4	P28	298,2	0,157
Q17	0,1	234,9	P23	241,2	0,002
Q18	0,7	244,4	P29	284,8	0,01
Q19	4,5	595	P29	284,8	0,027
Q20	2,7	543	P30 (cabecera), P31, P32 (en la estación)	401,4	0,012
Q21	28,9	2904,3	P30 (cabecera), P31, P32 (en la estación)	401,4	0,025
Q23	7,4	436,1	P33	326,8	0,052

[Fuente: Elaboración propia.]

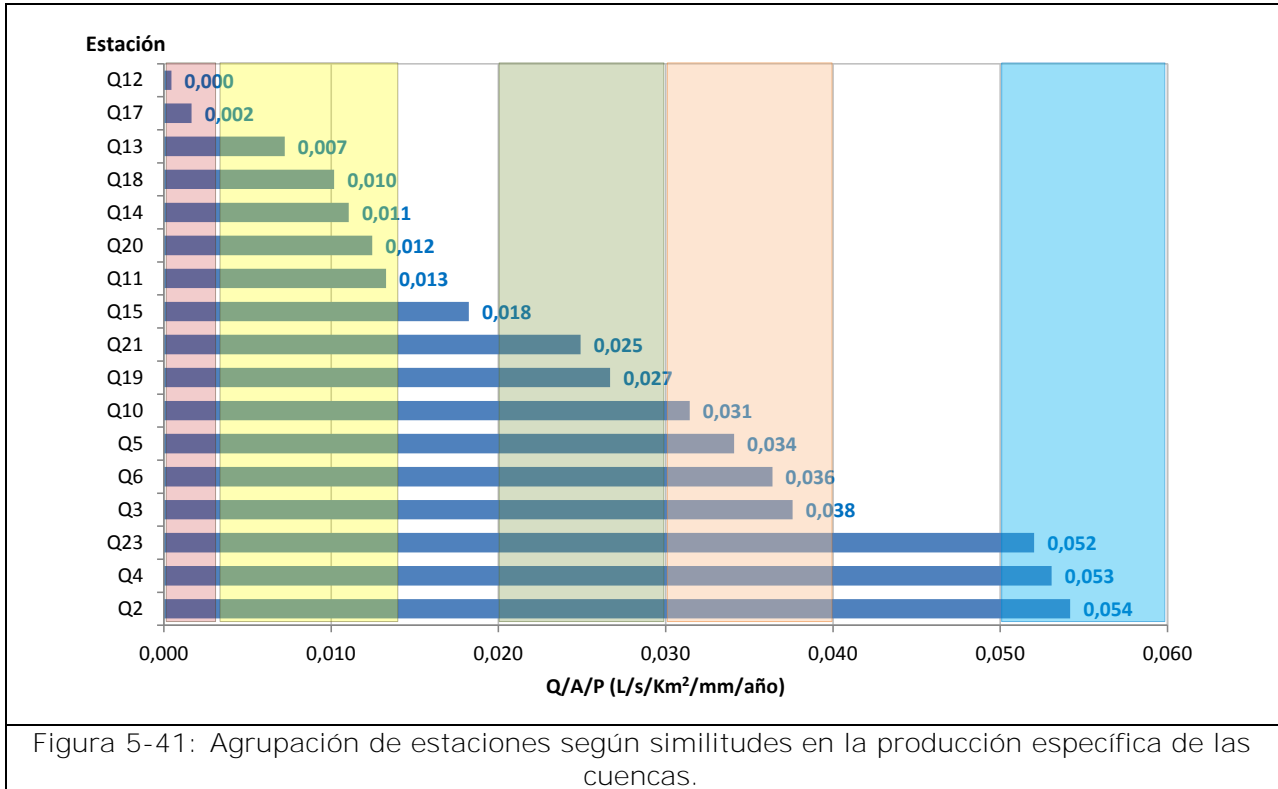


Figura 5-41: Agrupación de estaciones según similitudes en la producción específica de las cuencas.

[Fuente: Elaboración propia.]

Los rangos de producción específica en este gráfico son coherentes con aquellas presentadas en la Figura 5-40 y definen los valores en que se puede clasificar la producción calculada. Estos rangos se detallan en la Tabla 5-14 y su valor se puede utilizar para la estimación del caudal medio anual en zonas sin control fluviométrico.

Tabla 5-14: Información para el cálculo de la producción específica.

Rango prod. Específica (L/s/Km²/mm/año)	Estaciones fluviométricas
0,0 – 0,003	Q12, Q17
0,0031 – 0,014	Q13, Q18, Q14, Q20, Q11
0,020 – 0,030	Q21, Q19
0,0301 – 0,040	Q10, Q5, Q6, Q3
0,050 – 0,060	Q23, Q4, Q2

[Fuente: Elaboración propia.]

### 5.3.9 Evaluación de la disponibilidad hídrica

A partir del análisis y la caracterización hidrológica del sistema, se generó una metodología tendiente a evaluar y cuantificar, tanto los escurrimientos superficiales en cuencas sin control fluviométrico, y el agua disponible para infiltrar hacia los acuíferos subterráneos del sistema.

Dada la variabilidad y heterogeneidad del sistema hidrológico, la definición de la disponibilidad hídrica superficial es bastante compleja, y por lo tanto imprecisa.

Por esta razón es que, para la evaluación de la disponibilidad hídrica superficial, el análisis se basa en los registros de fluviométricos por ser la variable más consistente tanto en los registros individuales, como a escala regional. De esta manera se cuenta con una estimación simplificada, pero basada en la variable de mayor confiabilidad. Además esta variable es una respuesta a la ocurrencia de eventos de precipitación por lo que indirectamente están también incluidos en el análisis; sobre todo lo eventos de precipitación sólida, que dado lo acotado de los registros, tanto en el espacio como en el tiempo, es una variable determinante pero de cuantificación compleja. De todas maneras los registros de precipitación se incluyen como complemento a este análisis.

En este capítulo se describe el análisis de los datos hidrológicos para la zona de estudio presentados en las secciones anteriores, que se ha orientado a dos objetivos:

1. Evaluación hídrica de superficie disponible para infiltrar al sistema subterráneo.
2. Estimación de caudales en cuencas no monitoreadas.

El análisis de datos se basó en la esorrentía superficial, complementado con las precipitaciones, a dos escalas temporales: mensual y anual.

La estimación de la disponibilidad hídrica para infiltrar a los acuíferos se definió a partir del flujo base de los cursos superficiales, obtenido a través de un análisis probabilístico de los valores observados en las estaciones de aforo y sus patrones de homogeneidad espacial. Este flujo base representa el equilibrio entre las entradas y las salidas de agua en cada cuenca, lo que se corresponde con la recarga.

La estimación de caudales en cuencas sin control fluviométrico se realizará utilizando los resultados de producción específica promedio anual.

#### 5.3.9.1 Disponibilidad hídrica para infiltración

La estimación de agua disponible para infiltrar a los acuíferos se realizó asumiendo que existe un equilibrio entre sus entradas y salidas de agua. Las entradas están representadas por la infiltración directa de las precipitaciones, la infiltración de agua desde los cursos superficiales cuando éstos se encuentran en crecida o en máximos estacionales (Figura 5-42) y las percolaciones que producen algunos usos de carácter antrópico, como pueden ser los excesos de riego o la red de agua potable.

Las salidas quedan descritas por las extracciones, las descargas de los acuíferos a los cursos superficiales en periodos de recesión y la evaporación desde napas. Se ha considerado que

no existe conexión entre acuíferos, de manera que las salidas se equilibran con las entradas en cada unidad hidrológica.

En zonas en que los acuíferos alimentan a los ríos durante una parte importante del año y la evaporación desde napas no es un factor relevante, se puede considerar que el flujo base aportado a los cursos superficiales es un reflejo de la recarga (Figura 5-42). Este flujo base es variable en el tiempo, tanto a lo largo del año como interanualmente (Figura 5-43): en ciertos meses del año el flujo será mayor que en otros, lo mismo que en épocas húmedas será mayor que en sequías.

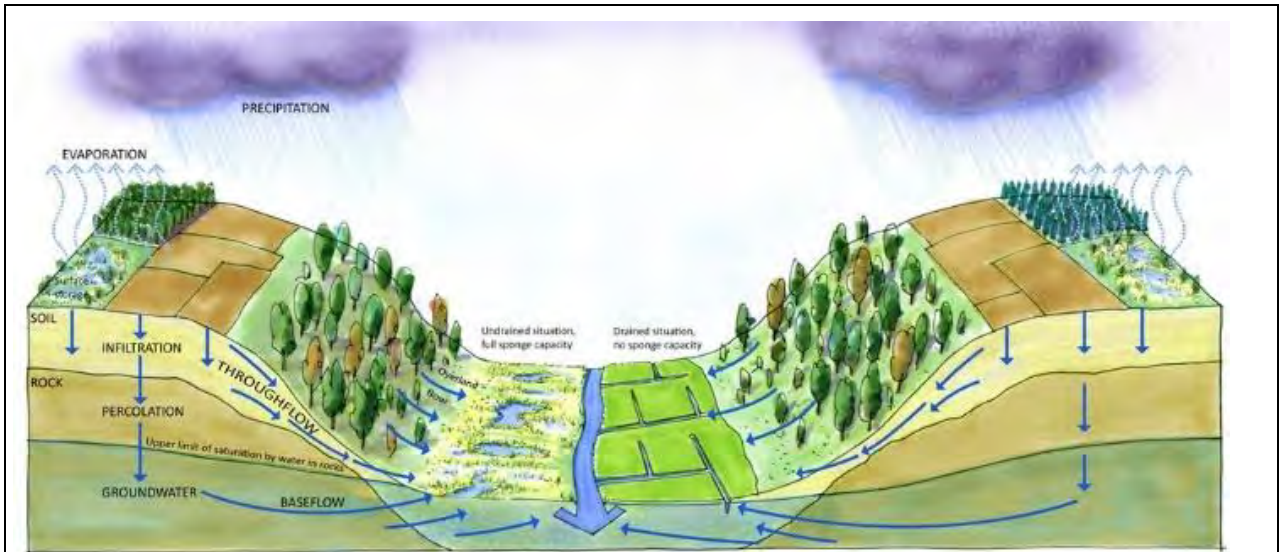


Figura 5-42: Esquema de la infiltración, escorrentía subterránea y flujo base aportado a zonas húmedas y cursos superficiales.

[Fuente: <http://www.stroming.nl/>]

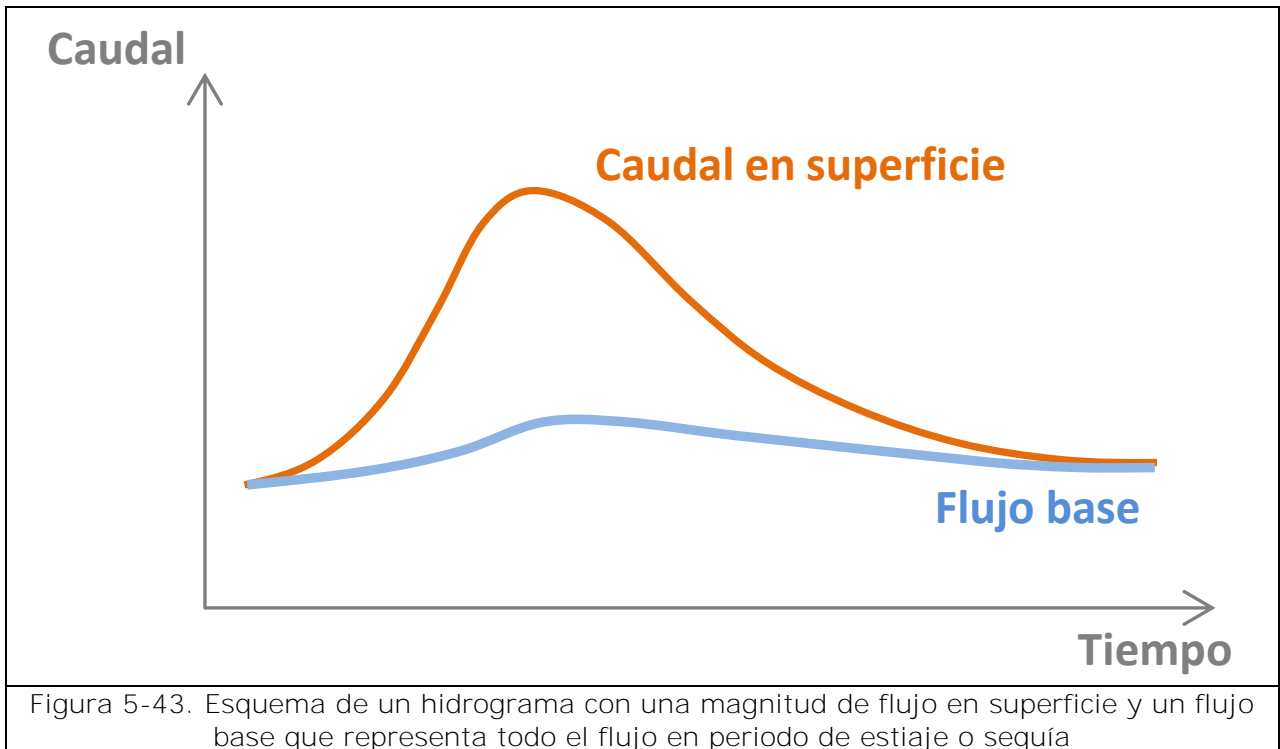


Figura 5-43. Esquema de un hidrograma con una magnitud de flujo en superficie y un flujo base que representa todo el flujo en periodo de estiaje o sequía

[Fuente: Elaboración propia.]

Para la estimación se utilizaron valores de las series mensuales promedio, que a su vez permiten calcular el valor de un año promedio en cada cuenca. Las series mensuales se obtuvieron aplicando un modelo probabilístico a un conjunto de datos regionalizados. Estos datos corresponden a las series de caudal adimensional (caudal medio mensual dividido por el caudal medio anual) de los grupos identificados en el apartado precedente.

El modelo aplicado correspondió a la función de Valores Extremos tipo III (VE tipo III), diseñada para tratar información de mínimos. De este modo, a partir de la información regionalizada, se escogieron los mínimos de cada mes para el conjunto de estaciones que conformaban cada grupo (Tabla 5-15). A partir de los parámetros estimados con el modelo VE tipo III se calcularon los caudales  $Q_{85}$  (85% de probabilidad de excedencia) y  $Q_{95}$  (95% de probabilidad de excedencia), que definen un intervalo de confianza para la infiltración.

Tabla 5-15: Estaciones fluviométricas por grupo para el ajuste del modelo VE tipo III a sus mínimos mensuales adimensionalizados.

Grupo	Nº Estación	Nombre Estación
<b>Continental Norte, Sur e Isla Riesco</b>	Q1	Río Grande en isla Riesco
	Q3	Río Grande en seno Otway
	Q4	Río Calete en seno Otway
	Q5	Río San Juan en desembocadura
	Q6	Río Tres Brazos antes Bt. Sendos
	Q8	Río las Minas en Bt. Sendos
	Q10	Río Rubens en ruta N 9
	Q11	Río Penitente en Morro Chico
<b>Tierra del Fuego Norte</b>	Q13	Río Side en cerro Sombrero
	Q14	Río Oscar en bahía San Felipe
	Q15	Río Oro en bahía San Felipe
	Q17	Río Cullen en frontera
	Q18	Río San Martín en San Sebastián
	Q19	Río Chico en ruta Y-895
	Q20	Río Herminita en ruta Y-895
<b>Tierra del Fuego Sur</b>	Q16	Río Caleta en Tierra Del Fuego
	Q21	Río Grande en Tierra del Fuego
	Q22	Río Catalina en Pampa Guanacos
	Q23	Río Rasmussen en frontera (estancia Vicuña)

[Fuente: Elaboración propia.]

### **Función de Valores Extremos tipo III**

El modelo VE tipo III, también conocido como modelo Weibull, es ampliamente utilizado en hidrología para análisis de frecuencia de precipitaciones o caudales mínimos. La probabilidad de excedencia de un caudal  $x$ ,  $P(x < x_p)$ , se calcula con la siguiente expresión:

$$P(x < x_p) = 1 - F(x_p)$$

Siendo  $F(x_p)$  es la probabilidad de no excedencia, que se obtiene ajustando a un modelo de distribución continua a la serie de datos. Para el modelo seleccionado, la expresión es:

$$F(x_p) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x_p}{\beta}\right)^\alpha\right)$$

, donde:

$\alpha$ : parámetro de forma (mayor que cero)

$\beta$ : parámetro de escala (mayor que cero)

Las estimación de estos parámetros se hace con las siguientes expresiones:

$$g(x) = \frac{\Gamma(1+2/\alpha)}{\Gamma^2(1+1/\alpha)} - 1 - C_v^2 = 0 \quad \text{con} \quad C_v = \frac{\sigma}{\mu}$$

, donde  $\mu$  es la media y  $\sigma$  la desviación estándar de la muestra. En esta expresión, el valor de  $\alpha$  se puede despejar por iteración, o bien usando un optimizador que haga cero el valor de  $g(x)$ . Para  $\beta$  la expresión queda:

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\Gamma(1+1/\alpha)}$$

Con  $\bar{x}$  el valor promedio de la serie, de longitud  $n$ . La probabilidad de excedencia empírica de cada dato de la serie ( $p_j$ ) se calcula con el criterio de Weibull, en función de la posición de ploteo  $j$ :

$$p_j = \frac{j}{n+1}$$

El valor asignado a dicha probabilidad, se obtiene de despejar  $x_p$  en la expresión de  $F(x_p)$ :

$$x_p = \beta \cdot (-\ln p_j)^{1/\alpha}$$

### Estimación de infiltración al acuífero

Con la metodología descrita, se estimaron los flujos bases mensuales para cada estación, para una probabilidad de excedencia del 85% (Q85%) y 95% (Q95%). Estos valores se presentan en las Tabla 5-16, Tabla 5-17,

Tabla 5-18.

Tabla 5-16: Flujo base para 85% y 95% de probabilidad de excedencia, para estaciones del grupo "Continental Norte, Sur e Isla Riesco" (m<sup>3</sup>/s).

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Q85%	Q1	4,1	2,6	3,5	5,6	5,1	4,2	3,6	3,6	7,2	4,3	7,9	6,0
	Q3	0,3	0,2	0,6	2,0	1,5	1,8	1,0	1,4	4,2	2,0	1,4	0,7
	Q4	1,8	1,3	1,8	3,8	2,7	2,5	1,8	1,7	4,5	2,6	3,7	2,9
	Q5	2,3	1,6	2,3	5,4	4,5	4,9	4,8	3,9	9,3	5,5	5,7	4,1
	Q6	0,1	0,1	0,2	0,5	0,4	0,7	0,7	0,5	1,1	0,7	0,5	0,3
	Q8	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,1
	Q10	1,9	1,1	1,5	3,1	2,5	2,3	2,6	2,3	5,2	3,3	4,4	3,3
	Q11	1,5	1,0	1,3	2,4	2,5	2,8	3,5	3,6	7,7	5,6	5,4	2,9
Q95%	Q1	2,5	0,9	1,1	3,2	2,2	2,1	1,5	0,5	3,6	0,0	5,4	4,5
	Q3	0,2	0,1	0,2	1,2	0,6	0,9	0,4	0,2	2,1	0,0	1,0	0,6
	Q4	1,1	0,4	0,6	2,2	1,2	1,3	0,7	0,2	2,3	0,0	2,5	2,2
	Q5	1,4	0,5	0,7	3,0	1,9	2,4	2,0	0,6	4,7	0,0	3,9	3,1
	Q6	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,5	0,0	0,4	0,2
	Q8	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1
	Q10	1,2	0,4	0,5	1,8	1,1	1,1	1,1	0,3	2,7	0,0	3,0	2,5
	Q11	0,9	0,3	0,4	1,4	1,1	1,4	1,5	0,5	3,9	0,0	3,7	2,2

[Fuente: Elaboración propia.]

Tabla 5-17: Flujo base para 85% y 95% de probabilidad de excedencia, para estaciones del grupo "Tierra del Fuego Norte" (m<sup>3</sup>/s).

	Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q85%	Q13	0,3	0,2	0,4	0,5	0,5	0,8	1,1	1,0	0,9	0,5	0,3	0,3
	Q14	0,5	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,4	1,0	1,3	0,8	0,5	0,5
	Q15	0,7	0,5	0,9	1,1	1,3	1,7	2,1	1,4	1,9	1,4	0,8	0,8
	Q17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	Q18	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,5	0,2	0,1	0,1
	Q19	1,2	0,8	1,3	1,6	1,8	2,5	2,7	2,0	2,9	1,5	1,1	1,1
	Q20	0,7	0,4	0,5	0,8	0,9	0,9	1,8	1,6	2,0	0,8	0,6	0,6
Q95%	Q13	0,3	0,1	0,4	0,4	0,4	0,6	0,9	0,6	0,6	0,3	0,2	0,2
	Q14	0,3	0,1	0,4	0,5	0,6	0,8	1,1	0,6	0,9	0,5	0,3	0,4
	Q15	0,6	0,2	0,7	0,9	1,0	1,4	1,7	0,8	1,4	0,8	0,5	0,6
	Q17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Q18	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1
	Q19	0,9	0,4	1,1	1,3	1,4	2,0	2,1	1,2	2,1	0,9	0,7	0,8
	Q20	0,5	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	1,4	0,9	1,4	0,5	0,4	0,4

[Fuente: Elaboración propia.]

Tabla 5-18: Flujo base para 85% y 95% de probabilidad de excedencia, para estaciones del grupo "Tierra del Fuego Sur" (m<sup>3</sup>/s).

	Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q85%	Q16	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1
	Q21	2,2	1,8	1,6	2,5	3,8	4,1	4,6	5,0	6,5	6,9	4,9	3,2
	Q22	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,4	0,7	0,6	0,1	0,1
	Q23	0,4	0,4	0,5	0,8	0,8	1,1	0,9	1,0	2,0	2,4	1,1	0,6
Q95%	Q16	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
	Q21	1,6	1,3	1,2	1,9	2,8	3,0	3,4	3,7	4,8	5,1	3,6	2,4
	Q22	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,1	0,1
	Q23	0,3	0,3	0,4	0,6	0,6	0,8	0,7	0,8	1,5	1,7	0,8	0,4

[Fuente: Elaboración propia.]

A partir de los flujos bases mensuales estimados se calculó un flujo base medio anual y de esta manera se determinó la cantidad de agua superficial disponible para infiltrar al sistema subterráneo.

Para ellos se asociaron las estimaciones de recarga calculadas a partir de cada estación, a la unidades hidrogeológicas en la zona definidas por DGA/AC Consultores (1991). De esta manera se estima un rango de recarga para cada unidad, de manera de complementar la información existente del informe mencionado. Dado que en las unidades hidrogeológicas III, VI y VII no existen estaciones fluviométricas, no se estimó un valor de recarga para estas unidades. Los resultados se presentan en la Tabla 5-19.



Tabla 5-19: Estimación de recarga asociado a unidades hidrogeológicas.

Tipo	Estaciones	Cuenca aportante km <sup>2</sup>	Recarga m <sup>3</sup> /s		Recarga m/d		PP mm/año		%Rec/PP	
			mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
I	Q05	816,0	2,0	4,5	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$4,78 \cdot 10^{-4}$	417,5	853,6	11	27
	Q06	97,6	0,2	0,5	$1,80 \cdot 10^{-4}$	$4,22 \cdot 10^{-4}$				
	Q07	47,7	-	-						
	Q08	34,8	0,1	0,2	$2,06 \cdot 10^{-4}$	$4,92 \cdot 10^{-4}$				
II	Q03	266,7	0,6	1,4	$1,99 \cdot 10^{-4}$	$4,61 \cdot 10^{-4}$	417,5	853,6	11	26
VIII	Q15	527,6	0,9	1,2	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-4}$		385	14	19
IX	Q13	822,9	0,4	0,6	$4,26 \cdot 10^{-5}$	$5,93 \cdot 10^{-5}$		268,1	9	12
	Q14	574,4	0,6	0,8	$8,41 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$				
X	Q17	299,1	0,0	0,0	$5,83 \cdot 10^{-6}$	$8,14 \cdot 10^{-6}$	268,1	322,5	1	1
XI	Q18	244,4	0,2	0,2	$5,96 \cdot 10^{-5}$	$8,42 \cdot 10^{-5}$		314,2	7	10
IR*	Q01	616,9	2,63	4,81	$3,68 \cdot 10^{-4}$	$6,74 \cdot 10^{-4}$	315,4	509,8	26	78**

\* IR: Isla Riesco

\*\* Este valor resulta inusualmente alto, particularmente por la alta producción específica que se reporta en esta cuenca.

Además se estimó un porcentaje de recarga con respecto a las precipitaciones para cada unidad. Para definir las precipitaciones medias en cada unidad, se consideró la precipitación media anual considerando las estaciones que se encuentran en cada unidad.

Las recargas mínimas estimadas ocurren en la unidad X con valores entre  $5,83 \cdot 10^{-6}$  y  $8,14 \cdot 10^{-6}$  m/d, correspondiente al 1% del total de las precipitaciones. Las recargas máximas estimadas ocurren en la unidad IR (Isla Riesco) con valores entre  $3,68 \cdot 10^{-4}$  y  $6,74 \cdot 10^{-4}$  m/d, correspondiente al 26% a 78% del total de las precipitaciones. Estos valores anómalamente altos responden a la alta magnitud de la escorrentía anual en relación a las precipitaciones registradas en la cuenca.

Si bien los valores son variables, es una estimación que pretende complementar los valores de recarga estimados por DGA/AC Consultores (1991) y no tiene como fin la gestión de recursos hídricos superficiales o subterráneos a partir de esta estimación.

Para ello es necesario complementar otras técnicas no consideradas, para la estimación de variables de recarga con mayor precisión.

### 5.3.9.2 Estimación de caudales en cuencas sin control fluviométrico

La estimación de caudales en cuencas sin control fluviométrico se realizó utilizando los resultados de producción específica promedio anual, que fueron presentados en la sección 5.3.8. El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. En función del rango de producción específica en que se encuentre la cuenca sin control, se asigna un valor de producción promedio anual, coherente con el valor de producción en la o las cuencas vecinas. La asignación se realiza utilizando el valor medio de los rangos de la Tabla 5-14 o el valor de la cuenca más cercana.
2. Teniendo el valor de producción específica promedio anual ( $q_i$ ,  $L/s/Km^2/mm/año$ ), el caudal promedio anual ( $Q_i$ ,  $L/s$ ) se obtiene multiplicando dicho valor por el área de la cuenca ( $A_i$ ,  $Km^2$ ) y la precipitación promedio en ella ( $P_i$ ,  $mm/año$ ). Un valor de precipitación puede ser tomado de alguna estación representativa en el área. La expresión queda:

$$Q_i = q_i \cdot P_i \cdot A_i$$

El subíndice  $i$  representa a una cuenca sin aforos.

3. Los valores mensuales se generan multiplicando el caudal promedio anual del paso anterior por una serie adimensional, obtenida de la agrupación espacial de cuencas que seguían algún patrón de estacionalidad. Estos patrones se obtuvieron al comparar los caudales adimensionales, que resultan de dividir el caudal promedio de cada mes por su valor medio anual.

Para obtener una sola serie adimensional, se formó para cada uno de los 3 grupos una serie única con distribución uniforme, que varía entre el mínimo y el máximo de cada mes. Un esquema del rango de la función se presenta en la Figura 5-44.

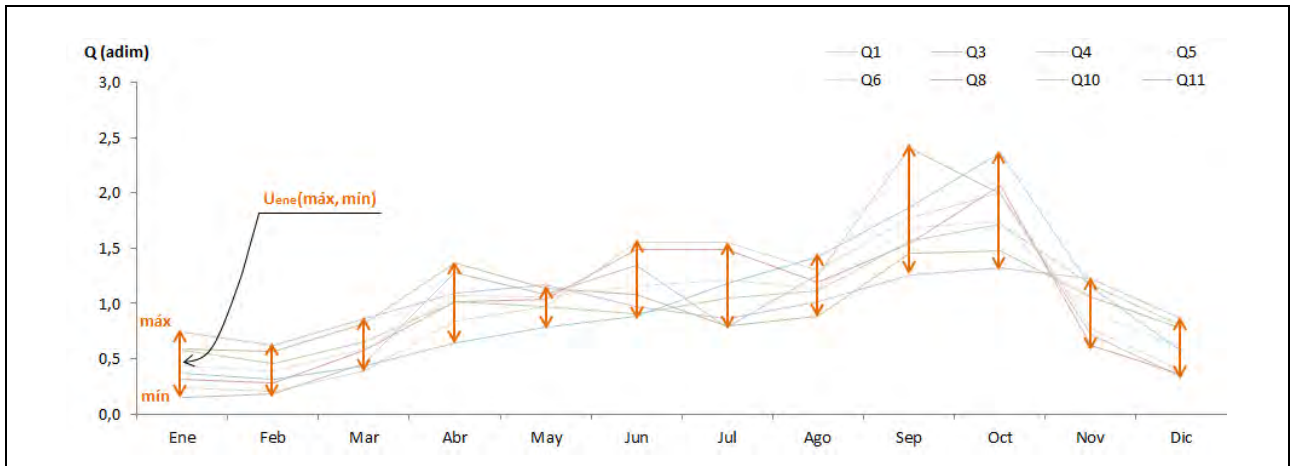


Figura 5-44: Caudales adimensionales e intervalo de máximo y mínimo en cada mes para el uso de la distribución uniforme en estaciones del grupo "Continental Norte, Sur e Isla Riesco".

[Fuente: Elaboración propia.]

La expresión para generar la función uniforme es:

$$U(\text{mín}, \text{máx}) = \text{mín} + (\text{máx} - \text{mín}) \cdot \text{rnd}(0,1),$$

donde  $\text{rnd}(0,1)$  es una función aleatoria que varía entre 0 y 1, con valores de igual probabilidad en ese intervalo.

El resultado de esta distribución puede o no tener un promedio anual unitario. Para corregir esta situación, se produjo una serie normalizada, que se obtiene de dividir los valores mensuales por el promedio anual de la serie de distribución uniforme:

$$U(\text{mín}, \text{máx})_{\text{normalizada}} = \frac{U(\text{mín}, \text{máx})}{\bar{U}(\text{mín}, \text{máx})}$$

Los valores resultantes para los 3 grupos se presentan en la Tabla 5-20 y la forma gráfica de ambas series en la Figura 5-45 a Figura 5-47.

Tabla 5-20. Valores utilizados por grupo para la serie con distribución uniforme y uniforme normalizada.

Grupo	Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Continental Norte, Sur e Isla Riesco	Mín	0,15	0,18	0,39	0,65	0,79	0,88	0,78	0,88	1,26	1,32	0,62	0,34	<b>Promedio</b> 1,05 1,00
	Máx	0,74	0,62	0,87	1,36	1,17	1,55	1,55	1,42	2,41	2,36	1,22	0,87	
	U(mín, máx)	0,31	0,27	0,69	1,17	1,03	1,27	1,29	1,21	2,00	1,87	0,94	0,57	
	U normalizada	0,29	0,25	0,66	1,12	0,97	1,21	1,22	1,15	1,90	1,78	0,90	0,55	
Tierra del Fuego Norte	Mín	0,27	0,24	0,28	0,40	0,61	0,94	1,55	1,43	1,63	0,85	0,43	0,34	<b>Promedio</b> 1,02 1,00
	Máx	0,62	0,63	0,60	0,76	0,93	1,43	2,08	3,32	2,15	1,27	0,75	0,62	
	U(mín, máx)	0,54	0,36	0,50	0,45	0,78	1,20	1,74	2,29	2,02	1,06	0,64	0,61	
	U normalizada	0,53	0,35	0,49	0,44	0,77	1,18	1,71	2,26	1,99	1,05	0,63	0,60	
Tierra del Fuego Sur	Mín	0,18	0,12	0,26	0,52	0,60	1,03	0,94	1,02	1,65	1,35	0,47	0,34	<b>Promedio</b> 1,05 1,00
	Máx	0,55	0,45	0,52	1,11	0,98	1,56	1,71	1,56	2,64	2,34	1,25	0,83	
	U(mín, máx)	0,51	0,40	0,42	0,66	0,70	1,47	1,12	1,55	2,05	1,72	1,24	0,73	
	U normalizada	0,49	0,39	0,40	0,63	0,67	1,41	1,07	1,48	1,95	1,64	1,18	0,69	

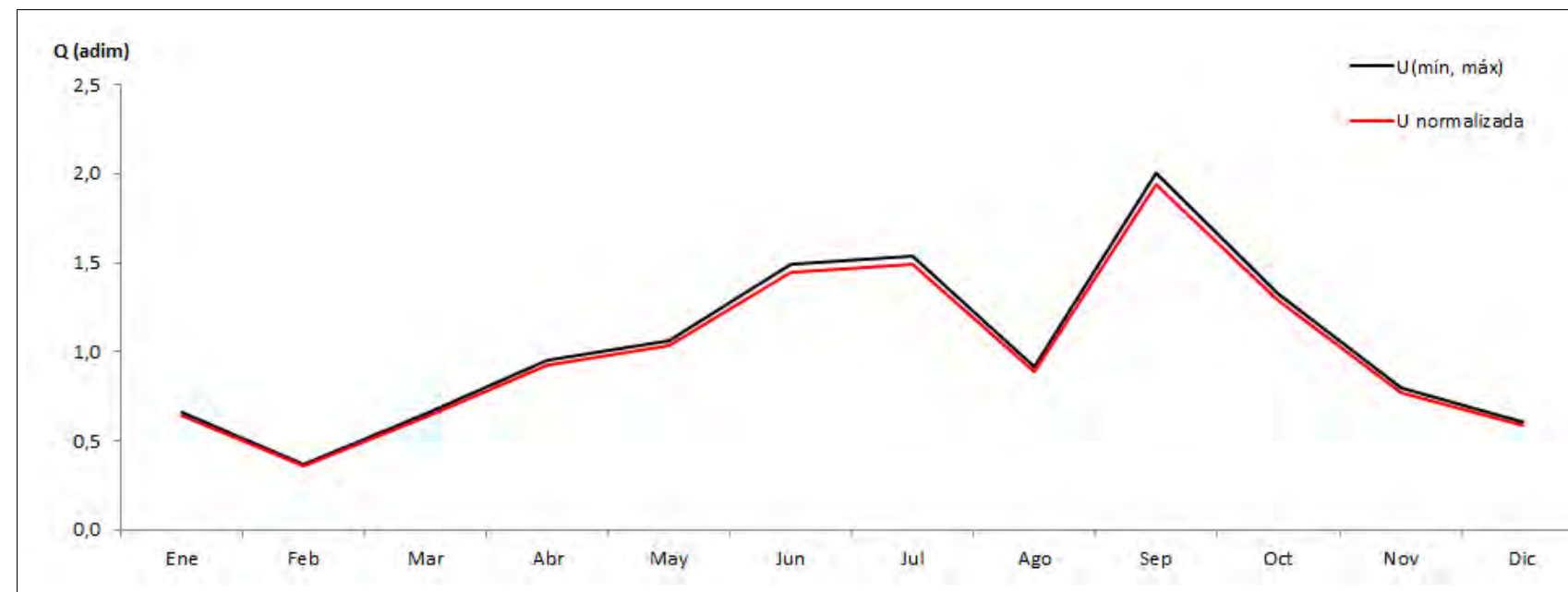


Figura 5-45. Series de caudales adimensionales obtenidas con la distribución uniforme en estaciones del grupo "Continental Norte, Sur e Isla Riesco".

[Fuente: Elaboración propia]

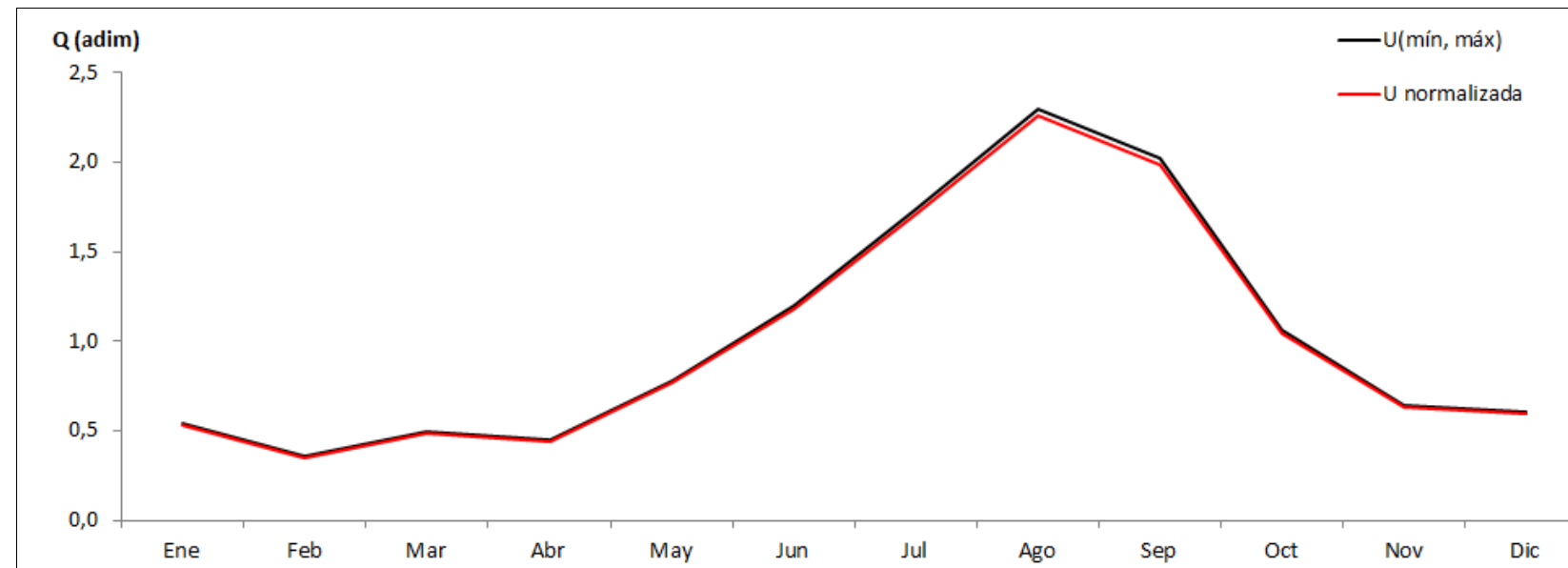


Figura 5-46. Series de caudales adimensionales obtenidas con la distribución uniforme en estaciones del grupo "Tierra del Fuego Norte"

[Fuente: Elaboración propia]

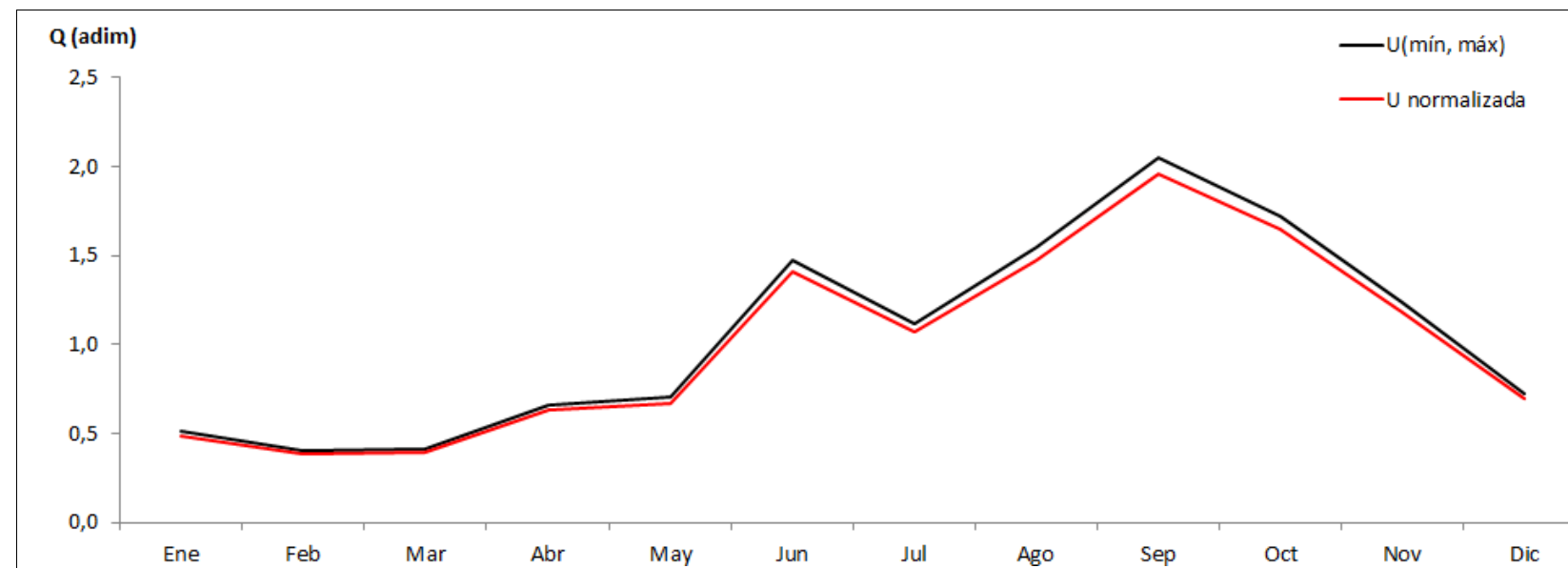


Figura 5-47. Series de caudales adimensionales obtenidas con la distribución uniforme en estaciones del grupo "Tierra del Fuego Sur".

[Fuente: Elaboración propia]

4. La serie completa de caudal para un cierto número de años se puede generar a partir de la expresión de Fiering, que considera la correlación temporal de los caudales, a través de la siguiente ecuación:

$$Q_j = \bar{Q}_j + \rho_j \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} (Q_{j-1} - \bar{Q}_{j-1}) + t \cdot \sigma_j \cdot \sqrt{1 - \rho_j^2}$$

, donde:

$Q_j$ : caudal del mes j [ $L^3/T$ ]

$\bar{Q}_j$ : caudal promedio del mes j [ $L^3/T$ ]

$\rho_j$ : correlación del mes j en función del mes j-1 [-]

$\sigma_j$ : desviación estándar del mes j [-]

$t$ : número aleatorio que sigue una distribución normal estándar (media cero y desviación unitaria).

Los valores de  $\bar{Q}_j$  son aquellos que se obtuvieron en el paso anterior, de multiplicar el caudal promedio anual por un valor adimensional para cada mes.

Los valores de  $\rho_j$  se consiguen de calcular el coeficiente de correlación para una serie que representa la zona en que se encuentra la cuenca, del mismo grupo con que se construyeron los caudales adimensionales. Esta serie representativa puede ser el promedio de los caudales en todas las estaciones del grupo o la estación más próxima a la cuenca sin información que se quiere completar, por ejemplo.

Esta secuencia sintética de caudales se basa en la teoría de los modelos autorregresivos (AR), que considera que la variable tiene una parte aleatoria, no arbitraria, sino que respeta ciertos parámetros estadísticos del pasado. En este caso, respeta los parámetros de una serie patrón que es la usada para la generación de datos. Entre estos estadísticos se incluye su estacionalidad (modelos periódicos).

Una de las ventajas principales de este procedimiento es que se pueden generar series sintéticas de información que tienen iguales probabilidades de ocurrencia. Esto es especialmente importante para efectos de la gestión del recurso.

### Ejemplo de aplicación

El método se aplicó a dos cuencas sin control fluviométrico ubicadas en el sector sur de las "Cuenclas Costeras entre Lag. Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes", que desembocan en el estrecho de Magallanes (Figura 5-48).

De acuerdo a la metodología definida, se partió identificando las cuencas vecinas con las que se asemeja su producción específica. En este caso se utilizó la cuenca del río San Juan, monitoreada en su desembocadura por la estación Q5 (Figura 5-26). La producción específica es de 0,035 L/s/Km<sup>2</sup>/mm/año. Con este valor más el área de las unidades hidrográficas y su precipitación se estimó el caudal medio anual (

Tabla 5-21). La información de precipitación utilizada correspondió a la estación "San Juan" (P10).

A partir de estos datos y los coeficientes del grupo “Continental Norte, Sur e Isla Riesco” en Tabla 5-20, se estimó el caudal medio para cada mes, resultando lo expuesto en la Tabla 5-22 y Figura 5-49.

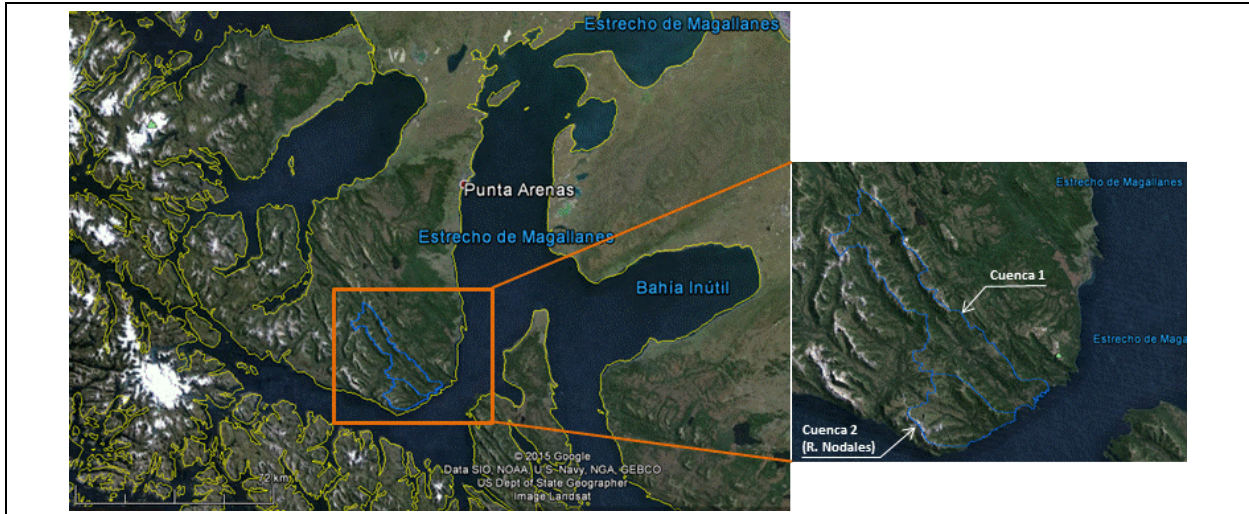


Figura 5-48: Ubicación de las cuencas sin control fluviométrico en que se estimó caudales

Tabla 5-21. Valores para el cálculo del caudal medio anual en cuencas sin control.

Cuenca	Paso 1	Paso 2		
	Q/A/P	A (km <sup>2</sup> )	P (mm/año)	Q anual (L/s)
Cuenca 1	0,035	255,653	669,5	5.991
Cuenca 2	0,035	98,466	669,5	2.307

Tabla 5-22. Valores para el cálculo del caudal medio mensual en cuencas sin control.

Cuenca	Paso 3											
	Caudal (L/s)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cuenca 1	1.737	1.498	3.954	6.709	5.811	7.249	7.309	6.889	11.382	10.663	5.392	3.295
Cuenca 2	669	577	1.523	2.584	2.238	2.792	2.815	2.653	4.384	4.107	2.077	1.269

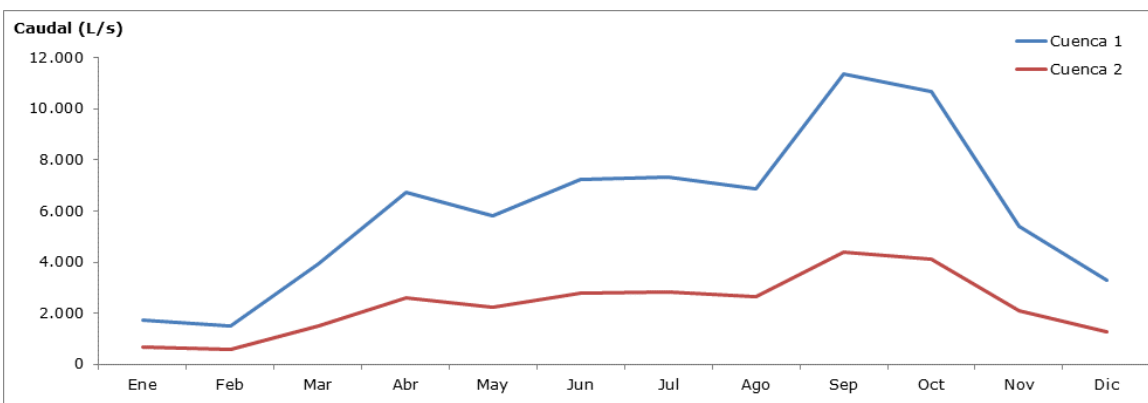


Figura 5-49: Caudales medios mensuales estimados en cuencas sin control

Para el último paso, en que se aplica el método de Fiering para estimación de caudales mensuales, se calcularon los coeficientes de regresión, desviaciones estándar y coeficiente de correlación para las series de datos (Tabla 5-23). En el caso del coeficiente de regresión y el de correlación, el cálculo se realiza con las matrices de datos del mes  $j$  y  $j-1$  (por ejemplo, enero con febrero, abril con mayo, y diciembre con enero).

El resultado obtenido para ambas cuencas se observa gráficamente en la Figura 5-50. En la cuenca 1 se obtienen máximos en el mes de septiembre, que se encuentran en el rango  $11,36 - 11,41 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los mínimos para la cuenca 1 se encuentran en el mes de febrero, que se sitúan en el rango  $1,48 - 1,51 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para la cuenca 2, los meses de máximos y mínimos coinciden con los de la cuenca 1, debido a que se utilizó la misma **serie patrón de la estación Q5 ("San Juan en Desembocadura")**. Los valores más altos se sitúan entre  $4,36$  y  $4,41 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que los más bajos están entre  $0,57$  y  $0,59 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tabla 5-23. Valores para el cálculo del caudal mensual en cuencas sin control usando el método de Fiering.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>Cuenca 1</b>	1.737	1.498	3.954	6.709	5.811	7.249	7.309	6.889	11.382	10.663	5.392	3.295
<b>Cuenca 2</b>	669	577	1.523	2.584	2.238	2.792	2.815	2.653	4.384	4.107	2.077	1.269
<b>Coef. Regresión</b>	0,35	0,12	-0,01	0,34	0,44	0,38	0,39	0,60	0,06	0,35	0,40	0,21
<b>Coef. Correl</b>	0,28	0,09	-0,01	0,42	0,39	0,38	0,53	0,44	0,06	0,57	0,48	0,36
<b>Desvest</b>	3,47	4,30	5,84	11,67	9,69	10,60	10,69	7,84	10,90	11,54	7,01	5,96



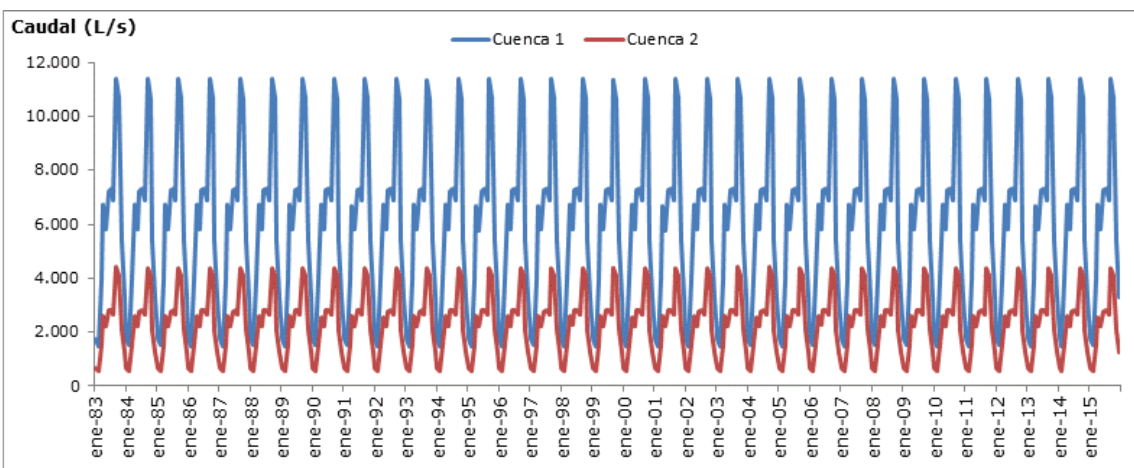


Figura 5-50: Caudales mensuales estimados en cuencas sin control utilizando el método de Fiering.

---

## 6 MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO

---

### 6.1 GEOLOGÍA REGIONAL

---

En la zona de estudio afloran principalmente los depósitos de relleno de la cuenca estratigráfica de Magallanes o Cuenca Austral. La cuenca estratigráfica de Magallanes está compuesta por una sucesión de rocas volcánicas, sedimentarias y volcano-sedimentarias, cuyas edades van desde el Jurásico Medio-Superior hasta el Cuaternario. El espesor de los depósitos de esta cuenca alcanza un máximo de 8.000 m en el sector de Península de Brunswick (Pittion y Arbe, 1999).

La cuenca de Magallanes se extiende hacia el norte al menos hasta los 49°S. Hacia el sur se encuentra limitada por el contacto entre las placas Sudamericana, Antártica y Scotia. Hacia el este, la cuenca de Magallanes se encuentra cerrada por el arco de Río Chico-Dungeness, en territorio argentino, mientras que al oeste limita con los Andes Patagónicos (Figura 6-1). Los Andes Patagónicos están compuestos por rocas del Batolito Patagónico y Complejo Metamórfico de los Andes Orientales (Ugalde, 2012).

El *Batolito Patagónico* corresponde a plutones félsicos y máficos con edades que van desde el Jurásico Superior hasta fines del Mioceno Medio (Bruce et al., 1991); por otra parte, el *Complejo Metamórfico de los Andes Orientales* corresponde a principalmente metarenitas y filitas que afloran inmediatamente al este del Batolito Patagónico, las que se encuentran intruídas por este último. Se interpreta que la depositación y metamorfismo de esta unidad habrían ocurrido durante el Paleozoico medio y Paleozoico tardío (Thomson y Hervé, 2002).

Las unidades geológicas que se reconocen en la cuenca de Magallanes pueden ser divididas principalmente en basamento y relleno sedimentario. El basamento sobre el cual se deposita el relleno de la cuenca de Magallanes corresponde principalmente a la Formación Tobífera y sus equivalentes. La *Formación Tobífera* sobreyace en discordancia al Complejo Metamórfico de los Andes Orientales y está formada por depósitos volcánicos riolíticos con intercalaciones de lutitas, asignados al Jurásico Tardío. Esta unidad posee un espesor de más de 1000 m. Estas rocas se habrían depositado durante una etapa de extensión o rift (Charrier et al., 2007) (Figura 6-2).

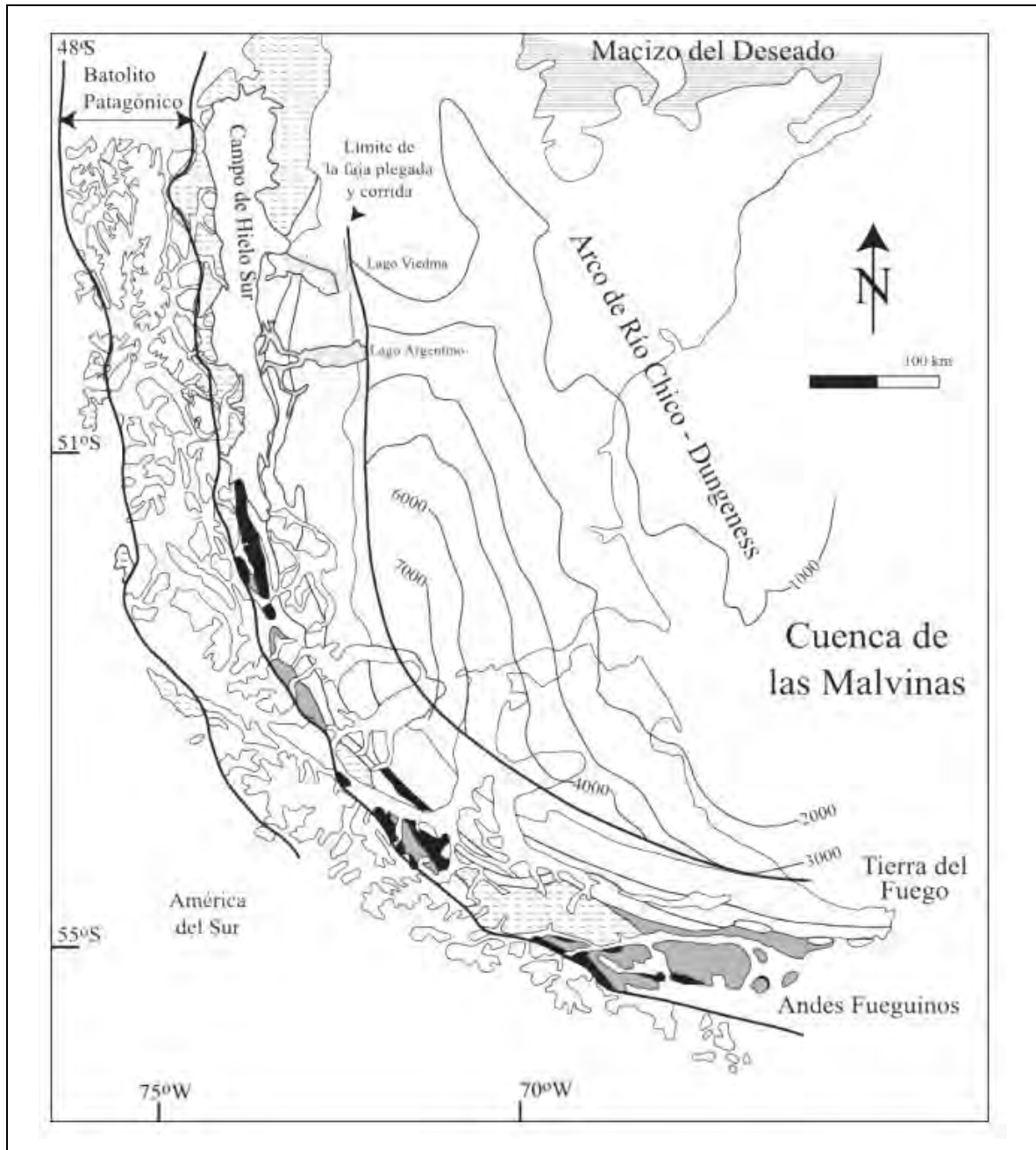


Figura 6-1. Mapa simplificado de la cuenca estratigráfica de Magallanes. Las isolíneas, en metros, muestran el espesor del relleno sedimentario de la cuenca (Ugalde, 2014).

Por otro lado, el relleno de la cuenca de Magallanes se puede separar en 2 grupos, asociados a distintas etapas de la evolución tectónica de la cuenca. Éstas corresponden a los depósitos asociados a subsidencia termal del Cretácico inferior y a los depósitos

asociados a la subsidencia flexural del Cretácico superior-Cenozoico (Charrier et al., 2007) (Tabla 6-2). Estos se describen a continuación, de más antiguo a más reciente. Los nombres de las formaciones descritas corresponden a los nombres de las formaciones que afloran en la zona principal de producción petrolera (plataforma Springhill), donde existe mayor conocimiento de la estratigrafía. Estas formaciones se correlacionan con formaciones coetáneas en las otras zonas de la cuenca.

### **Depósitos asociados a subsidencia termal del Cretácico inferior**

Durante la etapa de subsidencia termal se depositaron las areniscas marinas de la Formación Springhill, las cuales son sobreyacidas por los Estratos con Favrella, a su vez sobreyacidos por la Lutitas con Phthanitas y la Formación Margas (Peña, 2009) (Figura 6-2 y Figura 6-3). Estas formaciones se describen a continuación.

- **Formación Springhill:** corresponde a areniscas y lutitas marinas (Cecioni et al., 1955) que se depositan en discordancia sobre la Formación Tobífera. Éstas alcanzan un espesor máximo de 130 m. De acuerdo a la macrofauna identificada en territorio chileno se acepta una edad titoniana-valanginiana para estos depósitos (Riccardi, 1976).
- **Formación Estratos con Favrella:** corresponde a lutitas con intercalaciones de calizas ricas en amonites (Cecioni, 1955). Estas rocas se depositan sobre la Formación Springhill y, en parte, engranan lateralmente con la Formación Springhill. La Formación Estratos con Favrella posee un espesor entre 10 y 240 m. Su edad, en base a fauna marina, se interpreta como valanginiana-hauteriviana (González et al., 1965).
- **Formación Lutitas con Phthanitas:** corresponde a arcillolitas grises cuyo espesor varía entre 70 y 170 m (Mordojovich, 1951). Esta unidad se deposita sobre la Formación Estratos con Favrella. En base a una abundante microfauna se le atribuye una edad barremiana-aptiana (González, 1965).
- **Formación Margas:** corresponde a margas silíceas y arcillolitas calcáreas con espesor entre 60 y 130 m que se depositan sobre la Formación Lutitas con Phthanitas (Thomas, 1949). En base a una rica microfauna, se le atribuye una edad aptiana-albiana (Cecioni, 1995).

### **Depósitos asociados a la subsidencia flexural del Cretácico superior-Cenozoico**

Durante la etapa de inversión de la cuenca se habría producido una subsidencia flexural que habría generado el espacio para la depositación de las siguientes unidades (de más antigua a más reciente): Lutitas Gris Verdosas, Lutitas Arenosas, Zona Glauconítica, Grupo Bahía Inútil, Areniscas Arcillosas, Formación Brush Lake, Formación Filaret, Formación Palomares y cubierta glacial (Peña, 2009) (Figura 6-2 y Figura 6-3). Estas formaciones se describen a continuación.

- **Lutitas Gris Verdosas:** corresponden a arcillolitas gris verdosas y gris medio, con intercalaciones calcáreas que se depositan en discordancia sobre la Formación Margas. Su espesor varía entre los 270 y 400 m. En base a su contenido macro y microfaunal se le asigna una edad albiana-santoniana (González, 1965).
- **Lutitas Arenosas:** corresponden a arcillolitas glauconíticas de color gris medio, limosas en su parte superior que se depositan concordantemente sobre las Lutitas Gris Verdosas. Su espesor varía entre 50 y 180 m (Mordojovich, 1951). En base a la microfauna se le asigna una edad campaniana-maastrichtiana (González, 1965; Natland et al., 1974; Rodgers, 1979).
- **Zona Glauconítica:** corresponde a areniscas finas, limolitas y arcillolitas de color gris medio, muy glauconíticas con abundante microfauna de foraminíferos (Mordojovich, 1951), que se depositan en discordancia angular y de erosión sobre las Lutitas Arenosas. Su espesor varía entre los 100 m y 330 m (González, 1965). Se le atribuye una edad maastrichtiana tardía-eocena media (Cañon y Ernst, 1975).
- **Grupo Bahía Inútil:** corresponde a arcillolitas, con intercalaciones de limolitas y de areniscas arcillosas con gránulos de rocas ígneas y de arcillolitas cretácicas (González, 1965). Esta unidad se deposita concordantemente sobre la Zona Glauconítica y alcanzaría en superficie un espesor entre 50 y 200 m. En base a contenido faunístico se le atribuye una edad eocena tardía-oligocena (González, 1965).
- **Areniscas Arcillosas:** corresponden a areniscas, con abundante cemento arcilloso, glauconítico con gránulos de cuarzo, rocas ígneas y arcillolitas, con algunas intercalaciones de arcillolitas (Mordojovich, 1951). Las Areniscas Arcillosas se depositan concordantemente sobre el Grupo Bahía Inútil. El espesor de esta unidad varía entre los 100 y 340 m y su edad en base a microfauna se asigna al Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (González, 1965).
- **Formación Brush Lake:** corresponde a lutitas con intercalaciones de areniscas y calizas muy fosilíferas hacia el techo, con un espesor variable entre los 80 y 680 m (Barwick, 1955). Se deposita en discordancia sobre las Areniscas Arcillosas. En base a contenido de microfauna se le asigna una edad miocena media a tardía (Natland et al., 1974).
- **Formación Filaret:** Compuesta por arcillolitas, areniscas, y areniscas conglomeráticas, con intercalaciones de mantos de carbón y niveles coquinoideos de moluscos y gastrópodos. La Formación Filaret sobreyace en concordancia a la Formación Brush Lake. Su espesor varía entre los 260 y 400 metros. En base a su contenido faunístico se le asigna una edad miocena tardía (González, 1965). Las areniscas, localizadas hacia el techo de esta formación, han sido reconocidas sólo en Tierra del Fuego (DGA/AC Consultores, 1991). Su ambiente deposicional se ha interpretado como continental litoral y de plataforma marina somera.
- **Formación Palomares:** Corresponde a tobas, brechas volcánicas, y cenizas hacia el techo de la formación, y conglomerados y areniscas hacia su base, que se depositan en discordancia sobre la Formación Filaret. Su espesor varía entre 260 y 400 metros, aunque los estratos de areniscas y conglomerados no superan los 20 m. Se le ha asignado una edad Mioceno superior - Plioceno inferior (González,

1953). Su ambiente deposicional se ha interpretado como continental, en planicie aluvial y sistemas deltaicos intercalados con flujos volcánicos y caída de piroclastos.

- **Depósitos fluvioglaciales:** corresponden a una extensa cubierta de morrenas y sedimentos glaciolacustres y fluvioglaciales que abarca una gran parte de la Cuenca de Magallanes (Peña, 2009). Se han interpretado como sedimentos depositados de morrenas y que han sido retrabajados por los sistemas fluviales modernos. Esta unidad se deposita concordantemente sobre la Formación Palomares. Se le asigna una edad Pleistoceno - Holoceno.

Las unidades descritas tienen una distribución superficial que está descrita por el mapa geológico a escala 1:1.000.000 del Sernageomin, el que se muestra en la Figura 6-4.

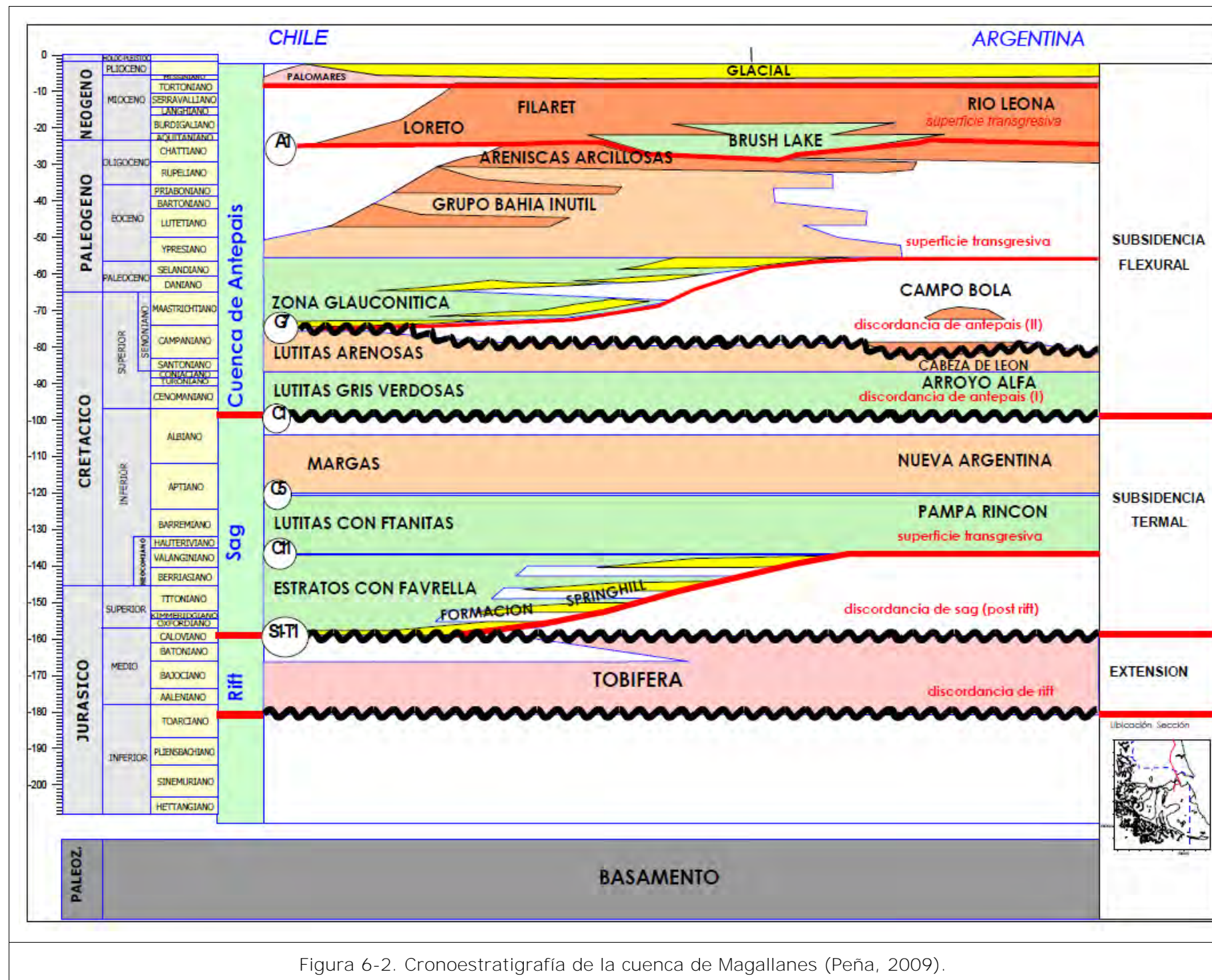


Figura 6-2. Cronoestratigrafía de la cuenca de Magallanes (Peña, 2009).

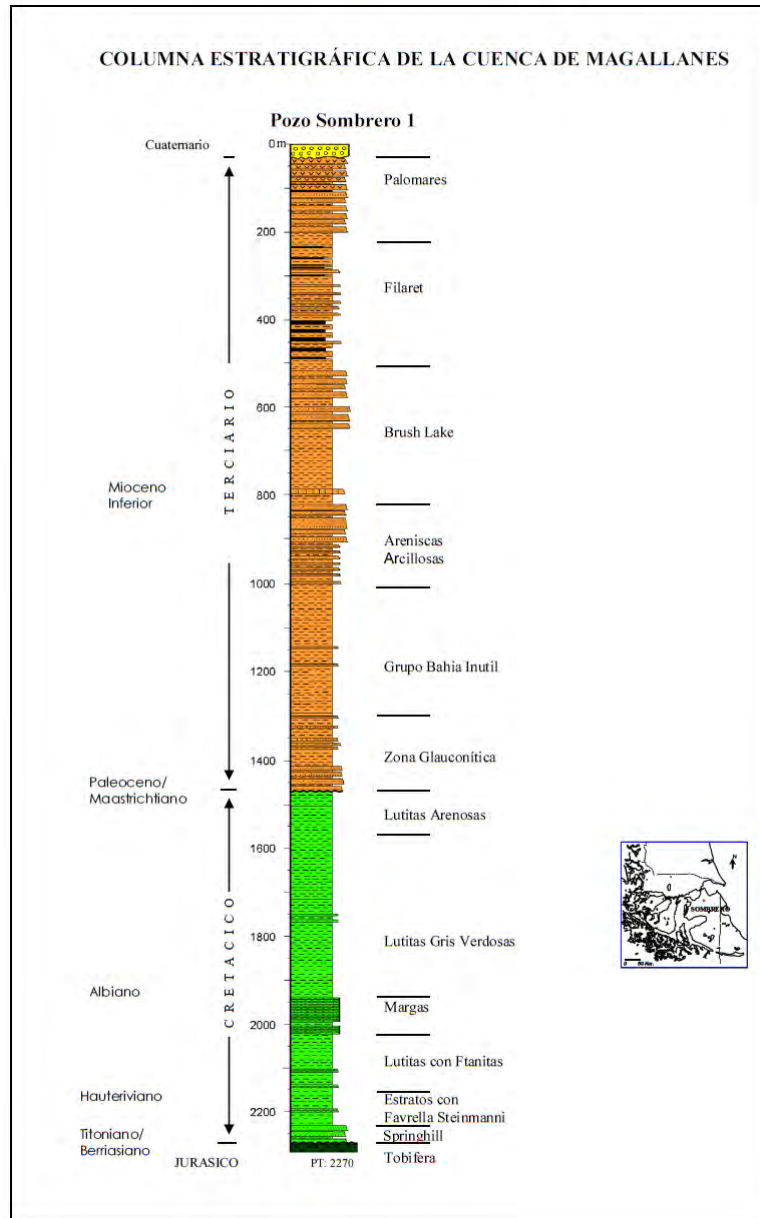


Figura 6-3. Cronoestratigrafía de la cuenca de Magallanes (Peña, 2009).



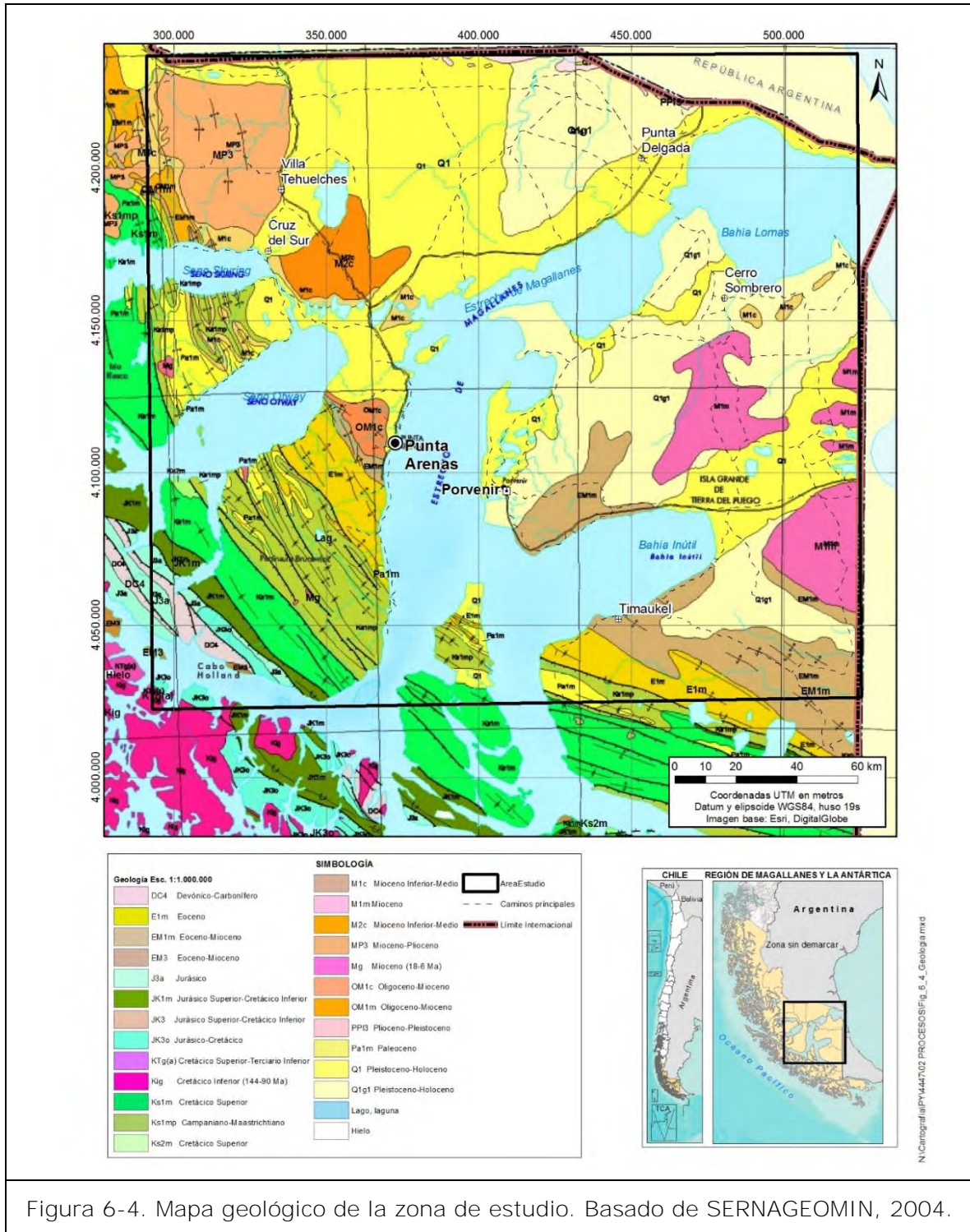


Figura 6-4. Mapa geológico de la zona de estudio. Basado de SERNAGEOMIN, 2004.

---

## 6.2 GEOLOGÍA LOCAL

La información base de la geología local superficial se obtuvo a partir de la carta geológica de Sernageomin (2004), de DGA/AC Consultores (1991), y de imágenes satelitales de Google Earth. En el área de estudio se observan gran cantidad de unidades geológicas (Figura 6-3, Figura 6-4); sin embargo, según los objetivos planteados para este proyecto, las unidades geológicas de interés corresponden a los depósitos sedimentarios del Pleistoceno - Holoceno (depósitos fluvioglaciares), y las Formaciones Filaret (Mioceno superior) y Palomares (Mioceno superior - Plioceno inferior). Estas unidades corresponden a las más recientes (Figura 6-3), y han sido descritas por la DGA y AC Consultores en la evaluación de los recursos hídricos de la región el año 1991. La Figura 6-5 muestra el mapa superficial del contacto roca-relleno de DGA/AC Consultores (1991).

De las tres unidades nombradas anteriormente, la unidad de depósitos fluvioglaciares es la de mayor interés, dado su uso actual. Según indican los resultados del catastro, los pozos particulares en esta zona estarían perforados en esta unidad. Para la interpretación de la geología de subsuperficie se cuenta con una base de datos de estratigrafía de pozos y geofísica. Éstas se describen a continuación:

### 6.2.1 Estratigrafía de pozos

La información de estratigrafía de pozos proviene de 3 fuentes: pozos de exploración petrolera - gasífera de ENAP (Figura 6-6), pozos particulares catastrados en este trabajo (Figura 6-7), y 7 piezómetros de la Mina Invierno en Isla Riesco (Figura 6-6). La información litológica es limitada y corresponde principalmente a una base de datos con la profundidad de la base de la unidad depósitos fluvioglaciares para los pozos de ENAP (**Anexo C**) y profundidad de pozos, para los pozos particulares catastrados. Para la Isla Riesco los piezómetros presentan mayor información granulométrica dentro de los depósitos fluvioglaciares; sin embargo, ellos se concentran en un sector de la isla, por lo que no es posible establecer alguna continuidad lateral de dichos estratos hacia las zonas restantes de ésta.

Los antecedentes de ENAP corresponden a 2.223 pozos, los que se encuentran distribuidos principalmente en la isla de Tierra del Fuego y en el área continental al norte de ésta, como se aprecia en la Figura 6-6. Según los datos de ENAP, el espesor de la unidad depósitos fluvioglaciares se encuentra en un rango entre 1 y 228 m, con un promedio de 77 m.

Por otro lado, los antecedentes recopilados durante el catastro corresponden a 324 pozos particulares, de los cuales 137 cuentan con información de profundidad, sin información estratigráfica. Los pozos catastrados con información de profundidad se muestran en la Figura 6-7. Estos pozos tienen un mínimo de 0,5 m y un máximo de 123 m de profundidad, con un promedio de 17,4 m y una mediana de 5 m, de lo que se infiere que la gran mayoría de los pozos posee profundidades someras.

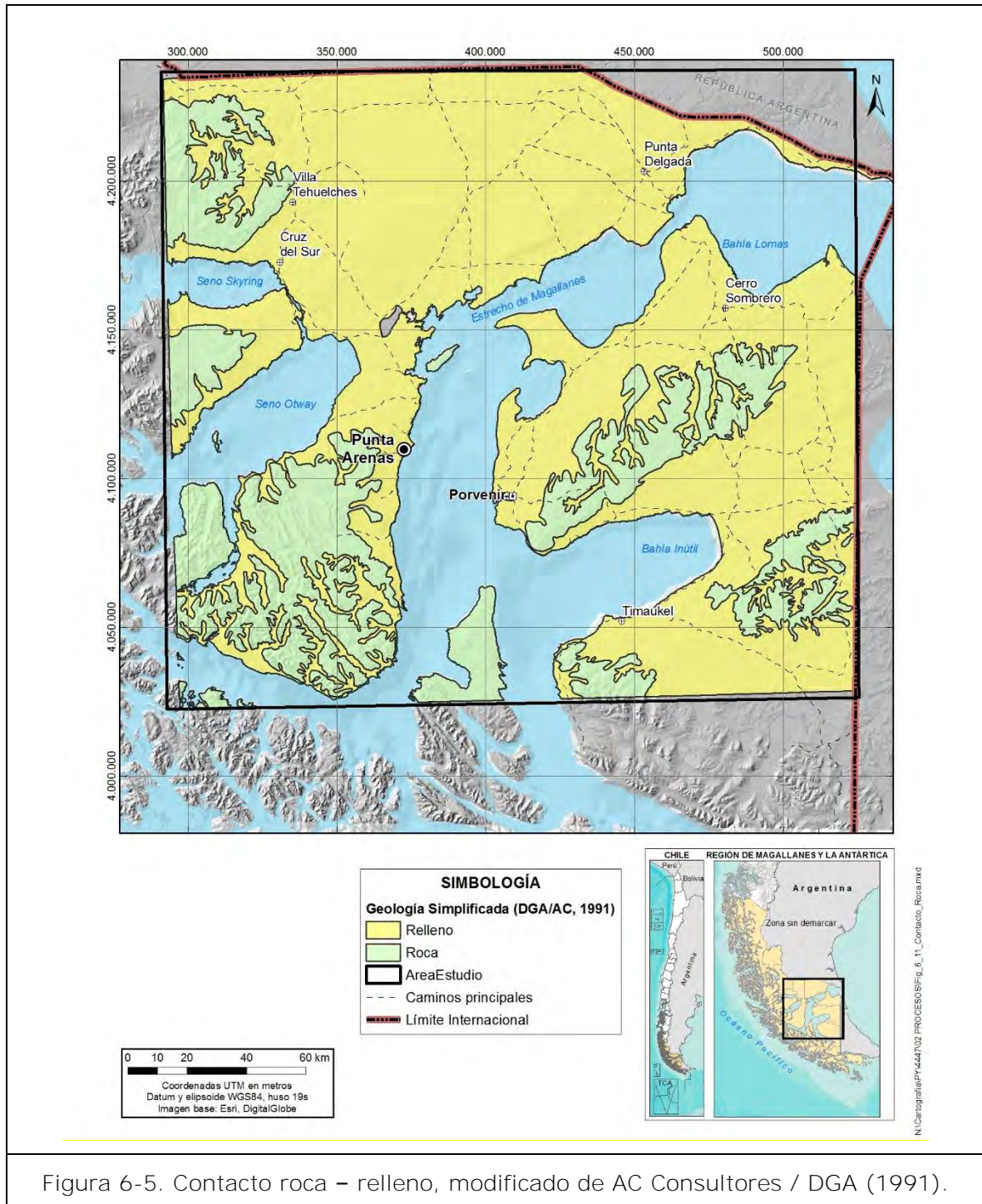
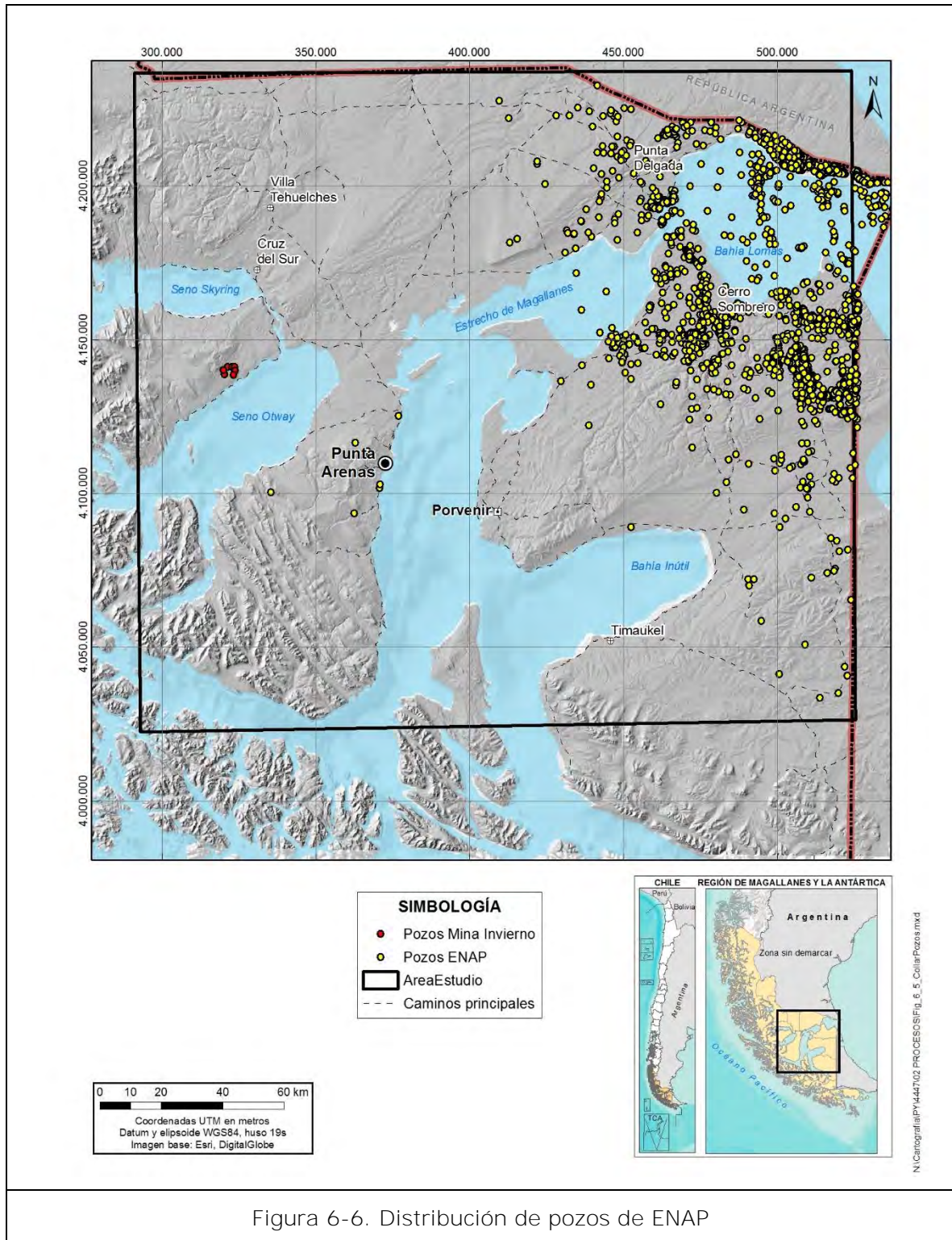


Figura 6-5. Contacto roca – relleno, modificado de AC Consultores / DGA (1991).



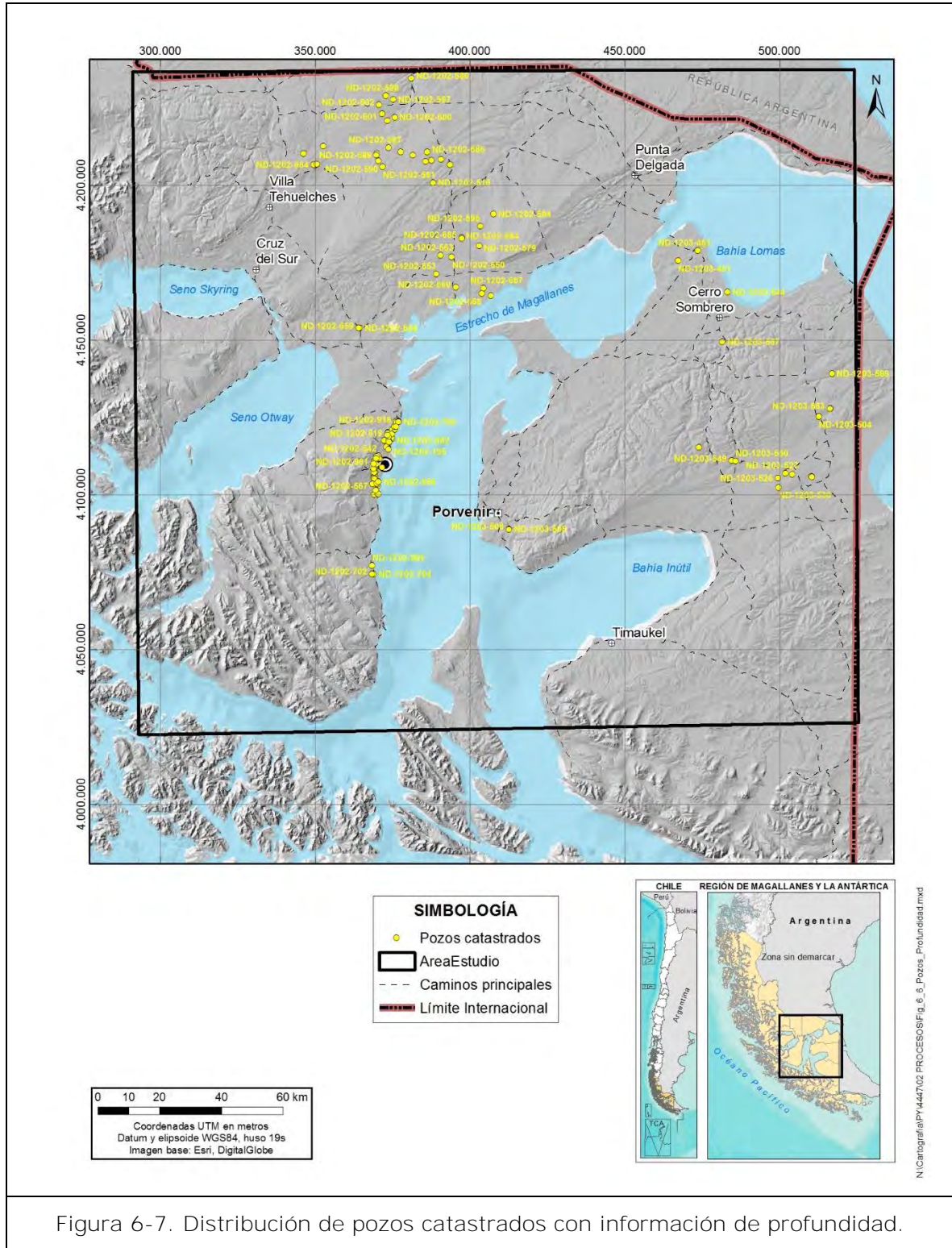


Figura 6-7. Distribución de pozos catastrados con información de profundidad.

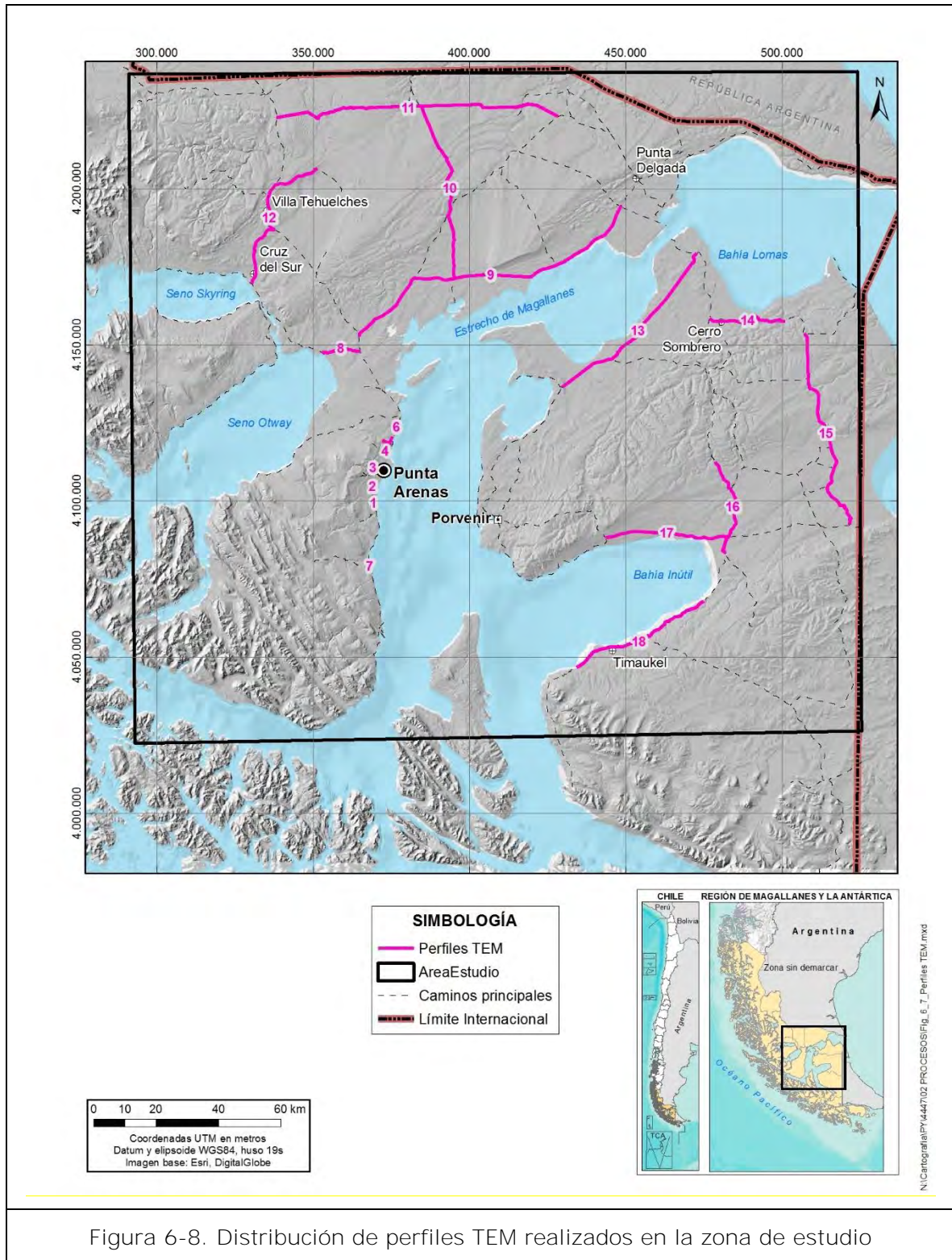
## 6.2.2 Geofísica

Con el fin de complementar la información de subsuperficie y caracterizar de mejor forma las geometrías de las unidades geológicas e/o hidrogeológicas de la zona de estudio, se realizó un estudio geofísico mediante la técnica de Transiente Electromagnético (TEM). El estudio, realizado por Geodatos, contempló mediciones en 200 estaciones distribuidas en 18 perfiles, las que a su vez se distribuyen en toda la zona de estudio (Figura 6-8).

La configuración de los sondeos TEM utilizados en este proyecto corresponde un “Loop Coincidente”, con un loop o espira cuadrada de 100 x 100 m o de 200 x 200 m. Dependiendo del sustrato existente, estas espiras tienen capacidad de visualizar estratos que se encuentren entre 50 y 300 m de profundidad. Sin embargo, si un estrato superficial es muy conductivo, se producirá la pérdida de señal inmediatamente bajo éste, impidiendo el reconocimiento de más capas en profundidad.

Los resultados e interpretación de los 18 perfiles TEM se presentan en el **Anexo D**. Como observación general a dicha interpretación, gran parte de los modelos presentan cambios de resistividad que no se correlacionan con el nivel estático de la unidad investigada, ni con el contacto entre la unidad de depósitos fluvioglaciares y las formaciones más antiguas que la subyacen. Esta respuesta geoelectrica del subsuelo es consistente en toda el área de estudio. Por tanto, de los perfiles TEM es posible interpretar un **“basamento resistivo” que se encuentra a mayor profundidad que el contacto fluvioglacial con las unidades de roca que la subyacen**. Esto se corrobora en el perfil L-15 (Figura 6-9), localizados en la isla de Tierra del Fuego, en el cual también se tiene información primaria de pozos de ENAP. En el perfil se aprecia que el contacto entre la unidad de relleno y las rocas terciarias se ubica a una menor profundidad que el cambio resistivo mayor en el perfil TEM.

Sin embargo, es posible identificar, especialmente en las zonas cercanas al Estrecho de Magallanes, zonas con posibles intrusiones salinas, definidas por zonas puntuales con extremadamente baja resistividad, cercana a 1 Ohm-m. Los perfiles que presentan estas posibles intrusiones son el L-4 (Figura 6-10), L-9 y L-13 (Figura 6-11).



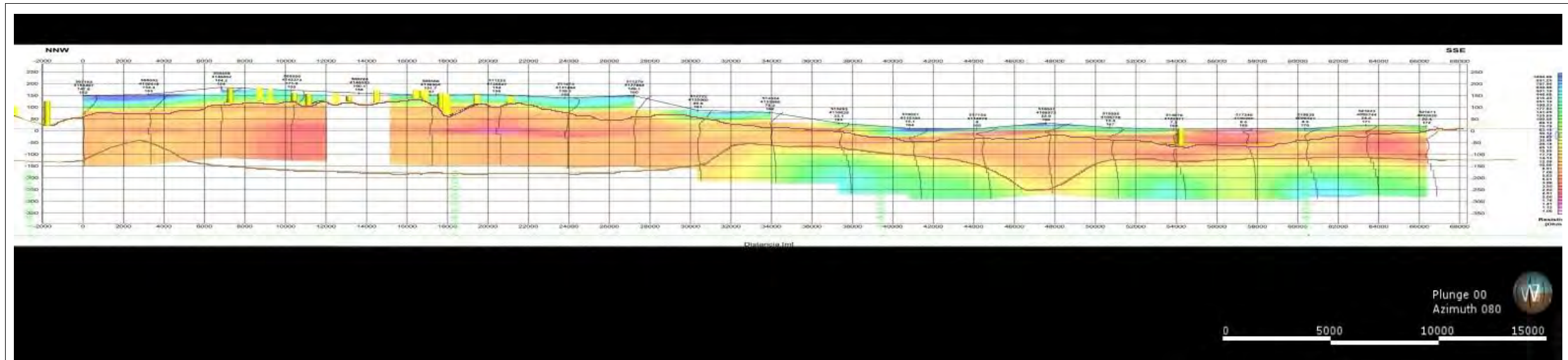


Figura 6-9. Perfil TEM L-15, ubicado en la Isla de Tierra del Fuego. La línea superior marca la profundidad del relleno cuaternario, mientras que la línea inferior marca un fuerte cambio resistivo.

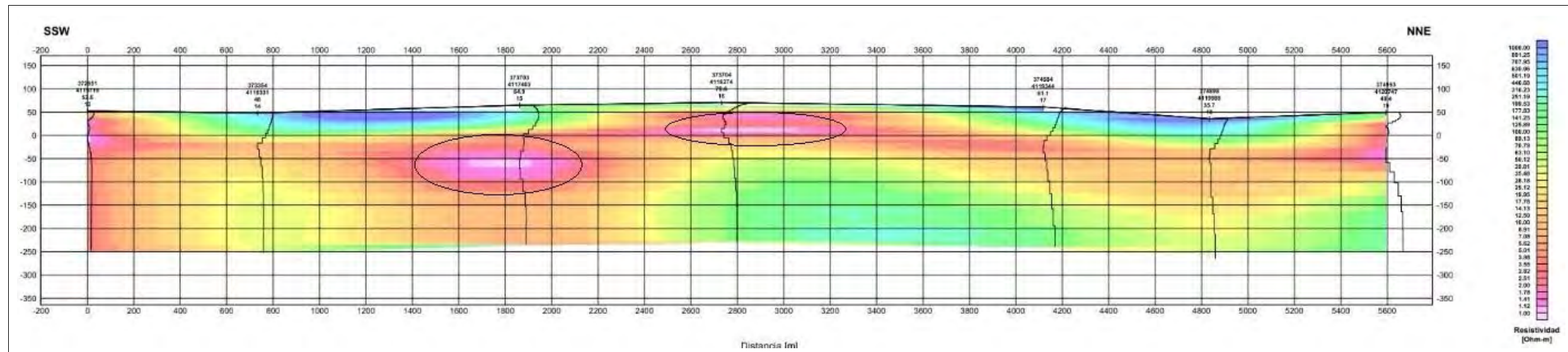


Figura 6-10. Perfil TEM L-4, ubicado en la península de Brunswick. En elipses se marcan las posibles intrusiones salinas.





---

## 6.3 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

A continuación se presenta una definición de las unidades hidrogeológicas, seguido de los resultados de la modelación en 3D de la geometría de estas unidades.

### 6.3.1 Definición de unidades hidrogeológicas

Como se nombró en el apartado de geología local, la unidad geológica de mayor interés corresponde a los depósitos fluvioglaciares del Holoceno, ya que la mayoría de los pozos catastrados tiene baja profundidad y se encuentran emplazados en esta unidad. Por ende, dicha unidad es también la unidad hidrogeológica de mayor interés en el área de estudio, por lo que la modelación conceptual hidrogeológica se centrará en ella, dejando a las Formaciones más antiguas (Palomares y Filaret), como parte del basamento hidrogeológico de la zona de estudio. Además, **debido a la detección de un "basamento resistivo" detectado en los perfiles TEM, se incluye como otra unidad hidrogeológica.**

Por tanto en el área de estudio se pueden definir 3 unidades hidrogeológicas:

- **Unidad Hidrogeológica Cuaternaria:** Es la unidad más somera. Corresponde a la unidad geológica depósitos no consolidados del Holoceno, la que está compuesta por depósitos de morrenas que han sido retrabajados por sistemas fluviales modernos. Contiene agua que corresponde principalmente al agua freática, almacenada como unidad libre. De esta unidad proviene el agua de la totalidad de las vertientes y pozos someros perforados en la región. En algunas zonas está en condiciones artesianas, dando lugar a la existencia de cuencas artesianas de extensión reducida. En algunos casos la reserva de agua es reducida y la surgencia tiende a perderse después de un corto periodo de producción por agotamiento de las napas (González, 1979).
- **Basamento Hidrogeológico:** Corresponde a las unidades geológicas que subyacen a los depósitos no consolidados del Holoceno. Según la geología regional, corresponde a la Formación Palomares y/o Formación Filaret, y las unidades más antiguas bajo éstas. Estas unidades son consideradas capaces de almacenar y transportar agua, por lo que históricamente se han considerado como acuíferos del tipo confinado; sin embargo, las aguas de estas unidades son muy salinas, de acuerdo a los numerosos registros hidroquímicos que ENAP le ha presentado a la DGA, de pozos perforados en estas unidades. Además, como ya se ha nombrado, la totalidad de los pozos del catastro se encuentra perforados en la unidad somera, por ende esta unidad se considera en este trabajo como parte del basamento hidrogeológico.
- **Basamento Resistivo:** Sólo definida por los perfiles TEM, que muestra un cambio en la resistividad de las capas medidas, a una profundidad mayor al contacto entre las dos unidades hidrogeológicas anteriores. A partir de esta profundidad se define este basamento resistivo.

La distribución en planta de estas unidades se presenta en la Figura 6-5, que representa el contacto entre los Depósitos Fluvioglaciares del Pleistoceno – Holoceno, y las unidades rocosas a las que ésta sobreyace (contacto roca – relleno). La definición de una sola gran unidad hidrogeológica de relleno se hace necesaria debido a la extensión regional del modelo conceptual; además, la conceptualización de AC/DGA (1991), con 12 unidades hidrogeológicas, no es posible caracterizar con información estratigráfica de subsuperficie y parámetros hidráulicos, siendo éstas necesarias para una subdivisión de la unidad de relleno.

### 6.3.2 Construcción de modelo hidrogeológico 3D

Usando el contacto roca relleno en superficie (Figura 6-5), la geología local de subsuperficie (pozos ENAP y piezómetros de Mina Invierno de la Figura 6-6) y la información de los perfiles TEM (**Anexo D**), se construyó un modelo hidrogeológico en 3D, usando el software Leapfrog Hydro. Este modelo contiene las geometrías de las tres unidades hidrogeológicas definidas, como se puede observar en la Figura 6-12. El modelo hidrogeológico de la unidad completa se subdividió posteriormente en cuatro modelos locales, por motivos de simplicidad al momento de modelar numéricamente los flujos de agua subterránea y superficial. Estas cuatro zonas corresponden a la isla de Tierra del Fuego (Figura 6-13), al área continental al norte del Estrecho de Magallanes (Figura 6-14), a la zona de la Península Brunswick donde se emplaza la ciudad de Punta Arenas (Figura 6-15), y a la Isla Riesco (Figura 6-16). En todas estas figuras se puede observar en superficie a la Unidad Hidrogeológica Cuaternaria (amarillo), bajo ésta el Basamento Hidrogeológico (café), y en la base el Basamento Resistivo (rojo). Las diferencias de potencia de cada una de éstas están determinadas por la presencia de información primaria (pozos) y secundaria (TEM).

La Unidad Hidrogeológica Cuaternaria, la de mayor interés hidrogeológico, tiene en general un espesor entre 1 y 397 m. En el área de Punta Arenas (península de Brunswick) esta unidad posee espesores entre 1 y 275 m, siendo más potente al norte de la península, cerca de la unión con el área Continental Norte, con un promedio de 80 m (Figura 6-17).

Similares características presenta esta unidad en la Isla de Tierra del fuego, donde presenta espesores entre 1 y 297 m, con un promedio de 65 m, siendo más potente hacia el noroeste de esta zona (Figura 6-17). Isla Riesco posee espesores de la Unidad Hidrogeológica Cuaternaria entre 1 y 242 m, con un promedio de 75 m (Figura 6-17).

Finalmente, el área Continental Norte presenta los mayores espesores de esta unidad, que se encuentran en un rango entre 1 y 397 m, con un promedio de 124 m. La zona más potente corresponde a la zona central, donde se observan con mayor claridad los depósitos de morrenas del último período glacial, disminuyendo su espesor hacia el norte y sur de éstas (Figura 6-17).



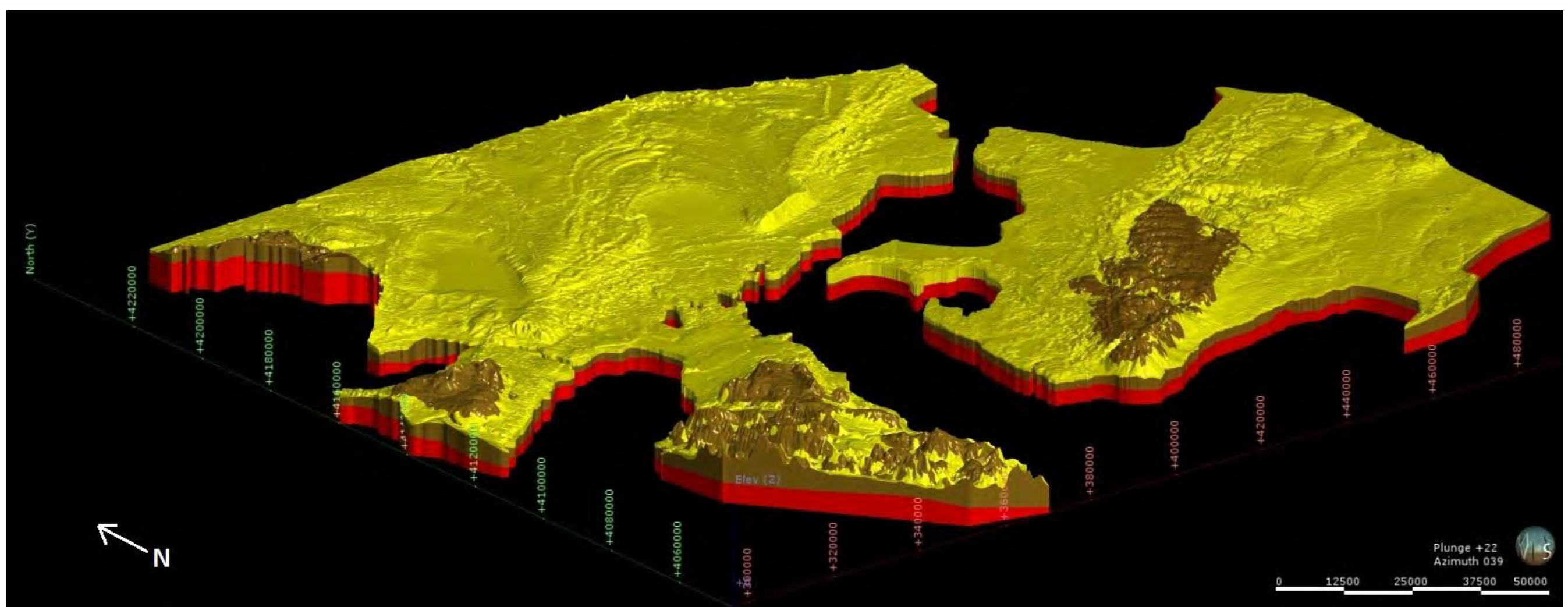


Figura 6-12. Vista hacia el NE del Modelo Hidrogeológico 3D construido para la totalidad del área de estudio. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo.

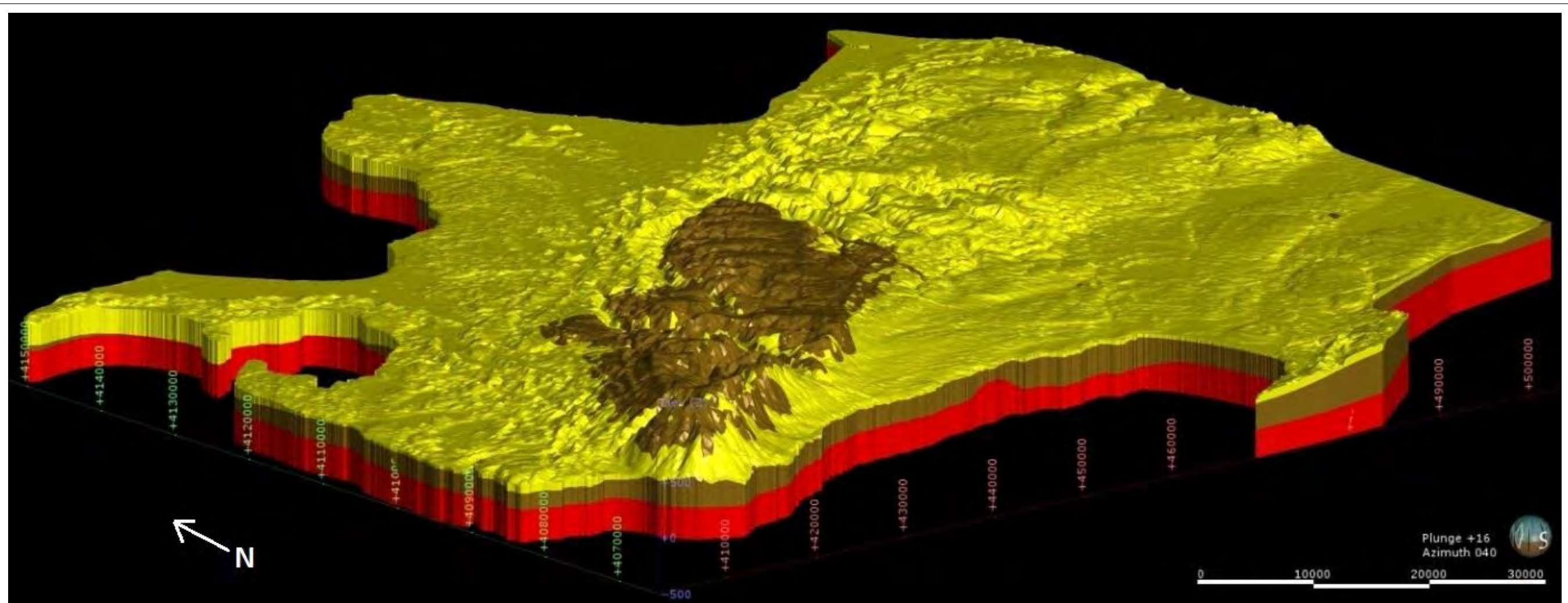


Figura 6-13. Vista hacia el NE del Modelo Hidrogeológico 3D construido para la Isla de Tierra del Fuego. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo.

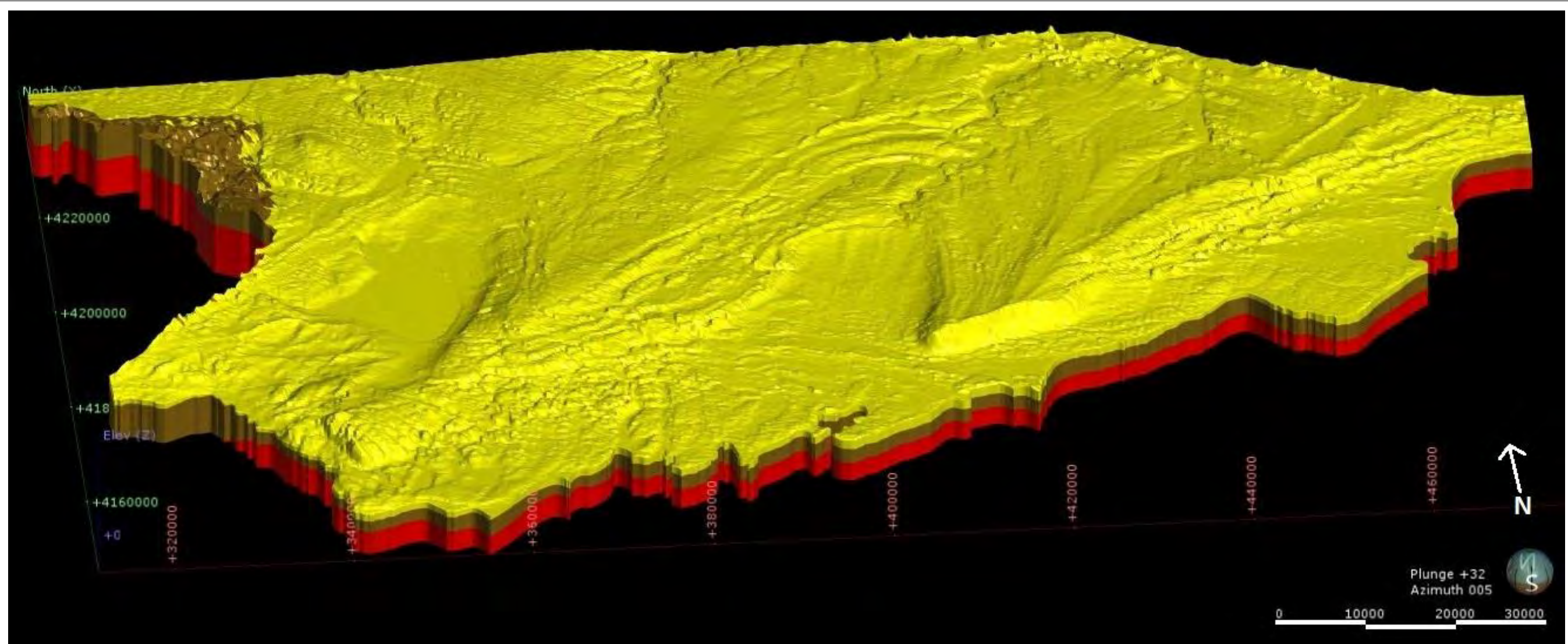


Figura 6-14. Vista hacia el N-NE del Modelo Hidrogeológico 3D construido para área Continental Norte del Estrecho de Magallanes. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo.

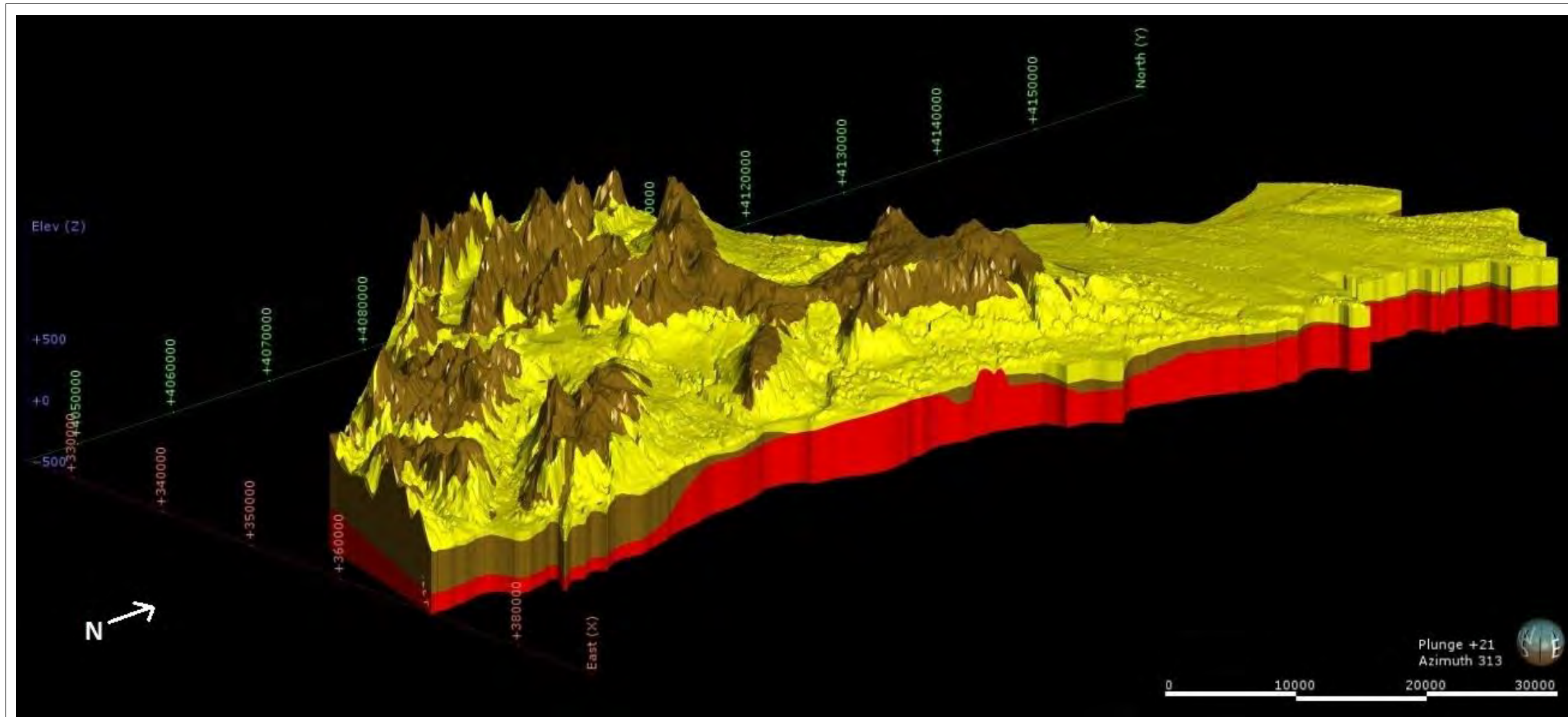


Figura 6-15. Vista hacia el NW del Modelo Hidrogeológico 3D construido para la porción de la Península de Brunswick donde se emplaza la ciudad de Punta Arenas. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo.



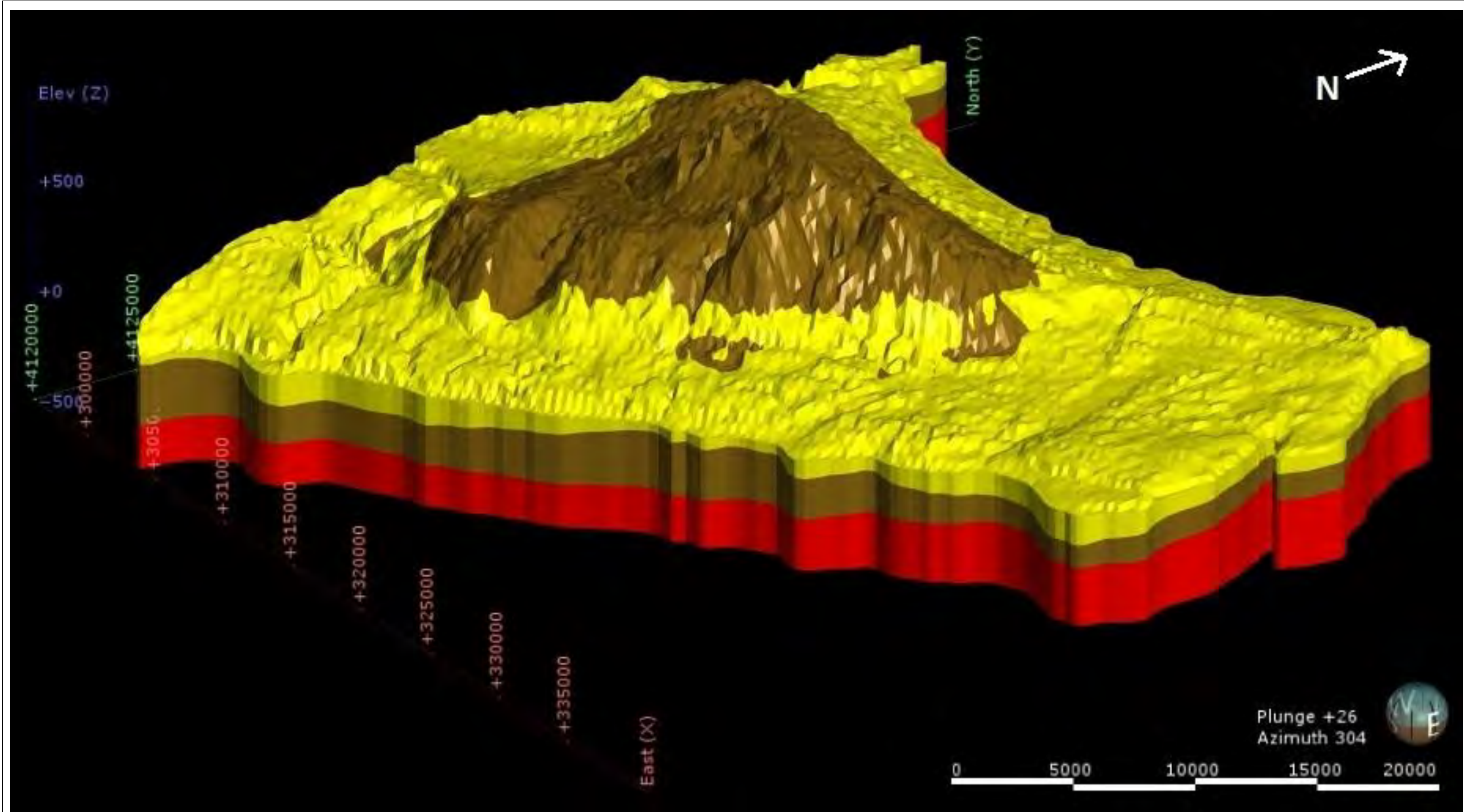
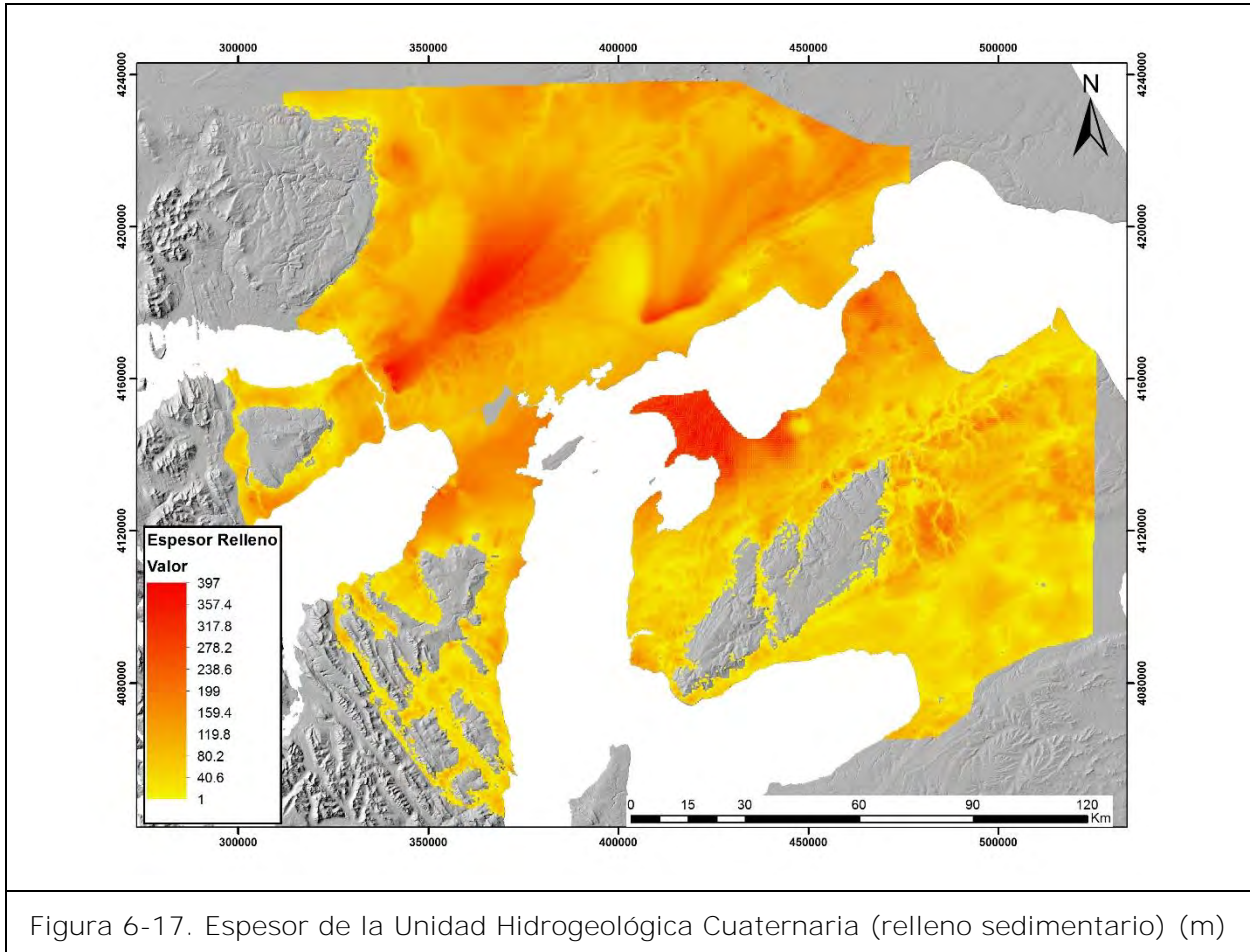


Figura 6-16. Vista hacia el NW del Modelo Hidrogeológico 3D construido para la Isla Riesco. Amarillo: Unidad hidrogeológica Cuaternaria; Café: Basamento Hidrogeológico; Rojo: Basamento Resistivo.



## 6.4 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Se analizaron las pruebas de bombeo de pozos catastrados en la zona de estudio, con el fin de obtener las propiedades hidráulicas transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K), de las unidades hidrogeológicas definidas. Los resultados obtenidos permiten entender espacialmente el comportamiento de los acuíferos y son la base para la caracterización de las unidades hidrogeológicas y la construcción del modelo numérico hidrogeológico de la zona de estudio.

## Metodología

Se presenta la metodología general utilizada para el cálculo de los parámetros elásticos o hidráulicos (T, K), junto con los inconvenientes encontrados y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

De un total de 311 pozos con derechos asignados en la región, se encontraron 64 pozos y norias con Pruebas de bombeo de Gasto Constante (PGC). Sólo uno de ellos (una noria) presentaba una Prueba de bombeo de Gasto Variable (PGV). De este universo, sólo se analizaron 27 pozos de bombeo, descartándose todas las norias porque éstas mayormente se encuentran localizadas en sectores donde el subsuelo ha sido caracterizado con información de pozos, y por presentar ecuaciones diferentes en las que se debe incluir el almacenamiento de agua en la noria.

La distribución de los pozos evaluados, y en general de los derechos de agua de la zona, se concentra principalmente en el sector entre el Aeropuerto internacional Presidente Carlos Ibáñez del Campo y la ciudad de Punta Arenas y sus alrededores.

Para el análisis de los ensayos de bombeo se suponen las siguientes características físicas del acuífero:

- Acuífero homogéneo e isótropo
- Acuífero de extensión infinita
- Acuífero con base horizontal y espesor constante.
- Se cumple la ley de Darcy,  $\vec{q} = -\mathbf{K} \cdot \vec{i}$
- Niveles iniciales horizontales
- Flujo horizontal y radial
- Pozo totalmente penetrante y de radio pequeño (~0,4 m)
- Caudal constante.

La información existente de los pozos analizados corresponde a PGC y su recuperación (sólo en algunos casos). En los pozos que contaban con información estratigráfica y de habilitación, esta información fue incluida en el análisis para ajustar con mayor detalle los parámetros hidráulicos del acuífero (K y T). No fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento del acuífero (S) debido a que las pruebas analizadas no contaban con pozos de observación.

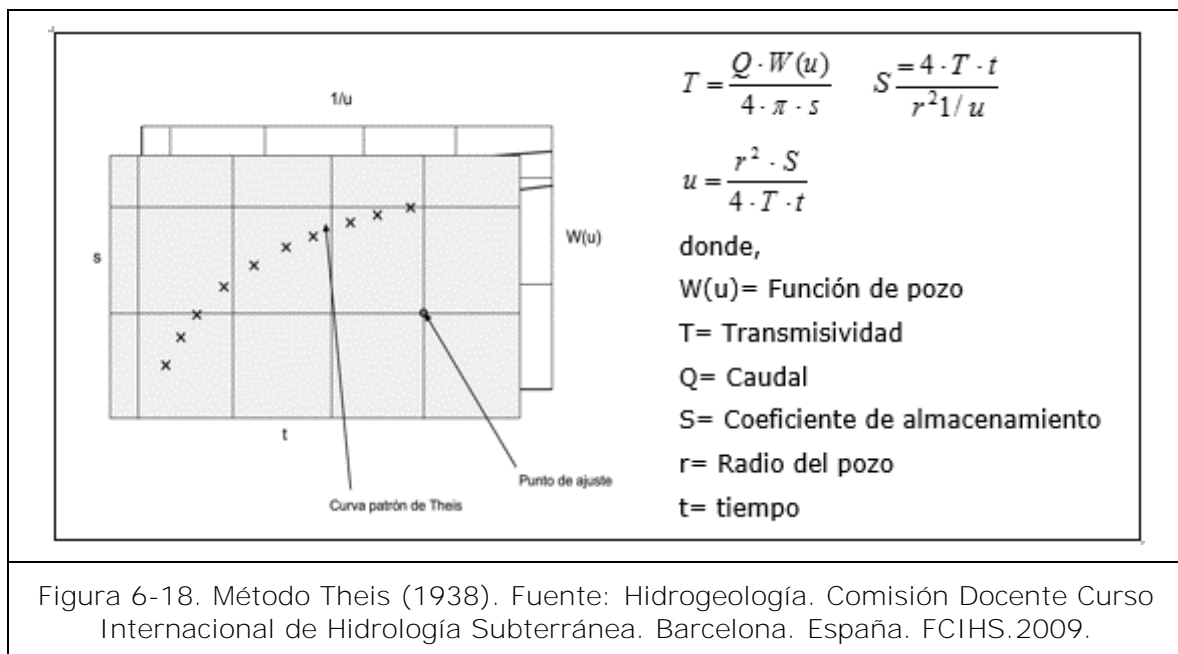
Si bien para determinar los parámetros elásticos del acuífero es adecuado utilizar las ecuaciones de régimen variable, en algunos casos esto no fue posible debido a la cercanía de los pozos a fuentes de recarga (ríos, canales y lagos). Por tanto, en algunos casos se estimó la transmisividad a través de las ecuaciones de régimen permanente.

De acuerdo a los casos analizados y a sus características particulares, se han aplicado distintas fórmulas para estimar los parámetros elásticos, dependiendo de si es régimen variable o constante.

### Régimen Variable

Se usaron las ecuaciones de régimen variable cuando, durante el desarrollo de las pruebas, el agua provenía del almacenamiento del acuífero y no de la recarga; es decir, cuando el nivel dinámico tomaba un tiempo de más de 30 minutos para estabilizarse. Dependiendo del tipo de acuífero se utilizaron las siguientes fórmulas:

- **Theis (1938)**: Para acuíferos confinados se puede aplicar el método gráfico de Theis (Figura 6-18).



- **Neuman (1975)**: Para acuíferos libres se puede aplicar el método gráfico de Neuman (Figura 6-19).
- **Prueba de recuperación Theis**: Se analizaron los registros de la prueba de recuperación como complemento al análisis de la PGC (Figura 6-20).

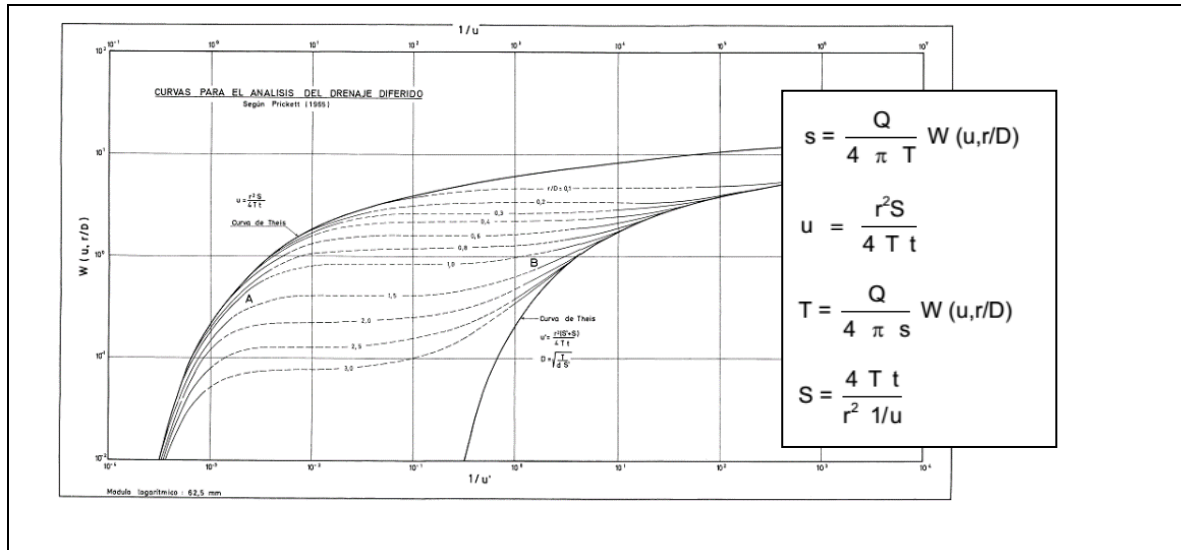


Figura 6-19. Método de Neuman (1975). Fuente: Hidrogeología. Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. España. FCIHS.2009.

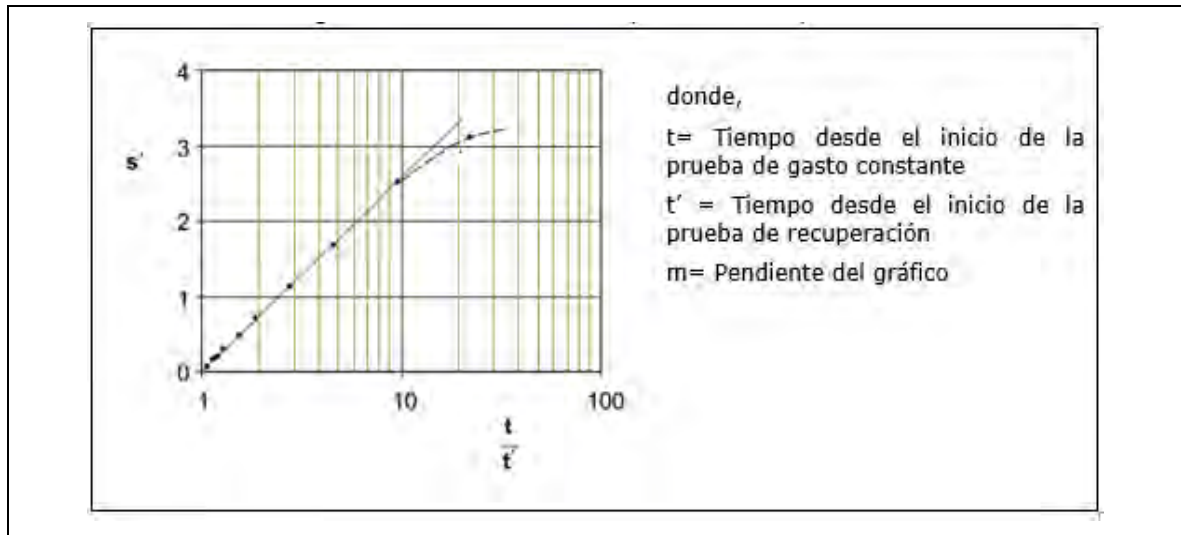


Figura 6-20. Método Theis en prueba de recuperación

## Régimen Permanente

- **Logan (1964)**

Acuífero confinado: 
$$T = \frac{1,22 \cdot Q}{S_P}$$

Acuífero libre: 
$$T = \frac{2,43 \cdot Q \cdot H}{S_P \cdot (2 \cdot H - S_P)}$$

## Resultados

El resumen de los parámetros hidráulicos calculados a partir del análisis de las pruebas de bombeo se muestra en la Tabla 6-1, mientras que en el **Anexo E** se incluyen los resultados obtenidos del análisis particular de cada pozo. De esta tabla se infiere un amplio rango de conductividad hidráulica para la Unidad Hidrogeológica Cuaternaria (de 0.02 a 35 m/día), lo que da cuenta de la gran heterogeneidad de sedimentos observados en esta unidad.

Tabla 6-1: Resumen de parámetros hidráulicos obtenidos a partir del análisis de pruebas de bombeo.

Expediente	UTM		Zona	Caudal (L/s)	Prof. (m)	Prof. Nivel estático (m)	Fecha del nivel estático	Prueba gasto constante		K (m/d)	Método
	Norte	Este						Caudal (L/s)	Prof. Nivel dinámico (m)		
ND-1202-195	4114667	373821	Punta Arenas	20	18	6.2	jun-96	1.4	7	16	Logan
ND-1202-463	4119430	372840	Punta Arenas	2.03	38	20.4	may-03	2	20.86	35	Theis
ND-1202-464	4119798	372634	Punta Arenas	0.5	50	32	may-03	0.5	36.1	0.7	Logan
ND-1202-491	4122765	374092	Punta Arenas	2	40	3.5	dic-04	2	27	0.17	Theis
ND-1202-779	4108821	371664	Punta Arenas	0.5	40	11.5	jul-07	0.5	23.5	0.09	Theis
ND-1202-794	4123629	377018	Punta Arenas	4	26.7	3.5	mar-05	4	8.5	6	Logan
ND-1202-794	4123486	376904	Punta Arenas	4	35.4	8.5	abr-06	4	13	7	Logan
ND-1202-794	4123541	376880	Punta Arenas	4	29.2	9	jul-07	4	9.3	115	Logan

ND-1202-858	4121896	375786	Punta Arenas	0.7	53	22.2	ago-10	0.7	5.68	0.5	Neuman
ND-1202-896	4173054	297944	Continental Norte	2.5	42	3	ago-09	2.5	3.5	0.2	Neuman
ND-1202-896	4173525	294306	Continental Norte	0.3	36	6	ago-09	0.3	27	0.02	Neuman
ND-1202-918	4123619	376933	Punta Arenas	8	22	5	feb-11	8	8.5	24	Logan
ND-1202-918	4123670	376863	Punta Arenas	8	23	13	feb-11	8	17.5	19	Logan
ND-1202-918	4123671	376808	Punta Arenas	4	23	13.5	feb-11	4	16.5	15	Logan
ND-1202-918	4123453	376189	Punta Arenas	3	26	7	sep-11	3	9.6	9	Logan
ND-1202-918	4123638	376510	Punta Arenas	6	27	8	feb-11	6	13	7	Logan
ND-1202-918	4123665	376431	Punta Arenas	3.3	19	0	mar-11	3.3	6	5	Logan
ND-1202-918	4123747	376267	Punta Arenas	3.3	19	0	mar-11	3.3	8	3	Logan
ND-1202-918	4123770	376152	Punta Arenas	3.3	19	0	mar-11	3.3	6	5	Logan
ND-1203-451	4175724	467274	Tierra del Fuego	8	117	2.05	feb-03	8	2.92	10	Logan
ND-1203-451	4178945	473613	Tierra del Fuego	7.2	109	2.5		10	12	1.4	Logan
ND-1203-470	4093231	403688	Tierra del Fuego	1.5	72	12	feb-03	2.8	64	0.12	Theis
ND-1203-471	4093208	403774	Tierra del Fuego	1.5	75	13.5	feb-03	3	62	0.14	Theis
ND-1203-577	4140179	508796	Tierra del Fuego	1.6	26	2.65	abr-10	2.9	6.33	0.2	Logan
ND-1203-577	4140103	508703	Tierra del Fuego	1.6	24.1	3.81	abr-10	3.8	12.6	0.6	Logan
ND-1203-577	4140103	508703	Tierra del Fuego	1.6	24	3.81	abr-10	3.5	9.24	0.5	Logan

## 6.5 PIEZOMETRÍA

Conforme a lo expuesto en el Acápito 4 del presente estudio, se llevó a cabo el catastro de 323 captaciones de aguas subterráneas en toda el área, información utilizada para la determinación de la piezometría en los distintos sectores bajo análisis. De éstas, en 155 captaciones se obtuvo medidas de niveles, todos ellos localizados en la Península Brunswick, Área continental Norte e Isla de tierra del Fuego. Se excluyeron aquellos niveles que representan niveles dinámicos. Para estimar la cota topográfica de los puntos catastrados, se utilizó como referencia la elevación entregada por una imagen STRM, de 75 m de resolución. Los niveles en terreno fueron medidos entre los meses de noviembre de 2014 y enero de 2015. El detalle del Catastro se presenta en el Capítulo 4.

Para la construcción de las superficies piezométricas, la zona de estudio fue dividida en tres subzonas: isla de Tierra del Fuego, isla Riesco, y la unión entre el área Continental Norte y la Península de Brunswick (Punta Arenas). Cabe destacar que sólo algunas zonas presentan una densidad de pozos aceptable para la construcción de una superficie piezométrica con un alto grado de confiabilidad. Considerando que el presente estudio es realizado a escala regional, para complementar las isopiezas en aquellas zonas donde no se tiene información de pozos, se tomó como referencia a la topografía de cada zona analizada. En particular, para Isla Riesco existe sólo 1 piezómetro con información de

nivel estático, debido a que el resto de los piezómetros y pozos se encuentran habilitados en las unidades terciarias.

La Figura 6-21 muestra un mapa de toda la zona de estudio con los niveles piezométricos obtenidos a partir del análisis de los niveles estáticos. En general, se observa que los niveles piezométricos se encuentran muy cercanos a la superficie, lo que indica un alto grado de saturación de los acuíferos analizados; sin embargo, se debe considerar que los niveles estáticos fueron medidos en los meses de noviembre y diciembre, que corresponde a un período de alta recarga por deshielos.

En la zona de Tierra del Fuego se cuenta con 27 datos válidos de niveles piezométricos, que se encuentran en el rango entre 8 y 264 msnm, aunque la mayoría de ellos se encuentran en las partes bajas de la cuenca, en general bajo los 100 msnm. Las direcciones de flujo del agua subterránea van desde las zonas topográficamente altas, que finalmente actúan como fuentes de recarga, hacia las bajas (Figura 6-21). En la misma figura se aprecia que todas las curvas piezométricas de Isla Riesco son inferidas respecto de su topografía, puesto que sólo existe 1 dato de nivel estático, el que fue tomado a finales de abril del año 2007; por lo mismo, el nivel de saturación indicado por las curvas piezométricas de Isla Riesco es menor que para el resto de las áreas analizadas.

La Figura 6-22 muestra un mapa piezométrico local para la ciudad de Punta Arenas (dentro de la península de Brunswick), debido a que tiene una densidad mayor de pozos con información de niveles estáticos. Para esta zona se cuenta con 70 pozos con niveles piezométricos, los que se encuentran en un rango entre 4 y 161 msnm. En general, se observa una dirección de flujo subterránea de oeste a este, es decir, desde los altos topográficos a las zonas más deprimidas. El acuífero analizado descarga sus aguas en los cursos superficiales en toda esta zona.

Finalmente, al norte de la zona de estudio, para el área continental al norte del Estrecho de Magallanes, la Figura 6-21 muestra patrones similares a las dos zonas ya descritas; es decir, una zona muy saturada e influenciada por la topografía local. Las direcciones de flujo van desde los altos topográficos hacia los bajos; en este caso, se observan flujos subterráneos que drenan regionalmente tanto hacia el norte (Argentina) como hacia el sur del área estudiada. Al igual que para Punta Arenas, los cauces superficiales reciben agua desde el acuífero. La zona central, de confluencia entre esta zona continental y la Península de Brunswick, corresponde a una zona de descarga de flujos subterráneos, que reciben las aguas de estas dos zonas mencionadas (desde el norte y el sur).



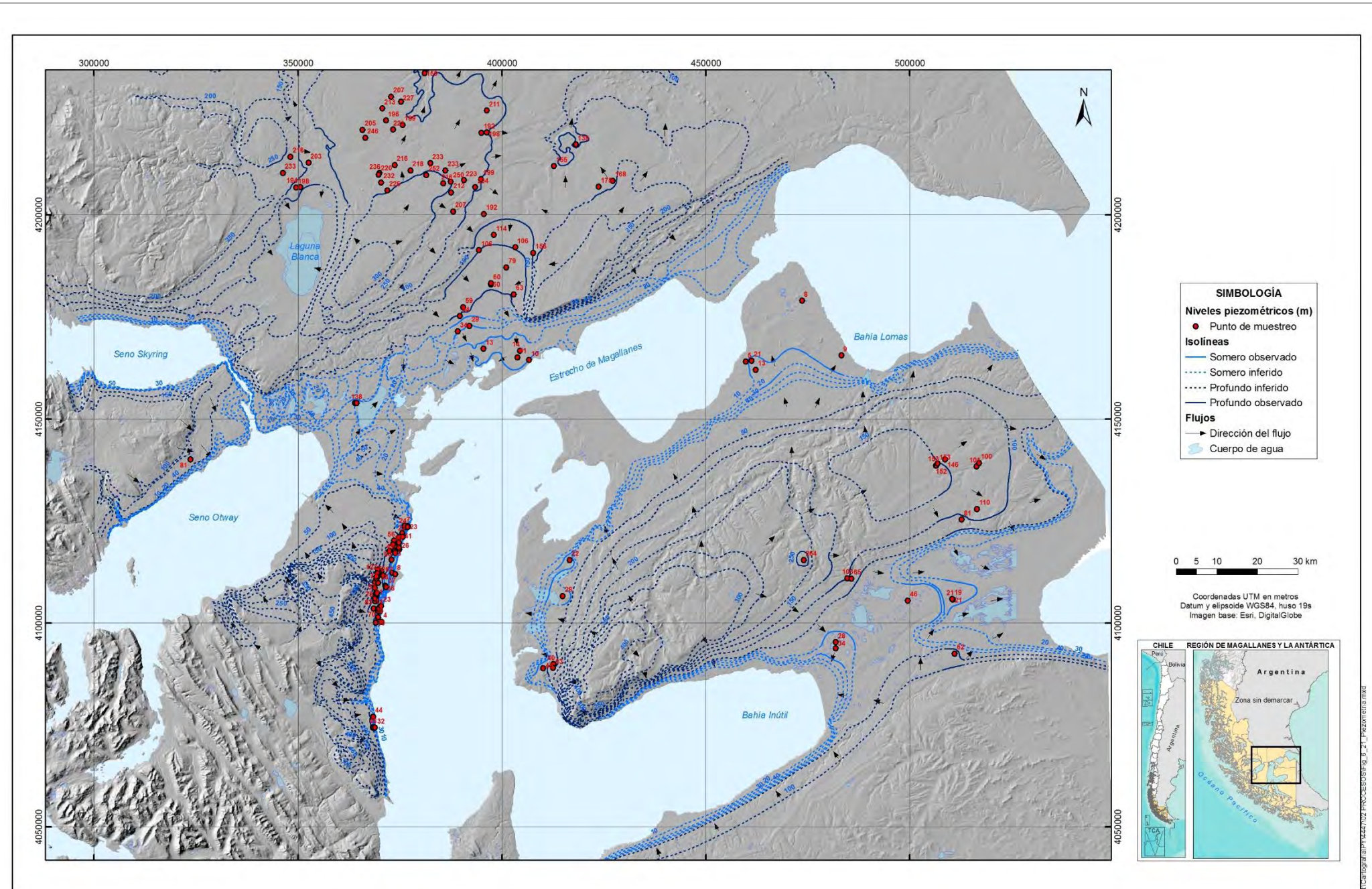


Figura 6-21. Mapa Piezométrico del área de estudio

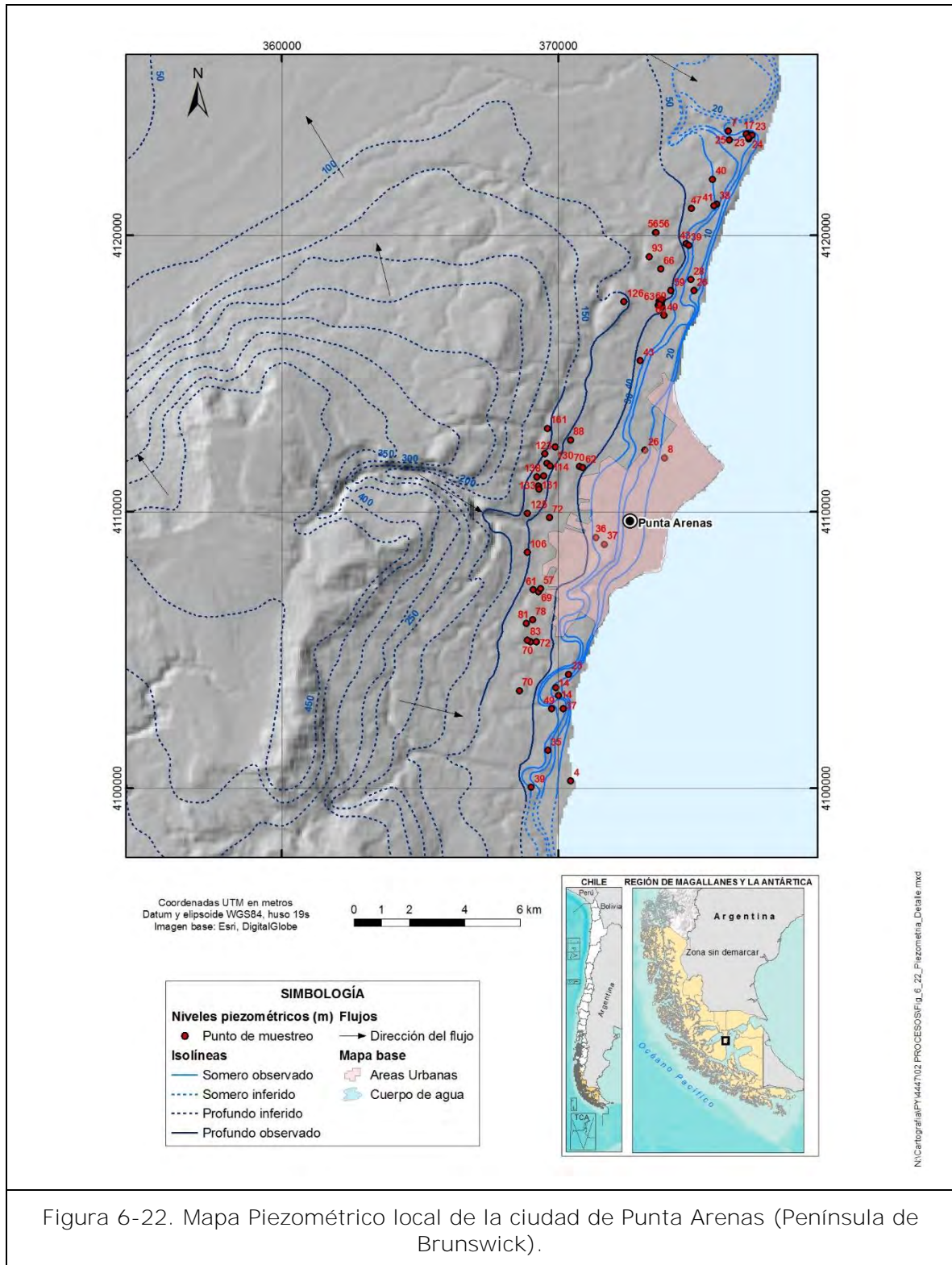


Figura 6-22. Mapa Piezométrico local de la ciudad de Punta Arenas (Península de Brunswick).

## 6.6 BALANCE HÍDRICO ISLA RIESCO

Con el objetivo de analizar el comportamiento hidrogeológico en Isla Riesco, se procedió al desarrollo de un balance hídrico en la Isla, incorporando en el mismo las siguientes variables hidrológicas (Figura 6-23):

- (1) Recarga por precipitación (mm/año)
- (2) Recarga del río (mm/año)
- (3) Descarga al río (mm/año)
- (4) Extracciones (mm/año)
- (5) Et Napas (mm/año)
- (6) Retornos Riego (mm/año)
- (7) Aportes laterales Sub (mm/año)
- (8) Descargas laterales subterráneas (mm/año)

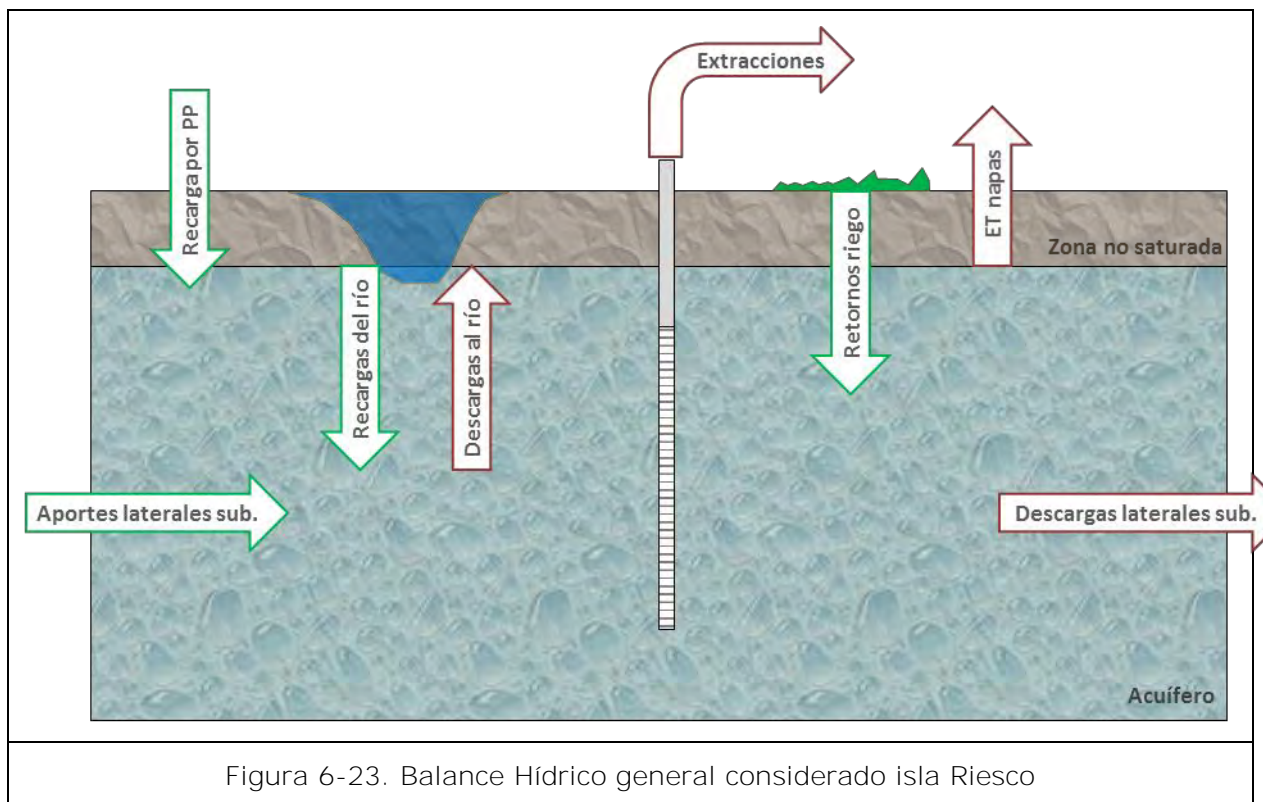


Figura 6-23. Balance Hídrico general considerado isla Riesco

En este caso, se dispone de información a firme de los siguientes parámetros:

- (1) Recarga por precipitación (mm/año). La recarga por precipitación se asume como la precipitación total, mínima y máxima de acuerdo a lo presentado en el Acápite 5.3.9.1, que cae sobre el área aportante de Isla Riesco (616,9 km<sup>2</sup>).
- (2) Recarga del río (mm/año). Se estima como el caudal base observado asociado a Pex de 85% y 95% Pex, estimado en el Acápite 5.3.9.1.
- (3) Descarga al río (mm/año). Se estiman como nulas, dado que se asume que el río es ganador.
- (4) Extracciones (mm/año). En Isla Riesco se disponen de 3 captaciones subterráneas en uso (ND-1202-493; ND-1202-841 y ND-1202-868), las que extraen en total 0,1 m<sup>3</sup>/s.
- (5) Et Napas (mm/año). Se asume como nula.
- (6) Retornos Riego (mm/año). Se asumen como nulos.
- (7) Aportes laterales Sub (mm/año). Se asume como un valor equivalente al de descargas laterales subterráneas.
- (8) Descargas laterales subterráneas (mm/año). Se asume como un valor equivalente al de aportes laterales subterráneos.

Adicionalmente, se propone un valor de cierre o error ( $\epsilon$ ), que permite cuadrar el balance de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{Recarga PP} \left( \frac{m^3}{s} \right) + \text{extracciones} \left( \frac{m^3}{s} \right) = \text{Recarga Q base} \left( \frac{m^3}{s} \right) + \epsilon$$

En la Tabla 6-2 se indica el balance hídrico en Isla Riesco.

Tabla 6-2: Balance Hídrico Subterráneo en Isla Riesco

Cuenca	PP (min-max)		Recarga por PP (min-max)		Q base (85% Pex)	Q base (95% Pex)	Extracciones	Cierre (min-max)	
	mm/año	mm/año	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s		m3/s	m3/s
Isla Riesco	315,40	509,80	6,17	9,97	2,63	4,81	0,1	3,6	5,2

De acuerdo a lo valores presentados, es posible observar un valor de cierre considerable respecto a las estimaciones de recargas por precipitaciones. Lo anterior se debe principalmente a existencia de factores no estimables directamente mediante los parámetros considerados en el balance.

---

## **7 DESARROLLO DE MODELO NUMÉRICO**

---

### **7.1 ASPECTOS GENERALES**

Para la modelación numérica del área de estudio se han delimitado tres sectores de modelación, que corresponden con el sector de Punta Arenas, el cual incluye la superficie de la Península de Brunswick, el sector Continental Norte y el sector de Tierra del Fuego.

Esta división de sectores se basa en una mejor delimitación de las condiciones de contorno que definen el comportamiento hidrogeológico de los sistemas acuíferos y un menor número de celdas en los modelos numéricos, de forma de obtener un dominio activo razonable.

Los modelos numéricos de flujo subterráneo se han desarrollado con MODFLOW-USG, que es la versión más reciente y potente en términos de capacidades de modelación, empleando Groundwater Vistas 6 como interfaz gráfica de pre- y post- procesamiento.

La modelación numérica incluye una calibración de los flujos superficiales obtenidos en los modelos numéricos, la cual se ha llevado a cabo a partir de los datos hidrológicos disponibles que han permitido calcular el flujo superficial base de los cauces con información fluviométrica.

---

### **7.2 DOMINIO DE MODELACIÓN**

El dominio de modelación para cada uno de los modelos corresponde a la superficie en la cual se encuentra el relleno cuaternario, que corresponde al acuífero de interés en el presente estudio. En la Figura 7-1 se muestran los dominios activos de los tres modelos numéricos.

Por tanto, la modelación de los tres sectores incluye únicamente una unidad hidrogeológica, de permeabilidad espacialmente variable, que corresponde con la Unidad Hidrogeológica Cuaternaria, donde se encuentran perforados la totalidad de los pozos del catastro.

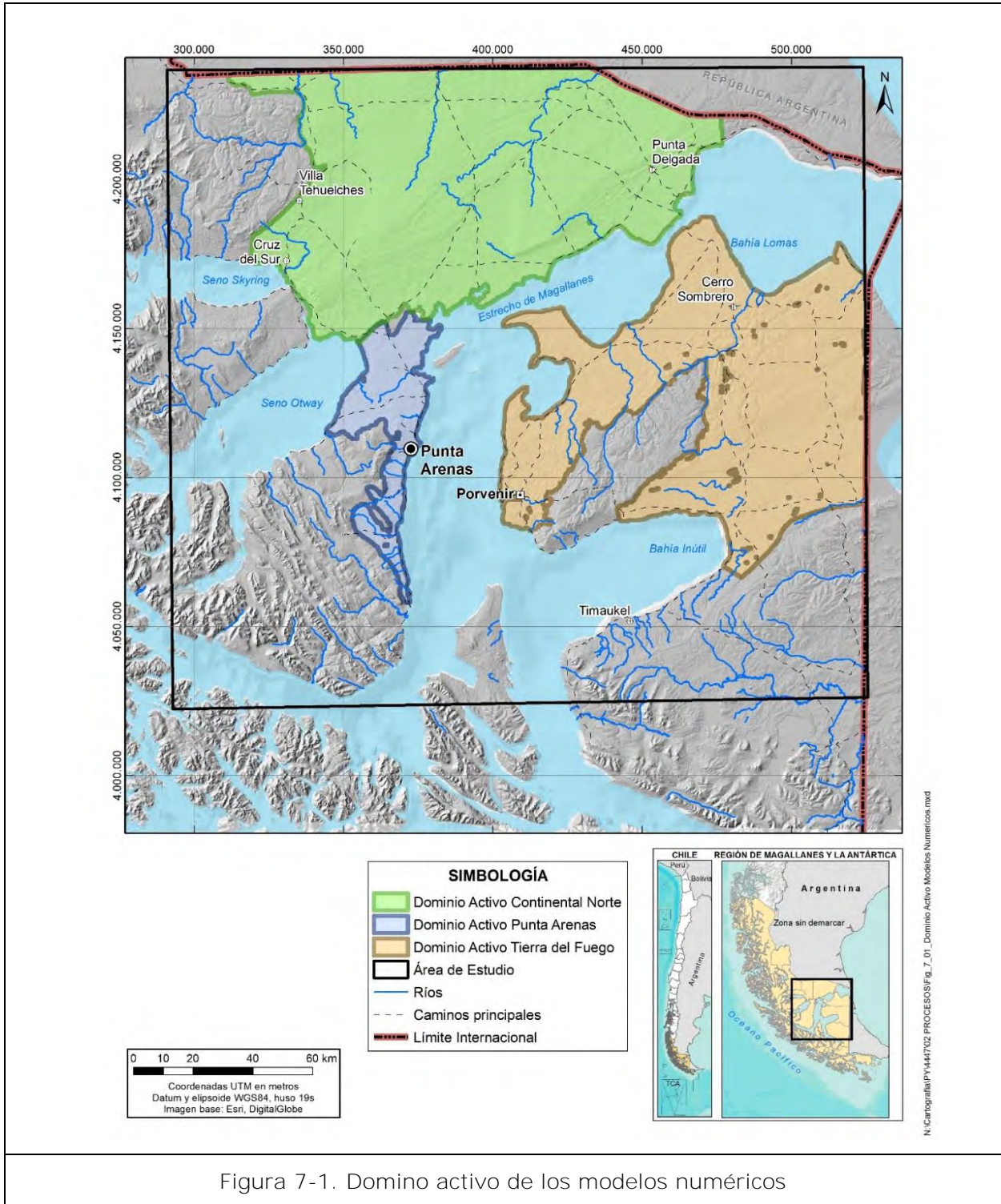
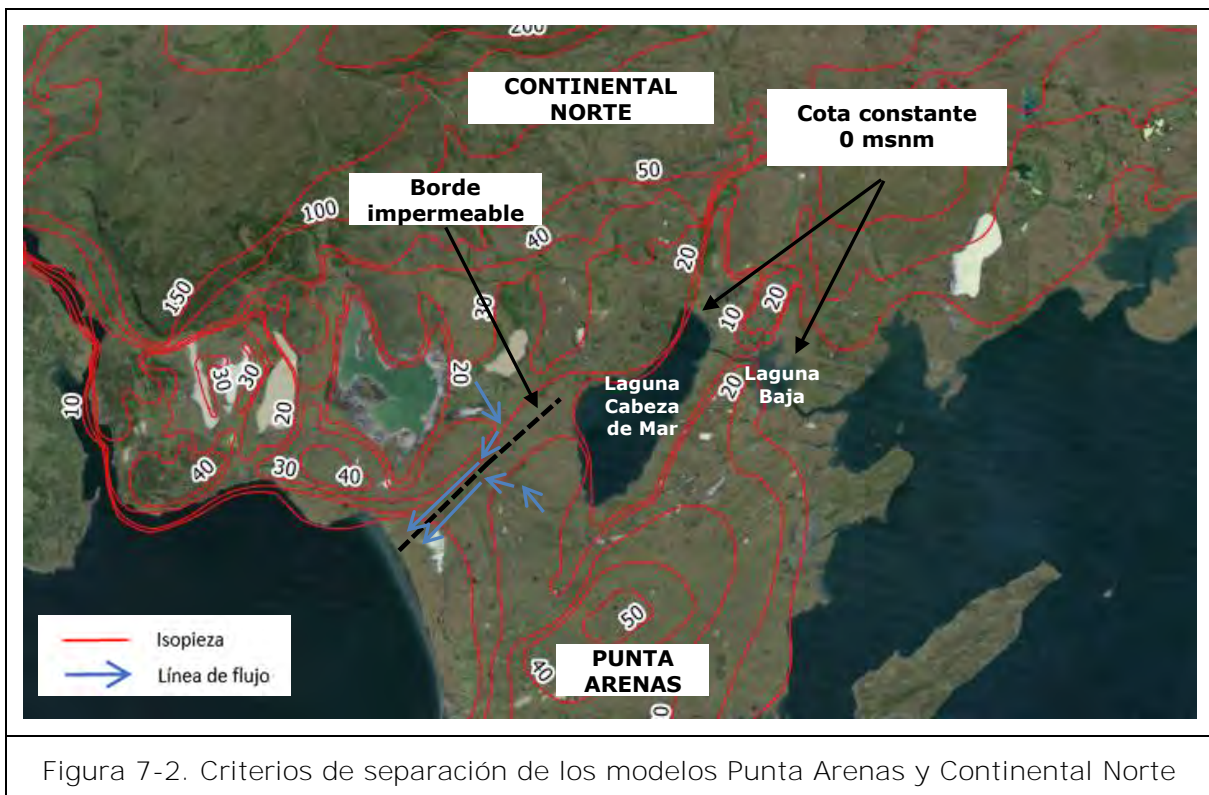


Figura 7-1. Domino activo de los modelos numéricos

La separación del modelo de Punta Arenas y el modelo Continental Norte se basa en los siguientes puntos (ver Figura 7-2):

- Hacia el Este, entre ambos modelos se encuentra la Laguna Cabeza de Mar y la Laguna Baja, que actúan como condición de borde de nivel constante, con cota igual a 0 msnm.
- Hacia el Oeste, el flujo se presenta perpendicular a la costa según la piezometría del modelo conceptual, drenando el flujo hacia Seno Otway, lo cual se representa en ambos modelos como un borde impermeable.

En la Figura 7-2 se muestran estos criterios de separación para los modelos de Punta Arenas y Continental Norte.



Además de lo antes mencionado, la división en sectores hace que la modelación numérica sea más manejable en términos de cálculo numérico, debido a que se utiliza un menor número de celdas.

El sector de Tierra del Fuego se presenta separado en la modelación, debido a la separación física del mismo con el resto de sectores, a través del Estrecho de Magallanes, el cual actúa como un nivel constante de cota 0 msnm en los modelos.

El dominio total (celdas activas e inactivas) de los modelos queda definido a partir de los vértices de la Tabla 7-1, los cuales están en coordenadas WSG84 19S.

Tabla 7-1. Vértices de los modelos numéricos

<b>Modelo numérico</b>	<b>Vértice NW</b>	<b>Vértice NE</b>	<b>Vértice SW</b>	<b>Vértice SE</b>
PUNTA ARENAS	X: 324.000 Y: 4.156.500	X: 382.800 Y: 4.156.500	X: 324.000 Y: 4.044.000	X: 382.800 Y: 4.044.000
CONTINENTAL NORTE	X: 310.000 Y: 4.238.600	X: 477.700 Y: 4.238.600	X: 310.000 Y: 4.142.000	X: 477.700 Y: 4.142.000
TIERRA DEL FUEGO	X: 401.000 Y: 4.187.400	X: 526.100 Y: 4.187.400	X: 401.000 Y: 4.062.000	X: 526.100 Y: 4.062.000

En las figuras Figura 7-3, Figura 7-4 y Figura 7-5 se muestran los dominios de cada uno de los modelos numéricos, donde se diferencia el dominio activo y el dominio inactivo para cada uno de ellos.



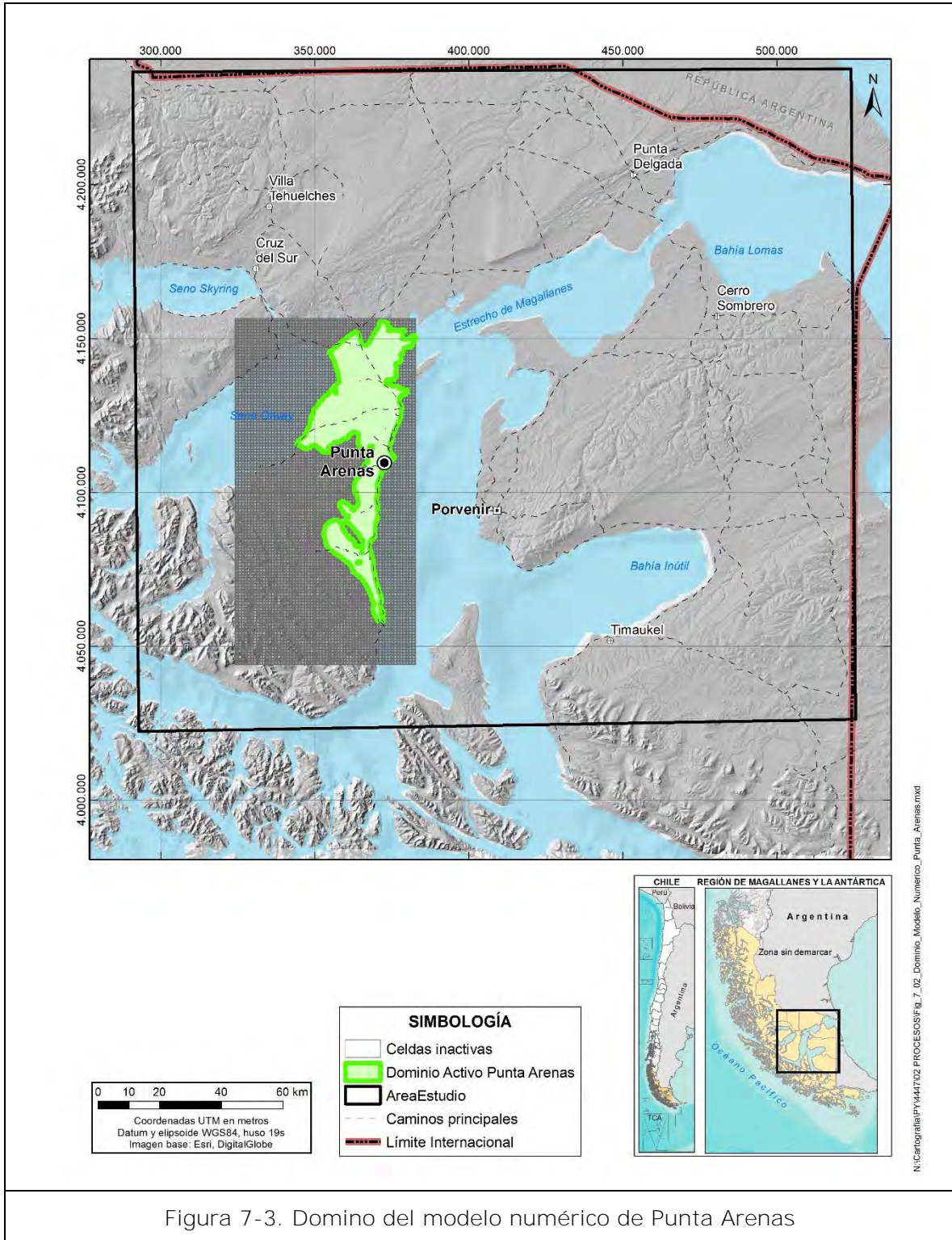
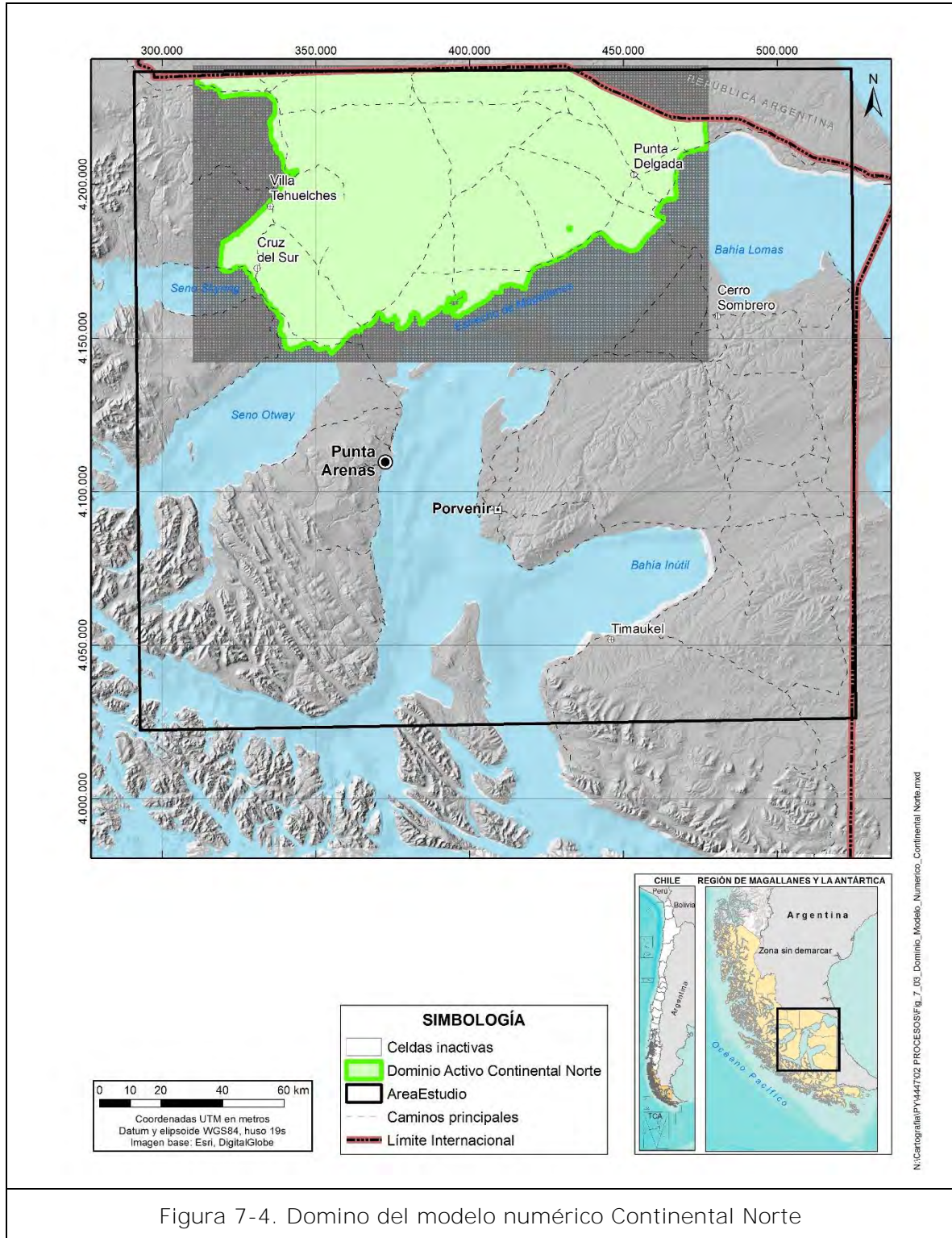


Figura 7-3. Dominio del modelo numérico de Punta Arenas



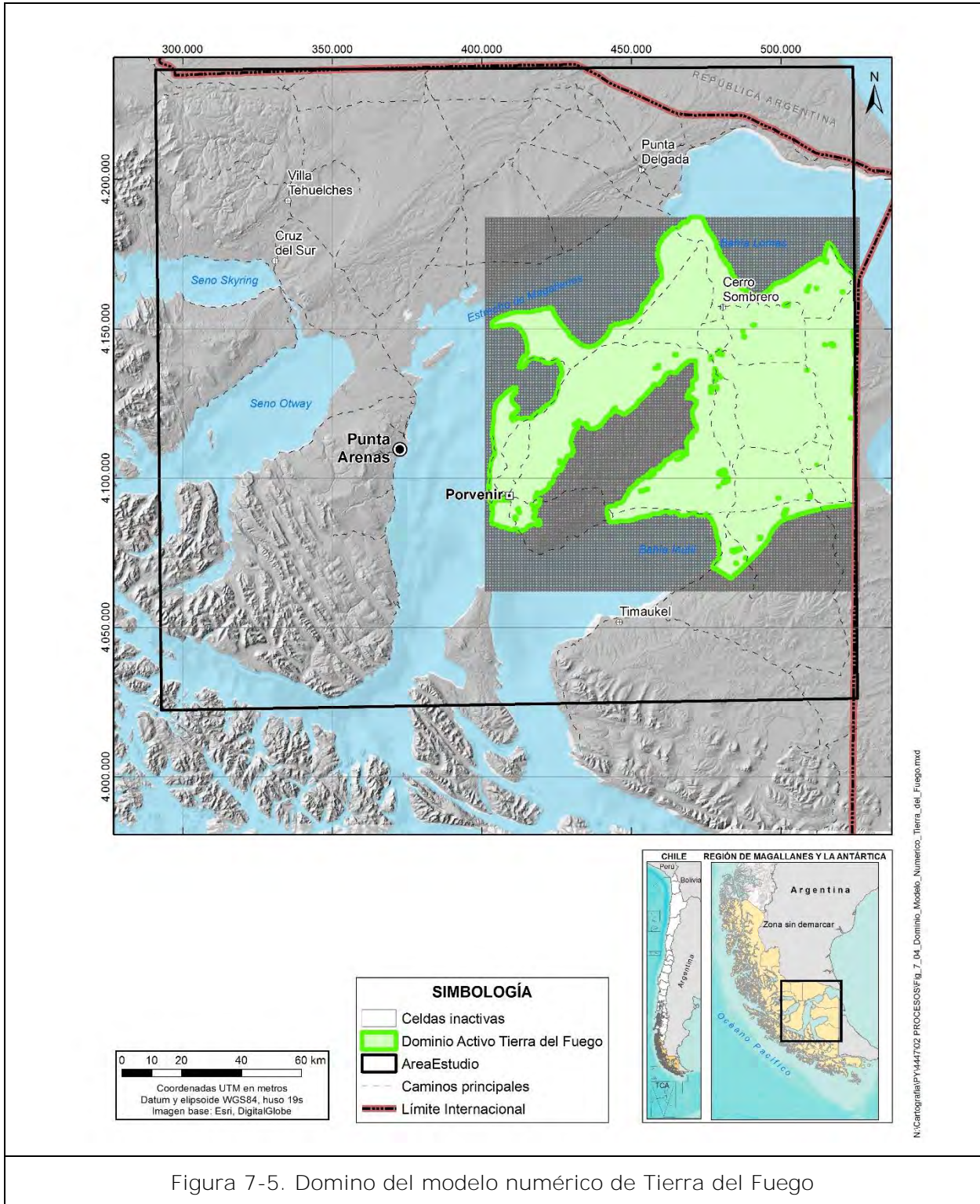


Figura 7-5. Domini del modelo numérico de Tierra del Fuego

---

## 7.3 CÓDIGO DE MODELACIÓN

Para el desarrollo de los modelos numéricos de flujo del sector de estudio se ha optado por elegir códigos pertenecientes a la familia MODFLOW, desarrollados y mantenidos por el USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos), los cuales son de distribución gratuita. Esta elección se hace teniendo en cuenta que este código es de amplio conocimiento y aplicación en Chile a distintos contextos hidrogeológicos, y está dentro de los códigos recomendados por el SEA (2012) para el desarrollo de este tipo de modelos y principalmente, porque se considera apropiado para representar el sistema de flujo conceptualizado.

Dentro de las alternativas clásicas de MODFLOW se encuentran MODFLOW-2000 (Harbaugh et al 2000) y MODFLOW-2005 (Harbaugh 2005). El primero ha sido utilizado extensivamente en Chile, en particular en modelos de disponibilidad hídrica desarrollados para la DGA, pero su desarrollo y mejoramiento por parte del USGS ha sido discontinuado, dejando a MODFLOW-2005 como la versión vigente, la cual recibe constantemente revisiones y actualizaciones.

Por otro lado, existen también alternativas más modernas, basadas en MODFLOW-2005, que resuelven varias de las principales limitaciones asociadas a las versiones clásicas. Dentro de estas se encuentran MODFLOW-NWT (Niswonger et al 2011) y MODFLOW-USG (Panday et al 2013). Ambos códigos son capaces de manejar de forma eficiente los problemas de convergencia numérica derivados del secado y re-humectación de celdas y otras dificultades asociadas al flujo en acuíferos libres (flujo no-lineal) donde existe una componente importante de interacción río-acuífero, donde el último código agrega además una ventaja significativa: la capacidad de emplear grillas flexibles, que permiten focalizar la resolución dentro del dominio sin afectar las celdas ubicadas en los límites de los modelos, similar a lo que los métodos basados en elementos finitos pueden lograr.

La versión que se ha seleccionado para el modelo numérico es MODFLOW-USG, que es la versión más reciente y potente en términos de capacidades de modelación, ya que hace uso del método de volúmenes finitos combinados con diferencias finitas.

Como interfaz gráfica de pre- y post- procesamiento se ha empleado Groundwater Vistas 6 desarrollado por Environmental Simulations Inc.

---

## 7.4 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

La unidad hidrogeológica modelada corresponde a la Unidad Hidrogeológica Cuaternaria (Acápite 6). Esta unidad, que corresponde a los depósitos fluvio-glaciares del Holoceno, es la de mayor interés hidrogeológico, ya que la mayoría de los pozos catastrados tienen una baja profundidad y se encuentran emplazados en esta unidad.

En algunos sectores, el acuífero cuaternario se encuentra confinado por depósitos finos, ya que los sedimentos se encuentran interdigitados por depósitos de arcillas. Estas intercalaciones de capas impermeables o semipermeables producen sectores donde las capas se encuentran confinadas o semi-confinadas. Sin embargo, la extensión de estas zonas de confinamiento es desconocida a efectos de realizar una delimitación de este

comportamiento en el modelo numérico, por lo que no se dispone de datos suficientes para discretizar verticalmente el acuífero en los modelos numéricos.

Por tanto, aunque en algunos sectores de extensión reducida esta unidad hidrogeológica presenta condiciones artesianas, esta unidad se ha representado en los modelos como una sola capa numérica, debido a que el agua que contiene corresponde principalmente a agua freática, almacenada como unidad libre.

## 7.5 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

### 7.5.1 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

El dominio de los tres modelos ha sido subdividido en celdas cuadradas de 300 m de lado, a partir de las cuales se refinó el dominio en los sectores en los que se encuentran las distintas condiciones de contorno, asignándoles celdas más pequeñas, de 75 m de lado. El dominio ha sido refinado en los cauces de los ríos principales, en los pozos de bombeo, y en los bordes de nivel constante, que corresponden con valores fijos del nivel piezométrico, como es la línea de costa y los lagos.

Para esto se usó la técnica denominada *Quadtree suavizado* disponible a través de Groundwater Vistas 6, la cual subdivide cada celda en cuatro partes iguales controlando que ninguna de ellas esté en contacto con más de dos celdas adyacentes, esto permite asegurar el cumplimiento de los requerimientos geométricos de la grilla de un modelo numérico desarrollado con MODFLOW-USG (volúmenes finitos). Para el refinamiento se ha empleado una subdivisión de 4 veces el tamaño de la celda original, de esta forma el tamaño mínimo de celda es de 75 m, el cual se incrementa progresivamente de 2 en 2 pasando a 150 m y luego a 300 m. En la Tabla 7-2 se indican las áreas y número de celdas resultantes para los tres modelos.

Tabla 7-2. Área de los modelos y número de celdas

Modelo numérico	Nº total de celdas	Nº de celdas activas	Área total del modelo (km <sup>2</sup> )	Área activa del modelo (km <sup>2</sup> )
PUNTA ARENAS	124.461	61.723	6.615	1.326,60
CONTINENTAL NORTE	294.373	216.041	16.199,82	9.712,89
TIERRA DEL FUEGO	358.494	262.212	15.687,54	7.802,73

La discretización vertical consta de una capa, la cual corresponde al relleno cuaternario del sector, cuya geometría proviene desde el modelo conceptual desarrollado en Leapfrog (ver Acápite 6.3.2).

En la Figura 7-6 se observa un ejemplo de la discretización realizada a través del *Quadtree suavizado*, con un refinamiento en las condiciones de borde (cotas de nivel constante, ríos, pozos y lagos).

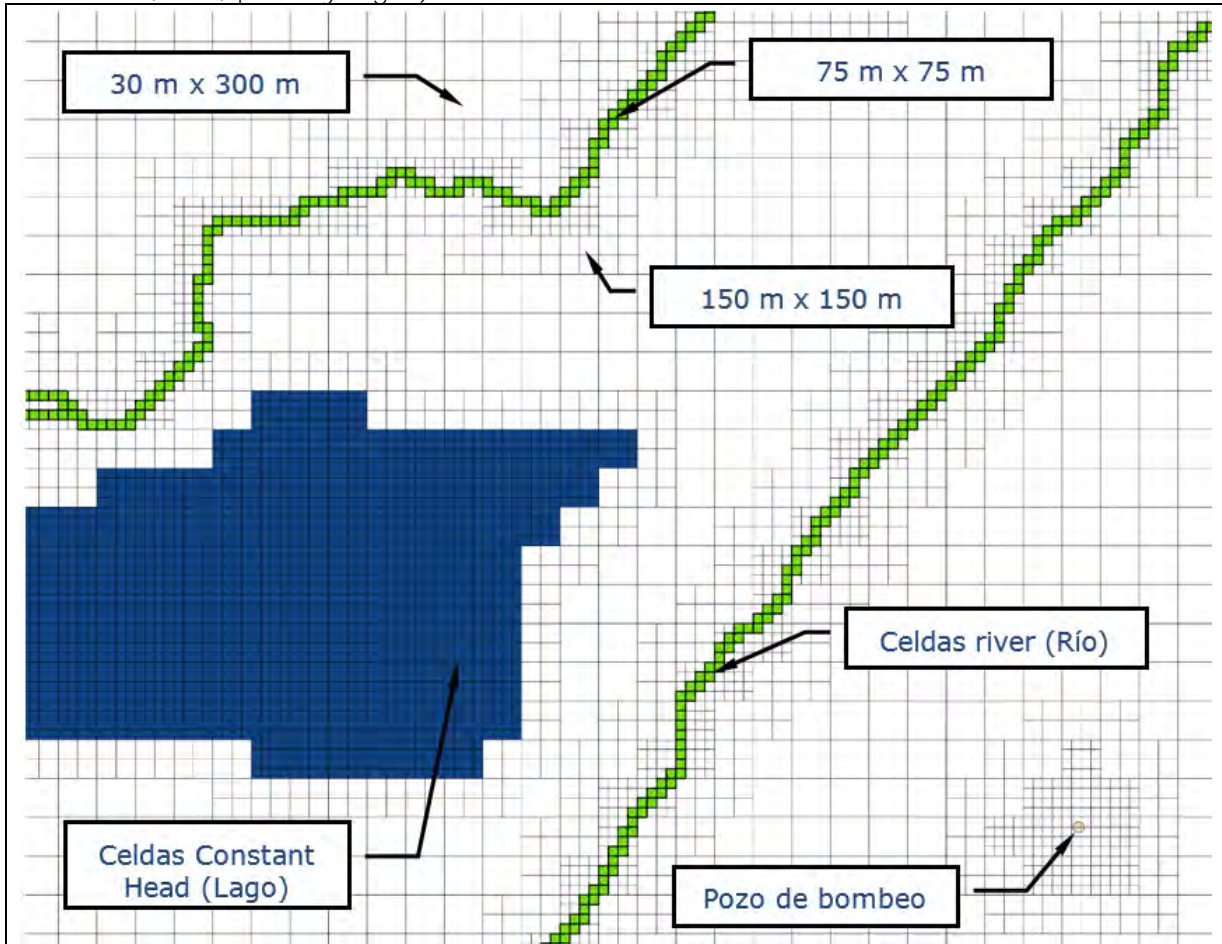
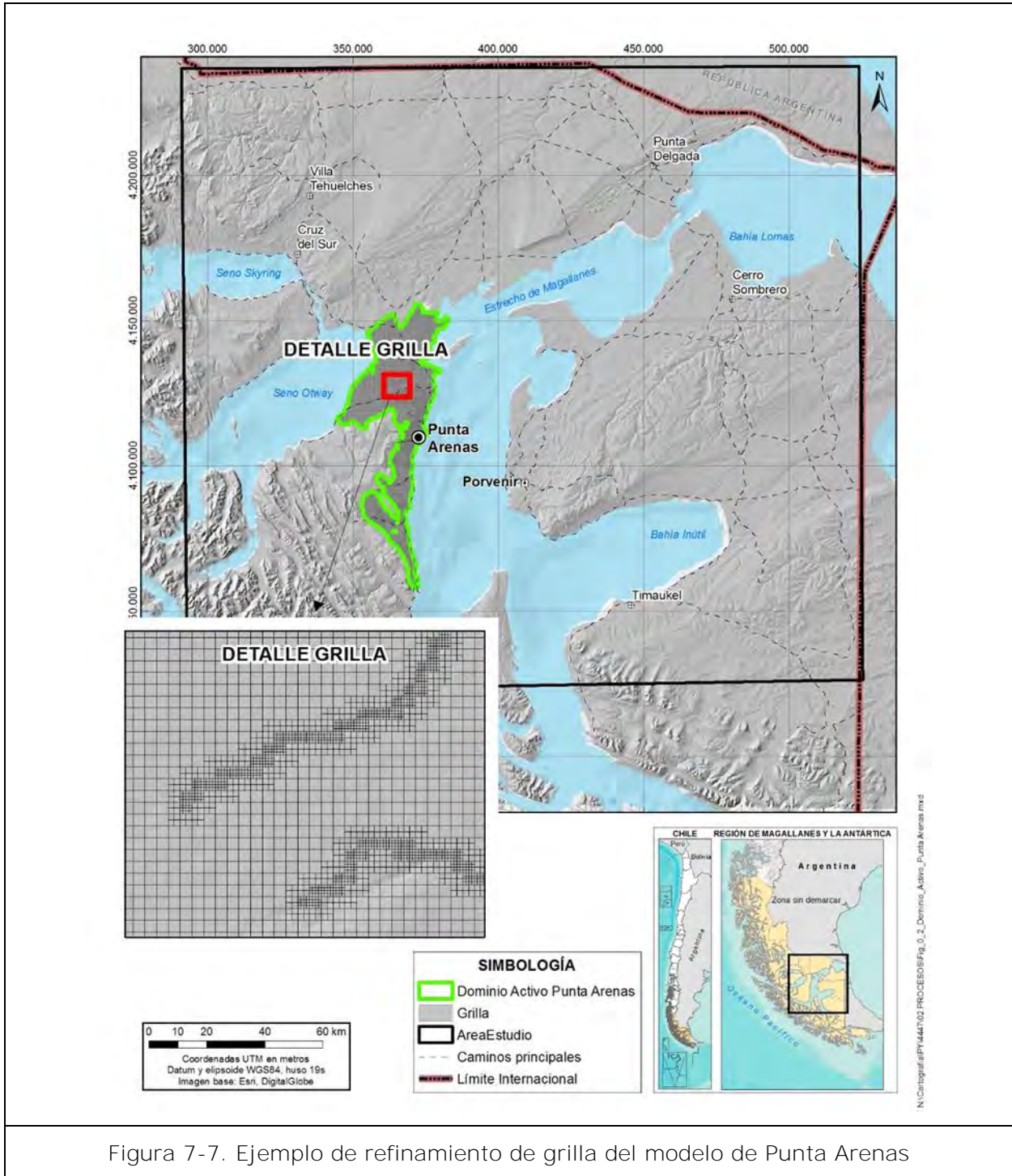


Figura 7-6. Ejemplo de refinamiento de celdas a través de la técnica *Quadtree suavizado*

En las siguientes figuras (Figura 7-7, Figura 7-8 y Figura 7-9) se muestra la grilla de cada uno de los modelos numéricos.



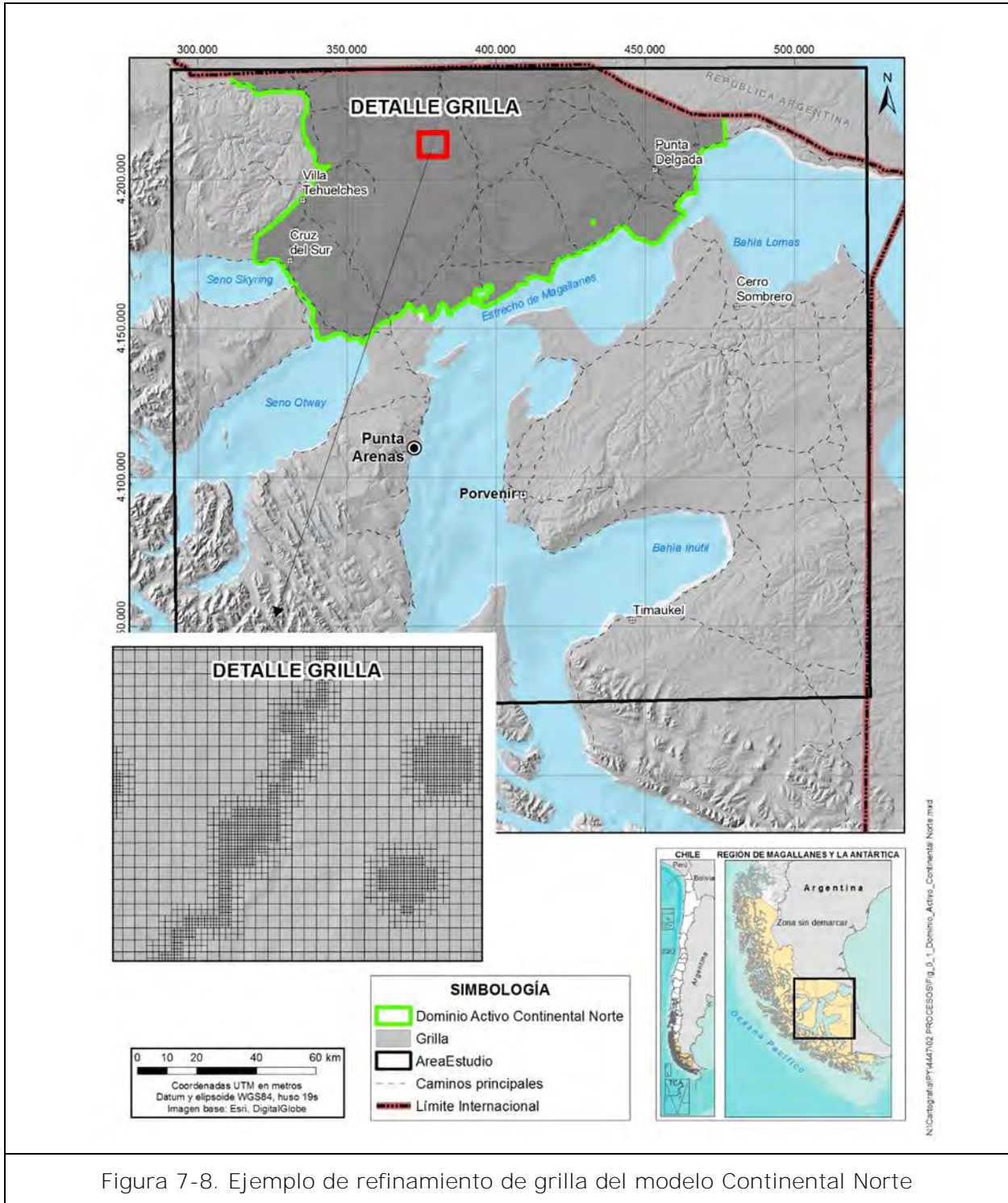


Figura 7-8. Ejemplo de refinamiento de grilla del modelo Continental Norte



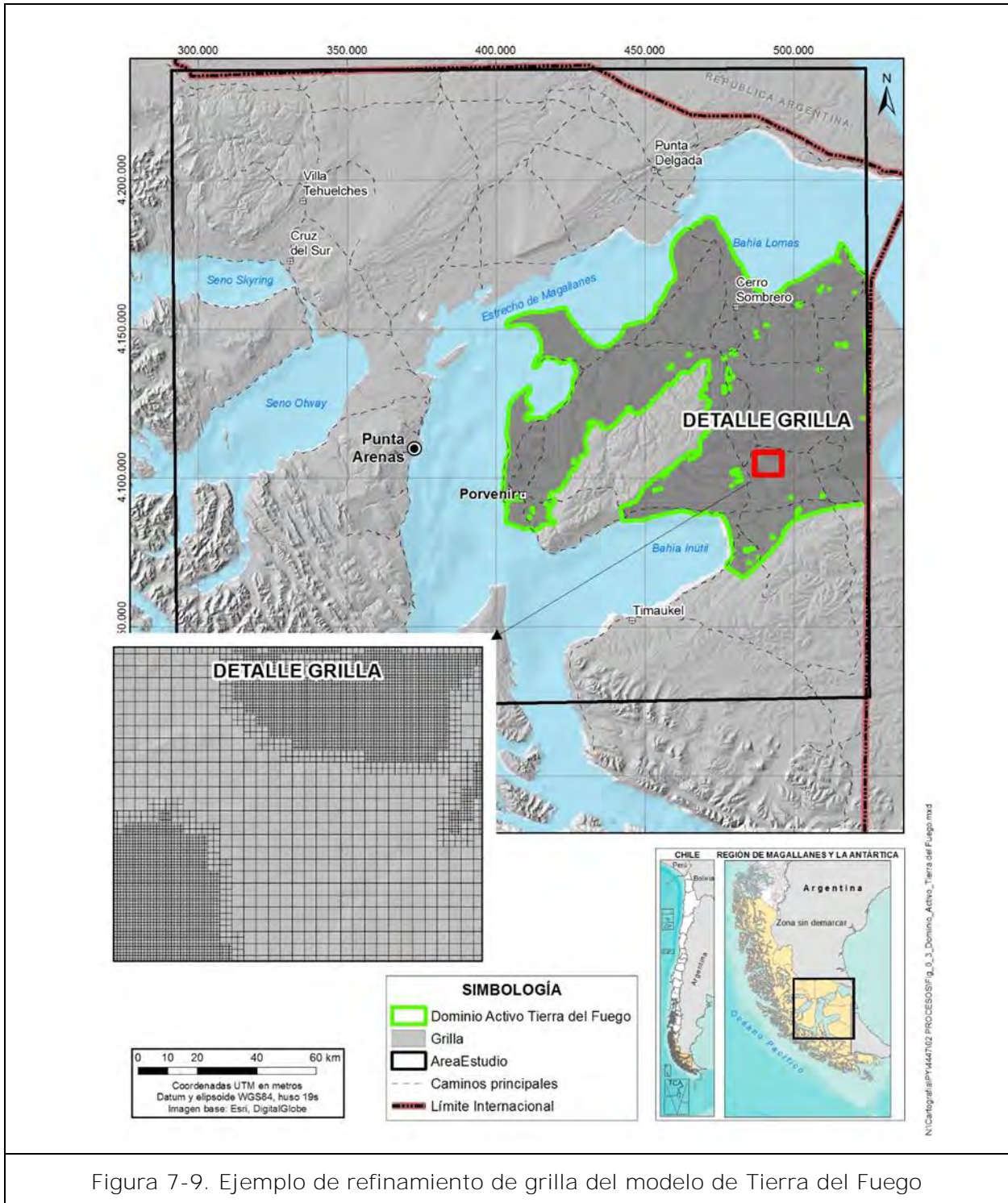


Figura 7-9. Ejemplo de refinamiento de grilla del modelo de Tierra del Fuego

## 7.5.2 Discretización temporal

Debido a que se dispone de solo una medición de niveles piezométricos, generada a través del catastro de pozos, se ha optado por desarrollar una simulación en régimen permanente que permita simular los niveles registrados en el catastro desarrollado en el presente estudio. La simulación permanente apunta a representar las condiciones de equilibrio de largo plazo (incluyendo las extracciones actuales del sistema), suponiendo que éstas son representativas de la superficie piezométrica del sistema.

De esta forma, todas las variables de entrada y salida de los modelos (condiciones de borde) son definidas buscando representar las condiciones hidrológicas que más se asemejen a las condiciones de largo plazo.

---

## 7.6 CONDICIONES DE BORDE

### 7.6.1 Flujos laterales subterráneos

En las zonas donde el nivel piezométrico es conocido se ha utilizado la condición de borde **"Constant Head" (paquete CHD)**. Esta condición de borde mantiene los niveles constantes según el valor de cota asignado. De esta forma, en la línea de costa de los modelos se ha definido un Constant Head de valor 0 msnm, debido a que la cota del nivel piezométrico en estas zonas corresponde con la cota del nivel medio del mar. Esta condición de borde representa la salida de flujo desde los modelos hacia el mar.

También se han definido condiciones de borde **"Constant Head" en las zonas de contacto** del relleno cuaternario con el basamento definido en el modelo conceptual. En estos sectores, la cota de nivel piezométrico asignada a la condición de borde depende de la piezometría de la zona de estudio. Así, estos bordes de cota constante producirán una recarga de flujo hacia el interior de los modelos numéricos, que corresponde con la recarga de flujo desde las unidades subyacentes al relleno cuaternario en estas zonas de contacto. En las celdas donde la piezometría se encuentra por debajo del fondo de la celda, se asume que el nivel de la napa está bajo el relleno cuaternario, por lo que en estas celdas con el nivel bajo la cota de fondo, no se incluye esta condición de contorno, **quedando en estos sectores como borde impermeable (condición de borde "No flow")**. En la Figura 7-10 se muestran las celdas con condición de **borde "Constante Head" en el** contacto del relleno y el basamento, y las celdas donde el nivel piezométrico quedaría por debajo del relleno y por tanto, presentan condición de borde **"No flow"**.

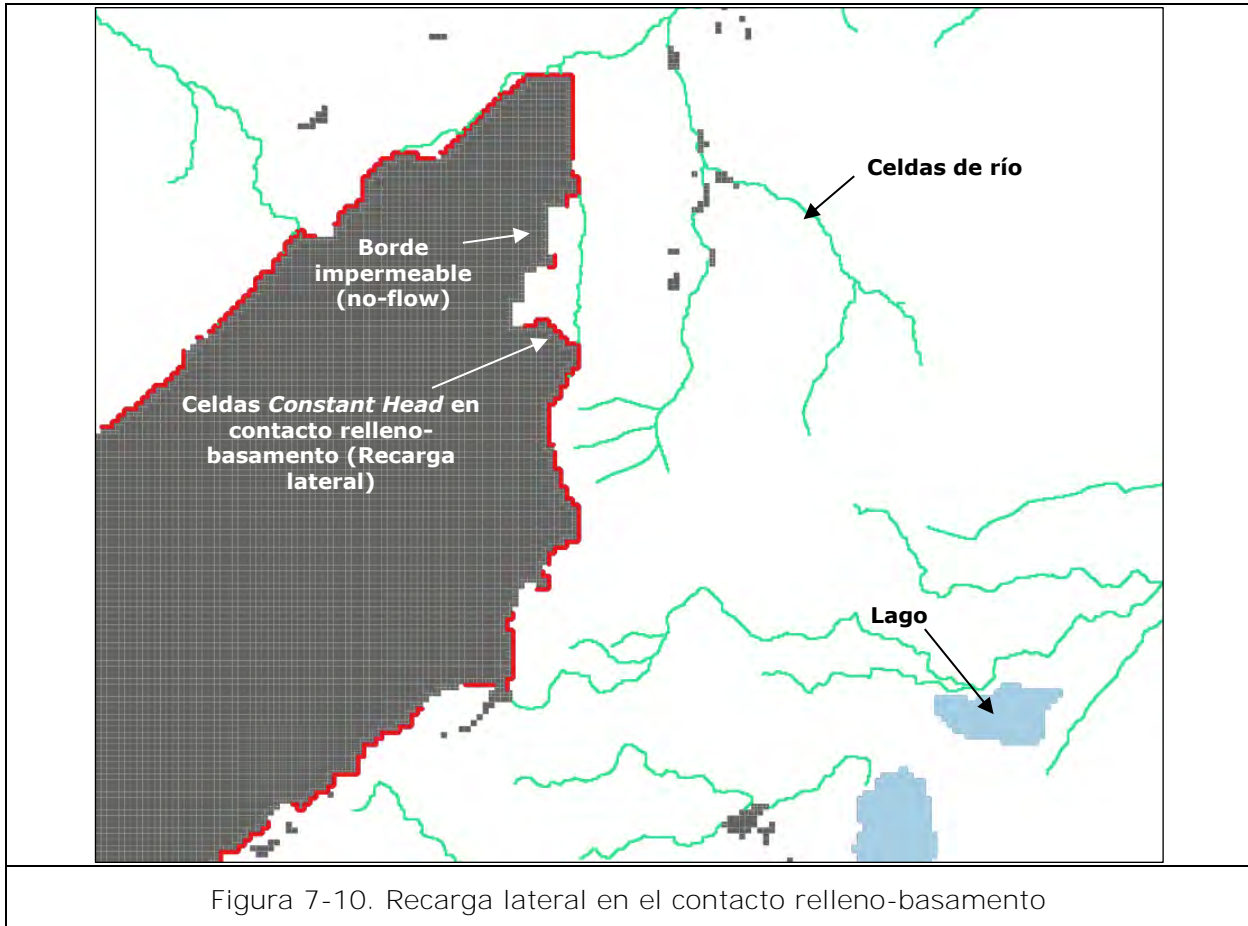


Figura 7-10. Recarga lateral en el contacto relleno-basamento

### 7.6.2 Recarga superficial

La recarga superficial corresponde con la infiltración de la precipitación directa hacia el acuífero. En la Figura 7-11 se identifican las áreas de recarga superficial ingresadas a los modelos numéricos. Las zonas de recarga coinciden con las unidades hidrogeológicas cuaternarias identificadas en el estudio previo de 1991 (DGA/AC Consultores, 1991), dejando sin recarga las unidades de rocas, asumiendo que son impermeables, por lo que son representadas como celdas inactivas. En el caso de la UH 7, ésta queda dividida en dos zonas de recarga diferentes, zona 7 y zona 11, las cuales se sitúan en el modelo Continental Norte y en el modelo de Punta Arenas, respectivamente, ya que tras la calibración de los modelos se obtienen valores distintos para la UH 7 en Punta Arenas (zona 11), y para la UH 7 en el modelo Continental Norte (zona 7).

Las tasas de recargas ingresadas a los modelos corresponden a valores que se encuentran en el rango de la recarga estimada para un 85% y un 95% de excedencia (Capítulo de Evaluación de disponibilidad hídrica). También se ha considerado el rango de valores que se obtuvo en el estudio de 1991 (DGA/AC Consultores, 1991) en la

calibración de este parámetro. En la Tabla 7-3 se indican los datos de recarga que finalmente se han asignado a los modelos numéricos.

Tabla 7-3. Recargas asignadas a los modelos numéricos

<b>MODELO NUMÉRICO</b>	<b>Zona de recarga</b>	<b>UH</b>	<b>Tasa de recarga asignada al modelo numérico (mm/día)</b>
PUNTA ARENAS	1	UH 1	4,44E-07
	2	UH 2	3,00E-07
	11	UH 7	1,49E-07
CONTINENTAL NORTE	3	UH 3	2,90E-08
	4	UH 4	3,28E-08
	5	UH 5	2,90E-08
	6	UH 6	2,19E-08
	7	UH 7	4,00E-08
TIERRA DEL FUEGO	8	UH 8	2,74E-09
	9	UH 9	6,14E-08
	10	UH 10	9,59E-08

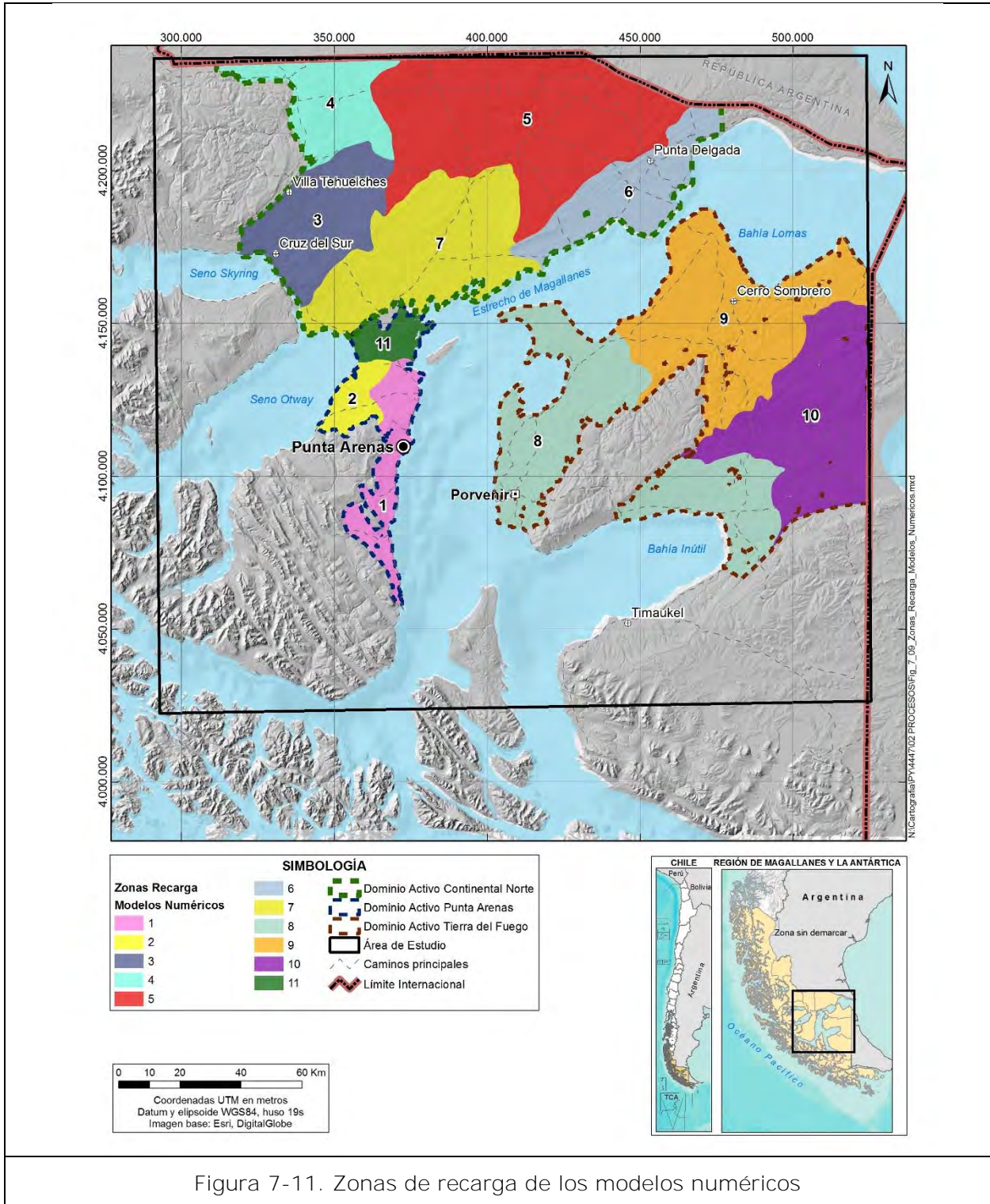


Figura 7-11. Zonas de recarga de los modelos numéricos

La recarga superficial ha sido incorporada a los modelos mediante una condición de borde de flujo especificado utilizando el paquete RCH (*recharge*).

### 7.6.3 Cauces superficiales

Los cauces superficiales representan zonas de intercambio entre el dominio subterráneo y el dominio superficial. A partir del modelo digital del terreno en la zona de estudio se ha definido la red de drenaje de los tres modelos, la cual se ha modelado con la condición de borde "River".

**La condición de borde "River" (paquete RIV) es dependiente de la cota de la napa y el río** (3er tipo o Cauchy). En una celda río, el flujo de agua que entra y sale del acuífero depende de la cota asignada al río y, en menor medida, del valor de la conductancia. El valor de la cota del río (Stage) es comparado con el valor de la cota de agua en el acuífero, en la celda donde se encuentra el río, si el nivel en el acuífero es mayor, el río recibe agua del acuífero, mientras que si es menor, el río infiltra agua hacia el acuífero.

A través de la incorporación de esta condición de borde se busca entregar una vía de salida para las descargas de aguas subterráneas hacia los drenajes superficiales, permitiendo liberar presión dentro del acuífero y bajar los niveles. También se busca simular la recarga que los ríos producen hacia el acuífero en determinados sectores. Este intercambio de flujo queda patente al realizar distintas pruebas de modelación sin incluir esta condición de borde, ya que el agua que recibe el río del acuífero no tiene salida y produce zonas de inundación que no están presentes en la zona de estudio. En el estudio de DGA/AC Consultores (1991) se indica que una fuente importante de recarga la constituye la infiltración que se produce en cauces naturales, esteros y quebradas.

En primer lugar se han incorporado al modelo aquellos cauces de orden 3 y mayores (jerarquización que sigue un orden creciente de importancia desde los puntos altos de una cuenca a los bajos), y en el proceso de calibración se han incorporado cauces adicionales en función de los resultados de nivel obtenidos, identificando cauces de orden menor que presentan intercambio de flujo con el acuífero en base a la profundidad de napa modelada.

**Los datos que requiere el paquete "River" para simular esta condición de borde son los siguientes:**

- Stage (m): Corresponde a la cota del espejo de agua del río. Se ha tomado para todos los ríos un metro por encima de la cota de la superficie del cauce en el modelo digital del terreno.
- Bottom river (m): Corresponde a la cota del lecho del río. Se ha tomado la cota del cauce en el modelo digital del terreno.
- Width (m): Es el ancho del cauce, la cual se ha tomado como un valor constante de 10 m para todos los ríos.
- Conductance (m/día): El valor de la conductancia determina la cantidad de flujo intercambiado entre acuífero y río. Este valor depende de la conductividad hidráulica del lecho del río, el ancho del río, y la longitud del mismo en cada celda del modelo. El valor de la conductancia ha sido modificado en el proceso de calibración, obteniéndose un rango de valores entre 0,1 m/día y 100 m/día.

El intercambio hídrico entre río y acuífero viene dado por la conductancia y la diferencia de cota entre el río y el acuífero.

$$Q_t = \frac{KwL}{m} (h_r - h_a)$$

↓  
Conductancia del lecho  
del río

Donde,

$K$  es la conductividad hidráulica del lecho del río

$w$ , es el ancho del río

$L$ , es la longitud del río en la celda

$m$ , es el espesor del lecho del río

$h_r$ , es el nivel de agua del río

$h_a$ , es el nivel de agua del acuífero

El ancho del río ( $w$ ) es un valor inicial que se usa para asignar un dato inicial de conductancia al río. En el modelo numérico el parámetro que se utiliza es la conductancia, modificándose en el proceso de calibración.

La configuración indicada fue aplicada de igual forma a todos los cauces de los 3 modelos.

#### 7.6.4 Lagos

Los lagos han sido representados con la condición de borde de carga hidráulica conocida (paquete CHD) en base a la cota del espejo de agua obtenido de la información topográfica del modelo de elevación digital. Los lagos que se han incorporado a los modelos corresponden con aquellos que, a través del proceso de calibración, se han identificado que presentan interacción con el acuífero.

En la Figura 7-12 se muestran los lagos simulados en los modelos numéricos a través de carga hidráulica conocida (Constant head).

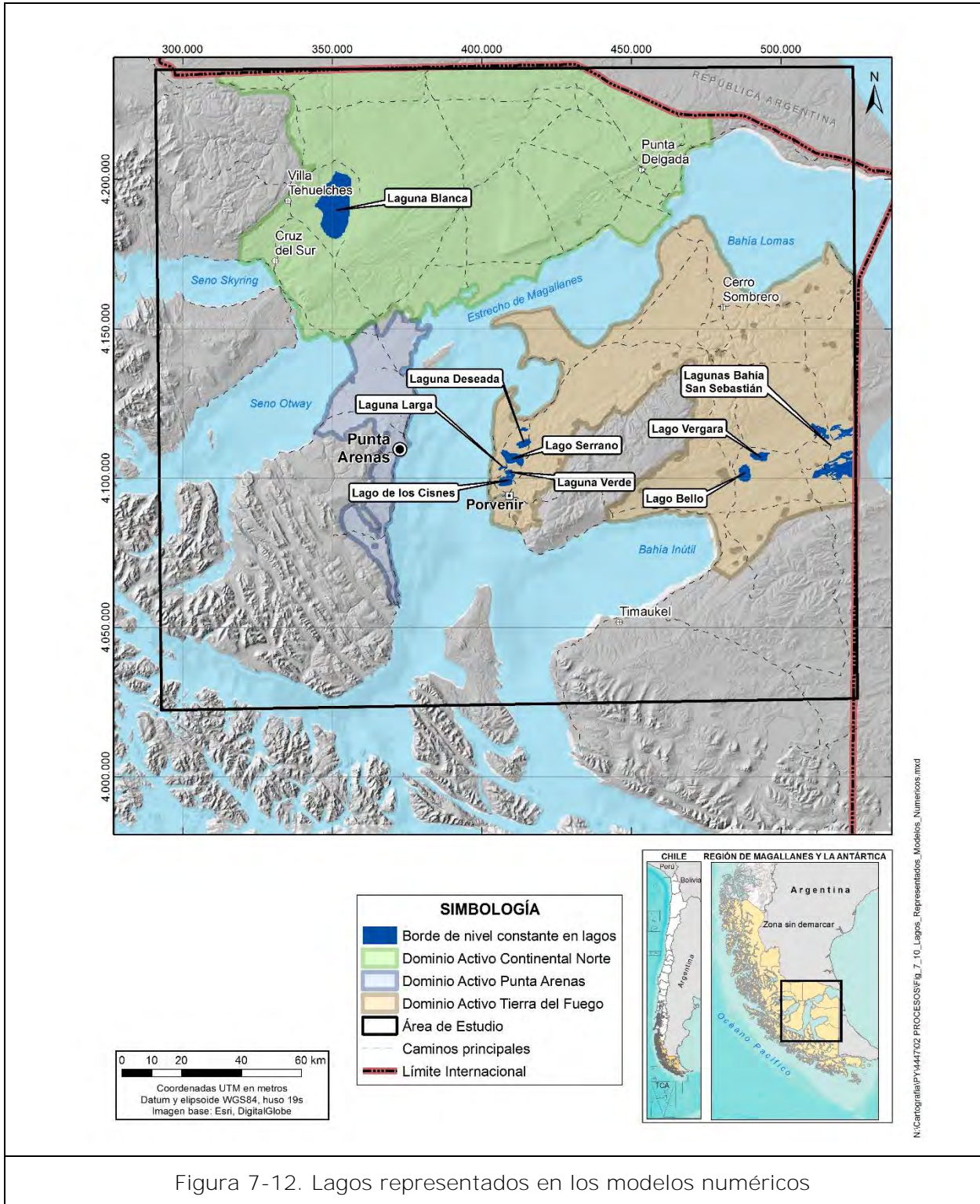


Figura 7-12. Lagos representados en los modelos numéricos



### 7.6.5 Resumen de las condiciones de borde del modelo de Punta Arenas

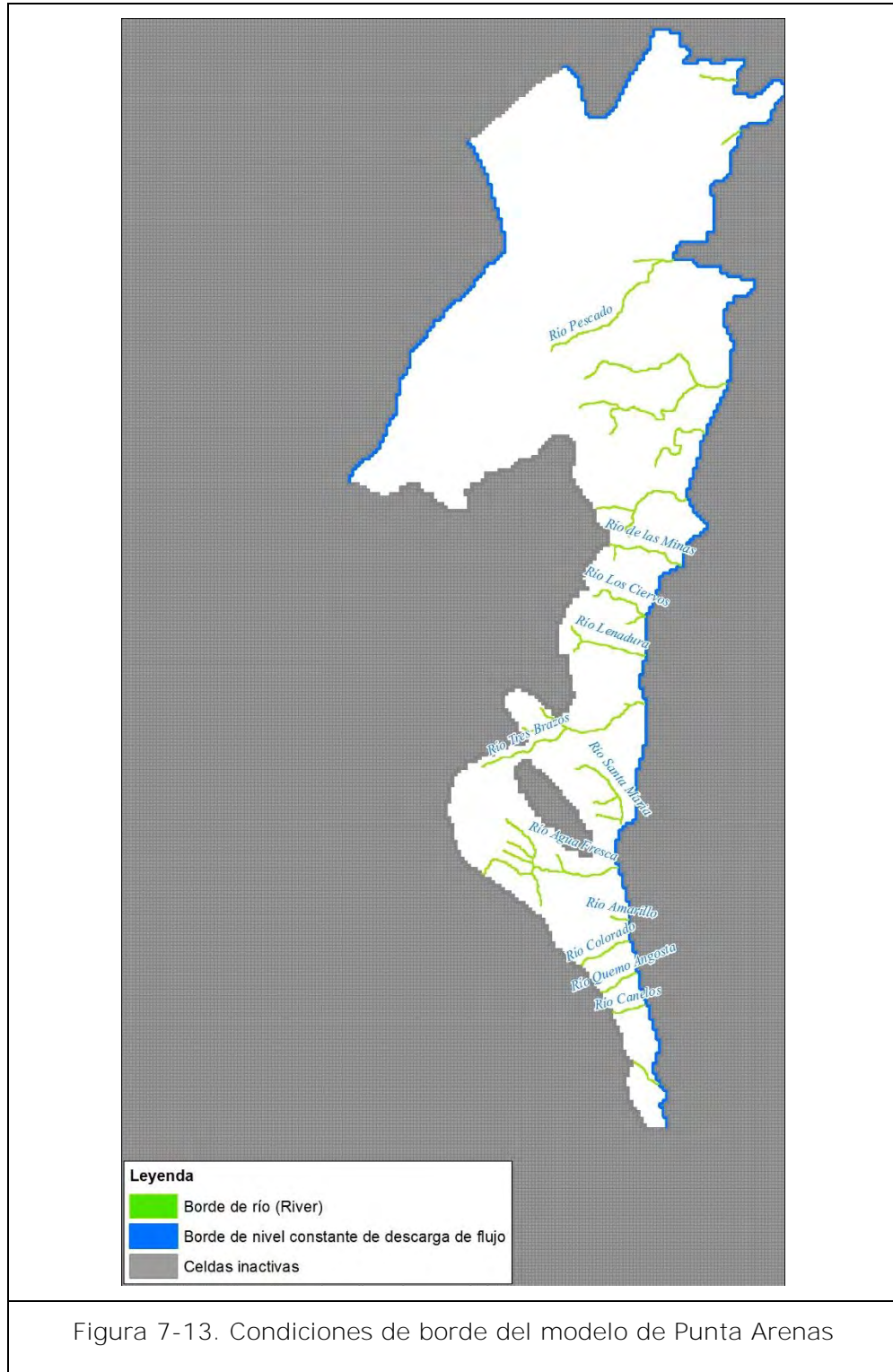
El modelo de Punta Arenas presenta las siguientes condiciones de borde, las cuales se muestran en la Figura 7-13.

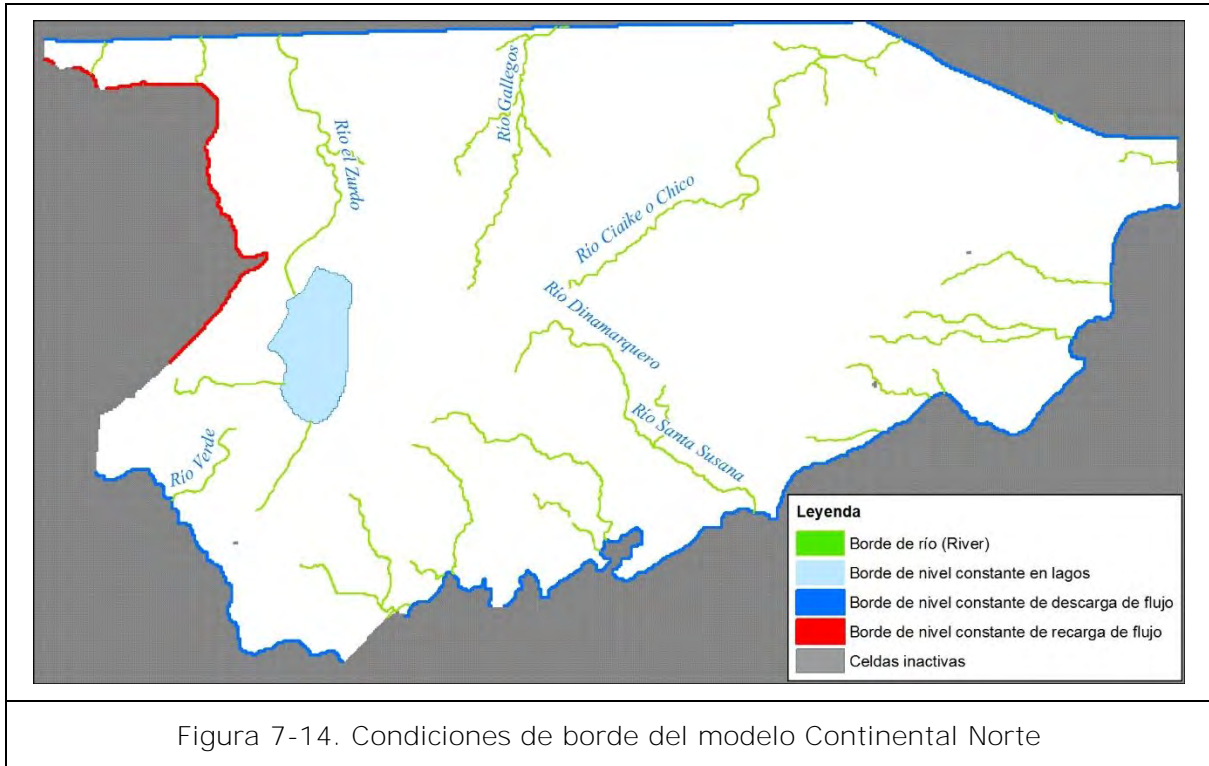
- Bordes de nivel constante de descarga de flujo subterráneo. Se sitúan en la línea de costa con cota igual a cero, situada hacia el sector este y oeste del modelo, y representan una salida de agua subterránea hacia el mar.
- Bordes impermeables: En el contacto del relleno cuaternario con las unidades subyacentes que presentan su afloramiento hacia el suroeste del sector modelado, se ha representado un borde impermeable.
- Borde de río (River). Se ha representado esta condición de borde en los ríos más importantes del sector, los cuales se muestran en la Figura 7-13, como el río Leñadura, río Los Ciervos y río de las Minas, y que presentan intercambio de flujo con el acuífero cuaternario.

### 7.6.6 Resumen de las condiciones de borde del modelo Continental Norte

El modelo Continental Norte presenta las siguientes condiciones de borde, las cuales se muestran en la Figura 7-14.

- Bordes de nivel constante de descarga de flujo subterráneo. Se sitúan en la línea de costa con cota igual a cero, situada en el sector sur, en el estrecho de Magallanes, y corresponden a una salida de flujo subterráneo hacia el mar. También hacia el norte se encuentra una salida lateral de flujo subterráneo hacia el sector argentino, cuya cota se ha definido en función de la piezometría realizada en el modelo conceptual.
- Bordes de nivel constante de recarga de flujo subterráneo. Se sitúan en el sector oeste, donde los sectores altos de los relieves situados hacia el oeste del sector, recargan el acuífero lateralmente. Esta condición de borde se ha definido mediante la cota de nivel piezométrico en función de la piezometría realizada en el modelo conceptual.
- Bordes de nivel constante en lagos. Estas condiciones de borde mantienen el valor de la cota correspondiente a la superficie del agua en el lago, la cual se ha tomado del modelo digital del terreno. El lago representado por esta condición de borde es Laguna Blanca, ubicada en el sector oeste.
- Borde de río (River). Se ha representado esta condición de Borde en los ríos más importantes del sector, los cuales se muestran en la Figura 7-14, tales como el río Gallegos, río Chico y río el Zurzo, y que presentan intercambio de flujo con el acuífero cuaternario.





### 7.6.7 Resumen de las condiciones de borde del modelo de Tierra del Fuego

El modelo de Tierra del Fuego presenta las siguientes condiciones de borde, las cuales se muestran en la Figura 7-15.

- Bordes de nivel constante de descarga de flujo subterráneo. Se sitúan a lo largo de toda la línea de costa del modelo, que se encuentra en el sector norte y oeste, en el estrecho de Magallanes, y hacia el sur, en el sector de Bahía Inútil. Esta condición de borde representa una salida de flujo subterráneo hacia el mar y presenta cota igual a cero. Otro borde de este tipo se encuentra hacia el sector este del modelo donde representa una salida de flujo subterráneo hacia la zona argentina de Tierra del Fuego, donde la cota de este borde se ha fijado en 10 m por debajo de la superficie del terreno. Esta cota ha sido asignada en función de los datos de piezometría y elevación del terreno en este sector, de forma de que el nivel se presente siempre bajo la cota del terreno y a la profundidad media que representa según el trazado de la piezometría. También se basó en la calibración del modelo en este sector, debido a que en este límite del modelo no se dispone de datos del nivel piezométrico en pozos de observación.
- Bordes de nivel constante de recarga de flujo subterráneo. Se sitúan en las zonas más altas, en la sierra de Balmaceda y en el sector sur, hacia el este de Bahía Inútil. En estos dos sectores representan una entrada de flujo subterráneo hacia el acuífero. Bordes de nivel constante en lagos. Estas condiciones de borde

mantienen el valor de la cota correspondiente a la superficie del agua en el lago, la cual se ha tomado del modelo digital del terreno.

- Bordes de nivel constante en lagos. Los lagos representados por esta condición de borde son, en el sector oeste; Laguna Deseada, Lago Serrano, Laguna Verde, Laguna Larga y Lago de los Cisnes, y en el sector este; Lago Bello, Lago Vergara y el conjunto de lagunas situadas en el sector de Bahía San Sebastián.
- Borde de río (River). Se ha representado esta condición de Borde en los ríos más importantes del sector, los cuales se muestran en la Figura 7-15, como el río Side, río Oscar y río Oro, y que presentan intercambio de flujo con el acuífero cuaternario.

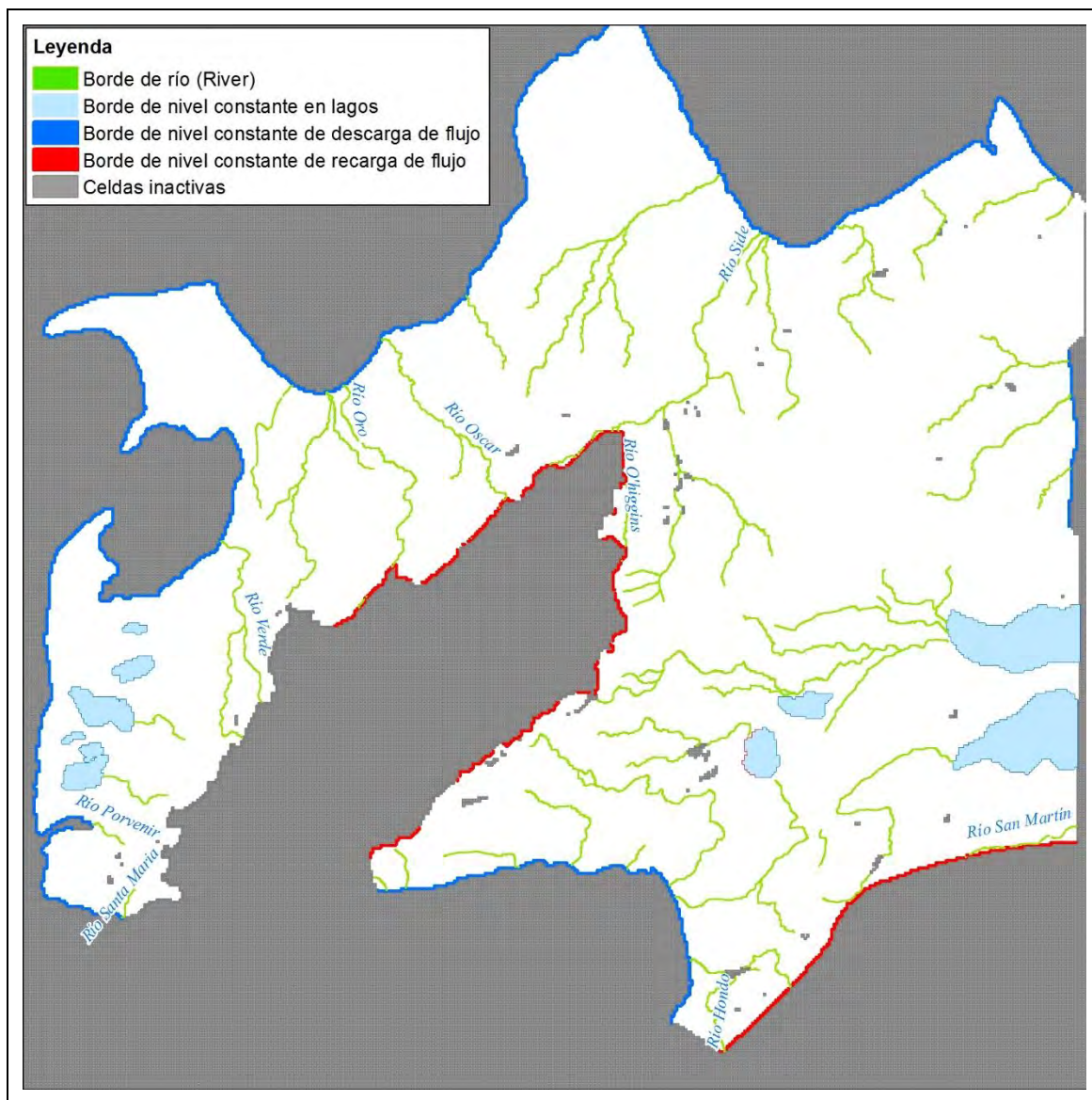


Figura 7-15. Condiciones de borde del modelo Tierra del Fuego

## 7.7 PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Las zonas de conductividad hidráulica se han definido a partir de la delimitación de las Unidades Hidrogeológicas del sector. A partir de esta distribución, se ha calibrado la conductividad hidráulica, teniendo en cuenta el rango de valores que se ha obtenido en las pruebas de bombeo para cada sector modelado.

El rango obtenido en las pruebas de bombeo es de 0,02 a 115 m/día. Las pruebas de bombeo se encuentran localizadas en los dominios de Punta Arenas y Tierra del Fuego, ya que en el sector Continental Norte no se dispone de información.

La conductividad hidráulica de las pruebas de bombeo en Tierra del Fuego oscila entre 0,2 y 9,9 m/día, y en el sector de Punta Arenas oscila entre 0,09 y 115,2 m/día.

Se han definido las distintas zonas de conductividad hidráulica a lo largo del proceso de calibración, para finalmente obtener la distribución de este parámetro, a partir de la cual se obtiene una mejor calibración de niveles, así como un balance hídrico acorde con el sector de estudio. Inicialmente se asignan valores arbitrarios en las zonas donde no hay información, en función de los valores de conductividad hidráulica aportados por los antecedentes y el análisis de las pruebas de bombeo, y posteriormente estos valores se modifican en función de la variación de la piezometría del modelo conceptual.

En el modelo de Punta Arenas, la conductividad hidráulica calibrada oscila entre 0,4 y 8 m/día, como se muestra en la Figura 7-16. En el modelo Continental Norte, cuya distribución de conductividad hidráulica se muestra en la Figura 7-17, el rango de conductividad hidráulica calibrada oscila entre 0,04 y 18 m/día. Por último, en la Figura 7-18 se muestra la distribución de conductividad hidráulica calibrada en el modelo de Tierra del Fuego, cuyo rango oscila entre 0,02 y 20 m/día. Estos valores se encuentran dentro del rango obtenido en las prueba de bombeo y consiguen representar la piezometría obtenida en el modelo conceptual.

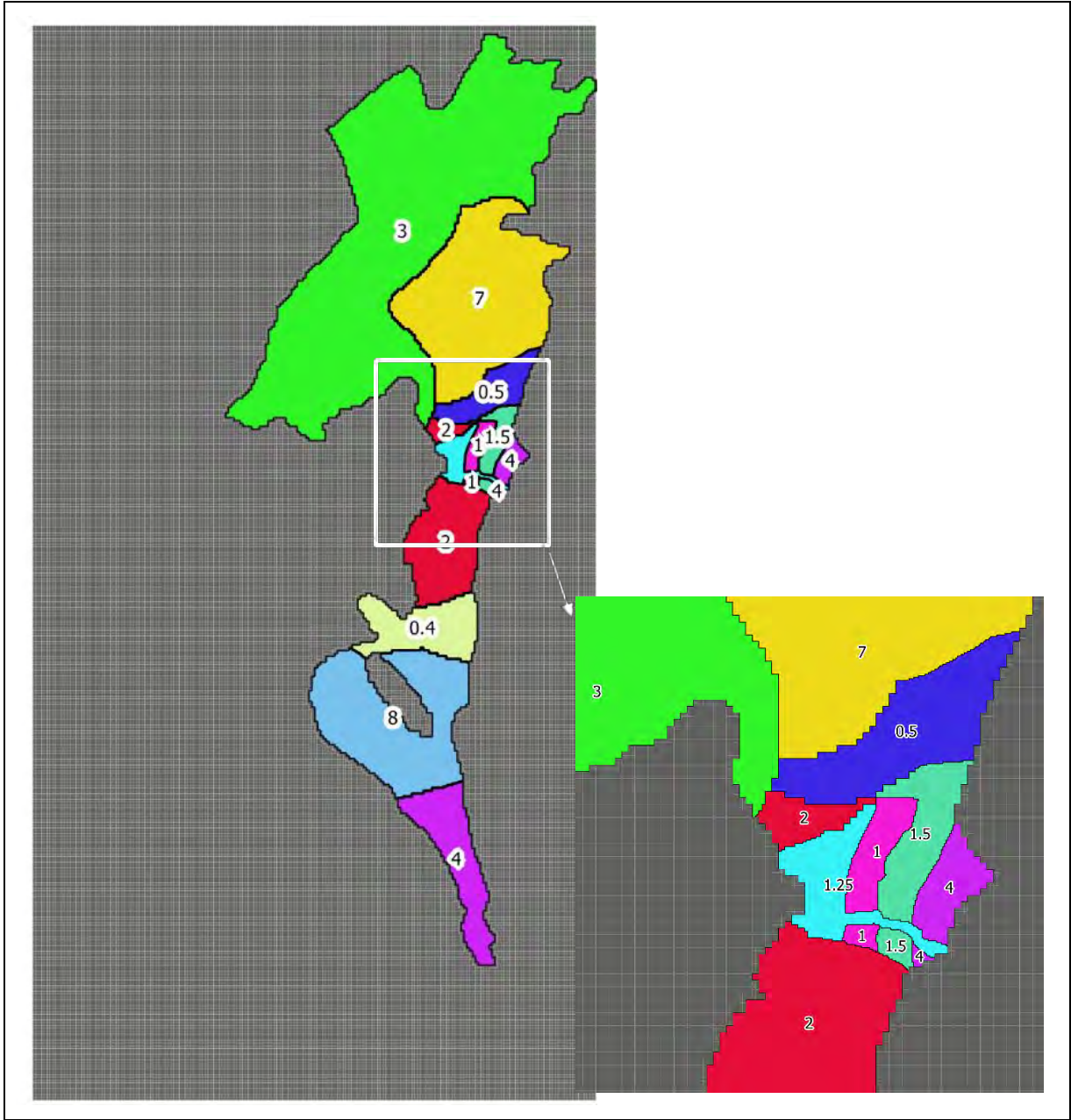


Figura 7-16. Distribución de la conductividad hidráulica calibrada en el modelo de Punta Arenas (Valores en m/día)

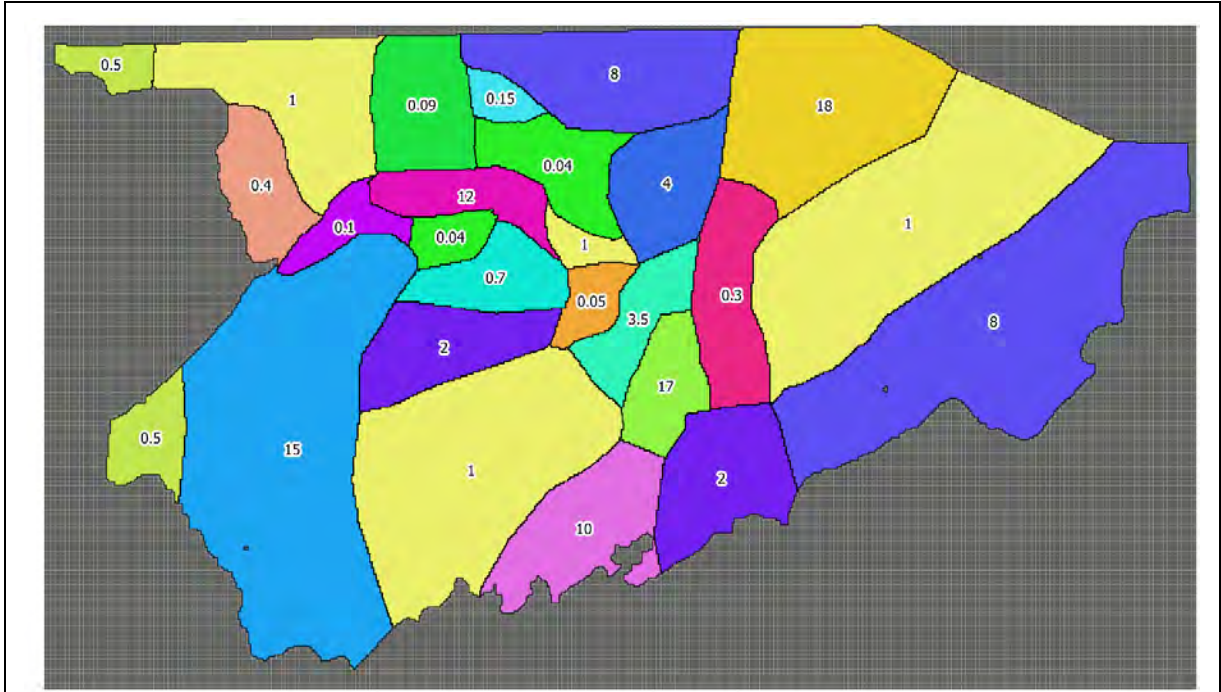


Figura 7-17. Distribución de la conductividad hidráulica calibrada en el modelo Continental Norte (Valores en m/día)

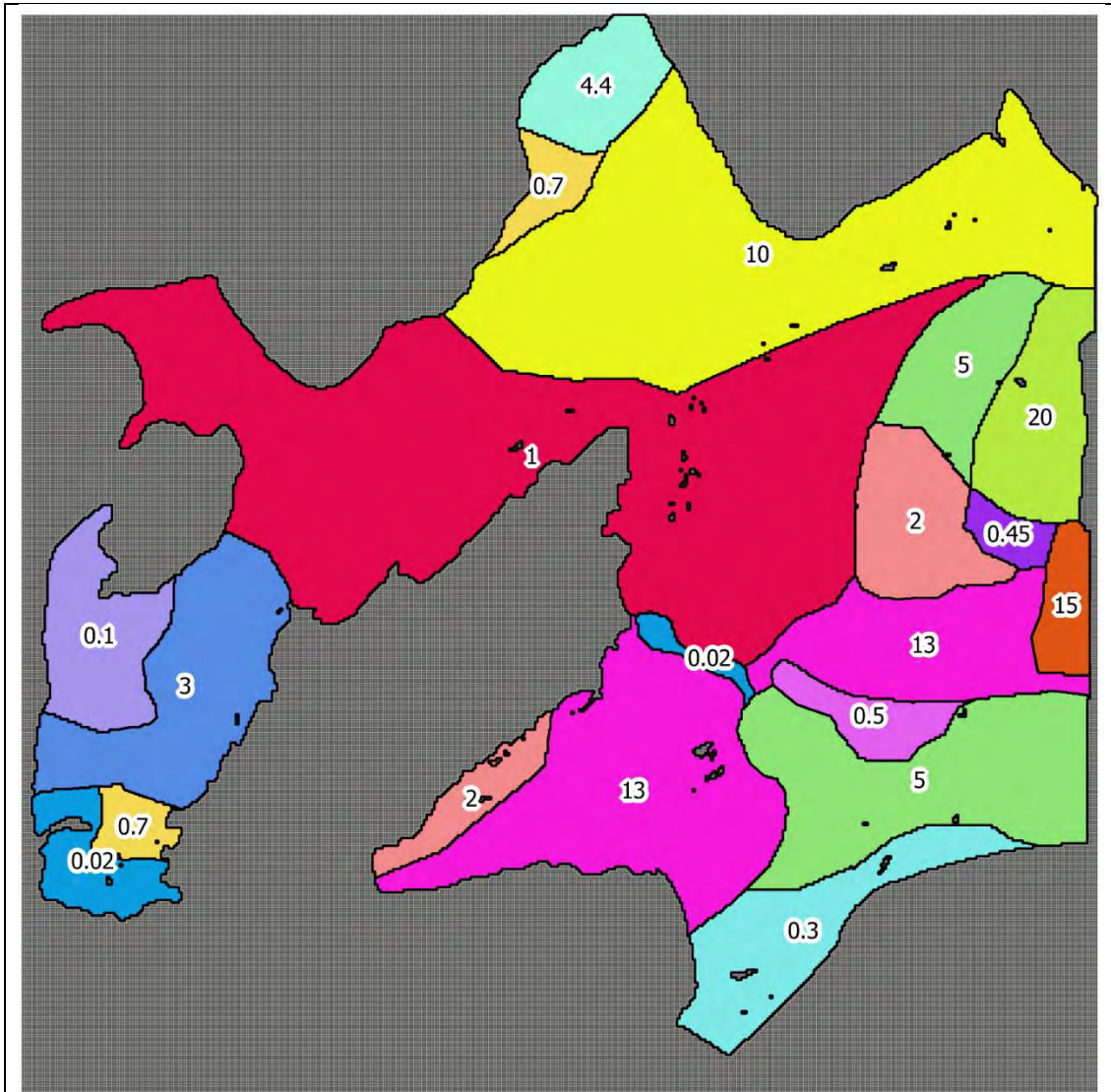


Figura 7-18. Distribución de la conductividad hidráulica calibrada en el modelo de Tierra del Fuego (Valores en m/día)



## 7.8 EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS

Las extracciones consideradas en el modelo provienen del catastro de captaciones generado en la Etapa I del presente estudio. En el dominio de los tres (3) modelos numéricos se encuentran 308 captaciones de agua subterránea, las cuales presentan un total de 400,2 L/s en derechos otorgados.

Para estimar el caudal efectivo de bombeo, se multiplicó el caudal total de derechos otorgados (400,2 L/s) por un factor, estimado a partir del uso del derecho, denominado factor de uso. Este factor de uso, tal como se explica en el Acápito 4.3, fue estimado en el área de estudio pero, dada la falta de información entregada por los mismos usuarios, se consideró prudente, según la experiencia del consultor, el uso de factores de uso disponibles por bibliografía ya observados en otros estudios en Chile. En particular se propone utilizar los factores observados en el Estudio Hidrogeológico de la Araucanía (Arcadis, 2013-en desarrollo). Estos factores de uso son el resultado de la información sobre caudal y horas de extracción entregada por el entrevistado proveniente de un catastro de más de 3.000 captaciones subterráneas.

En este sentido, se emplearon los factores de uso indicados en la Tabla 7-4, lo que da como resultado una producción estimada de 143,82 L/s.

Tabla 7-4. Factores de uso del agua subterránea

Uso	Factor de Uso
Agua Potable y Doméstico	0,7
Riego	0,2
Industrial	0,4
Otro	0,5

Los pozos que se encuentran en desuso según el catastro, se han incluido en el modelo con caudal nulo en caso de que se simulen extracciones en los mismos en futuras simulaciones.

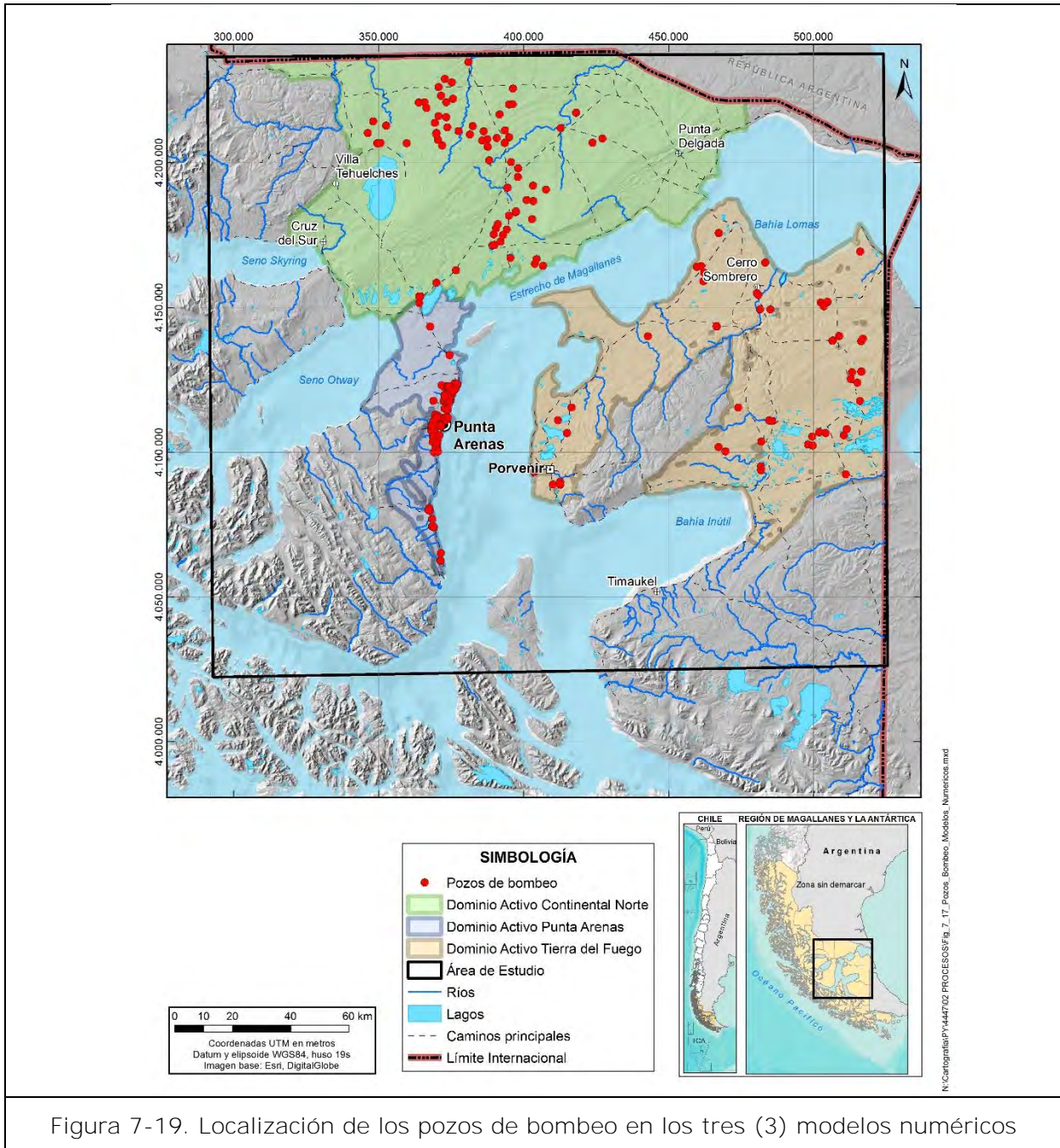
En la Tabla 7-5 se indican los caudales extraídos en cada modelo numérico y los derechos totales de los mismos. Para los pozos que según el catastro no están en uso actualmente, se ha mantenido el pozo de bombeo con un caudal nulo, obteniéndose 243 pozos que presentan bombeo actualmente.

Tabla 7-5. Pozos de bombeo y caudales asignados a los modelos numéricos

Modelo numérico	Nº de pozos	Nº de Pozos actualmente en uso	Caudal con factor de uso (L/s)	Caudal derechos otorgados (L/s)	Caudal derechos otorgados y pendientes (L/s)
Punta Arenas	177	151	46,58	107,67	115,32
Continental Norte	72	48	48,38	127,60	127,60
Tierra del Fuego	59	44	48,86	164,93	195,93

Total	<b>308</b>	<b>243</b>	143,82	400,20	438,85
-------	------------	------------	--------	--------	--------

En la Figura 7-19 se observa la localización de todos los pozos de bombeo que están incluidos en los tres (3) modelos numéricos.



---

## 7.9 CONDICIÓN INICIAL

Debido a que se trata de una simulación de régimen permanente la altura inicial no es relevante para el resultado de la simulación, dado que éste sólo depende de la distribución espacial del campo de permeabilidades y de las condiciones de borde impuestas.

La elección de una u otra condición inicial sólo tiene incidencia en el tiempo de corrida del modelo, luego se eligió aquella que permita correr el modelo en el menor tiempo posible. Esta se obtuvo a partir de un proceso iterativo el cual partió con la topografía como altura inicial pasando a utilizar salidas sucesivas de la calibración en la medida que esta progresaba.

---

## 7.10 PARÁMETROS NUMÉRICOS MOTOR DE FLUJO

Las diferentes configuraciones empleadas para definir el funcionamiento del modelo numérico se listan a continuación:

- Se utiliza el paquete de flujo LPF (Layer Property Flow Package) de MODFLOW-USG (Harbaugh 2005; Niswonger et al 2011).
- Para el período de **stress** que representa el régimen permanente se utiliza una duración de 10 días, con 1 TS (*time steps*) y un TSM (*time step multiplier*) igual a 1,2.
- Se utiliza la opción LAYCON=4 (USG Upstream Water Table) para definir el tipo de flujo (acuífero libre) en la capa del modelo, lo que es equivalente a la opción pseudo-soil de MODFLOW-SURFACT (HydroGeoLogic 2008). Esto elimina la necesidad de emplear las opciones clásicas de re-humectación (*rewetting*) de celdas de MODFLOW-2000, mejorando notablemente las propiedades de convergencia del modelo.
- Se utiliza la opción de promedios armónicos para las transmisividades interceldas.
- Las recargas superficiales son aplicadas sobre la capa activa.
- Se emplea el **solver** gratuito disponible a través de MODFLOW-USG para resolver las ecuaciones de acuerdo al detalle presentado más abajo.

MODFLOW-USG introduce un nuevo paquete denominado SMS (Sparse Matrix Solver) para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales, el cual en la práctica incorpora dos solvers:  $\chi$ MD (Ibaraki, 2011) y PCGU (White & Hughes, 2012).

Para la calibración de régimen permanente el solver seleccionado fue  $\chi$ MD debido a presentó mejores propiedades de convergencia dentro de la simulación desarrollada. Los parámetros específicos requeridos para configurar el solver fueron definidos de acuerdo en base a la experiencia de este consultor desarrollando variados modelos con MODFLOW-USG, los que son presentados en la Figura 7-20.

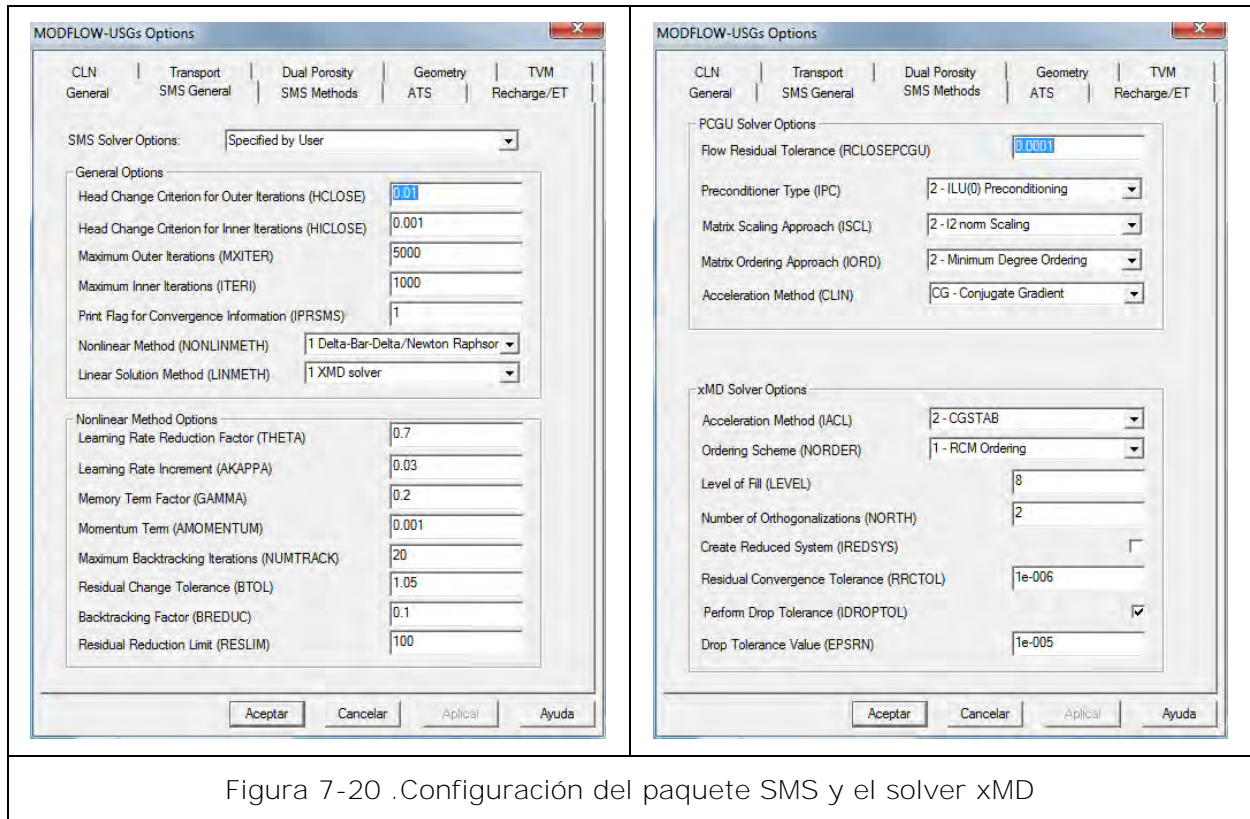


Figura 7-20 .Configuración del paquete SMS y el solver xMD

## 7.11 CALIBRACIÓN MODELO DE FLUJO

### 7.11.1 ESTRATEGIA Y PATRÓN DE CALIBRACIÓN

La calibración del modelo se hizo teniendo como objetivo ajustar los niveles de agua en los pozos catastrados. La calibración se desarrolló tanto de forma manual (prueba y error) y también de forma asistida mediante el software PEST (Doherty 2010; Doherty 2015).

Para los datos de niveles piezométricos en los pozos, se ha tenido en cuenta que éstos corresponden a niveles estáticos que indican una situación de equilibrio a largo plazo, y que las extracciones son representativas de la superficie piezométrica del sistema. No obstante, en algunos casos, en el proceso de calibración se han excluido determinados pozos que parecen indicar un nivel dinámico puntual que difiere de los puntos cercanos, por lo que estos datos dinámicos no han sido incluidos en la calibración de los modelos. Estos puntos corresponden a pozos que presentan unas extracciones de 0,1 L/s o

mayores en el modelo Continental Norte, que es donde se han encontrado las mayores diferencias de nivel en pozos que se encuentran próximos entre sí.

Las cotas de nivel piezométrico se han re-calculado en función de la topografía del modelo numérico, la cual se ha obtenido del modelo digital del terreno. Una vez que la grilla de los modelos ha sido definida, se han extraído las cotas topográficas de las celdas en las que se encuentran los pozos de observación para obtener la cota del nivel en los mismos en función de la cota topográfica del modelo.

En la Figura 7-21 se muestran los pozos de observación (targets) utilizados en la calibración de los tres modelos numéricos.

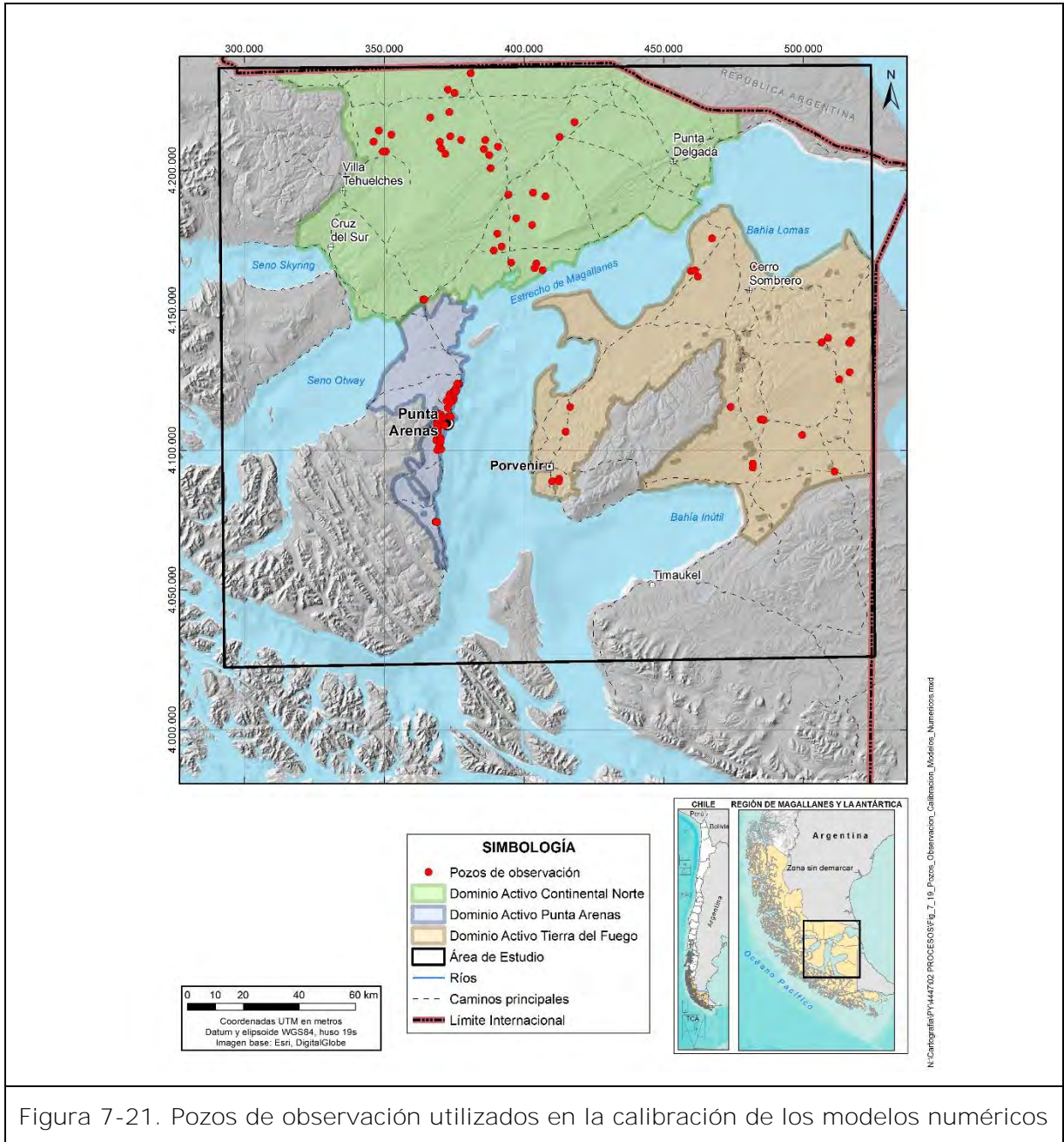


Figura 7-21. Pozos de observación utilizados en la calibración de los modelos numéricos

## 7.11.2 Resultados del Modelo de Punta Arenas

### Componentes y error del balance de masas

En la Tabla 7-6 se resumen las componentes del balance hídrico calculado en el modelo numérico de Punta Arenas empleando los parámetros hidráulicos calibrados.

Tabla 7-6. Balance de masas en régimen permanente del modelo de Punta Arenas

<b>CONDICIÓN DE BORDE</b>	<b>ENTRADAS (L/s)</b>	<b>SALIDAS (L/s)</b>	<b>NETO (L/s)</b>
Flujo lateral subterráneo (Constant Head)	0,00	5.363,25	
Ríos (River)	1.237,09	1.344,97	-107,88
Recarga superficial (Recharge)	5.203,46		
Bombeo (Wells)		41,58	
<b>TOTAL</b>	<b>6.440,55</b>	<b>6.440,56</b>	
<b>Error de balance de masas</b>	<b>-0,004</b>		

De los resultados anteriores se destacan los siguientes aspectos:

- El error de balance de masas es bastante inferior a 1%, criterio sugerido por SEA (2012) para este error, por lo que el modelo se valida en este aspecto.
- Las extracciones totales logradas por el modelo son 41,58 L/s, valor que en comparación con las extracciones impuestas (valor de entrada de las extracciones asignadas en el modelo numérico), que son 46,58 L/s, supone un 89,2% de las extracciones asignadas en el modelo numérico. Esto es debido a pozos que se sitúan cercanos a bordes impermeables o en zonas de baja permeabilidad, donde el caudal asignado al modelo disminuye para mantener un caudal constante en la modelación.
- La recarga superficial impuesta en el modelo es de 5.203 L/s. En este modelo la recarga hacia el acuífero está formada principalmente por la recarga superficial por precipitación directa, además del aporte de los cauces superficiales, ya que tras la calibración no se obtuvo un valor de recarga lateral subterránea desde los relieves circundantes situados hacia el suroeste (contacto entre el relleno y el basamento en las zonas altas)
- El modelo indica que existe un flujo de intercambio hídrico entre los ríos y el acuífero, con un caudal de 1.237 L/s que se infiltra en el acuífero desde los cauces superficiales, y un caudal de 1.345 L/s que recarga el flujo de los cauces desde el acuífero. El caudal neto indica que en total 108 L/s salen del acuífero hacia los ríos (Diferencia entre caudal de entrada y caudal de salida. El signo negativo indica

una salida del acuífero hacia el exterior, en este caso hacia los cauces superficiales)

- Las salidas del acuífero por los niveles de nivel constante, que corresponden a la cota cero de la línea de costa son de 5.054 L/s.

### Residuales y Estadígrafos de calibración

En la Tabla 7-7 se resumen los principales estadígrafos de residuales calculados en función de los targets de nivel y en la Figura 7-22 se muestra la distribución de valores observados y calculados.

Tabla 7-7. Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente del modelo de Punta Arenas

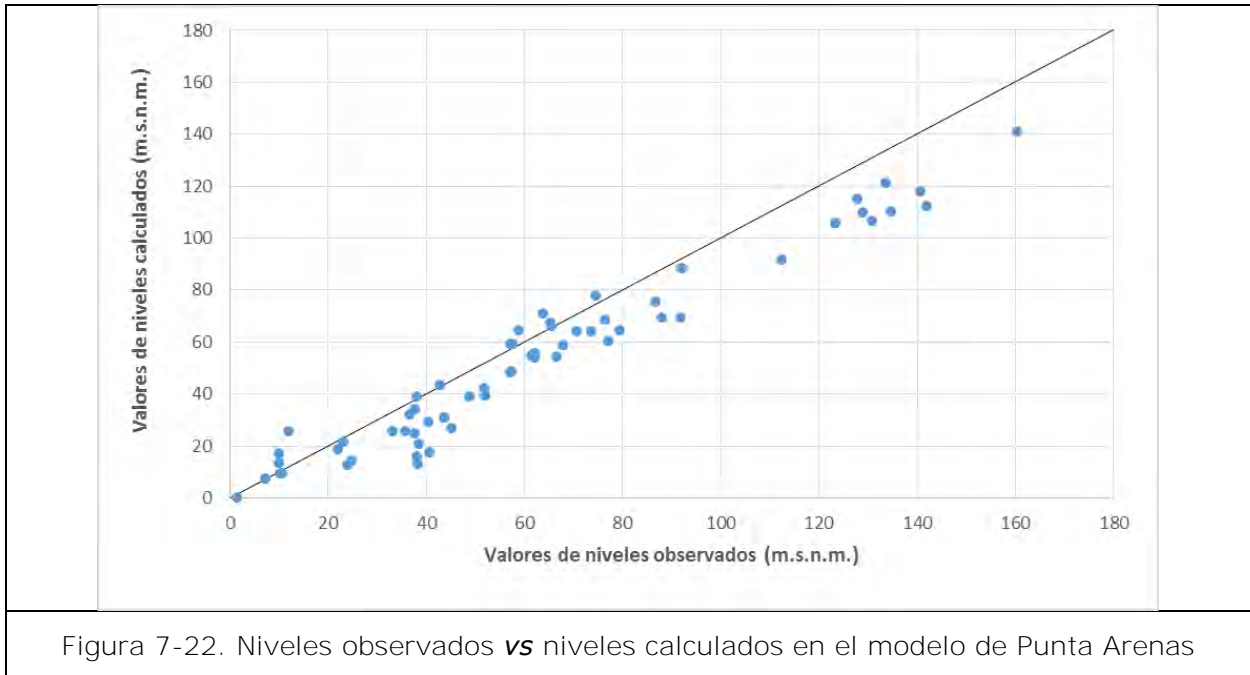
<b>Estadígrafos de residuales</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
ME (error medio)	9,33	m
MAE (error medio absoluto)	10,79	m
RMS (error cuadrático medio)	13,18	m
Residual Min.	-13,62	m
Residual Max.	29,82	m
N° Observaciones	63	-
Rango	158,98	m
MAE – normalizado = MAE/Rango	5,87	%
RMS – normalizado = RMS / Rango	8,29	%

Respecto de los residuales de nivel, los valores obtenidos para la calibración de régimen permanente son satisfactorios. El MAE normalizado (error medio absoluto) es 5,87%, que si bien es ligeramente superior al criterio del 5% recomendado por SEA (2012), se considera un buen ajuste de calibración. Por otra parte, el RMS normalizado (error cuadrático medio) es 8,29%, el cual se considera también un valor razonable para el nivel de información disponible, estando por debajo del 10%. El ajuste obtenido se considera adecuado para el nivel de información disponible (niveles de pozos y pruebas de bombeo)



En base a esto se estima que los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que además existe una buena consistencia entre el modelo numérico y el modelo conceptual desarrollado.

En el Anexo G se muestran los valores residuales obtenidos (ajuste del valor observado **vs** el valor calibrado) en la calibración para cada pozo de observación.



### 7.11.3 Resultados del Modelo Continental Norte

#### Componentes y error del balance de masas

En la Tabla 7-8 se resumen las componentes del balance hídrico calculado en el modelo numérico Continental Norte empleando los parámetros hidráulicos calibrados.

Tabla 7-8. Balance de masas en régimen permanente del modelo Continental Norte

<b>CONDICIÓN DE BORDE</b>	<b>ENTRADAS (L/s)</b>	<b>SALIDAS (L/s)</b>	<b>NETO (L/s)</b>
Flujo lateral subterráneo (Constant Head)	9.548,21	11.821,99	
Ríos (River)	724,58	2.557,83	-1.833,24
Recarga superficial (Recharge)	4.154,72		
Bombeo (Wells)		48,36	
<b>TOTAL</b>	<b>14.427,51</b>	<b>14.428,18</b>	
<b>Error de balance de masas</b>	<b>-0,67</b>		

De los resultados anteriores se destacan los siguientes aspectos:

- El error de balance de masas es bastante inferior a 1%, criterio sugerido por SEA (2012) para este error, por lo que el modelo se valida en este aspecto.
- Las extracciones totales logradas por el modelo son 48,36 L/s, valor que corresponde prácticamente a la totalidad (99,9%) de las extracciones impuestas (valor de entrada de las extracciones asignadas en el modelo numérico) en el modelo, que son de 48,38 L/s. Esto es debido a pozos que se sitúan cercanos a bordes impermeables o en zonas de baja permeabilidad, donde el caudal asignado al modelo disminuye para mantener un caudal constante en la modelación.
- La recarga superficial por precipitación directa impuesta en el modelo es de 4.155 L/s.
- El modelo indica que existe un flujo importante de intercambio hídrico entre los ríos y el acuífero, con un caudal de 725 L/s que se infiltra en el acuífero desde los cauces superficiales, y un caudal de 2.558 L/s que recarga el flujo de los cauces desde el acuífero. El caudal neto indica que en total 1.833 L/s salen del acuífero hacia los ríos (Diferencia entre caudal de entrada y caudal de salida. El signo negativo indica una salida del acuífero hacia el exterior, en este caso hacia los cauces superficiales)
- El acuífero cuaternario presenta una recarga de flujo lateral subterráneo procedente del contacto con las unidades subyacentes y del sector sur de 9.548 L/s. Esta recarga, junto con la recarga superficial suman un aporte de flujo hacia el acuífero de 13.613 L/s.
- Las salidas del acuífero por los niveles de nivel constante, que corresponden a la cota cero de la línea de costa y el sector norte, donde la cota del nivel se ha fijado en función de la piezometría definida en el modelo conceptual, son de 11.822 L/s.

## Residuales y Estadígrafos de calibración

En la Tabla 7-9 se resumen los principales estadígrafos de residuales calculados en función de los targets de nivel, y en la Figura 7-23 se muestra la distribución de valores observados y calculados.

Respecto de los residuales de nivel, los valores obtenidos para la calibración en régimen permanente son satisfactorios. El MAE normalizado (error medio absoluto) es de -0,21%, valor inferior al criterio del 5% recomendado por SEA (2012). Por otra parte, el RMS normalizado (error cuadrático medio) es 2,56% valor también inferior al 5%.

En base a esto se estima que los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que además existe una buena consistencia entre el modelo numérico y el modelo conceptual desarrollado.

Tabla 7-9. Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente del modelo Continental Norte

<b>Estadígrafos de residuales</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
ME (error medio)	-0,50	m
MAE (error medio absoluto)	4,85	m
RMS (error cuadrático medio)	6,14	m
Residual Min.	-15,01	m
Residual Max.	12,79	m
N° Observaciones	36	-
Rango	238,59	m
MAE – normalizado = MAE/Rango	-0,21	%
RMS – normalizado = RMS / Rango	2,56	%

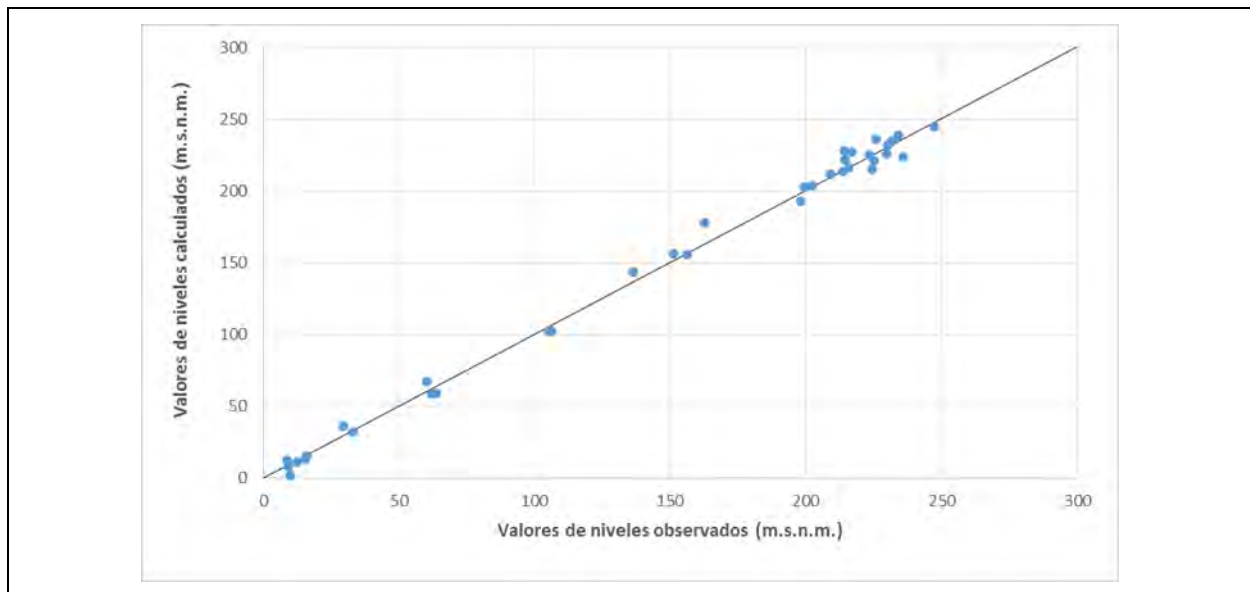


Figura 7-23. Niveles observados **vs** niveles calculados en el modelo Continental Norte

En el Anexo G se muestran los valores residuales obtenidos (ajuste del valor observado **vs** el valor calibrado) en la calibración para cada pozo de observación.

#### 7.11.4 RESULTADOS DEL MODELO TIERRA DEL FUEGO

##### Componentes y error del balance de masas

En la Tabla 7-10 se resumen las componentes del balance hídrico calculado en el modelo numérico de Tierra del Fuego empleando los parámetros hidráulicos calibrados.

Tabla 7-10. Balance de masas en régimen permanente del modelo Tierra del Fuego

<b>CONDICIÓN DE BORDE</b>	<b>ENTRADAS (L/s)</b>	<b>SALIDAS (L/s)</b>	<b>NETO (L/s)</b>
Flujo lateral subterráneo (Constant Head)	3.337,50	6.138,46	
Ríos (River)	988,98	2.450,37	-1.461,39
Recarga superficial (Recharge)	4.303,08		
Bombeo (Wells)		40,72	
<b>TOTAL</b>	<b>8.629,56</b>	<b>8.629,56</b>	
<b>Error de balance de masas</b>	<b>0,0015 %</b>		

De los resultados anteriores se destacan los siguientes aspectos:

- El error de balance de masas es bastante inferior a 1%, criterio sugerido por SEA (2012) para este error, por lo que el modelo se valida en este aspecto.
- Las extracciones totales logradas por el modelo son 40,72 L/s, en comparación con las extracciones impuestas (valor de entrada de las extracciones asignadas en el modelo numérico) que son 48,86 L/s, lo cual supone un 83,3 % de las extracciones asignadas en el modelo numérico. Esto es debido a pozos que se sitúan cercanos a bordes impermeables o en zonas de baja permeabilidad, donde el caudal asignado al modelo disminuye para mantener un caudal constante en la modelación.
- La recarga superficial obtenida en el modelo tras la calibración es de 4.303 L/s.
- El modelo indica que existe un flujo importante de intercambio hídrico entre los ríos y el acuífero, con un caudal de 989 L/s que se infiltra en el acuífero desde los cauces superficiales, y un caudal de 2.450 L/s que recarga el flujo de los cauces desde el acuífero. El caudal neto indica que en total 1.461 L/s salen del acuífero hacia los ríos (Diferencia entre caudal de entrada y caudal de salida. El signo

negativo indica una salida del acuífero hacia el exterior, en este caso hacia los cauces superficiales)

- El acuífero cuaternario presenta una recarga de flujo lateral subterráneo procedente del contacto con las unidades subyacentes y del sector sur de 3.337 L/s. Esta recarga, junto con la recarga superficial suman un aporte de flujo hacia el acuífero de 7.641 L/s.
- Las salidas del acuífero por los niveles de nivel constante, que corresponden a la cota cero de la línea de costa y el sector este, donde la cota del nivel se ha fijado a 10 metros bajo la superficie, son de 6.138 L/s.

### Residuales y Estadígrafos de calibración

En la Tabla 7-11 se resumen los principales estadígrafos de residuales calculados en función de los targets de nivel, y en la Figura 7-24 se muestra la distribución de valores observados y calculados.

Tabla 7-11. Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente del modelo Tierra del Fuego

<b>Estadígrafos de residuales</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
ME (error medio)	1,30	m
MAE (error medio absoluto)	3,84	m
RMS (error cuadrático medio)	5,06	m
Residual Min.	-5,58	m
Residual Max.	15,13	m
N° Observaciones	25	-
Rango	256,19	m
MAE – normalizado = MAE/Rango	0,51	%
RMS – normalizado = RMS / Rango	1,98	%

Respecto de los residuales de nivel, los valores obtenidos para la calibración de régimen permanente son satisfactorios. El MAE normalizado (error medio absoluto) se estima en -

0,51%, valor inferior al criterio del 5% recomendado por SEA (2012). Por otra parte, el RMS normalizado (error cuadrático medio) es 1,98%, valor también inferior al 5%.

En base a esto se estima que los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que además existe una buena consistencia entre el modelo numérico y el modelo conceptual desarrollado

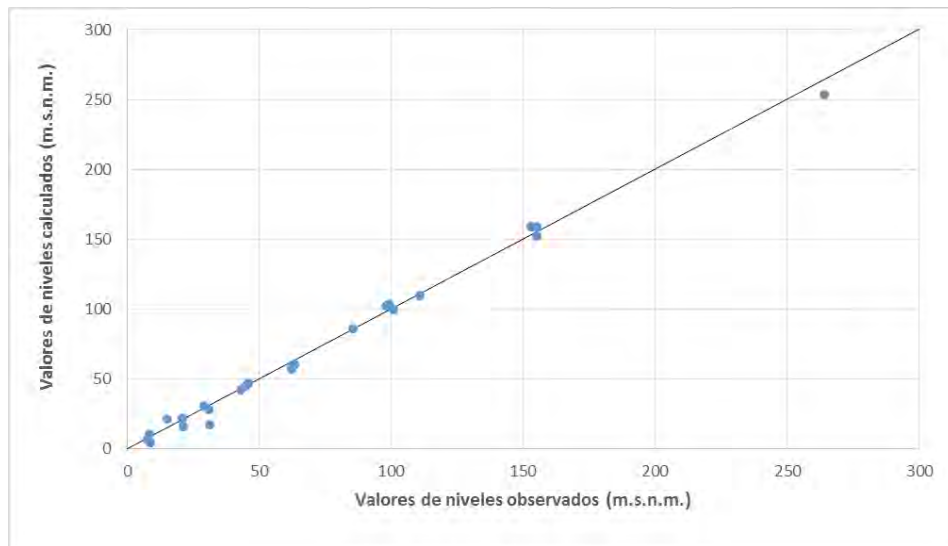


Figura 7-24. Niveles observados **vs** niveles calculados en el modelo de Tierra del Fuego

En el Anexo G se muestran los valores residuales obtenidos (ajuste del valor observado **vs** el valor calibrado) en la calibración para cada pozo de observación.

#### 7.11.5 MODELO INTEGRADO AGUAS SUPERFICIALES - AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para la calibración de los flujos superficiales en los cauces donde se dispone de información fluviométrica, se ha realizado **un balance hídrico de los ríos (celdas "River")** con el fin de analizar el intercambio hídrico con el acuífero obtenido en el modelo y comparar estos datos con los caudales calculados para el 85 y 95% de excedencia, que es equivalente con el flujo base del cauce.

Para ello, se han tomado las estaciones Q6, Q13, Q14, Q15 y Q17. En los cauces superficiales de estas estaciones se ha calculado el valor neto de caudal de salida del modelo hacia el río, el cual equivale al caudal superficial del río proveniente del acuífero. Estas estaciones se encuentran en los modelos de Punta Arenas (Q6) y Tierra del Fuego (Q13, Q14, Q15 y Q17).

En cuanto a las estaciones que no presentan toda la extensión del cauce en el área activa del modelo, se ha calculado el caudal neto de intercambio hídrico hacia el río en el

modelo, y a éste se le ha sumado el caudal superficial correspondiente a la cuenca aportante que se encuentra fuera del área activa del modelo. Estas estaciones son la Q6, Q13, Q14 y Q15. La estación Q17 presenta toda su cuenca aportante dentro del dominio activo del modelo numérico.

En cuanto al modelo Continental Norte, la estación Q11 corresponde a un cauce que se encuentra casi en su totalidad fuera del área activa del modelo por lo que no aplica la comparación del valor obtenido en el modelo numérico, y la estación Q12 no presenta un registro de mediciones de caudal suficiente para obtener un valor de caudal base del río (Ver capítulo 5).

En la Figura 7-25 se muestra la ubicación de las estaciones fluviométricas utilizadas en la calibración del flujo base superficial, así como las cuencas aportantes de los cauces de las estaciones, cuyo área fuera del límite del modelo ha sido utilizado para el cálculo de caudal superficial.

Como puede verse en la Figura 7-25, las estaciones Q6, Q13, Q14 y Q15 presentan parte de su cuenca aportante fuera del área activa de los modelos numéricos, por tanto, se requiere del cálculo del aporte superficial de estos sectores, el cual se sumará al caudal aportante al río obtenido en el modelo numérico para cada cuenca con estación fluviométrica. La estación Q17 presenta toda su cuenca aportante dentro del área activa del modelo, por lo que el caudal obtenido en el modelo numérico representa el caudal superficial total para ese cauce (Río Cullen).

El cálculo del caudal superficial en los sectores inactivos de los modelos se ha llevado a cabo a partir del área de la cuenca en este sector y de la tasa de recarga calculada para un 85% y un 95% de excedencia. Esta tasa de recarga asume que las entradas son iguales a las salidas, y por tanto la tasa de infiltración hacia la napa subterránea es igual al caudal superficial que aflora en los ríos desde el acuífero en ausencia de aportes superficiales.

En la Tabla 7-12 se muestran los caudales superficiales de cada estación fluviométrica y en la Tabla 7-13 los caudales calculados por los modelos.

Tabla 7-12. Caudal superficial base en estaciones fluviométricas

<b>Estación</b>	<b>Nombre estación</b>	<b>Caudal 95% excedencia (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal 85% excedencia (m<sup>3</sup>/s)</b>
Q06	Río Tres Brazos antes Bt. Sendos	0,2	0,5
Q13	Río Side en cerro Sombrero	0,4	0,6
Q14	Río Oscar en bahía San Felipe	0,6	0,8
Q15	Río Oro en bahía San Felipe	0,9	1,2



Q17	Río Cullen en frontera	0,0	0,0
-----	------------------------	-----	-----

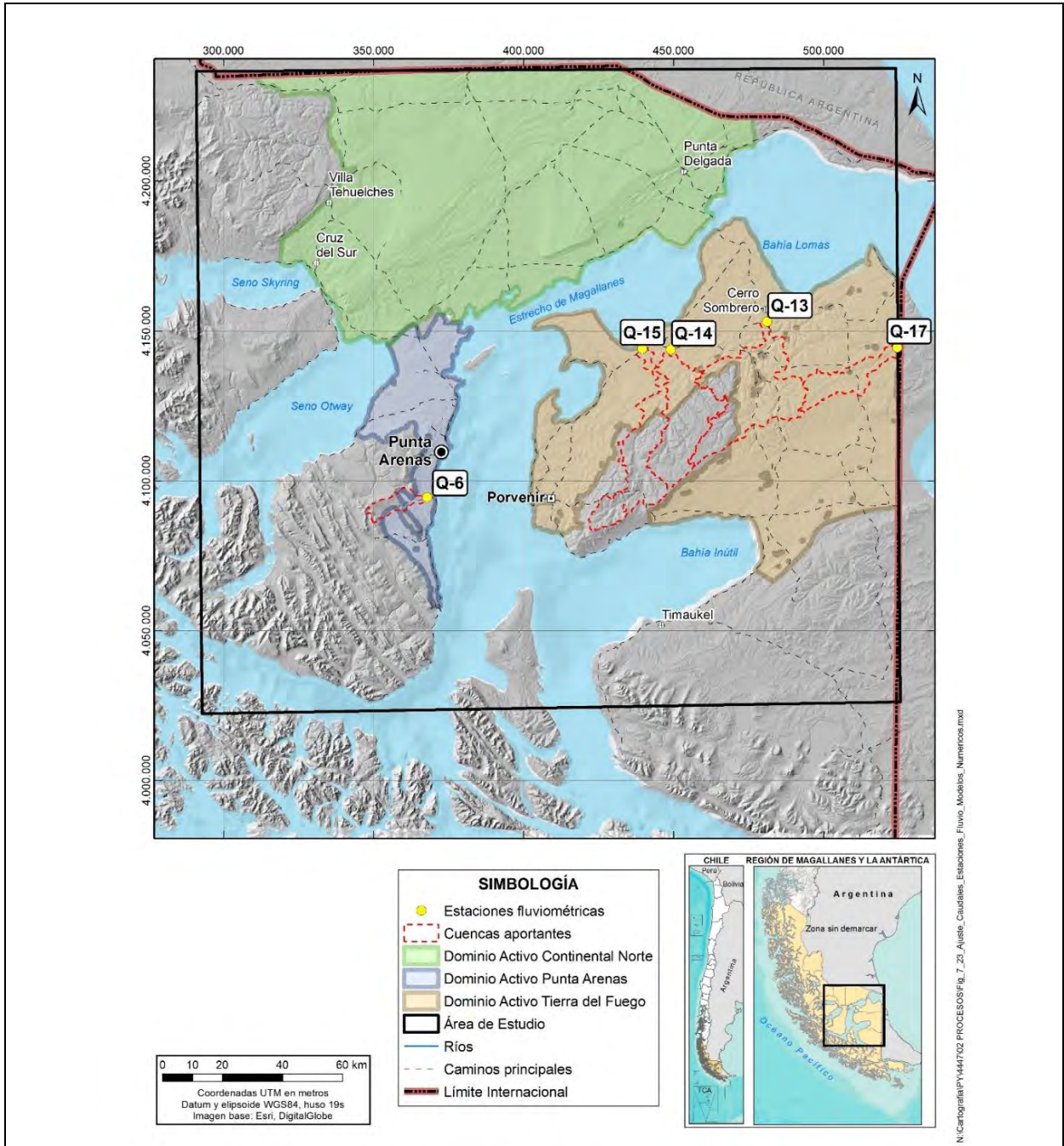


Figura 7-25. Ajuste de caudales entre las estaciones fluviométricas y los modelos

numéricos

Tabla 7-13. Calibración del caudal superficial en los modelos numéricos

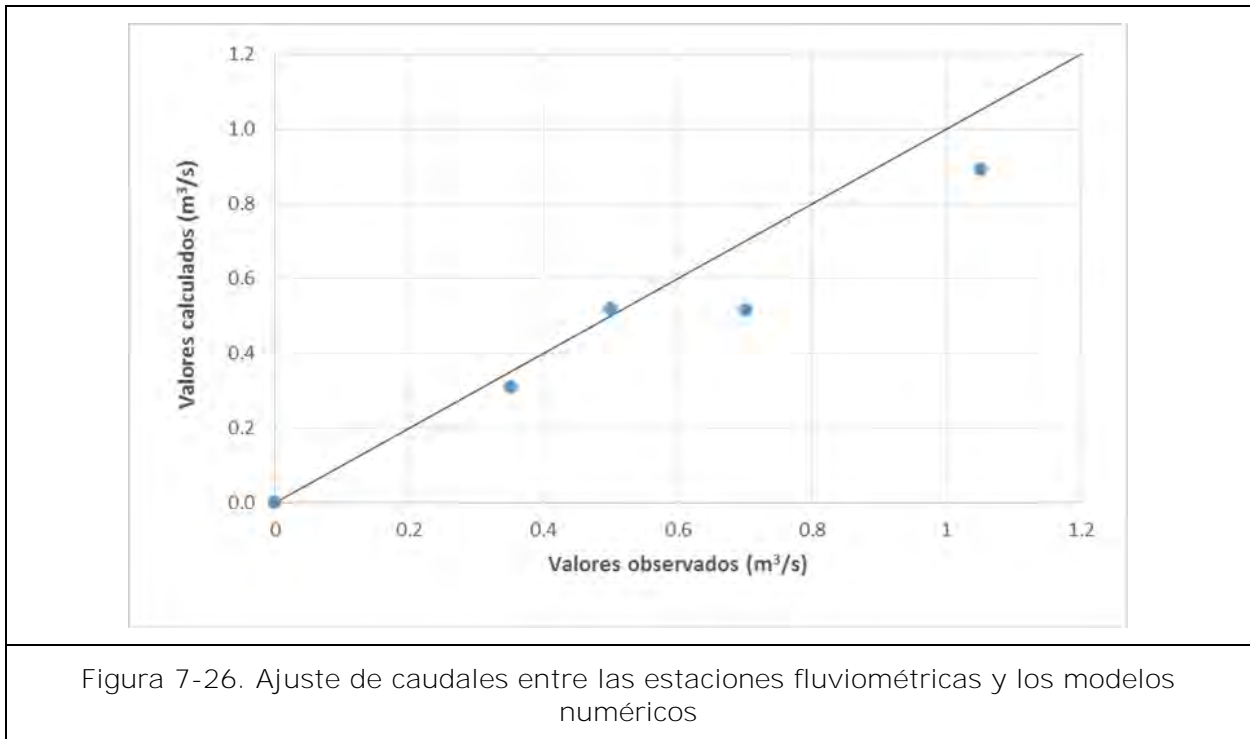
Estación	Nombre estación	Caudal obtenido en el modelo (m <sup>3</sup> /s)	Área inactiva en el modelo (km <sup>2</sup> )	Caudal en zonas inactivas 95% excedencia (m <sup>3</sup> /s)	Caudal en zonas inactivas 85% excedencia (m <sup>3</sup> /s)	Caudal total 95% excedencia (m <sup>3</sup> /s)	Caudal total 85% excedencia (m <sup>3</sup> /s)
Q06	Río Tres Brazos antes Bt. Sendos	0,09	63,50	0,13	0,31	0,22	0,40
Q13	Río Side en cerro Sombrero	0,38	245,17	0,12	0,17	0,50	0,54
Q14	Río Oscar en bahía San Felipe	0,04	413,84	0,40	0,56	0,44	0,60
Q15	Río Oro en bahía San Felipe	0,07	414,42	0,69	0,95	0,76	1,02
Q17	Río Cullen en frontera	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00

Los caudales que corresponden al flujo base en las estaciones fluviométricas se comparan con los obtenidos por el modelo numérico. Para ellos se ha calculado el promedio entre el 85 y el 95% de excedencia en ambos casos, el cual se indica en la Tabla 7-14.

Tabla 7-14. Promedio de caudales superficiales en estaciones fluviométricas y en los modelos numéricos

Estación	Caudal modelo numérico (m <sup>3</sup> /s)			Caudal modelo numérico (m <sup>3</sup> /s)		
	95% excedencia	85% excedencia	Valor Promedio	95% excedencia	85% excedencia	Valor Promedio
Q06	0,2	0,5	0,35	0,22	0,40	0,31
Q13	0,4	0,6	0,5	0,50	0,54	0,52
Q14	0,6	0,8	0,7	0,44	0,60	0,52
Q15	0,9	1,2	1,05	0,76	1,02	0,89
Q17	0	0	0	0	0	0

En la Figura 7-26 se muestra el ajuste entre los valores promedio de caudal en las estaciones fluviométricas y los valores de caudal calculados en el modelo numérico, el cual incluye el aporte de caudal calculado en los sectores inactivos de las cuencas aportantes. Como puede observarse se obtiene un buen ajuste de ambos valores.



#### 7.11.6 Piezometrías obtenidas

##### Piezometría obtenida en el modelo de Punta Arenas

La piezometría obtenida en el modelo de Punta Arenas se muestra en la Figura 7-27, donde se observa que el flujo subterráneo presenta una dirección sur-norte y oeste-este, descargando hacia el mar. La zona norte del modelo, que presenta una topografía más plana, tiene un gradiente menor a la zona este del sector, donde el flujo subterráneo presenta una dirección desde las zonas altas hacia el mar con un gradiente mayor.

En la Figura 7-28 se muestra el detalle de la piezometría en el sector norte de Punta Arenas (límite con el modelo Continental Norte), donde se observa que la dirección de flujo en el sector este va hacia la laguna Cabeza de Mar y la laguna Baja, que presentan cota 0 msnm, y en el sector oeste, la dirección de flujo va desde los sectores más altos hacia el mar de manera paralela a la condición de contorno de borde impermeable. Este sector actúa como divisoria de aguas, que separa a las que drenan hacia el Seno Otway (hacia el oeste) de las que drenan hacia el Estrecho de Magallanes (hacia el este).

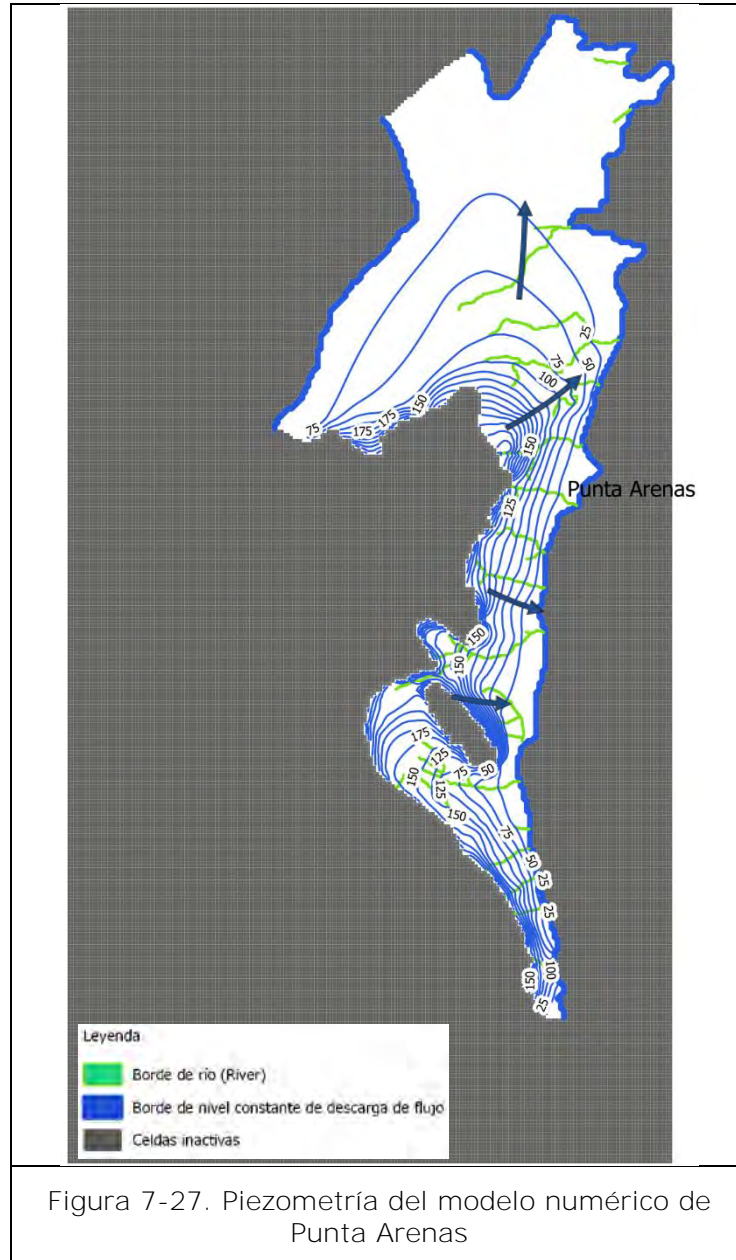


Figura 7-27. Piezometría del modelo numérico de Punta Arenas

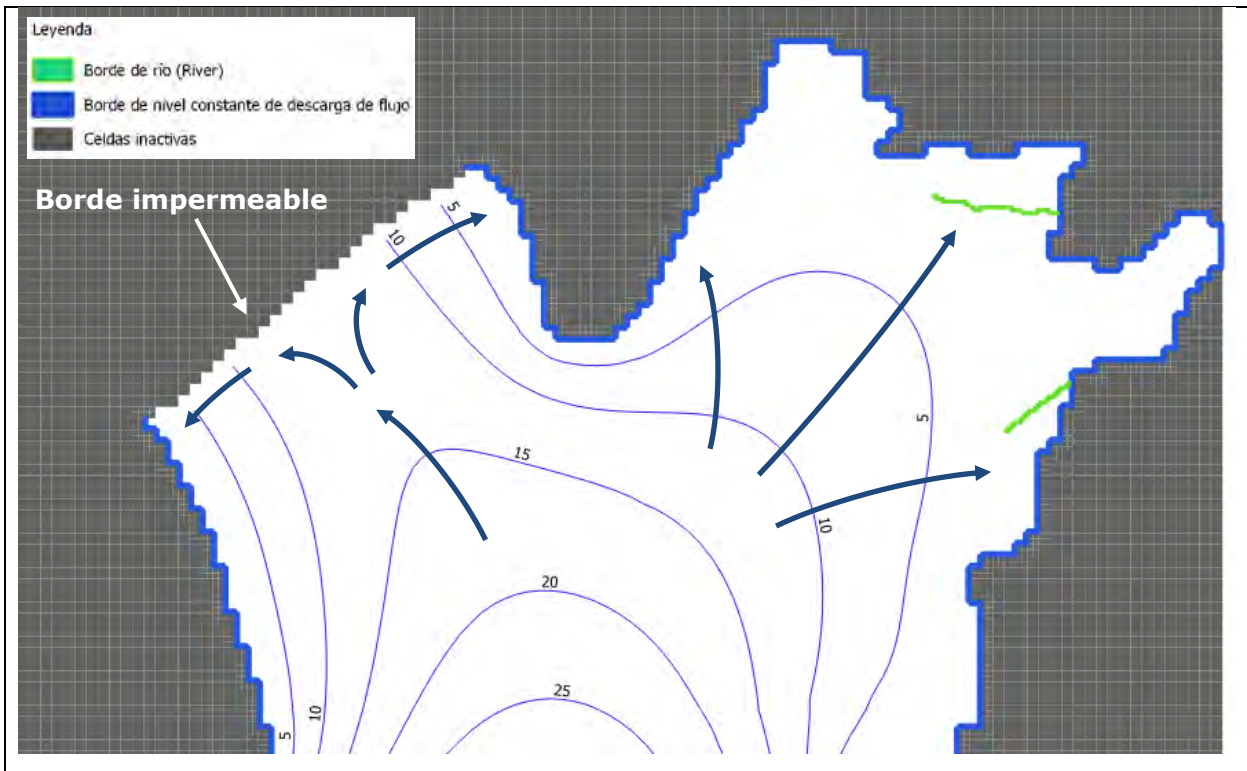


Figura 7-28. Detalle de la piezometría del modelo numérico de Punta Arenas en el sector Norte

### Piezometría obtenida en el modelo Continental Norte

La piezometría del modelo Continental Norte, que se muestra en la Figura 7-29, presenta sus direcciones de flujo principales hacia el norte y sur del área modelada. El flujo subterráneo se mueve hacia el norte y el sur debido a una divisoria de aguas subterráneas, la cual marca las dos direcciones principales. Hacia el sur el flujo descarga en la línea de costa, mientras que hacia el norte, el flujo descarga lateralmente hacia la zona argentina del acuífero.

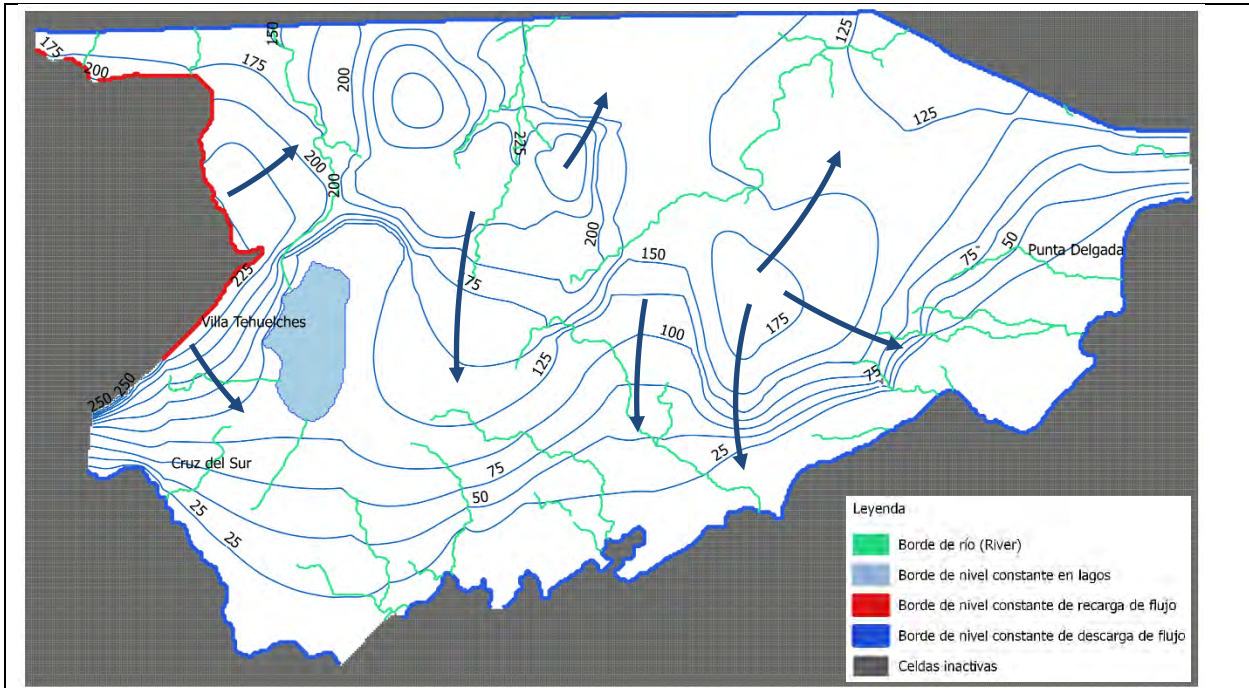


Figura 7-29. Piezometría del modelo numérico Continental Norte

### Piezometría obtenida en el modelo Tierra del Fuego

En la Figura 7-30 se muestra la piezometría del modelo Tierra del Fuego. Los resultados obtenidos muestran una piezometría consistente con el modelo conceptual del sector. El flujo subterráneo fluye desde las zonas altas de la sierra Balmaceda hacia la línea de costa en el norte y hacia el sector este del modelo. En la zona sur, existe otra entrada de flujo lateral con dirección hacia el sector este, donde se encuentran las lagunas de la Bahía San Sebastián y hacia el sector oeste, donde se encuentra la línea de costa. El gradiente hidráulico disminuye desde las zonas más altas hacia la costa.

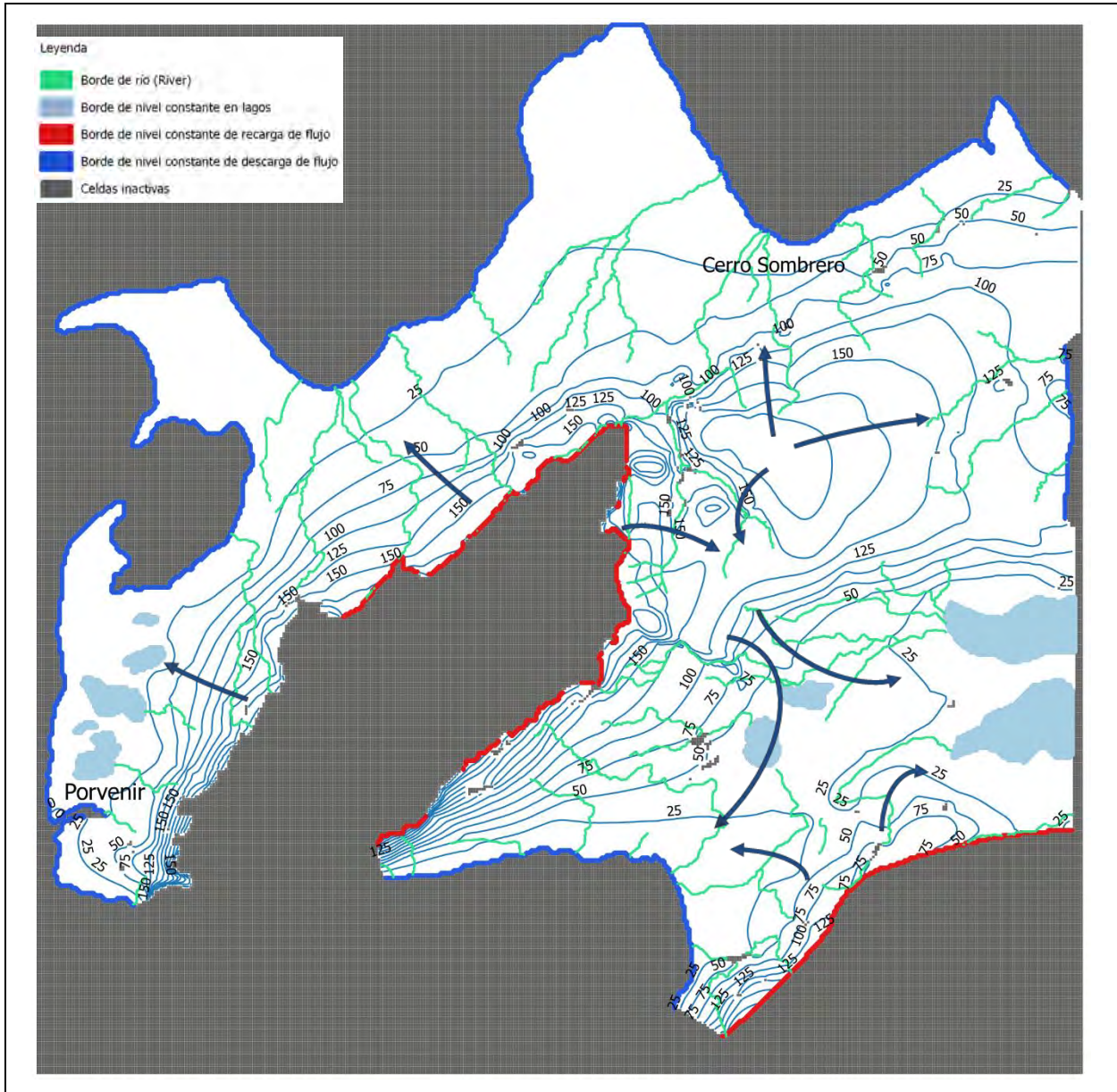


Figura 7-30. Piezometría del modelo numérico Tierra del Fuego

### 7.11.7 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad determina las variaciones producidas en los resultados cuando se modifican en un cierto rango los diferentes parámetros finalmente adoptados tras la fase de calibración.

Para el análisis de sensibilidad se han variado las conductividades hidráulicas obtenidas tras la calibración de los modelos y se ha obtenido el RMS normalizado (error cuadrático medio) en cada caso para determinar la sensibilidad de cada zona de conductividad hidráulica.

La selección de valores de conductividad hidráulica para el análisis de sensibilidad, se ha realizado en función del valor asignado en la calibración. Así, los valores mayores a 1 presentan unos multiplicadores diferentes a los valores menores a 1. En la Tabla 7-15 se indican los multiplicadores seleccionados.

El K3 representa el valor de la calibración del modelo numérico, y su RMS corresponde al valor que se ha obtenido en la calibración final. Los valores K1 y K2 son multiplicadores con los que se obtienen valores menores al K3, y los valores K4 y K5, son multiplicadores con los que se aumenta el valor de K3.

Tabla 7-15. Multiplicadores utilizados en el análisis de sensibilidad

Conductividad hidráulica	Multiplicadores				
	K1	K2	K3	K4	K5
Mayor o igual a 1 m/día	K3 x 0,1	K2 x 0,5	K3 x 1	K4 x 2	K5 x 10
Menor a 1 m/día	K3 x 0,1	K2 x 0,5	K3 x 1	K4 x 10	K5 x 100

Los gráficos obtenidos para cada zona de conductividad hidráulica en los modelos numéricos se presentan en el Anexo G.

- Modelo de Punta Arenas

El modelo de Punta Arenas presenta 12 zonas de conductividad hidráulica. En Tabla 7-16 se indican los valores utilizados en el análisis de sensibilidad para este modelo, y en la Figura 7-31 se muestra la distribución de las distintas zonas en el modelo. Los resultados obtenidos en el análisis indican de forma general, que la conductividad hidráulica presenta poca sensibilidad, con valores constantes o con poca variación de RMS en varias zonas, como la zona 3 (Figura 7-32). Las zonas 5 y 12 presentan la mayor sensibilidad al aumento de conductividad hidráulica, mientras que la zona 1 presenta la mayor sensibilidad al descenso de este parámetro.



Tabla 7-16. Valores de conductividad hidráulica utilizados en el análisis de sensibilidad del modelo de Punta Arenas

Zona	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) (m/día)					RMS normalizado (%)				
	K1	K2	K3	K4	K5	K1	K2	K3	K4	K5
Zona 1	0,125	0,625	1,25	2,5	12,5	10,4	8,4	8,3	8,3	10,0
Zona 2	0,7	3,5	7	14	70	8,2	8,3	8,3	8,4	9,1
Zona 3	0,04	0,2	0,4	4	40	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Zona 4	0,3	1,5	3	6	30	8,2	8,3	8,3	8,3	8,3
Zona 5	0,05	0,25	0,5	5	50	9,0	8,0	8,3	11,2	17,7
Zona 6	0,2	1	2	4	20	9,5	8,2	8,3	8,9	10,3
Zona 7	0,2	1	2	4	20	8,4	8,1	8,3	9,0	11,8
Zona 8	0,8	4	8	16	80	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Zona 9	0,4	2	4	8	40	8,0	8,2	8,3	8,4	8,8
Zona 10	0,4	2	4	8	40	7,9	8,0	8,3	8,6	8,9
Zona 11	0,15	0,75	1,5	3	15	9,6	7,3	8,3	9,8	12,3
Zona 12	0,1	0,5	1	2	10	7,7	7,2	8,3	10,6	14,7

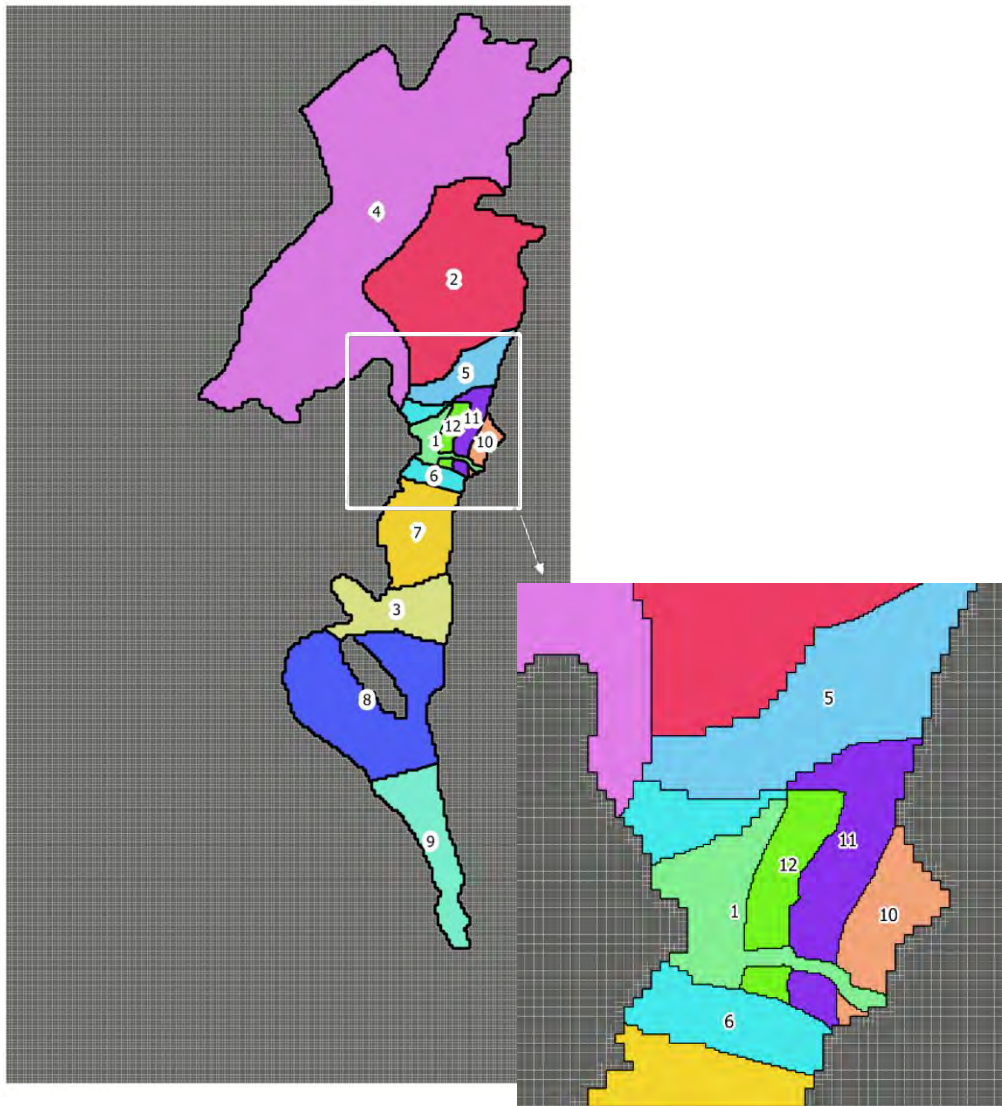
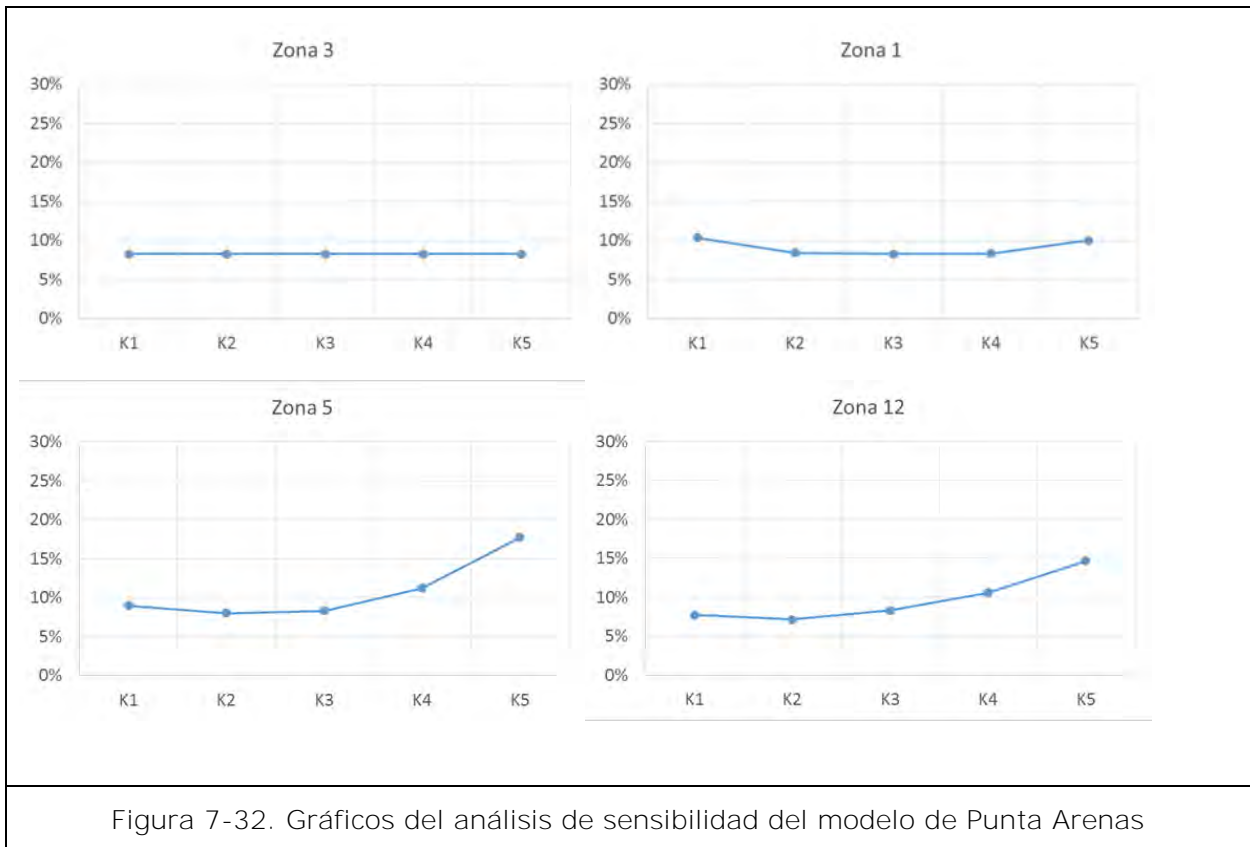


Figura 7-31. Zonas de conductividad hidráulica en el modelo de Punta Arenas



- Modelo Continental Norte

El modelo Continental Norte presenta 25 zonas de conductividad hidráulica. En la Tabla 7-17 se indican los valores utilizados en el análisis de sensibilidad para este modelo, y en la Figura 7-33 se muestra la distribución de las distintas zonas en el modelo. Este modelo presenta mayores variaciones del RMS con el cambio de conductividad hidráulica. Las zonas con mayores variaciones del RMS son las zonas 22 (con el mayor RMS al disminuir el valor de K) y la zona 21 (con el mayor RMS al aumentar el valor de K), como puede observarse en la Figura 7-34. Existen también varias zonas que no presentan sensibilidad al cambio de este parámetro, como la zona 15 (Figura 7-34).

En general, las zonas presentan poca sensibilidad al cambio de conductividad hidráulica, con ligeras variaciones del RMS en las zonas definidas, aumentando el RMS con los aumentos y disminuciones de este parámetro.

Tabla 7-17. Valores de conductividad hidráulica utilizados en el análisis de sensibilidad del modelo Continental Norte

Zona	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) (m/día)					RMS normalizado (%)				
	K1	K2	K3	K4	K5	K1	K2	K3	K4	K5
Zona 1	0,1	0,5	1	2	10	2,8	2,6	2,6	2,6	2,6
Zona 2	0,1	0,5	1	2	10	3,0	2,6	2,6	2,7	3,3
Zona 3	1	5	10	20	100	2,8	2,6	2,6	2,8	4,4
Zona 4	0,1	0,5	1	2	10	4,6	2,9	2,6	2,7	3,6
Zona 5	0,004	0,02	0,04	0,4	4	9,3	2,8	2,6	3,1	4,6
Zona 6	0,8	4	8	16	80	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Zona 7	1,8	9	18	36	180	2,8	2,6	2,6	2,6	2,6
Zona 8	0,2	1	2	4	20	3,2	2,6	2,6	2,6	2,9
Zona 9	1,7	8,5	17	34	170	4,6	2,7	2,6	2,9	3,6
Zona 10	0,03	0,15	0,3	3	30	10,7	3,0	2,6	3,3	3,6
Zona 11	0,005	0,025	0,05	0,5	5	2,7	2,6	2,6	3,3	6,0
Zona 12	0,8	4	8	16	80	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6
Zona 13	0,2	1	2	4	20	2,8	2,6	2,6	2,6	2,9
Zona 14	0,35	1,75	3,5	7	35	2,8	2,6	2,6	2,7	3,0
Zona 15	1,5	7,5	15	30	150	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Zona 16	0,01	0,05	0,1	1	10	3,3	2,6	2,6	5,8	9,3
Zona 17	0,05	0,25	0,5	5	50	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Zona 18	1,2	6	12	24	120	2,8	2,6	2,6	2,6	2,6
Zona 19	0,015	0,075	0,15	1,5	15	7,4	3,1	2,6	3,6	4,3
Zona 20	0,04	0,2	0,4	4	40	3,8	2,6	2,6	2,9	3,1
Zona 21	0,07	0,35	0,7	7	70	4,5	2,8	2,6	6,1	10,8
Zona 22	0,004	0,02	0,04	0,4	4	15,6	3,1	2,6	3,2	6,9
Zona 23	0,009	0,045	0,09	0,9	9	9,5	2,8	2,6	3,1	3,7
Zona 24	0,1	0,5	1	2	10	3,8	2,7	2,6	2,6	2,9
Zona 25	0,4	2	4	8	40	2,7	2,6	2,6	2,6	2,7

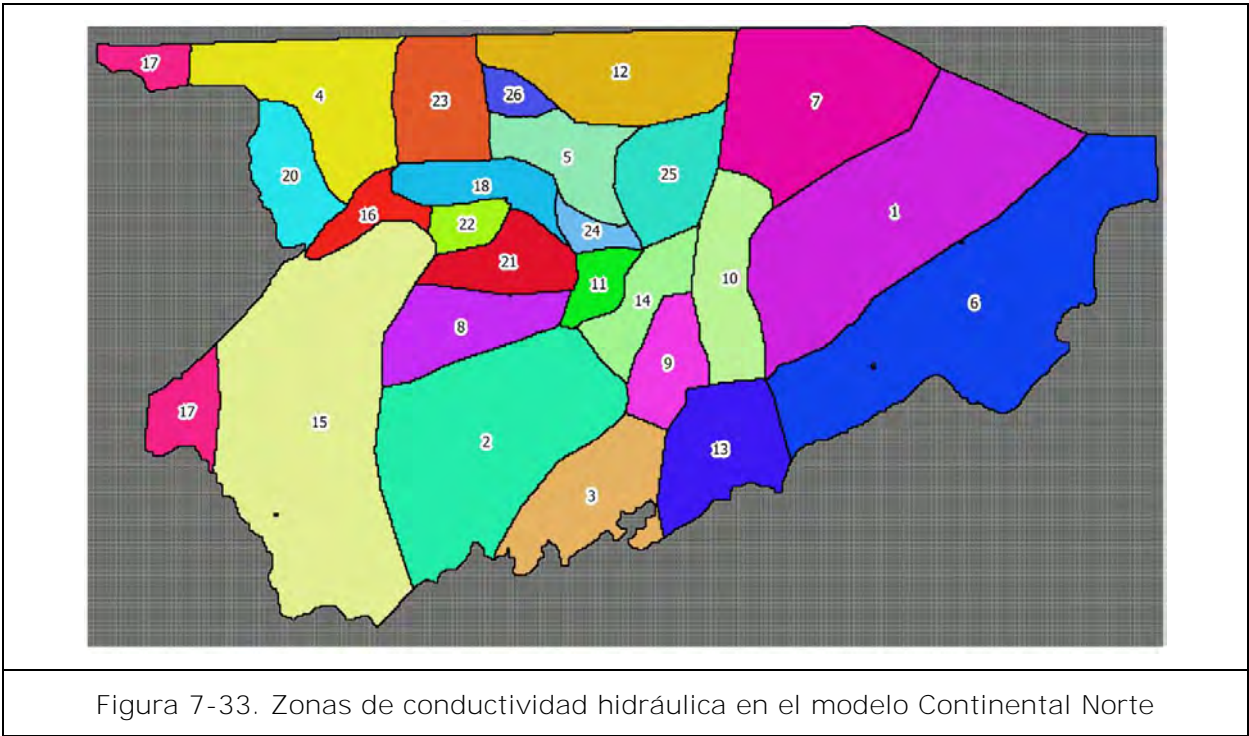


Figura 7-33. Zonas de conductividad hidráulica en el modelo Continental Norte

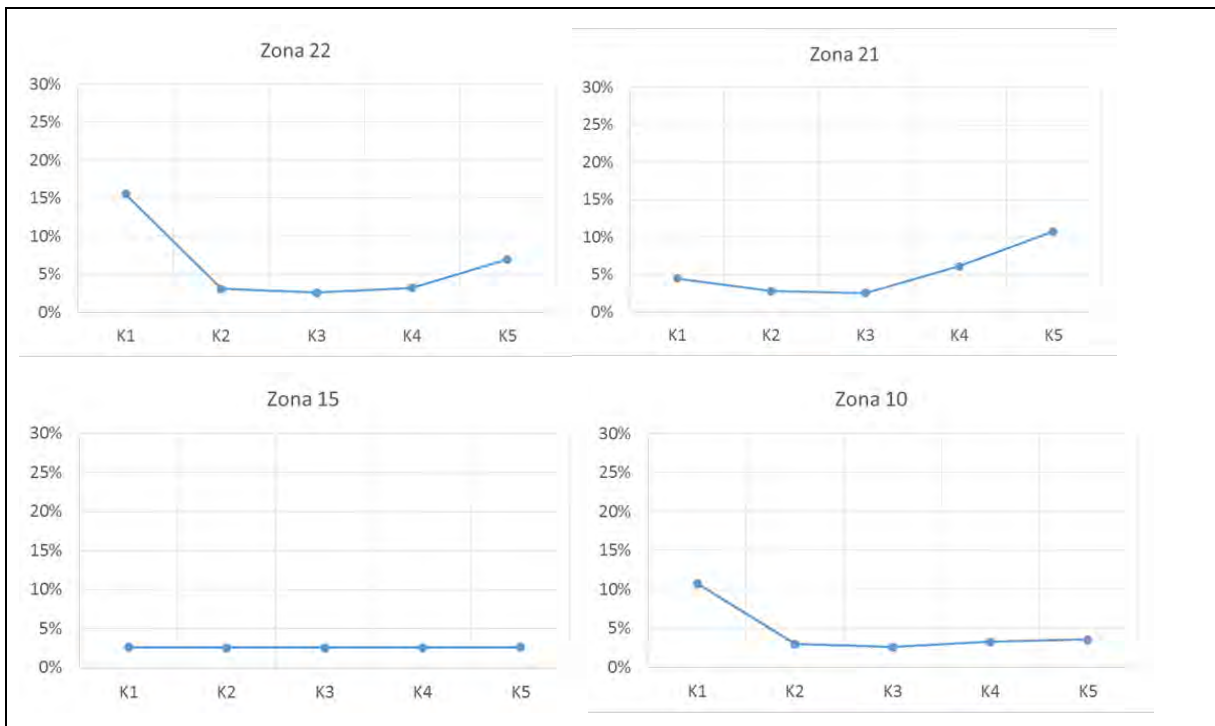


Figura 7-34. Gráficos del análisis de sensibilidad del modelo Continental Norte

- Modelo Tierra del Fuego

El modelo Tierra del Fuego presenta 19 zonas de conductividad hidráulica. En la Tabla 7-18 se indican los valores utilizados en el análisis de sensibilidad para este modelo, y en la Figura 7-35 se muestra la distribución de las distintas zonas en el modelo.

En este modelo se presentan también ligeras variaciones del RMS con los cambios de conductividad hidráulica, además de zonas donde el RMS se muestra constante o muy similar, como las zonas 4 y 13, respectivamente (Figura 7-36), indicando una baja sensibilidad de este parámetro en el modelo. Las zonas con mayor sensibilidad son las zonas 10 y 16, como puede verse en la Figura 7-36, donde se muestra el aumento del RMS al disminuir la conductividad, y con el menor valor del mismo en el valor original de calibración (K3).

Tabla 7-18. Valores de conductividad hidráulica utilizados en el análisis de sensibilidad del modelo de Tierra del Fuego

Zona	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) (m/día)					RMS normalizado (%)				
	K1	K2	K3	K4	K5	K1	K2	K3	K4	K5
Zona 1	0,01	0,05	0,1	1	10	2,0	2,0	2,0	1,7	2,1
Zona 2	1	5	10	20	100	2,0	2,0	2,0	2,1	2,6
Zona 3	0,5	2,5	5	10	50	2,6	2,4	2,0	2,1	3,3
Zona 4	0,1	0,5	1	2	10	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Zona 5	1,3	6,5	13	26	130	2,1	1,9	2,0	2,0	2,5
Zona 6	0,2	1	2	4	20	4,5	2,3	2,0	2,0	3,3
Zona 7	0,5	2,5	5	10	50	3,7	2,0	2,0	2,0	2,1
Zona 8	0,2	1	2	4	20	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Zona 9	0,07	0,35	0,7	7	70	2,4	2,0	2,0	2,2	2,2
Zona 10	0,002	0,01	0,02	0,2	2	27,5	2,8	2,0	4,8	5,5
Zona 11	0,07	0,35	0,7	7	70	2,1	2,0	2,0	2,3	2,7
Zona 12	0,44	2,2	4,4	8,8	44	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0
Zona 13	0,03	0,15	0,3	3	30	4,8	2,0	2,0	2,2	2,2
Zona 14	0,045	0,225	0,45	4,5	45	4,0	2,0	2,0	2,1	2,5
Zona 15	2	10	20	40	200	2,7	2,2	2,0	2,0	*
Zona 16	0,05	0,25	0,5	5	50	8,5	2,2	2,0	2,2	2,5
Zona 17	0,1	0,5	1	2	10	2,2	2,0	2,0	2,0	2,2
Zona 18	0,3	1,5	3	6	30	2,3	2,1	2,0	2,0	2,1
Zona 19	1,5	7,5	15	30	150	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

\*El modelo no converge

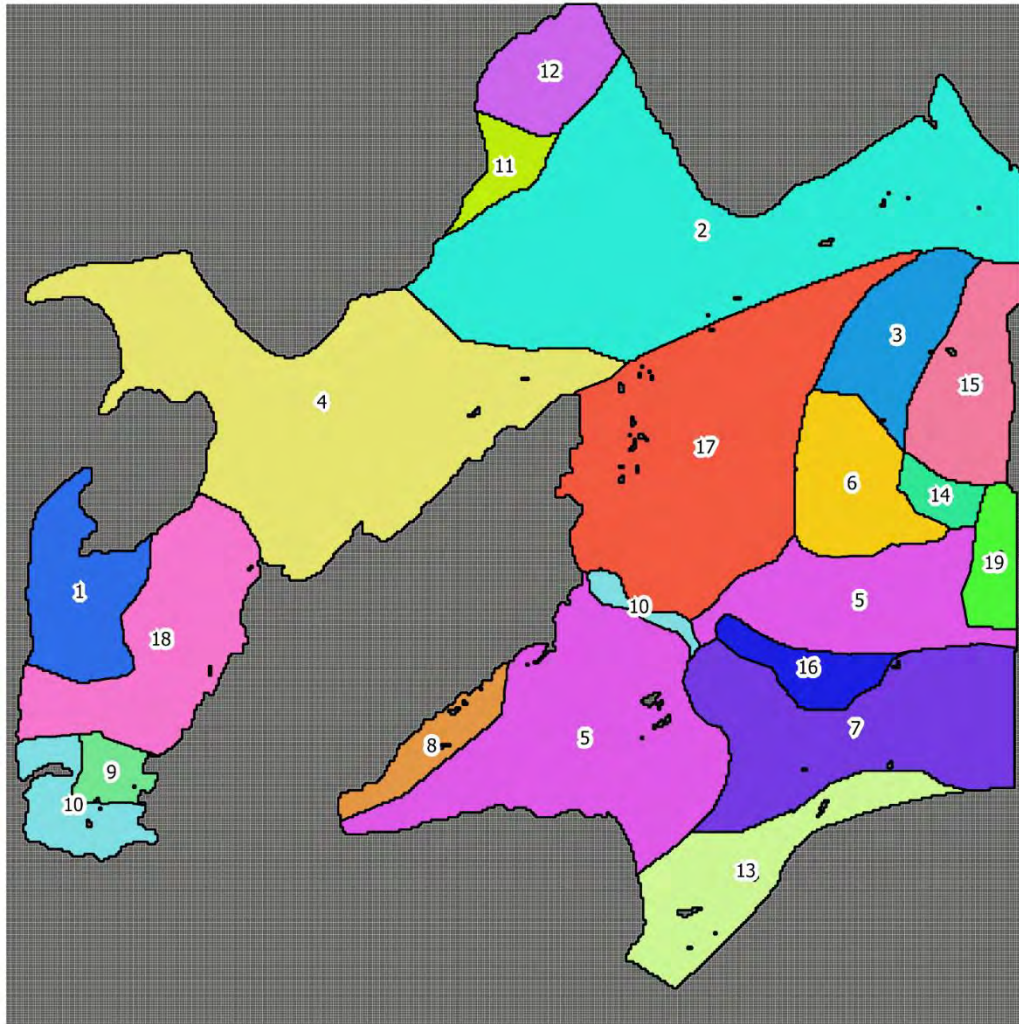
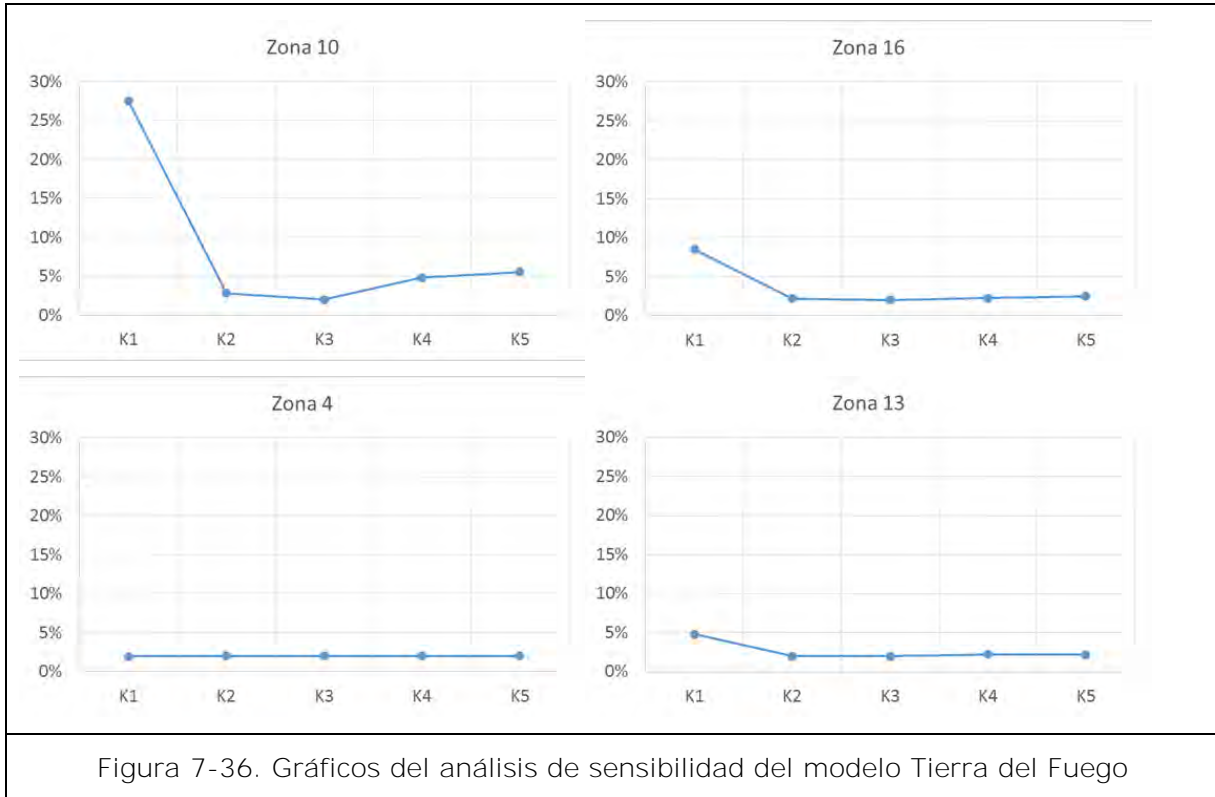


Figura 7-35. Zonas de conductividad hidráulica en el modelo Tierra del Fuego



## 7.12 SIMULACIONES

### 7.12.1 Coeficiente de almacenamiento

Para la modelación en régimen transiente se ha definido para cada modelo una distribución espacial del coeficiente de almacenamiento, que en el caso de un acuífero libre, está definido por el **Sy** (Specific Yield). El Sy es equivalente a la porosidad eficaz, la cual corresponde al volumen de agua drenada por gravedad en relación al volumen total, medida en porcentaje o en tanto por 1, e indica el volumen de agua que se puede obtener vaciando un medio poroso saturado.

La distribución espacial del Sy se ha definido en función de la permeabilidad, asignado los mayores valores a las zonas que presentan una mayor permeabilidad, ya que no se dispone de información de pruebas de bombeo, en las que se haya podido calcular el coeficiente de almacenamiento a partir de pozos de observación.

En acuíferos libres, el **Sy**, varía aproximadamente entre 2 y 35%. En la Tabla 7-19 se muestran los valores para materiales no consolidados.



Tabla 7-19. Valores de Specific yield en materiales no consolidados (Johnson, 1967)

Material	Specific Yield (%)		
	Mínimo	Media	Máximo
Arcilla	0	2	5
Arcilla arenosa	3	7	12
Limo	3	18	19
Arena fina	10	21	28
Arena media	15	26	32
Arena gruesa	20	27	35
Arena con gravas	20	25	35
Grava fina	21	25	35
Grava media	13	23	26
Grava gruesa	12	22	26

La Unidad Hidrogeológica Cuaternaria modelada se trata de sedimentos glacio-fluviales cuyo Sy máximo según DGA/AC 1991 es de 10%, en las Unidades Hidrogeológicas I, II y IX, definidas en este estudio. Este valor de referencia se tomó como el valor máximo para los sectores de mayor permeabilidad.

Por tanto, para la asignación de valores de Sy en los modelos, se ha tomado esta referencia, asignando mayores valores a las zonas de mayor conductividad hidráulica, y los menores a las zonas de baja conductividad hidráulica.

En la Tabla 7-20 se muestra el rango de Sy considerado y los valores de Sy asignados en función de la conductividad hidráulica.

Tabla 7-20. Valores de Sy asignados en los modelos numéricos

Conductividad hidráulica (m/día)	Rango Sy (%)	Sy asignado a los modelos
>10	7-21	10
0,1-10	3-7	5
<0,1	1-3	2

### 7.12.2 Escenarios de simulación

Los escenarios de simulación tienen como objetivo determinar el caudal máximo susceptible de ser otorgado en las áreas comprendidas por los modelos numéricos de la cuenca de Magallanes. Estos escenarios presentan una discretización temporal anual, simulando 50 años de extracciones desde la actualidad. Los escenarios simulados presentan las siguientes características:

- Escenario Base: Se bombean la totalidad de los derechos otorgados.
- Escenario 1: Se bombean todos los derechos otorgados y los derechos pendientes (en trámite).
- Escenario 2: Condiciones de extracción del Escenario 1 aumentando progresivamente en un 50% las extracciones en un periodo de 50 años. Las extracciones se aumentan un 10% adicional cada 10 años hasta alcanzar el 50% adicional.
- Escenario 3: Condiciones de extracción del Escenario 1 aumentando progresivamente en un 100% las extracciones en un periodo de 50 años para los modelos Continental Norte y Tierra del Fuego, y en un 25% para el modelo de Punta Arenas.
- Escenario 4: Condiciones de extracción del Escenario 1 aumentando progresivamente en un 150% las extracciones en un periodo de 50 años para el modelo Continental Norte, en un 75% para el modelo Tierra del Fuego, y en un 40% para el modelo de Punta Arenas.
- Escenario 5: Disminución del coeficiente de almacenamiento en los tres modelos según se indica en la Tabla 7-21, para unas condiciones óptimas de extracción (con cumplimiento de los 4 criterios). Estas condiciones de extracción se determinan tras la simulación de los escenarios previos y su posterior análisis de sustentabilidad en función de los criterios exigidos, las cuales corresponden a las extracciones del Escenario 4.

Tabla 7-21. Coeficiente de almacenamiento asignado al Escenario 5

<b>Conductividad hidráulica (m/día)</b>	<b>Sy asignado a los modelos</b>	<b>Sy asignado al Escenario 5</b>
>10	10	8
0,1-10	5	3
<0,1	2	2

Para evaluar los criterios que indicarán la sustentabilidad de las extracciones en cada uno de los escenarios simulados, se tomará como escenario de referencia el Escenario 1, ya que éste presenta unas extracciones correspondientes a los derechos otorgados y en trámite, comparándolo con el resto de modelos, en los que se incluyen pozos adicionales

ficticios. Por tanto, el caudal de extracción asumido por los modelos en el Escenario 1, corresponderá al caudal de referencia para evaluar el porcentaje adicional que se consigue extraer en el resto de las simulaciones.

La selección de las extracciones impuestas a las simulaciones realizadas, se ha basado en los resultados de las mismas, asignando de manera progresiva los caudales en función del cumplimiento de criterios en la simulación previa, con el fin de obtener los escenarios óptimos de simulación para cada uno de los modelos numéricos.

En la Tabla 7-22 se muestran las características de estos escenarios y de los modelos permanentes calibrados, a partir de los cuales se han realizado los modelos transientes.

Los pozos que extraen el aumento de caudal definido para cada simulación se han ubicado en los modelos en base a zonas de interés donde se prevé un aumento de la demanda de agua subterránea, tales como zonas urbanas y zonas de regadío, las cuales se han definido en conjunto con la DGA.

Estas zonas de interés, donde se han localizado los nuevos pozos de bombeo en las simulaciones, se muestran en la Figura 7-37.

Tabla 7-22. Caudales de los escenarios simulados (L/s)

Modelo numérico	Modelo permanente	Escenario Base	Escenario 1	Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5*	
	Factores de uso	Derechos otorgados	Derechos otorgados y pendientes	% adicional Escenario 1	Caudal asignado	% adicional Escenario 1	Caudal asignado	% adicional Escenario 1	Caudal asignado	% adicional Escenario 1	Caudal asignado
Punta Arenas	46,58	107,67	115,32	50	172,92	25	144,12	40	161,40	40*	161,40*
Continental Norte	48,38	127,60	127,60	50	190,63	100	253,66	150	316,69	150*	316,69*
Tierra del Fuego	48,86	164,93	195,93	50	295,02	100	394,11	75	344,57	75*	344,57*
<b>Total</b>	<b>143,82</b>	<b>400,20</b>	<b>438,85</b>		<b>658,57</b>		<b>791,89</b>		<b>822,66</b>		<b>822,66*</b>

\*Disminución del coeficiente de almacenamiento (Sy)

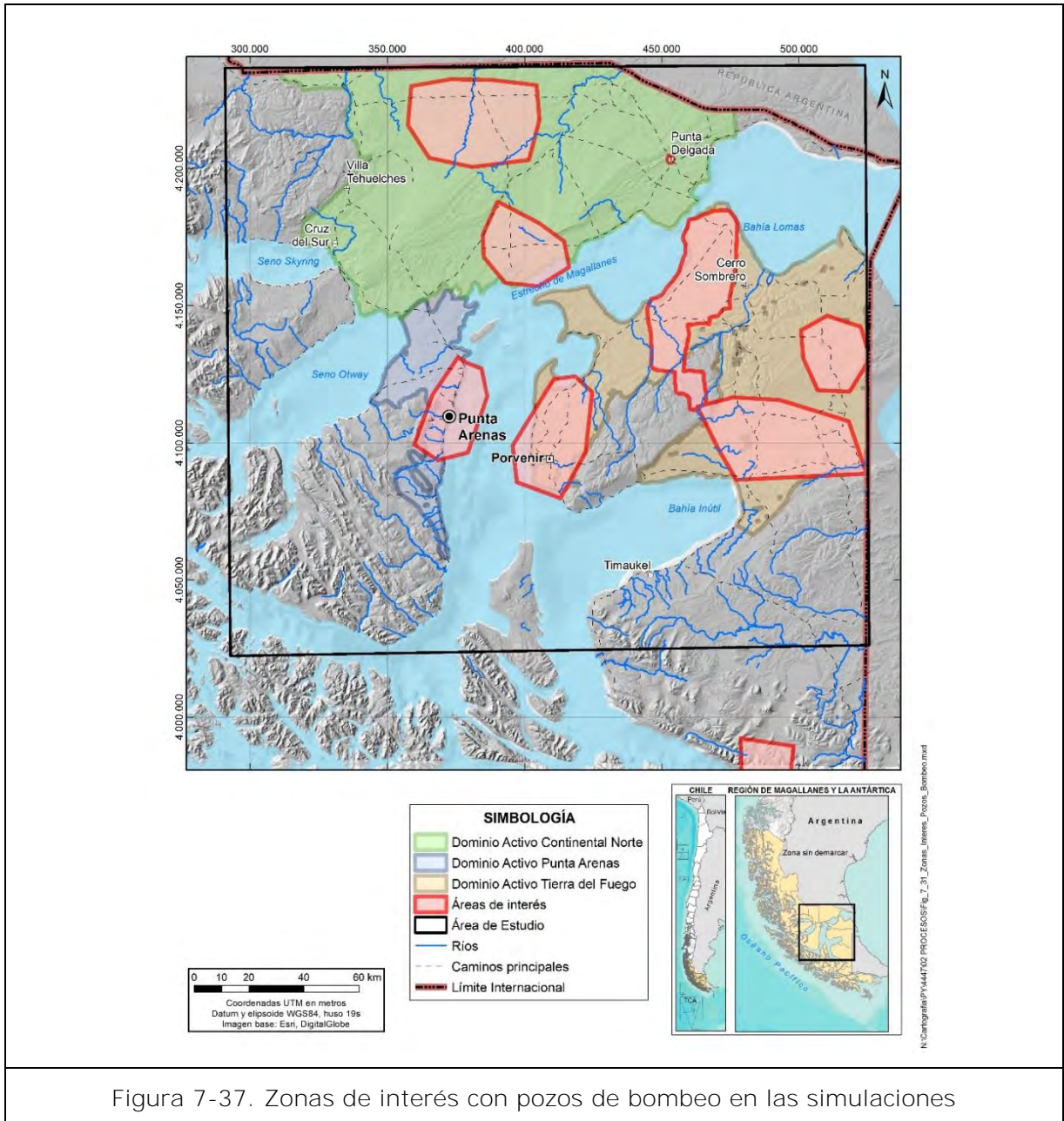


Figura 7-37. Zonas de interés con pozos de bombeo en las simulaciones

El caudal asignado a cada uno de los pozos incluidos en las simulaciones, se ha basado en el caudal promedio de derecho otorgado en cada modelo. Así, en el primer escenario se define el número de pozos adicionales para extraer el aumento de derechos a partir de pozos con el caudal medio de la zona, y en los siguientes escenarios, este caudal se aumenta o disminuye en función de la variación del caudal que tenga cada escenario. En

la Tabla 7-23 se indican los pozos adicionales incluidos, en los escenarios de simulación, para cada modelo numérico, así como el caudal promedio en derecho que tienen los pozos en cada sector.

Tabla 7-23. Pozos utilizados en las simulaciones

<b>Modelo numérico</b>	<b>Nº de pozos en el modelo permanente</b>	<b>Nº de pozos adicionales en las simulaciones</b>	<b>Nº total de pozos en las simulaciones</b>	<b>Caudal de derecho promedio (L/s)</b>
Punta Arenas	177	80	257	0,72
Continental Norte	72	33	105	1,91
Tierra del Fuego	59	27	86	3,67
<b>Total</b>	<b>308</b>	<b>140</b>	<b>448</b>	<b>6,3</b>

El modelo donde se han incluido más pozos nuevos corresponde a Punta Arenas, ya que el caudal promedio de derecho en estos pozos según el catastro es de 0,72 L/s, que es inferior al sector Continental Norte y Tierra del Fuego, donde los caudales otorgados promedio son de 1,91 y 3,67 L/s, respectivamente.

Para alcanzar el caudal adicional simulado en los escenarios, se han impuesto las extracciones en estos pozos de manera progresiva, de tal forma de obtener el total adicional incluido en la simulación a los 50 años. Así, el caudal se aumenta progresivamente cada 10 años de manera proporcional para alcanzar el caudal asignado en el escenario, tras 50 años de simulación.

A continuación se detallan las características del Escenario Base y el Escenario 1, donde se evalúan los caudales asumidos en los tres modelos numéricos, ya que el caudal asumido por el Escenario 1 se utilizará como caudal de referencia en la comparación con el resto de escenarios y la evaluación de criterios que deben cumplirse para asignar un caudal sustentable de extracción en los tres sectores modelados.

### Escenario Base

En este escenario se han asignado como extracciones a los modelos numéricos la totalidad de los derechos actuales otorgados en los pozos de bombeo. Tras las simulaciones a 50 años para este escenario en los tres modelos, se obtiene una extracción asumida por el modelo de 90,7% para el modelo de Punta Arenas, 99% para el modelo Continental Norte y 85,9% para el modelo Tierra del Fuego (Tabla 7-24).

Tabla 7-24. Características del Escenario Base

Modelo numérico	Nº de pozos	Caudal Factor de uso (L/s)	Caudal Derechos otorgados (L/s)	Caudal asumido por el modelo (L/s)	Porcentaje de extracción asumido por el modelo (%)
Punta Arenas	177	46,58	107,67	97,67	90,71
Continental Norte	72	48,38	127,60	126,39	99,05
Tierra del Fuego	59	48,86	164,93	141,71	85,92
<b>Total</b>	<b>308</b>	<b>143,82</b>	<b>400,20</b>	<b>365,77</b>	<b>91,40</b>

### Escenario 1

El Escenario 1 presenta como caudal de extracción la totalidad de derechos otorgados y en trámite en los sectores de los modelos numéricos. Cabe destacar que para el modelo numérico Continental Norte el caudal otorgado es igual al caudal otorgado más el caudal pendiente, ya que este sector no presenta captaciones con derechos en trámite. Tras las simulaciones a 50 años para este escenario en los tres modelos, se obtiene una extracción asumida por el modelo de 91,3% para el modelo de Punta Arenas, 99% para el modelo Continental Norte y 88,1 % para el modelo Tierra del Fuego (Tabla 7-25).

Tabla 7-25. Características del Escenario 1

Modelo numérico	Nº de pozos	Caudal Factor de uso (L/s)	Caudal Escenario 1 (L/s)	Caudal asumido por el modelo (L/s)	Porcentaje de extracción asumido por el modelo (%)
Punta Arenas	177	46,58	115,32	105,32	91,33
Continental Norte	72	48,38	127,60	126,39	99,05
Tierra del Fuego	59	48,86	195,93	172,71	88,15
<b>Total</b>	<b>308</b>	<b>143,82</b>	<b>438,85</b>	<b>404,42</b>	<b>92,15</b>

### 7.12.3 Criterios para la evaluación de sustentabilidad de escenarios.

Para evaluar el caudal de extracción máximo sustentable se han analizado los escenarios de simulación en base a los siguientes cuatro criterios, de forma que para determinar si el caudal de un escenario es sustentable, se han de cumplir los cuatro criterios.

- Criterio 1: Descensos sostenibles en el tiempo a nivel de acuífero.

Los descensos deber estar estabilizados para una operación de 50 años del sistema. Esta estabilización de niveles deber ser respaldada por una recarga suficiente que ingresa al volumen de control (recarga superficial, infiltración desde el río, etc.).

Para evaluar este criterio, se parte del volumen embalsado en los modelos en régimen permanente, al cual se le resta la pérdida de almacenamiento (producto de las salidas de flujo del sistema acuífero) en los diferentes escenarios transientes simulados, con el fin de comprobar que los descensos en el volumen almacenado no sean superiores al 5% en un plazo de 50 años.

El volumen embalsado se ha obtenido mediante el sumatorio del volumen contenido en cada celda activa del modelo, a través de los datos de espesor saturado (altura piezométrica menos la cota del fondo de la celda), dimensiones de cada celda del modelo y el coeficiente de almacenamiento ( $S_y$ ), de tal forma de obtener el volumen total de agua en el acuífero.

$$\text{Volumen celda} = \text{Dimensiones celda} \times \text{Espesor saturado} \times S_y$$

En la Tabla 7-26 se muestra el volumen embalsado inicial para los tres modelos numéricos, el cual no debe reducirse en más de un 5% en las posteriores simulaciones.

Tabla 7-26. Volumen embalsado

<b>Modelo numérico</b>	<b>Volumen embalsado (Mill. m<sup>3</sup>)</b>
Punta Arenas	5.403,52
Continental Norte	46.550,86
Tierra del Fuego	20.650,36

El sector Continental Norte presenta el mayor volumen embalsado con 46.550 millones de m<sup>3</sup>, mientras que el acuífero de Punta Arenas, de menor superficie presenta un volumen embalsado menor de unos 5.400 millones de m<sup>3</sup>.

En la Tabla 7-27, Tabla 7-28 y Tabla 7-29, se muestran los resultados de volumen obtenido en los tres modelos numéricos, y en la Figura 7-38, Figura 7-39 y Figura 7-40 se muestran los gráficos de reducción de volumen para cada modelo numérico. Los



resultados indican que no se alcanza el 5% de reducción del volumen embalsado original en ningún caso para los escenarios realizados.

Tabla 7-27. Diferencia de volumen embalsado en el modelo Punta Arenas

ESCENARIO	MODELO DE PUNTA ARENAS			
	Volumen inicial (Mill. de m <sup>3</sup> )	Diferencia de almacenamiento (Mill. de m <sup>3</sup> )	Volumen final escenario (Mill. de m <sup>3</sup> )	%Reducción
EBASE	5.403,52	61,26	5.342,26	1,13%
E1	5.403,52	64,24	5.339,27	1,19%
E2	5.403,52	108,98	5.294,53	2,02%
E3	5.403,52	86,61	5.316,91	1,60%
E4	5.403,52	100,03	5.303,49	1,85%
E5	5.403,52	87,20	5,316.31	1.61%

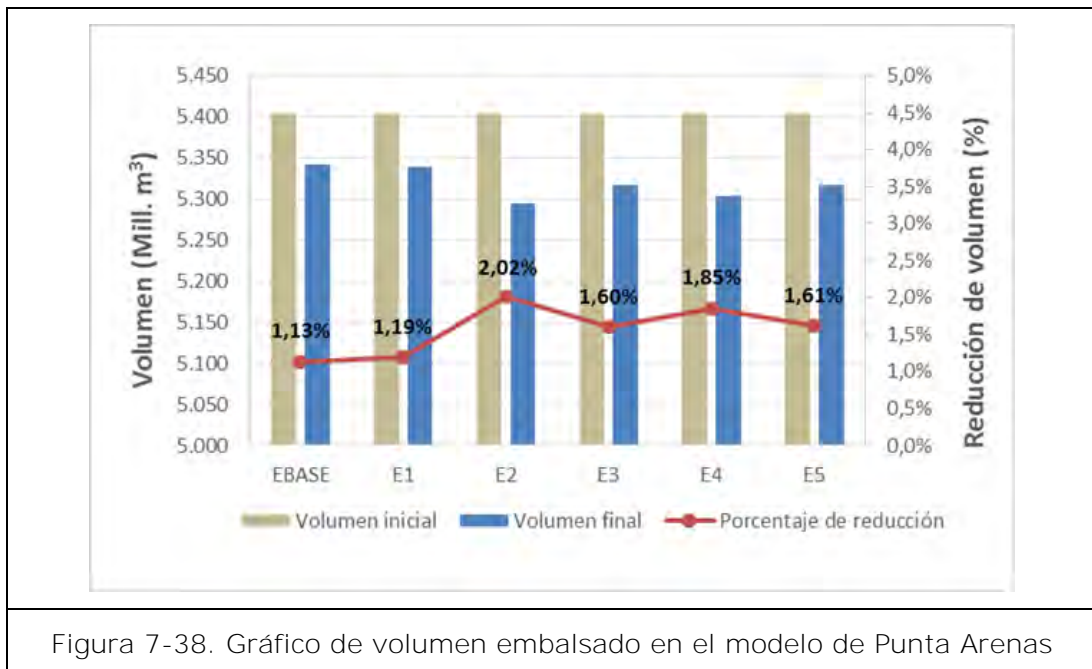


Tabla 7-28. Diferencia de volumen embalsado en el modelo Continental Norte

ESCENARIO	MODELO CONTINENTAL NORTE			
	Volumen inicial (Mill. de m <sup>3</sup> )	Diferencia de almacenamiento (Mill. de m <sup>3</sup> )	Volumen final escenario (Mill. de m <sup>3</sup> )	%Reducción
EBASE	46.550,86	121,89	46.428,97	0,26%
E1	46.550,86	121,89	46.428,97	0,26%
E2	46.550,86	181,71	46.369,15	0,39%
E3	46.550,86	241,38	46.309,48	0,52%
E4	46.550,86	300,08	46.250,79	0,64%
E5	46.550,86	301,85	46,249.01	0.65%

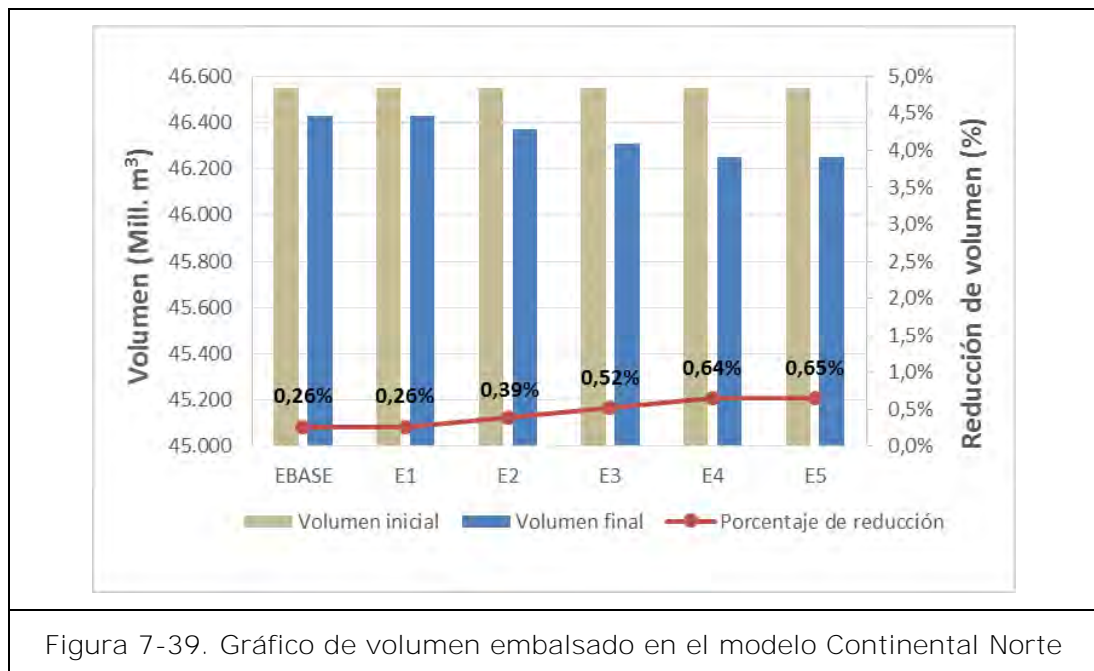


Figura 7-39. Gráfico de volumen embalsado en el modelo Continental Norte

Tabla 7-29. Diferencia de volumen embalsado en el modelo Tierra del Fuego

ESCENARIO	MODELO TIERRA DEL FUEGO			
	Volumen inicial (Mill. de m <sup>3</sup> )	Diferencia de almacenamiento (Mill. de m <sup>3</sup> )	Volumen final escenario (Mill. de m <sup>3</sup> )	%Reducción
EBASE	20.650,36	155,15	20.495,21	0,75%
E1	20.650,36	202,98	20.447,38	0,98%
E2	20.650,36	284,80	20.365,56	1,38%
E3	20.650,36	379,41	20.270,95	1,84%
E4	20.650,36	335,51	20.314,85	1,62%
E5	20.650,36	329,76	20.320,59	1,60%

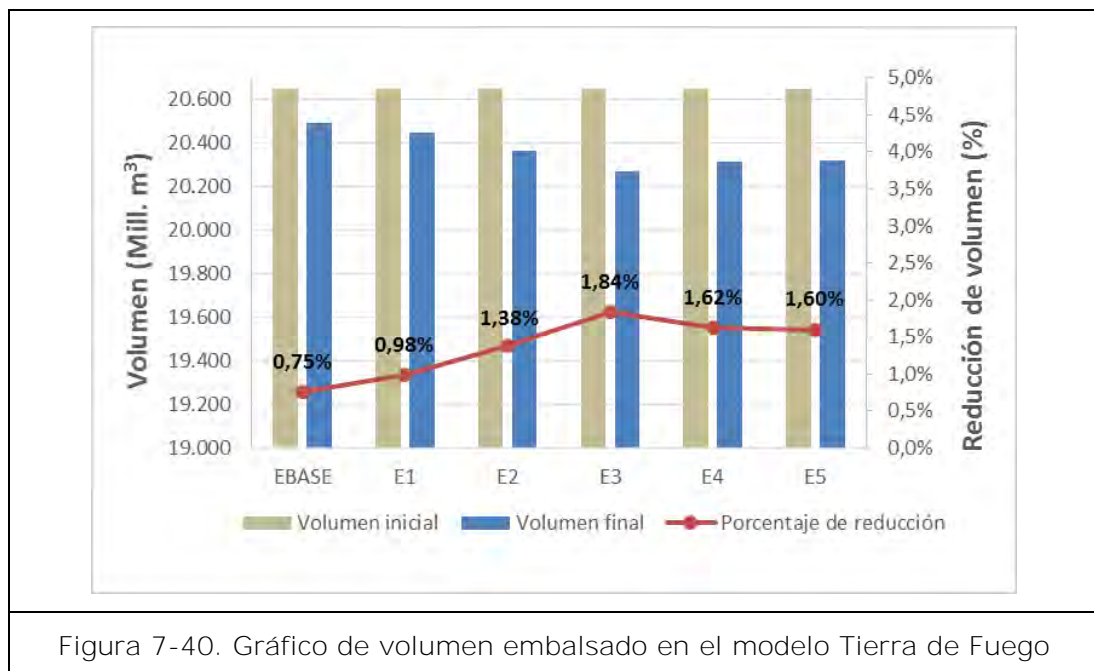


Figura 7-40. Gráfico de volumen embalsado en el modelo Tierra de Fuego

- Criterio 2: Afectación sobre aguas superficiales

La evaluación de la interacción entre aguas superficiales (ríos, vertientes, etc.) y aguas subterráneas no debe afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción (recursos inducidos sobre fuentes superficiales comparados con una situación de régimen natural) debe ser menor que el 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

Para la evaluación de este criterio se han calculado los caudales netos de salida desde el acuífero hacia los cauces superficiales en los escenarios (Balance neto del escenario). Este valor se ha comparado con el obtenido en el Escenario 1 (Balance neto inicial), que presenta la situación de los derechos otorgados y en trámite. Por tanto, estos caudales netos de intercambio hídrico hacia los ríos no deben reducirse en las simulaciones más de un 10% del valor obtenido en el Escenario 1.

En la Tabla 7-30 se muestran los resultados de balance neto de los cauces superficiales, donde se indica el caudal de salida hacia los ríos en el escenario de referencia (Escenario 1), y el caudal de salida en los escenarios tras las simulaciones a 50 años. En la Figura 7-41, Figura 7-42 y Figura 7-43 se muestran los gráficos de afectación sobre aguas superficiales para cada modelo numérico.

Tabla 7-30. Caudal de salida hacia los cauces superficiales en los escenarios

	PUNTA ARENAS			CONTINENTAL NORTE			TIERRA DEL FUEGO		
	Balance neto inicial (L/s)	Balance neto escenario (L/s)	% Reducción	Balance neto inicial (L/s)	Balance neto escenario (L/s)	% Reducción	Balance neto inicial (L/s)	Balance neto escenario (L/s)	% Reducción
E2	94,03	83,94	10,73%	1.831,62	1.831,09	0,03%	1.458,63	1.455,15	0,24%
E3	94,03	88,98	5,37%	1.831,62	1.830,57	0,06%	1.458,63	1.403,28	3,80%
E4	94,03	85,95	8,59%	1.831,62	1.830,06	0,09%	1.458,63	1.453,55	0,35%
E5	94,03	80,10	14,81%	1.831,62	1.831,06	0,03%	1.458,63	1.449,82	0,60%

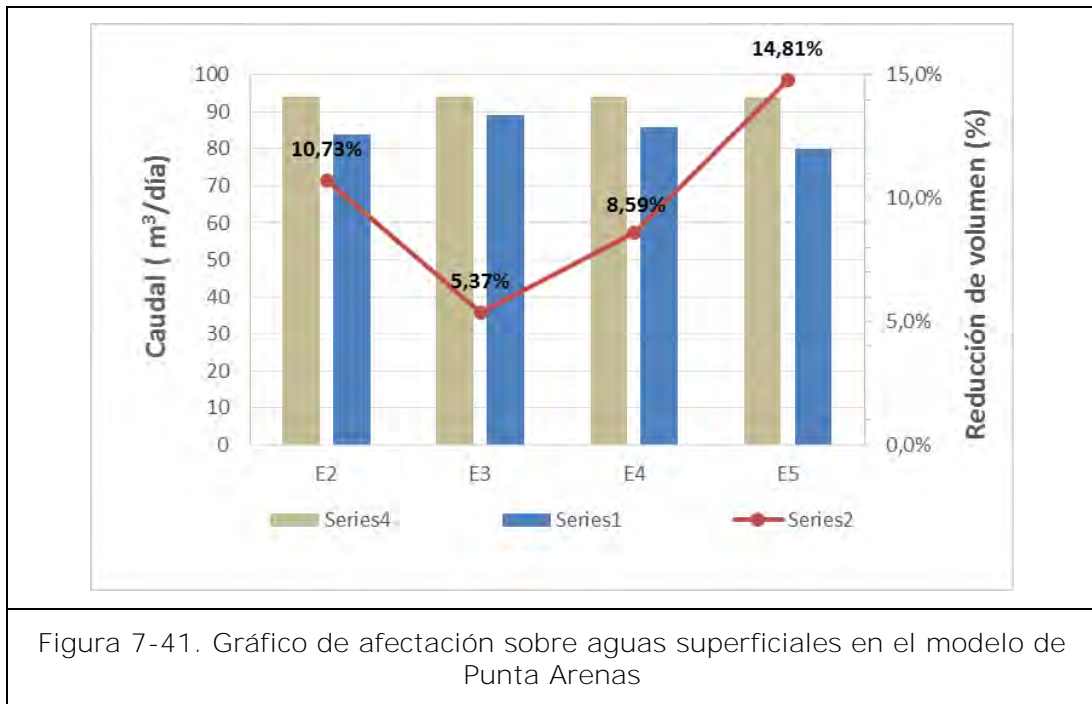


Figura 7-41. Gráfico de afectación sobre aguas superficiales en el modelo de Punta Arenas

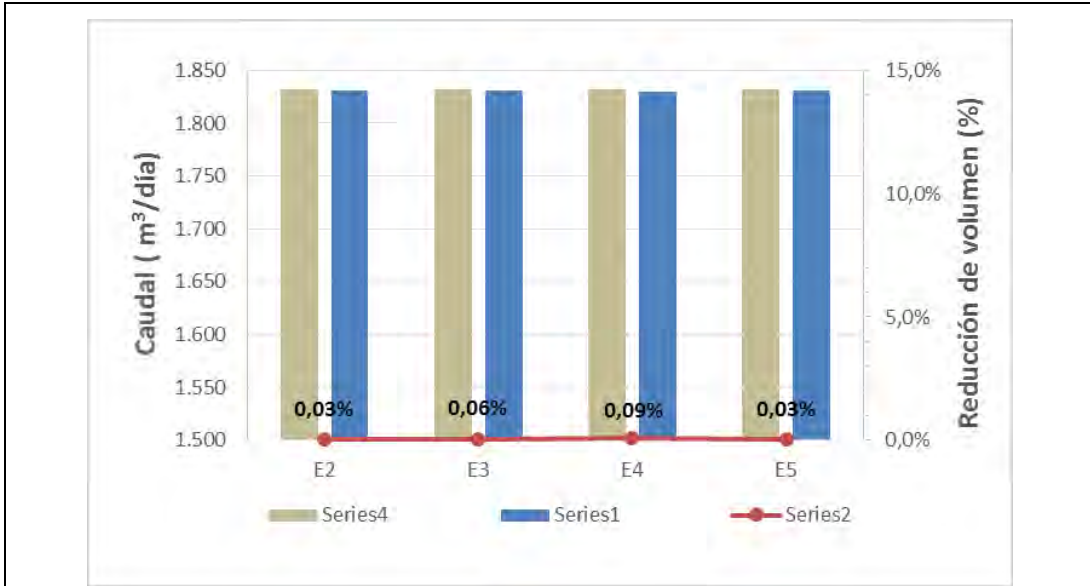


Figura 7-42. Gráfico de afectación sobre aguas superficiales en el modelo Continental Norte

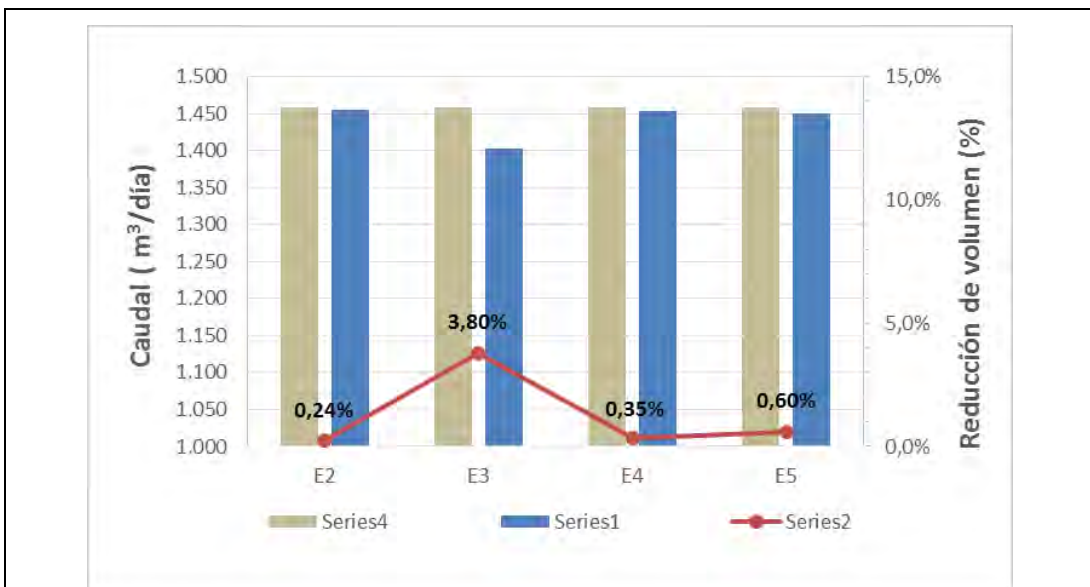


Figura 7-43. Gráfico de afectación sobre aguas superficiales en el modelo de Tierra de Fuego

Los resultados indican que el modelo de Punta Arenas reduce en más del 10% el caudal de salida hacia los ríos desde el acuífero en el Escenario 2, donde se incrementó en un 50% el caudal del Escenario 1. Por tanto, este escenario no cumple este criterio. Lo mismo ocurre en este mismo modelo para el Escenario E5, donde se disminuye el coeficiente de almacenamiento. Para el resto de escenarios y modelos se cumple este criterio.

- Criterio 3: Extracción ingresada al modelo

Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda.

Para evaluar este criterio, se toma un escenario de referencia a partir del cual se analizará el caudal adicional asumido por los escenarios simulados. El escenario de referencia presenta unas extracciones correspondientes a los derechos otorgados y en trámite (Escenario 1). Así, el porcentaje de las extracciones asumidas por este escenario, será el caudal a partir del cual se analizarán los porcentajes de caudal adicional asumidos por el resto de escenarios. En la Tabla 7-31 y en la Figura 7-44 se indican los caudales asumidos por cada escenario de simulación.

Tabla 7-31. Caudales asumidos en los escenarios

ESCENARIO	PUNTA ARENAS	CONTINENTAL NORTE	TIERRA DEL FUEGO
E2	100,00	100,00	98,02
E3	100,00	98,43	90,98
E4	100,00	97,29	97,45
E5	100,00	97,07	97,31

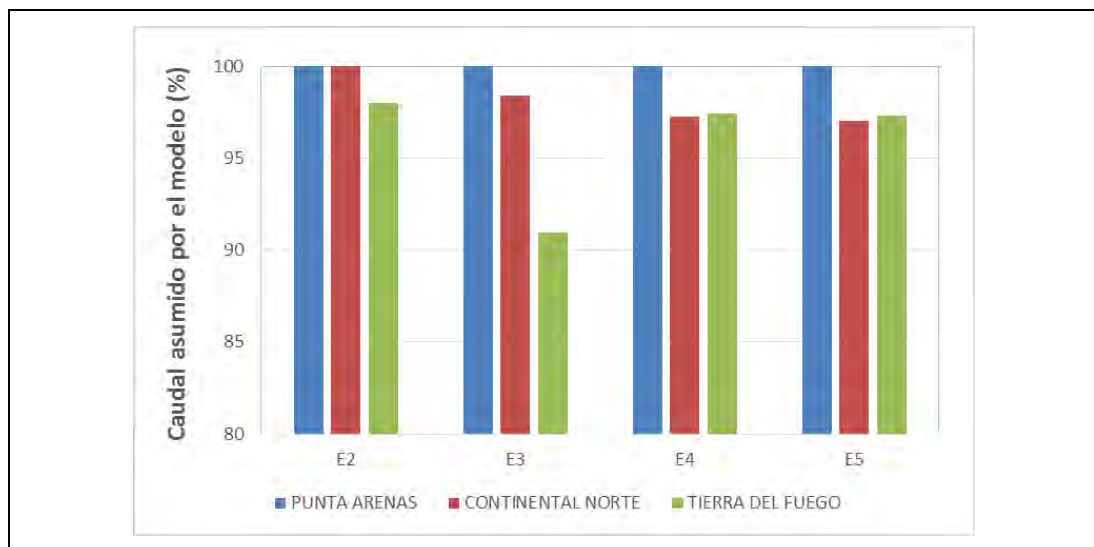


Figura 7-44. Gráfico de caudales asumidos por los modelos numéricos

Los resultados indican que el aumento de caudal en Tierra del Fuego en el Escenario 3 provoca un descenso del caudal asumido por el modelo por debajo del 95%, por tanto este escenario no se cumple en Tierra del Fuego. El resto de escenarios de los modelos numéricos asumen un caudal superior al 95%.

- Criterio 4: Afectación a pozos de terceros

En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

El análisis de este criterio se realiza mediante la obtención del número de pozos que no logran extraer todo el caudal asignado debido a descensos del espesor saturado. Los modelos numéricos presentan una opción de simulación de pozos de bombeo en la que cuando el pozo no es capaz de extraer todo el caudal, MODFLOW lo reduce automáticamente hasta un valor que es posible extraer por el pozo de bombeo, o bien, si el nivel disminuye bajo la profundidad del pozo, el pozo deja de extraer caudal. De esta forma, se identifican los pozos cuyo caudal asignado no es sustentable. En la Tabla 7-32 se indican el porcentaje de pozos con reducción del caudal en cada escenario de simulación.

Tabla 7-32. Afectación Pozos de terceros

ESCENARIO	PUNTA ARENAS		CONTINENTAL NORTE		TIERRA DEL FUEGO	
	Pozos con reducción de caudal	% Reducción	Pozos con reducción de caudal	% Reducción	Pozos con reducción de caudal	% Reducción
E2	1	0,0%	1	0,0%	10	1,3%
E3	1	0,0%	2	1,0%	10	1,3%
E4	1	0,0%	3	1,9%	10	1,3%
E5	1	0,0%	3	1,9%	10	1,3%

Los resultados indican que en ningún escenario se alcanza un 5% de pozos con caudal reducido. Este porcentaje de pozos se obtiene a partir de la diferencia de pozos con caudal reducido entre el Escenario 1 y el resto de escenarios.

#### 7.12.4 Caudales óptimos sustentables

Tras el análisis de los resultados obtenidos en los escenarios realizados, se ha determinado el caudal sustentable en cada sector hidrogeológico, el cual debe cumplir los criterios del capítulo 7.12.3. En la Tabla 7-33 se indican los caudales óptimos de extracción en función del cumplimiento de estos criterios.

Tabla 7-33. Caudales óptimos de extracción

PUNTA ARENAS			CONTINENTAL NORTE			TIERRA DEL FUEGO		
ESCENARIO	CAUDAL		ESCENARIO	CAUDAL		ESCENARIO	CAUDAL	
	L/s	m <sup>3</sup> /año		L/s	m <sup>3</sup> /año		L/s	m <sup>3</sup> /año
E3	144,12	4.544.968	E4	316,69	9.987.136	E4	344,57	10.866.360

El modelo de Punta Arenas cumple los cuatro criterios tanto en el Escenario 3 (aumento del 25% del bombeo) como en el Escenario 4 (aumento del 40%). Sin embargo, el Escenario 5, en el que se disminuye el coeficiente de almacenamiento, indica que el Escenario 4 es susceptible de no cumplir el criterio de afectación sobre aguas superficiales, y por tanto, se ha determinado el Escenario 3 como escenario óptimo.

En el modelo Continental Norte se cumplen los cuatro criterios en todos los escenarios simulados, alcanzando el 150% de bombeo adicional respecto al Escenario 1, siendo el Escenario 4 el escenario óptimo de extracción.

En Tierra del Fuego, el Escenario 3, con un aumento del 100% de las extracciones respecto al Escenario 1, no cumple el criterio de extracción ingresada al modelo, por lo que se ha determinado como caudal óptimo de extracción, el caudal correspondiente al Escenario 4, con un 75% de caudal adicional.

La Tabla 7-34 muestra el cumplimiento de criterios para cada escenario de simulación en los tres modelos numéricos.

Tabla 7-34. Cumplimiento de criterios en los escenarios de simulación

MODELO NUMÉRICO	ESCENARIO 2				ESCENARIO 3				ESCENARIO 4				ESCENARIO 5			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
PUNTA ARENAS	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
CONTINENTAL NORTE	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
TIERRA DEL FUEGO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

\*C1: Criterio 1 (Descensos sostenibles en el tiempo a nivel de acuífero); C2: Criterio 2 (Afectación sobre aguas superficiales); C3: Criterio 3 (Extracción ingresada al modelo); C4: Criterio 4 (Afectación a pozos de terceros).

Si comparamos el caudal óptimo de extracción en cada modelo con el caudal del Escenario 1 (derechos otorgados más derechos en trámite), obtenemos el caudal adicional susceptible de ser otorgado (Tabla 7-35).

Tabla 7-35. Caudal adicional susceptible de extracción

MODELO NUMÉRICO	Caudal Escenario 1 (L/s)	Caudal óptimo de extracción (L/s)	Caudal susceptible de ser otorgado (L/s)
-----------------	--------------------------	-----------------------------------	--



	L/s	m <sup>3</sup> /año	L/s	m <sup>3</sup> /año	L/s	m <sup>3</sup> /año
<b>PUNTA ARENAS</b>	115,32	3.636.732	144,12	4.544.968	28,80	908.237
<b>CONTINENT AL NORTE</b>	127,6	4.023.994	316,69	9.987.136	189,09	5.963.142
<b>TIERRA DEL FUEGO</b>	195,93	6.178.848	344,57	10.866.360	148,64	4.687.511
<b>TOTAL</b>	<b>438,85</b>	13.839.574	<b>805,38</b>	25.398.464	<b>366,53</b>	11.558.890

---

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 8.1 CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones asociadas a las distintas componentes del estudio, agrupadas por tema.

**Sistematización Demandas y Usos:** Esta actividad incluyó la visita de más de 300 captaciones subterráneas, de las cuales 200 pudieron ser catastradas, obteniendo información de uso de 195 captaciones (98%).

El uso principal de los recursos subterráneos de la región corresponde a agua para Consumo Humano y Animal (49%), agua para Riego (9%), aguas para Uso Industrial (12%) y agua para Otros Usos (28%). En lo que respecta a la evolución de la constitución de derechos de aguas subterráneas en la región, se observa que estos se han mantenido relativamente estables (inferior a 50 L/s) alcanzado valores máximos en el año 2006 (213 L/s) y el año 2013 (121 L/s).

Con respecto al nivel estático, se tiene información de 161 captaciones, de las cuales 30 son surgentes. Más del 60% de las captaciones tiene un nivel estático menor a 5 m

Asimismo, se catastró más de 160 captaciones superficiales, de las cuales únicamente 31 derechos tienen obras asociadas. De estas captaciones, solamente se logró levantar información de uso en 7 (3 para riego, 3 para bebida animal y 1 para agua potable).

**Hidrología:** El análisis pluviométrico permite concluir que las estaciones presentan una baja correlación espacial, identificándose, en términos generales 3 grupos de estaciones: 1°) Continental Sur y Noreste e isla Riesco; 2°) Tierra del Fuego Norte, y; 3°) Tierra del Fuego Sur. Asimismo, se observa un grupo menor de estaciones que no guarda relación espacial con el resto de las analizadas. En términos generales, las precipitaciones alcanzan su máximo en los meses de marzo (Tierra del Fuego Norte) y Abril (Continental Sur y noreste y Tierra del Fuego Sur), estabilizándose las precipitaciones hasta julio, para alcanzar mínimos en los meses de Octubre-Noviembre.

Respecto a los caudales, las cuencas presentan una importante amplitud en cuanto a su rendimiento (0,2 a 45,6 L/s/km<sup>2</sup>), lo que se condice con la variabilidad espacial observada en las precipitaciones. Asimismo, se observa una relación entre la producción específica de la cuenca (L/s/km<sup>2</sup>), y su altura media (msnm). Espacialmente, es posible agrupar las estaciones en tres zonas, las que se condicen con las características de la precipitación: 1°) Continental Sur, Isla Riesco y Continental Noroeste; 2°) Tierra del Fuego Norte, y; 3°) Tierra del Fuego Sur.

Las temperaturas medias mensuales registradas presentan, en algunas estaciones, valores menores o cercanos a 0°C durante la estación invernal. Considerando además, el alto número de horas por día con temperaturas bajo 0°C, es de esperar que parte importante de las precipitaciones se produzca en forma sólida.

**Modelo hidrogeológico conceptual:** Las unidades geológicas de interés para este estudio corresponden a los depósitos sedimentarios del Pleistoceno - Holoceno (depósitos fluvioglaciares), y las Formaciones Filaret (Mioceno superior) y Palomares (Mioceno superior – Plioceno inferior). De las tres unidades nombradas anteriormente, la unidad de depósitos fluvioglaciares es la de mayor interés, dado su uso actual. Según indican los resultados del catastro, los pozos particulares en esta zona estarían perforados en esta unidad.

Estas unidades fueron identificadas tanto en superficie como en subsuperficie, mediante la información de pozos de ENAP (2.223 pozos), pozos particulares catastrados y 7 piezómetros de la Mina Invierno en Isla Riesco.

La unidad *depósitos fluvioglaciares* tiene gran distribución espacial y se deposita concordantemente sobre la Formación Palomares. Posee un espesor variable entre 0 y más de 100 m y es producto de la acción de los sistemas fluviales modernos que retrabajan los sistemas glaciares preexistentes. El origen fluvial de estos depósitos, determina el carácter local de este acuífero en las distintas zonas. Estos sedimentos cuaternarios están compuestos principalmente por arenas y gravas no consolidadas, interdigitadas con arcillas.

La *Formación Palomares* (Terciario superior), corresponde a tobas y cenizas volcánicas impermeables, que predominan hacia la parte alta, y areniscas azules y conglomerados fluviales, hacia la parte baja. Las areniscas azules constituyen el acuífero. Estas poseen un espesor entre 1 y 5 m y corresponden a lentes de arena de grano medio a grueso, de buena selección, que pasan lateralmente a conglomerados y arcillas tobáceas, alcanzando espesores efectivos de 20 m máximo. La Formación Palomares se deposita en discordancia sobre la Formación Filaret.

La *Formación Filaret* (Terciario superior), corresponde a arcillolitas y areniscas gris verdosas y a veces azules y capas de carbón impermeable. Las areniscas de la parte alta de la Formación Filaret poseen buenas características hidrogeológicas, reconocidas sólo en Tierra del Fuego.

Usando información de geología de superficie, subsuperficie, geofísica TEM y parámetros hidráulicos se definieron 3 Unidades Hidrogeológicas principales: *Unidad Hidrogeológica Cuaternaria*, *Basamento Hidrogeológico* y *Basamento Resistivo*. Estas unidades fueron modeladas espacialmente en 3D (utilizando el software Leapfrog Hydro).

- La *Unidad Hidrogeológica Cuaternaria* corresponde a la unidad más somera, correspondiente a la unidad geológica depósitos fluvioglaciares. Esta unidad contiene el agua, almacenada como unidad libre, donde están perforados los pozos someros en la región. Esta unidad posee un rango de espesores entre 1 y 400m, con un promedio de 65 m para Tierra del Fuego, 80 m para Punta Arenas, y 124 m para el área Continental Norte. Esta unidad presenta un amplio rango de conductividad hidráulica que varía entre 0.02 a 35 m/día.
- El *Basamento Hidrogeológico* corresponde a las unidades geológicas que subyacen a la unidad hidrogeológica cuaternaria, correspondientes a la formación Palomares y/o Formación Filaret, y las unidades más antiguas bajo estas. Estas unidades son

consideradas capaces de almacenar y transportar agua, por lo que históricamente se han considerado como acuíferos del tipo confinado; sin embargo, las aguas de estas unidades son muy salinas, de acuerdo a los numerosos registros hidroquímicos que ENAP le ha presentado a la DGA, de pozos perforados en estas unidades. Además, la totalidad de los pozos del catastro se encuentra perforados en la unidad somera, por ende esta unidad se considera en este trabajo como parte del basamento hidrogeológico.

- El **Basamento Resistivo**, sólo definida por los perfiles TEM, que muestra un cambio en la resistividad de las capas medidas, a una profundidad mayor al contacto entre las dos unidades hidrogeológicas anteriores. A partir de esta profundidad se define este basamento resistivo.

En general, se observa que los niveles piezométricos se encuentran muy cercanos a la superficie, lo que indica un alto grado de saturación de los acuíferos analizados; sin embargo, se debe considerar que los niveles estáticos fueron medidos en los meses de noviembre y diciembre, que corresponde a un período de alta recarga por deshielos.

**Modelación Numérica:** Se ha llevado a cabo la modelación numérica en la cuenca de Magallanes a través de tres modelos numéricos que comprenden el sector de la Península de Brunswick, el sector Continental Norte y el sector de Tierra del Fuego, respectivamente. A través de la modelación, calibración y operación de los modelos numéricos se ha determinado el volumen sustentable de los sectores acuíferos en base a los cuatro criterios exigidos por la DGA para la evaluación de sustentabilidad de los distintos escenarios simulados.

La división en tres modelos se ha realizado en función de la piezometría, ya que se observan divisorias de agua subterránea entre el modelo Continental Norte y el modelo de Punta Arenas, mientras que el modelo Tierra del Fuego está separado físicamente del resto de sectores.

Entre las principales conclusiones de la modelación numérica es posible señalar:

- Los modelos numéricos están constituidos por una capa que corresponde a la Unidad Hidrogeológica Cuaternaria. Esta unidad se ha modelado como un acuífero libre, ya que, aunque en algunos sectores el acuífero se encuentra confinado o semi-confinado por la interdigitación de materiales arcillosos, la extensión de estas zonas de confinamiento es desconocida a efectos de realizar una delimitación de este comportamiento en el modelo numérico.
- En términos de balance hídrico y de los estadígrafos de calibración, los resultados obtenidos son satisfactorios, existiendo una buena consistencia entre los modelos numéricos y el modelo conceptual desarrollado.
- La recarga superficial de los modelos tras la calibración es de 5.200 L/s en Punta Arenas, 4.150 en el modelo Continental Norte, y 4.300 en Tierra del Fuego. Los modelos Continental Norte y Tierra del Fuego presentan una recarga lateral

subterránea adicional, procedente de los relieves situados en el contacto con las unidades subyacentes al acuífero cuaternario, la cual es de unos 9.550 L/s en el modelo Continental Norte, y de unos 3.350 L/s en el modelo Tierra del Fuego. Además de la recarga lateral y por infiltración, se obtiene también un flujo de entrada a través de los ríos, los cuales presentan una importante interacción con el acuífero, cediendo agua al acuífero y actuando también como una salida de flujo en sectores donde el acuífero recarga a los cauces superficiales.

- La calibración del modelo se ha llevado a cabo en régimen permanente debido a que no se dispone de datos de niveles piezométricos a lo largo del tiempo para poder realizar una calibración en régimen transiente.
- Tras la calibración de los modelos se han realizado 6 escenarios de simulación para determinar el caudal óptimo de extracción en cada sector modelado. Para la determinación de este caudal, se han evaluado cuatro criterios que han de cumplirse para el caudal óptimo de extracción. Los criterios utilizados buscan evitar que se produzcan descensos sostenibles en el tiempo a nivel de acuífero, que se produzca una afectación sobre las aguas superficiales, que se afecten a pozos de terceros con el incremento de extracciones, y que no se consigan extraer al menos el 95% de las extracciones impuestas en los modelos.

Los caudales óptimos de extracción en cada sector tras la evaluación del cumplimiento de criterios en los escenarios son los siguientes:

- Modelo de Punta Arenas: El caudal óptimo es de 144,12 L/s, que supone 28,8 L/s adicionales respecto al escenario de referencia (derechos otorgados más derechos en trámite)
- Modelo Continental Norte: El caudal óptimo es de 316,69 L/s, que supone 189 L/s adicionales respecto al escenario de referencia (derechos otorgados más derechos en trámite)
- Modelo Tierra del Fuego: El caudal óptimo es de 344,57 L/s, que supone 148,6 L/s adicionales respecto al escenario de referencia (derechos otorgados más derechos en trámite)
- Aunque los balances hídricos calculados por los modelos numéricos presentan unos valores de caudales consistentes con la información disponible para este sector, hay que tener en cuenta la incertidumbre en los resultados obtenidos, la cual está asociada a los parámetros de entrada de los modelos. Esta incertidumbre se debe a la falta de información en determinados sectores, como es la escasa información de niveles y pruebas de bombeo en comparación con la extensión de las áreas a modelar, no existiendo datos de conductividad hidráulica en el sector Continental Norte, así como en gran parte del área de los modelos de Punta Arenas y de Tierra del Fuego. La incertidumbre asociada a los resultados también está relacionada con la falta de una red de monitoreo con datos suficientes de niveles piezométricos a lo largo del tiempo que permitan una calibración en régimen transiente.

---

## 8.2 RECOMENDACIONES

Las principales recomendaciones de este trabajo son las siguientes:

- Disponer de una fuente de información adicional a los estudios locales disponibles, labor que puede ser realizada por la DGA con otros organismos locales (universidades, centros técnicos especializados, etc.), que permitan dar un mayor sustento y marco teórico a la hidrogeología regional y local;
- Respecto al catastro de captaciones, es posible señalar que fue posible obtener información de niveles, usos y características, de un número acotado de pozos en la región por los siguientes motivos: Coordenadas equivocadas en el CPA; desconocimiento de sus propietarios en cuanto al uso del derecho; accesos a las distintas captaciones. Conforme a lo anterior, se recomienda, en base a la información recopilada en este estudio, realizar campañas acotadas que permitan verificar la información en aquellas captaciones en las que no fue posible obtener dicha información.
- Respecto a la hidrología, se recomienda implementar una red extensa de estaciones que permitan medir precipitaciones sólidas en la región.
- Asimismo, dadas las diferencias notables observadas en las variables analizadas dependiendo de su ubicación, se recomienda realizar estudios acotados que permitan entender en concreto el funcionamiento de sistemas hídricos a escala para, posteriormente, proceder a un análisis macro regional.
- Dadas las características morfológicas e hidrogeológicas de la región, en donde se espera exista un traspaso de caudales subterráneos y superficiales entre Chile y Argentina de manera natural, se recomienda implementar una red de monitoreo en conjunto con Argentina que permita detallar en mayor medida el funcionamiento de los acuíferos.
- Implementar una red permanente de pozos de monitoreo, que registre información periódicamente, con pozos habilitados ya sea en el acuífero superficial o profundo, buscando observar las variaciones estacionales del acuífero durante el año.
- Debe tener una cobertura espacial suficiente para reflejar la dinámica del nivel estático del acuífero en relación a los eventos de recarga. En este sentido, esta red de pozos debe ser diferente a las mediciones de nivel que se hacen sobre los pozos de extracción que han sido catastrados.
- Debe considerar además pozos entorno a los principales cauces superficiales para analizar la dinámica de la interacción río-acuífero.
- Mejorar la calidad de la información litológica que se incluye en los expedientes que acompañan las solicitudes de agua de la región.

En lo que respecta a la modelación numérica, debido a que no se ha podido realizar una calibración en régimen transiente y a que la información de parámetros hidráulicos es escasa, y por tanto, permite una extensión limitada de esta información a todo el dominio

de los tres modelos numéricos, se recomienda la actualización de los modelos en base a la existencia de nueva información en los sectores modelados.

La red de monitoreo para llevar a cabo una calibración es escasa, ya que no se dispone de una base de datos de niveles en el tiempo que permita calibrar la dinámica temporal del acuífero y su coeficiente de almacenamiento, lo cual aumenta la incertidumbre de los resultados obtenidos. Se recomienda la definición de una red de monitoreo que permita cubrir los sectores de interés de los que no se dispone información de niveles, y obtener la evolución piezométrica de los acuíferos en el tiempo a través de mediciones de nivel con una periodicidad como mínimo trimestral.

La información de nuevos pozos estratigráficos profundos en sectores de interés, tales como el área próxima a la ciudad de Punta Arenas, es fundamental para la correcta definición de los acuíferos del sector. Igualmente se requiere de una mayor información de parámetros hidráulicos, por lo que se recomienda la realización de pruebas de bombeo de larga duración en las zonas donde la información hidráulica es escasa.

-

---

## **ANEXOS - DIGITALES**

### **ANEXOS CAPÍTULO 4**

#### **A. ANEXO A**

##### **A.1. REVISIÓN EXPEDIENTES DIGITALES**

##### **A.2. BASE DE DATOS ESTUDIO LEGAL DERECHOS DE AGUA**

##### **A.3. PROTOCOLO DE CATASTRO**

A.3.1 Encuesta Uso Catastro Magallanes 2014\_RevB

A.3.2 Carta Apoyo Catastro DGA. RevB

A.3.3 Protocolo Catastro\_Rev\_B

A.3.4 Stefano Torrent\_Credenciales DGA

A.3.5 Ximena Orrego\_Credenciales DGA

##### **A.4. SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN**

A.4.1 Base\_catastro\_DGA\_11122014

A.4.2 DerechosAreaEstudio

A.4.3 Encuesta de Uso\_11122014

A.4.4 Subterráneos\_Tram\_Aprob

##### **A.5. INFORMACIÓN PARA TERRENO**

A.5.1 Captaciones Subterráneas de sur a norte

A.5.2 Captaciones Subterráneas desde Sur a Norte

#### **B. ANEXO B**

##### **SIG**



## **ANEXOS CAPÍTULO 6**

**C.1. POZOS ENAP**

**D.1. POZOS ENAP**

**E.1. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO**

**F.1. BASE CATASTRO DGA**

**F.2. CATASTRO**

**F.3. FICHA DE POZOS REGISTRADOS 25.05.15**

**F.4. IFT LEVANTAMIENTO DE CAPTACIONES SUBTERRANEAS EN  
MAGALLANES**

## **ANEXOS CAPÍTULO 7**

**G.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

**G.2. RESIDUALES DE CALIBRACIÓN**