



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

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA CUENCA ITATA-BAJO, REGIÓN DEL BIOBÍO

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

AQUALOGY MEDIOAMBIENTE CHILE S.A.

S.I.T. N° 320

Santiago, Noviembre 2013

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministra de Obras Públicas

Sra. Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas

Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe de División de Estudios y Planificación

Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal

Sr. Juan Carlos Salgado González

AQUALOGY MEDIOAMBIENTE CHILE S.A.

Jefa de Proyecto

María Angélica Alegría Calvo

Ing. Civil Hidráulica

Director Técnico

Eduardo Lupiani Moreno

Hidrogeólogo

Experto en modelación matemática

Alberto Barrera García

Hidrogeólogo

Profesionales de terreno

Beatriz Salas Martínez (Geóloga)

Berta Morales González (Geóloga)

Alejandro Vázquez González (Ing. Topógrafo)

Carlos Gata Maya (Geofísico)

Experto en SIG

Jorge Mena Gutiérrez

Geógrafo

ÍNDICE

0.	RESUMEN	15
1.	INTRODUCCIÓN	19
	1.1. OBJETIVOS Y ALCANCE	20
	1.2. ESTRUCTURA DEL INFORME FINAL	21
2.	EL ACUÍFERO DEL ITATA BAJO	23
3.	EL ESTUDIO REALIZADO	25
4.	DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ITATA	27
	4.1. CLIMA	27
	4.2. GEOMORFOLOGÍA	28
	4.3. SUELOS	29
	4.4. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
5.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	33
6.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	37
	6.1. DESCRIPCIÓN DE LA RED DE DRENAJE	37
	6.2. DEFINICIÓN DE CUENCAS	39
	6.3. RED FLUVIOMÉTRICA	39
	6.3.1. TRATAMIENTO DE REGISTROS FLUVIOMÉTRICOS	42
	6.3.2. CORRECCIÓN DE ESTADÍSTICA	42
	6.3.3. RELLENO Y EXTENSIÓN DE ESTADÍSTICAS	43
	6.4. CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO	47
	6.5. PRECIPITACIÓN BRUTA	50
	6.6. HIPSOMETRÍA	50
	6.7. PERFIL DE PRECIPITACIONES	51
7.	GEOLOGÍA Y FORMACIONES PERMEABLES	59
	7.1. MARCO GEOLÓGICO GENERAL	59
	7.2. ESTRATIGRAFÍA	61
	7.3. COLUMNAS DE SONDEOS DISPONIBLES	63
	7.4. FORMACIONES PERMEABLES	67
8.	ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	69
	8.1. INTRODUCCIÓN	69
	8.2. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	69
	8.3. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN	70
	8.4. CAMPAÑA DE TERRENO	73
	8.5. PROCESADO E INVERSIÓN DE DATOS	76
	8.6. RESULTADOS	76
9.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELO CONCEPTUAL	89
	9.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO	89
	9.1.1. FORMACIONES PERMEABLES	89
	9.1.2. GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO	89
	9.1.3. LÍMITES DEL SISTEMA	96
	9.2. PARÁMETROS ELÁSTICOS	97
	9.2.1. RECOPIACIÓN DE PARÁMETROS ELÁSTICOS	97

9.2.2.	CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÁSTICOS	99
9.2.3.	PARÁMETROS ELÁSTICOS OBTENIDOS	108
9.3.	TRABAJO DE TERRENO	109
9.3.1.	CATRASTO DE CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS.....	109
9.3.2.	IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AGUA CATASTRADOS.....	110
9.3.3.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS POZOS CATASTRADOS.....	110
9.3.4.	CAMPAÑA DE PIEZOMETRÍA.....	111
9.3.5.	CAMPAÑA DE CALIDAD DE AGUAS.....	116
9.3.6.	CAMPAÑA DE AFOROS	122
9.3.7.	CATASTRO DE LA DEMANDA AGRÍCOLA, MINERA, SANITARIA E INDUSTRIAL.....	131
9.4.	EQUIPOTENCIALES Y FLUJOS DE AGUA SUBTERRÁNEA 132	
9.5.	BALANCE HÍDRICO	133
9.5.1.	ENTRADAS	134
9.5.2.	SALIDAS	149
9.5.3.	BALANCE.....	151
10.	MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO	153
10.1.	DISCRETIZACIÓN Y MALLADO DEL MODELO	153
10.2.	GEOMETRÍA DEL MODELO	154
10.3.	PARÁMETROS ELÁSTICOS	156
10.4.	CONDICIONES DE CONTORNO	157
10.4.1.	BORDES	157
10.4.2.	RÍOS.....	159
10.4.3.	RECARGA	160
10.4.4.	EXTRACCIONES POR BOMBEO.....	161
10.5.	PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	161
10.6.	EJECUCIÓN DEL MODELO	164
10.7.	CALIBRACIÓN DEL MODELO	165
10.8.	RESULTADOS OBTENIDOS. ESCENARIOS.....	165
10.8.1.	ESCENARIO 1. SITUACIÓN ACTUAL	166
10.8.2.	ESCENARIO 2. SITUACIÓN EN REGIMEN NATURAL ...	170
10.8.3.	ESCENARIO 3. SITUACIÓN CRÍTICA SIN PRECIPITACIONES.....	175
10.8.4.	ESCENARIO 4. SITUACIÓN DE AFECCIÓN AL SISTEMA SUPERFICIAL	180
10.8.5.	ESCENARIO 5. SITUACIÓN DE AFECCIÓN A MÁS DEL 5% DE LA DEMANDA	194
10.8.6.	ESCENARIO 6. SITUACIÓN DE AFECCIÓN A MÁS DEL 5% DE LAS CAPTACIONES DEL ACUÍFERO.....	210
10.8.7.	ESCENARIO 7. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON INCREMENTO DE LA DEMANDA	214
11.	PROPUESTA DE RED DE MONITOREO	221
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES	223
12.1.	CONCLUSIONES	223
12.2.	RECOMENDACIONES	224

PLANOS 1 Y 2. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS INVESTIGADOS MEDIANTE GEOFÍSICA

LÁMINAS 1. INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA

LÁMINAS 2. REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

ANEXO 1. FICHAS DE TERRENO

ANEXO 2. TABLAS DE TERRENO

ANEXO 3. RESULTADOS ANÁLISIS DE LABORATORIO

ANEXO 4. RESULTADOS CAMPAÑA DE AFOROS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.....	24
Figura 2. Diagrama climático. Fuente: Cade-Idepe (2004)	28
Figura 3. Área de estudio.....	31
Figura 4. Esquema general de subcuencas	39
Figura 5. Estaciones fluviométricas cuenca Itata	40
Figura 6. Estaciones fluviométricas utilizadas en el Estudio	41
Figura 7. Esquema del río Itata y afluentes	41
Figura 8. Curva estacional Estación Río Itata en Nueva Aldea	48
Figura 9. Autocorrelograma Estación Río Itata en Nueva Aldea	48
Figura 10. Curva estacional Estación Río Itata en Coelemu.....	49
Figura 11. Autocorrelograma Estación Río Itata en Coelemu.....	49
Figura 12. Hipsometría Itata Superior (control Itata en Nueva Aldea)	50
Figura 13. Hipsometría Itata Inferior (desembocadura del Itata).....	51
Figura 14. Hipsometría Lonquén	51
Figura 15. Estaciones Meteorológicas	52
Figura 16. Gradiente de precipitaciones total de estaciones meteorológicas	53
Figura 17. Gradiente de precipitaciones eliminando outliers.....	53
Figura 18. Dominios morfoestructurales de la zona central de Chile. Modificado de Sernageomin (2000).	59
Figura 19. Geomorfología de la región del Biobío. Fuente: Cartografía MOPIT.	60
Figura 20. Geología de la zona de Estudio.	63
Figura 21. Columna litológica del piezómetro #5.....	64
Figura 22. Columna litológica del piezómetro #6.....	65
Figura 23. Distribución de cuadrípolos para un dispositivo simétrico de prospección geoelectrica.	70
Figura 24. Relación de la resistividad aparente con el posicionamiento del cuadrípulo y los valores obtenidos de intensidad I y diferencia de potencial V.	71
Figura 25. Inversión de sondeo eléctrico vertical SEV.	71
Figura 26. Equipo geoelectrico Syscal R1 Plus SW72 (Iris Instruments). ...	72
Figura 27. Correlación entre piezómetro #6 y SEV nº 42.	78
Figura 28. Ubicación de los SEV 43 y 44 y del sondaje 2501.....	79
Figura 29. Correlación entre los SEV 43 y 44 y el sondaje 2501.	80
Figura 30. Topografía superficial.....	90
Figura 31. Basamento del acuífero Itata Bajo	91
Figura 32. Perfil 1-1'	92
Figura 33. Perfil 2-2'	92
Figura 34. Perfil 5-5'	93
Figura 35. Perfil 7-7'	93
Figura 36. Perfil 9-9'	94
Figura 37. Perfil 12-12'.....	94
Figura 38. Perfil 14-14'.....	95
Figura 39. Perfil 16-16'.....	95
Figura 40. Perfil 22-22'.....	96
Figura 41. Límites del sistema Itata-bajo	97
Figura 42. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-1421	101

Figura 43. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-1459	103
Figura 44. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-1481	103
Figura 45. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-2271	105
Figura 46. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-2532	105
Figura 47. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-6429	106
Figura 48. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-7135	107
Figura 49. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-2318	107
Figura 50. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-6684	108
Figura 51. Distribución geográfica de las captaciones catastradas	110
Figura 52. Caudales de explotación catastrados	116
Figura 53. Campaña de calidad química "in-situ"	119
Figura 54. Diagrama de Piper de en muestras de agua subterránea	120
Figura 55. Diagrama de Piper de en muestras de agua superficial	120
Figura 56. Diagrama de Schoeller-Berkaloff	121
Figura 57. Ubicación puntos de aforo	128
Figura 58. Caudales medidos, río Itata	129
Figura 59. Caudales medidos, río Lonquén	129
Figura 60. Relación río-acuífero según aforos realizados	130
Figura 61. Mapa de equipotenciales y direcciones de flujo	133
Figura 62. Subcuencas aportantes a Itata-bajo	135
Figura 63. Clasificación de usos del suelo. Elaboración propia a partir de información facilitada por la CNR	138
Figura 64. Clasificación de pendientes	139
Figura 65. Clasificación en grupos de suelo	140
Figura 66. Clasificación del umbral de escorrentía	141
Figura 67. Límites del sistema Itata-bajo	145
Figura 68. Diferencia entre caudal aforado en estación de Itata en Coelemu e Itata en Paso Hondo	148
Figura 69. Imagen satelital del área de desembocadura del río Itata	150
Figura 70. Mallado y celdas activas del modelo	154
Figura 71. Topografía introducida en el modelo	155
Figura 72. Basamento introducido en el modelo	155
Figura 73. Distribución de la permeabilidad Kx en el acuífero Itata bajo	156
Figura 74. Distribución de la permeabilidad Kz en el acuífero Itata bajo	157
Figura 75. Asignación de celdas de nivel constante en el acuífero Itata Bajo	158
Figura 75. Pozos de inyección en sector Coelemú	159
Figura 76. Asignación de celdas tipo rio (River) en el acuífero Itata Bajo	160
Figura 77. Puntos de observación utilizados para la calibración en el acuífero Itata Bajo	164
Figura 78. Niveles calculados frente a observados en el modelo del acuífero	165

Figura 79. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo	167
Figura 80. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo (pantalla MODFLOW)	168
Figura 81. Balance hídrico simulado	169
Figura 82. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo para la situación de Régimen Natural	172
Figura 83. Gráfico de balance hídrico en régimen natural	173
Figura 84. Distribución de pozos en el acuífero Itata Bajo para la situación crítica sin precipitación	177
Figura 85. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo para la situación crítica sin precipitación.....	178
Figura 86. Gráfico de balance hídrico en situación crítica sin precipitaciones	180
Figura 87. Distribución de los pozos de bombeo para el escenario 4.	182
Figura 88. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo para el escenario 4 con coeficiente de explotación de 5	183
Figura 89. Celdas secas en el escenario 4 con coeficiente de explotación de 25.....	184
Figura 90. Celdas secas en el escenario 4 con coeficiente de explotación de 50.....	185
Figura 91. Niveles calculados y secado de celdas para el escenario 4 con coeficiente de explotación de 250	186
Figura 92. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos y en trámite al 100%.	196
Figura 93. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 100%.	197
Figura 94. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 50%.	198
Figura 95. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 25%.	199
Figura 96. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 18.5%.	200
Figura 97. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 17%.	201
Figura 98. Demanda impuesta frente a abastecida en el acuífero según escenario 5.	209
Figura 99. Demanda impuesta frente a abastecida en cuencas según escenario 5.	210
Figura 100. Isopiezas obtenidas para una explotación del 15% de los derechos constituidos.	212
Figura 101. Afección de las captaciones en función del coeficiente de explotación de las captaciones con derechos en el acuífero.	214
Figura 102. Evolución del nivel en las captaciones con derechos otorgados, suponiendo una extracción de los caudales otorgados.	218
Figura 103. Evolución del nivel en las captaciones con derechos otorgados, suponiendo una extracción del 17,7% de los caudales otorgados.	219
Figura 104. Niveles simulados al final del periodo (50 años), suponiendo una extracción del 17,7% de los caudales otorgados.	220
Figura 105. Red monitoreo propuesta.....	222

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación de estudios.....	33
Tabla 2. Áreas de las cuencas de estudio	39
Tabla 3. Estaciones fluviométricas.....	42
Tabla 4. Valores anómalos (outliers)	43
Tabla 5. Estación río Itata en Nueva Aldea (m ³ /s).....	44
Tabla 6. Estación río Itata en Coelemu (m ³ /s)	45
Tabla 7. Estación río Itata en Paso Hondo (m ³ /s)	46
Tabla 8. Estación Río Lonquén (m ³ /s).....	46
Tabla 9. Curva estacional Estación Río Itata en Nueva Aldea (m ³ /s)	47
Tabla 10. Estaciones meteorológicas consideradas	52
Tabla 11. Precipitación bruta cuenca Lonquén	54
Tabla 12. Precipitación bruta cuenca Itata Inferior	55
Tabla 13. Precipitación bruta cuenca Itata Superior.....	57
Tabla 14. Expedientes con registros litológicos en la zona de estudio.....	64
Tabla 15. Registros litológicos en la zona de estudio.....	65
Tabla 16. Información sobre los SEVs realizados durante el mes de Julio de 2013.	73
Tabla 17. Resultados de la campaña geofísica.	81
Tabla 18. Transmisividad del acuífero Itata Bajo. Fuente: Estudio hidrogeológico Itata y Biobío. AQUATERRA INGENIEROS LTDA.	98
Tabla 19. Prueba de gasto constante expte. ND-801-1421	99
Tabla 20. Prueba de gasto constante expte. ND-801-1459	101
Tabla 21. Parámetros elásticos obtenidos.....	108
Tabla 22. Campaña de piezometría	111
Tabla 23. Calidad química "in-situ"	117
Tabla 24. Muestras tomadas para análisis en laboratorio de elementos mayoritarios.....	118
Tabla 25. Localización de los puntos aforados.....	122
Tabla 26. Profundidad de mediciones puntuales de velocidad	124
Tabla 27. Aforos, fechas y emplazamientos.....	125
Tabla 28. Resultados mediciones de caudal, Ríos Itata y Lonquén.....	126
Tabla 29. Estimación del umbral de escorrentía	136
Tabla 30. Grupos de suelo	137
Tabla 31. Umbral de escorrentía por subcuenca.....	141
Tabla 32. Características de los suelos en la zona de estudio.....	143
Tabla 33. Resultados obtenidos para la recarga por infiltración directa en acuífero y subcuencas aportantes según balance hidrometeorológico realizado.....	143
Tabla 34. Recarga por entradas subterráneas.....	147
Tabla 35. Entradas al sistema Itata-bajo.....	149
Tabla 36. Balance hídrico del sistema Itata-bajo.....	151
Tabla 37. Balance hídrico cuencas aportantes.....	151

Tabla 38. Puntos de observación y nivel	161
Tabla 39. Balance hídrico simulado (periodo agosto 2013)	169
Tabla 40. Recarga por precipitación en régimen natural	170
Tabla 41. Balance hídrico en Régimen Natural en el acuífero	173
Tabla 42. Balance hídrico en Régimen Natural en cuencas aportantes.....	174
Tabla 43. Caudal de derechos aprobados y en trámite en acuífero y cuencas	175
Tabla 44. Distribución de derechos por subcuencas	175
Tabla 45. Balance hídrico en el acuífero para la situación crítica.....	179
Tabla 46. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 5.	187
Tabla 47. Balance hídrico en el acuífero según escenario 4 y coeficiente de explotación 5.	188
Tabla 48. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 25.....	189
Tabla 49. Balance hídrico en el acuífero según escenario 4 y coeficiente de explotación 25.....	190
Tabla 50. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 50.....	191
Tabla 51. Balance hídrico en el acuífero según escenario 4 y coeficiente de explotación 50.....	191
Tabla 52. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 250.....	192
Tabla 53. Balance hídrico en el acuífero según escenario 4 y coeficiente de explotación 250.....	193
Tabla 54. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 100% en derechos constituidos y en trámite.	202
Tabla 55. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 100% de derechos constituidos y en trámite	203
Tabla 56. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 100% en derechos constituidos.	204
Tabla 57. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 100% de derechos constituidos	204
Tabla 58. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 50% en derechos constituidos.....	205
Tabla 59. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 50% de derechos constituidos.....	206
Tabla 60. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 25% en derechos constituidos.....	207
Tabla 61. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 25% de derechos constituidos	207
Tabla 62. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 17% en derechos constituidos.....	208

Tabla 63. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 17% de derechos constituidos	209
Tabla 64. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 6 y coeficiente de explotación 0.15 de derechos constituidos.	213
Tabla 65. Balance hídrico en el acuífero según escenario 6 y coeficiente de explotación 0.15.	214
Tabla 66. Puntos de monitoreo de nivel y calidad propuestos (WGS84 18S)	221

0. RESUMEN

El presente estudio, desarrollado por AQUALOGY, consistió en un levantamiento hidrogeológico que permitió la conceptualización de y posterior modelación matemática del acuífero del Itata Bajo.

El estudio consistió en la definición geométrica del acuífero, la determinación de disponibilidad y uso del agua, el análisis de la calidad química y la determinación del funcionamiento hidrogeológico de los sistemas en su conjunto.

Como producto final se elaboró un modelo conceptual y el correspondiente modelo numérico del señalado acuífero en régimen estacionario, que incorporó las actividades y resultados obtenidos en todo el estudio.

Los principales resultados obtenidos han sido los siguientes:

- Definición geométrica del acuífero (antecedentes y geofísica realizada).
- Disponibilidad hídrica del acuífero y cuencas aportantes (balance hídrico sectorizado).
- Caracterización de la calidad química (muestreo de calidad).
- Determinación del uso del agua (catastro).
- Definición de las equipotenciales y flujos de agua subterránea (campaña de piezometría).
- Simulación del comportamiento hidrogeológico y simulación de escenarios (modelo numérico).

Asimismo, en el presente estudio, a los efectos de ofrecer una herramienta de gestión lo más funcional posible para las labores propias de la Dirección General de Aguas, el balance hídrico realizado ha sido sectorizado por cuencas aportantes, que a su vez dependen de la aportación al sistema acuífero Itata bajo, pudiendo de esta forma conocer la recarga de cada subcuenca dentro del conjunto y cómo afectaría tanto a la cuenca como al acuífero Itata Bajo la incorporación de nuevas extracciones en la zona de estudio.

Desde el punto de vista hidrológico, el acuífero Itata Bajo presenta un comportamiento próximo al régimen natural, con gran influencia del río Itata en prácticamente toda la extensión del acuífero.

La explotación del acuífero es baja en términos de importancia, ya que apenas supone merma al sistema, no obstante, es recomendable que este factor sea controlado en todo momento debido al posible crecimiento de la demanda hídrica.

El sistema presenta entradas por 2.311 l/s en invierno, cuyo componente principal es la recarga lateral de cuencas aportantes. De total del caudal de entrada, casi todo vuelve al sistema superficial a través de afloramientos, y tan solo 133 l/s salen del sistema en forma subterránea hacia el mar.

Desde el punto de visto de derechos constituidos y en trámite, los escenarios simulados reflejan los siguientes límites a tener en cuenta:

- Afección al sistema superficial: En este caso los derechos constituidos así como los derechos en trámite no ponen en riesgo una afección al sistema superficial.
- Afección a más del 5% de la demanda: teniendo en cuenta la disposición y caudales de derechos constituidos, el coeficiente de explotación de captaciones con derechos constituidos que se podría dar como máximo sería del 18%, lo que supone una demanda global (acuífero y cuencas) de unos 284 l/s. No obstante, se podría dar una explotación mucho mayor redistribuyendo las captaciones por otras zonas del acuífero o separando una de otras.
- Afección a más del 5% de las captaciones: al igual que para la afección del 5% de la demanda, atendiendo a la distribución y caudales de derechos otorgados, la explotación máxima que se podría dar para no afectar a más del 5% de las captaciones sería del 15% respecto al caudal de derechos otorgados.
- No obstante, en términos de balance hídrico global, el sistema posee recursos muy superiores a los demandados realmente.
- Como recomendación, para un complemento del estudio y un mejor aprovechamiento a futuro, se recomienda la calibración del modelo en régimen transiente ya que de esta forma los escenarios modelados

tendrán una fiabilidad mucho mayor a la que se puede obtener tras la calibración en régimen estacionario, y dentro de esta simulación sería conveniente estudiar cómo se podrían redistribuir las captaciones para obtener una mejor planificación futura del aprovechamiento del acuífero sin que suponga afección a la demanda, ni al sistema superficial.

- Asimismo, para el mejor ajuste y fiabilidad del modelo se recomienda la obtención de una topografía a escala 1:5.000 y una campaña de medición topográfica de precisión en los puntos de nivel observados.

1. INTRODUCCIÓN

Entre las atribuciones y funciones de la Dirección General de Aguas (DGA) conferidas por el Código de Aguas, Artículo 299, letra a), consta la planificación del desarrollo del recurso en las fuentes naturales, con el fin de formular recomendaciones para su aprovechamiento, por lo que la DGA se ha abocado al estudio continuo de las fuentes de agua a fin de que sean aprovechadas de manera sustentable.

Es así como en el norte del país la mayor disponibilidad de agua corresponde a las aguas subterráneas, por lo que los estudios de este recurso se centran principalmente en la hidrogeología. Hacia el centro y el sur del país, en tanto, se basan en la hidrología de las aguas superficiales.

Por lo anterior es que, hasta la fecha, el análisis técnico para la determinación de las disponibilidades efectivas de agua subterránea y su posterior balance para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas se ha hecho en base a análisis locales en donde la disponibilidad se ha determinado en cada caso a través de las pruebas de bombeo realizadas en el pozo donde se solicita el derecho, en consideración a que aún existen montos elevados de recarga y una baja explotación de dichos acuíferos, lo que implica que no se han afectado ni los acuíferos ni los derechos existentes en ellos.

No obstante lo anterior, y debido a la creciente demanda por derechos de agua subterránea en los acuíferos de la zona Sur de Chile, la Dirección General de Aguas considera necesario el estudio de los mismos, desde el punto de vista de los volúmenes almacenados y disponibles, así como del funcionamiento hidráulico de los mismos, lo que le permitirá a dicho organismo avanzar en la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas subterránea de manera sustentable.

Por este motivo, se realiza el presente estudio de "Modelación Hidrogeológica Cuenca Itata-Bajo, Región del Biobío", que considera: el levantamiento de información hidrogeológica del acuífero de la zona terminal de la cuenca del

Itata, y el desarrollo de un modelo numérico que represente los flujos del sistema hidrogeológico, priorizando la generación de un modelo conceptual que derive en un modelo numérico más detallado para el acuífero.

1.1. OBJETIVOS Y ALCANCE

Para el acuífero de la cuenca del Itata Bajo los alcances son los siguientes:

- Caracterización de las formaciones acuíferas principales.
- Sectorización de acuíferos que representen fuentes o unidades de aprovechamiento común.
- Catastro y estimación de la demanda agrícola, sanitaria, minera e industrial.
- Estudio de prospección geofísica para determinar la geometría del acuífero.
- Campaña de terreno para identificar y/o verificar principales zonas de recarga y descarga.
- Estimación de volúmenes almacenados de los acuíferos y de flujos subterráneos.
- Estimación de recargas de precipitación, ríos y recargas agrícolas.
- Desarrollo de una herramienta SIG acorde a las necesidades de visualización regional y local. El SIG que se solicita ocupar y en el cual se recibirá toda la información es ArcGIS 9.x (idealmente 9.3 ó 9.2 o superior). El sistema de coordenadas en el cual se trabajará será UTM WGS84 Huso 19. El formato de las coberturas puede ser shape o geodatabase y de cualquier forma se pueden sumar otros formatos, como imágenes satelitales, coberturas raster, etc., que aporten en el análisis espacial.
- Formulación de un modelo conceptual que represente el funcionamiento del acuífero.
- Implementación y calibración de un modelo numérico de aguas subterráneas en régimen permanente, desarrollado en Visual Modflow-Flex.
- Proposición de una red de monitoreo de niveles y calidad de aguas subterráneas en el acuífero asociado a la zona de estudio.

1.2. ESTRUCTURA DEL INFORME FINAL

Este informe final incluye en una primera parte una descripción del acuífero en cuanto a sus características de almacenamiento y emplazamiento, de manera de dar una idea descriptiva del tipo y condiciones hidrogeológicas de él. Adicionalmente, se le caracteriza hidrogeológicamente, se define el modelo conceptual y se formula y desarrolla el modelo matemático.

Igualmente, se incluye un punto preliminar general acerca de las principales conclusiones y resultados del estudio que permiten contextualizar el desarrollo del informe y su contenido.

En cuanto a las etapas desarrolladas, se incluyen las Etapas 1 y 2 anteriores, de revisión de antecedentes, caracterización hidrológica y prospección geofísica (Etapa 1) y la caracterización hidrogeológica y modelo conceptual (Etapa 2), además de Etapa 3 que concluye con el modelo numérico del acuífero, la definición de tres escenarios bajo los cuales correr el modelo y la proposición de una red de monitoreo de niveles y calidad de aguas subterráneas en el acuífero.

2. EL ACUÍFERO DEL ITATA BAJO

La zona de estudio comprende la cuenca del río Itata Bajo, que abarca desde la confluencia de éste con el río Ñuble hasta su desembocadura en el océano Pacífico.

La cuenca está situada al noroeste de la Región del Biobío, caracterizada por ser una zona bajos relieves condicionados por el moldeamiento de la escorrentía superficial.

El acuífero Itata Bajo corresponde a los materiales aluviales depositados por los cursos fluviales sobre un basamento intrusivo y metamórfico, tratándose de un acuífero libre, detrítico, con una fuerte relación con el sistema hidrológico superficial, cuyo comportamiento hidráulico se puede considerar prácticamente en régimen natural, ya que la acción antrópica es mínima, con una disponibilidad hídrica excedente.

En la figura siguiente se muestra la ubicación del acuífero respecto a la cuenca del Itata Bajo, así como la situación de ésta frente al resto de la cuenca aguas arriba.

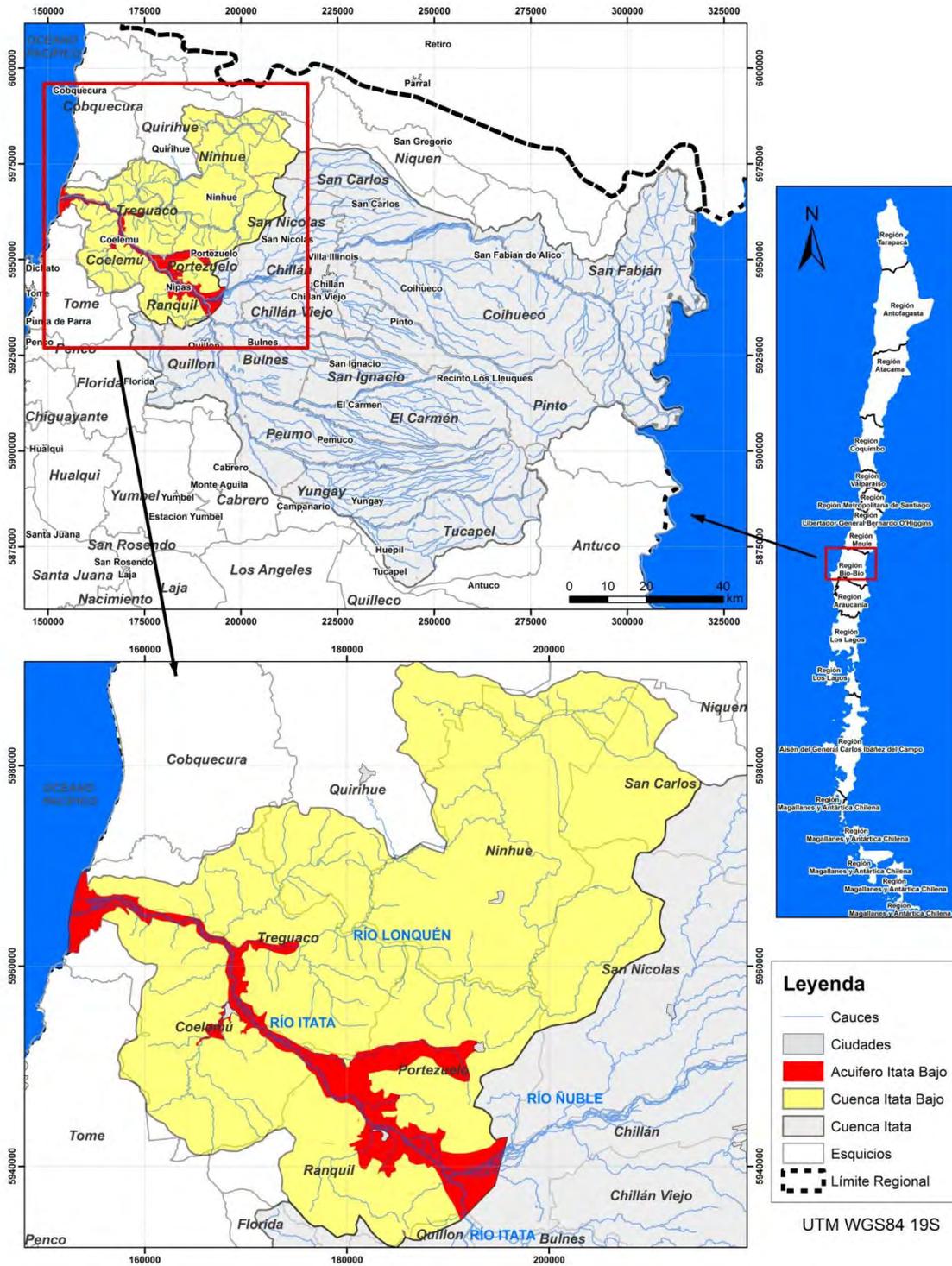


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

3. EL ESTUDIO REALIZADO

El estudio realizado comprende la definición geométrica del acuífero, la determinación de disponibilidad y uso del agua, el análisis de la calidad química y la determinación del funcionamiento hidrogeológico del sistema en su conjunto.

De forma adicional, a los efectos de ofrecer una herramienta de gestión lo más adecuada a las necesidades de la Dirección General de Aguas, se ha sectorizado el balance hídrico en subcuencas, de forma que se pueda conocer la disponibilidad hídrica por zonas y la afección que la detracción en alguna de ellas tendría sobre el acuífero Itata Bajo.

Como producto final se ha elaborado un modelo numérico del acuífero en régimen estacionario, que incorpora las actividades y resultados obtenidos en todo el estudio.

No obstante, para una mejor explotación del modelo, se recomienda la calibración del modelo en régimen transiente.

4. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ITATA

En este capítulo se efectúa la descripción del sistema físico y natural de la cuenca del río Itata, cuenca principal ubicada en la zona norte de la VIII Región, a saber, clima, geomorfología y suelos.

4.1. CLIMA

La cuenca del Río Itata se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo y presenta al menos dos meses consecutivos del período estival con déficit hídrico.

En la región mediterránea se distinguen seis tipos de ombroclima (dependiendo de las precipitaciones) según sea la media anual en mm: árido (inferior a 200), semiárido (200-350), seco (350-600), subhúmedo (600-1,000), húmedo (1,000-1,600), e hiperhúmedo (superior a 1,600).

Así, el patrón de variación ombroclimática es el característico para la zona centrosur de Chile en donde las precipitaciones tienden a ser mayores al oeste de ambas cordilleras por el efecto orográfico que ellas ejercen para los frentes húmedos que se aproximan al continente desde el Océano Pacífico, con montos de precipitación que varían en torno a los 1.000 mm anuales, diferenciándose sectores de ombroclima húmedo y subhúmedo.

Sobre la base del régimen pluviométrico y térmico, se distinguen dos tipos bioclimáticos:

Mediterráneo pluviestacional - oceánico, que influye en casi toda el área de la cuenca, en que la amplitud térmica anual es inferior a 20°C.

Mediterráneo pluvistacional - continental, en los sectores en que la altitud se eleva por sobre los 2.000 msnm, donde por efecto de la altitud la amplitud térmica anual suele ser superior a 20°C.

La Estación Meteorológica Chillán, considerada como representativa del área en estudio, registra una temperatura promedio anual de 14,08°C, con una

mínima de 7,6°C y una máxima de 20,56°C. En tanto, la precipitación promedio anual de agua caída es de 1.025,2 mm.

En la siguiente figura, se presentan los montos de precipitación y temperaturas medias mensuales registradas por la Estación Meteorológica de Chillán.

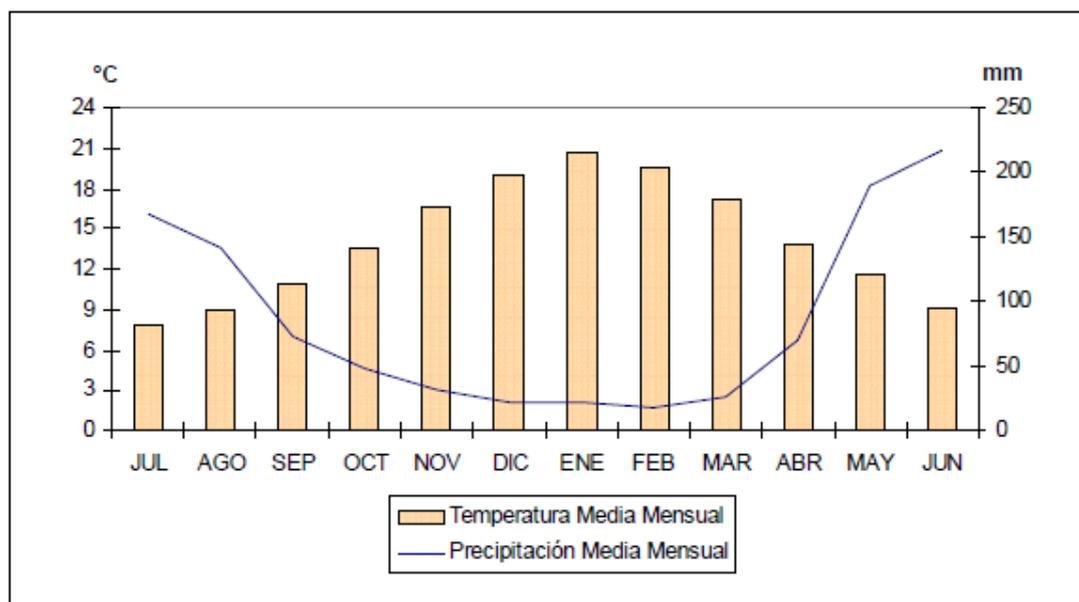


Figura 2. Diagrama climático. Fuente: Cade-Idepe (2004)

4.2. GEOMORFOLOGÍA

La Cuenca del río Itata está comprendida entre los paralelos 36°12'-37°16' de Latitud Sur, y los meridianos 71°00' - 73°10' de Longitud Oeste. La hoya hidrográfica del Itata comprende un área de 11.200 Km² e incluye tres subcuencas (de los ríos Itata, Ñuble y Diguillín). El sector donde se emplaza la cuenca, presenta una morfología de colinas redondeadas, pendientes suaves y cimas amesetadas que alternan con valles de fondos planos y vegas, algunos de bastante amplitud como es el Valle del río Itata.

La subcuenca del río Itata cubre una extensión de 3.768 Km². Se origina en la confluencia de los ríos Cholguán y Huépiol, cerca de la estación Cholguán del Ferrocarril Longitudinal Sur, a pocos kilómetros de la ribera norte del río Laja.

En un recorrido de 82 km con rumbo al NW, hasta su junta con el Ñuble en su confluencia, recibe sus principales tributarios cuyas cabeceras se encuentran en la zona de montaña. Los más importantes son los ríos Dañicalqui, Diguillín y Larqui. A lo largo de todo este trayecto, el cauce del río Itata presenta terrazas fluviales de escasa amplitud y escurre por medio de un relieve que no presenta grandes diferencias de alturas.

Después de su confluencia con el río Ñuble, el Itata desarrolla su curso inferior en el interior de la Cordillera de la Costa. Esta unidad morfoestructural constituye una barrera natural para el desarrollo de las comunicaciones con el interior de la región y sólo a través de los angostos valles de los ríos que la atraviesan, es posible el trazado vial y ferroviario, como es el caso de los valles del Itata y BioBio. Al salir del ámbito precordillerano y enfrentar el Valle Longitudinal, el río Itata da origen a un gran salto de agua, donde es posible apreciar en el talud del terreno los estratos de sedimentos fluvio-glaciovolcánicos que dan forma al relleno del Valle Longitudinal.

Entre la localidad de Trehuaco y la desembocadura, el río Itata escurre a través de un valle angosto, con pequeñas terrazas fluviales laterales enmarcadas por el colinaje costero y, sólo en su desembocadura se ensancha para dar origen a una amplia playa y barra litoral.

Cerca de su desembocadura, en el sector de boca Itata, los bancos de arena obligan a la corriente a extenderse en vegas y su profundidad disminuye.

4.3. SUELOS

En el litoral de la cuenca del río Itata se localizan los suelos de praderas costeras sobre terrazas marinas, muy desarrollados, debido a la mayor humedad y precipitación existente.

En la Cordillera de la Costa se desarrollan suelos pardo - forestales que han evolucionado sobre rocas graníticas y pizarras metamórficas. Estos suelos se denominan suelos pardo rojizos lateríticos; son suelos de color pardo rojizo, variando a pardo amarillento.

Su uso principal es la forestación, pero son muy susceptibles a la erosión. Debido a la gran erosión que afecta a los suelos en la cordillera costera, este río sufre un fuerte proceso de embancamiento en su curso inferior y desembocadura.

Los suelos pardo no cálcicos se localizan en el Valle Longitudinal; están formados sobre sedimentos aluviales y cenizas volcánicas, son intensamente ocupados por la agricultura y fruticultura de la zona.

En la Precordillera Andina, los suelos forestales ocupan una franja de ancho variable hacia el sur de la Región.

4.4. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Como se dijo, la cuenca del Itata Bajo se encuentra en la zona norte de la Región del Biobío, entre las coordenadas 150.000, 5.993.500 y 220.000, 5.925.990 (UTM WGS 84 H19S).



Figura 3. Área de estudio.

Dado que el presente estudio tiene por objetivo general una caracterización hidrogeológica, el área de estudio específica en la cuenca estará definida fundamentalmente por el sector costero al oeste de la depresión intermedia, donde se desarrollan principalmente acuíferos sedimentarios.

5. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Como primera actividad a realizar, se llevó a cabo una exhaustiva recopilación y análisis de antecedentes existentes en la zona de estudio.

Los estudios revisados fueron aquellos que contenían antecedentes con respecto a la geología, geofísica, hidrología, meteorología, hidrogeología e hidrogeoquímica del sector.

La tabla siguiente entrega el detalle de lo recopilado en los distintos estudios:

Tabla 1. Recopilación de estudios

Nº	Estudio	Organismo	Año	Contenido
1	Estudio Hidrológico cuencas BioBío e Itata	Aquaterra Ingenieros para DGA	2011	Levantamiento de la información hidrogeológica, para el desarrollo de un modelo conceptual del acuífero asociado a la cuenca del río Itata. En este estudio se realizó además una campaña de prospección geofísica mediante el método de gravimetría
2	Estudio de disponibilidad de agua cuenca río Itata: sector intermedio y bajo	DGA VII Región	1994	Determinación de disponibilidad de los recursos hídricos superficiales en el río Itata, con el objetivo de evaluar la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento en el sector acotado desde la confluencia del río Diguillín a la confluencia del río Lonquén
3	Balance hidrológico nacional: cuenca del río Itata	REG Ricardo Edwards G. Ingenieros Consultores para DGA	1985	Balance hídrico a nivel de cuenca, caracterizando los principales parámetros hidrometeorológicos que intervienen en el balance. El producto consistió en planos de isoyetas, isotermas e isolíneas de evapotranspiración. Con la información mencionada se construye mediante un balance, un plano de isolíneas de escurrimiento, y por extensión un plano de rendimientos específicos
4	La cuenca hidrográfica del río Itata: aportes científicos para su gestión sustentable	Univ. de Concepción	2009	—

Tabla 1. Recopilación de estudios

N°	Estudio	Organismo	Año	Contenido
5	Análisis Preliminar de Niveles de Aguas Subterráneas. S.I.T 224-2010	INIA DGA	2010	Medición del nivel estático de una selección de ciento treinta (130) pozos, situados en las regiones del BioBio, de La Araucanía, de Los Ríos y de Los Lagos, y que cumplan con estar situados en los acuíferos de mayor importancia. Los resultados se presentaron en un sistema SIG.
6	Estudios Hidrológicos de las Fuentes de Agua en Diversas Comunas de la VIII Región	GCF Ingenieros Consultores para Esbío	2001	Información acerca de los sectores más apropiados para nuevas fuentes de agua potable y un análisis de la oferta y demanda de agua subterránea en cada ciudad o pueblo, en base a antecedentes hidrológicos e hidrogeológicos de la VIII Región. Las localidades estudiadas insertas en las cuencas costeras corresponden a Cañete, Cobquecura, Curanilahue, Florida, Lebu, Los Álamos, Lota, Penco-Lirquén y Tomé.
7	Diagnóstico de Recursos Hídricos en Secano Interior y Costero VI a VIII Región	AC Ingenieros Consultores para CNR	2003	Para mejorar las condiciones de desarrollo socioeconómico de las zonas de secano mediante la transferencia de conocimientos respecto a la distribución de los recursos hídricos en el tiempo y en el espacio, y la propuesta de obras para su mejor aprovechamiento. Para el caso de la VIII Región, entre las cuencas costeras consideradas está la de la subcuenca costeras de la cuenca del río Itata, con antecedentes hidrogeológicos, hidrológicos, de suelos, agroclimáticos, estudios de calidad de aguas, entre otros. Además, se presenta un catastro de pozos, punteras y norias, con el fin de establecer cuán intensa es la explotación de agua subterránea en las localidades costeras.
8	Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos de la Región del Biobío	Iriarte y Aguirre para SERNAGEOMIN	2004	Resultados y criterios metodológicos desarrollados en la elaboración del Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos a escala 1: 250.000.

Tabla 1. Recopilación de estudios

Nº	Estudio	Organismo	Año	Contenido
9	Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad, Cuenca del río Itata	Cade-Idepe para DGA	2004	Antecedentes acerca de la geología, geomorfología, hidrogeología y análisis químico de las aguas de los principales afluentes al río Itata.
10	Estudio Geológico e Hidrogeológico de la VIII Región	Ingeorec para DGA	2008	Determinación de la capacidad hídrica de la cuenca, en materia de constitución de derechos de aprovechamiento de las aguas subterráneas. Entrega información acerca la geología, hidrogeología, estratigrafía de pozos y realiza un balance hídrico para los principales acuíferos de la región
11	Estudio Hidrológico e Hidrogeológico en Cuencas Costeras de la VIII Región	Ingeorec para Esbío	2010	Evalúa la hidrología e hidrogeología de las cuencas costeras de la VIII Región, efectuando un balance entre oferta y demanda en cada sistema definido
12	Mejoramiento y Ampliación de Red de Aguas Subterráneas, Regiones VII a X. S.I.T. N° 223-2010	Conic BF Ingenieros Civiles para DGA	2010	Formulación de una red de medición de aguas subterráneas para la zona comprendida entre el río Mataquito (VII Región) y el río Maulín (X Región de Los Lagos)
13	Derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas constituidos por la DGA	DGA	2013	Base de datos de la página WEB de la Dirección General de Aguas, de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas y de aguas superficiales constituidos en el período 1990-2013.
14	Información hidrológica, referida a caudales, aforos puntuales, precipitaciones, niveles freáticos, etc. en el Banco Nacional de Aguas	DGA	2013	Información hidrometeorológica y de calidad de aguas de la red hidrometeorológica de la DGA

6. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

Se caracterizó hidrológicamente el escurrimiento de las cuencas que conforman el sistema que se estudia. En términos generales, y como objetivo global, a partir de las producciones brutas de las cuencas se obtuvo: la escorrentía superficial, la infiltración y la evapotranspiración, siendo estas dos últimas variables que representan un input para la definición del modelo conceptual.

6.1. DESCRIPCIÓN DE LA RED DE DRENAJE

Como se señaló, la cuenca del río Itata comprende un área de 11.294 km², formando parte de la VIII Región del BioBio. El río principal se origina cerca de la estación Cholguán del Ferrocarril Longitudinal Sur, a pocos kilómetros al norte de la ribera norte del río Laja. En este punto se juntan los ríos Cholguán, que viene del oriente, y Huépil, que le cae del sur. En un recorrido de 85 km con dirección N-NW hasta su junta con el Ñuble, va captando sus principales tributarios que constituyen una red de drenaje paralela de dirección al poniente y cuyas cabeceras se encuentran en la zona de La Montaña. De ella forman parte los ríos Danicalqui, Diguillín y Larqui.

Poco más arriba de su junta con el Danilcalqui, el Itata presenta un salto de 20-25 m de altura. A partir de ese punto, el río transcurre en la Depresión Intermedia entre riberas bajas y cultivables.

En el curso inferior, después de trasponer la Cordillera de la Costa, los bancos de arena obligan a la corriente a extenderse considerablemente en vegas y su profundidad disminuye. El ancho en la boca del Itata varía de 100 a 200 m en verano, y llega a 300 m en invierno.

El río Cholguán se origina en la precordillera, en la falda poniente del cerro Calas (2.190 m), que separa su cabecera de los formativos del río Polcura, afluente del Laja.

Se desarrolla con rumbo general al W en longitud de 50 km. El río Huépil es el afluente más austral del Itata, siendo su caudal escaso; nace en los

primeros contrafuertes andinos y tiene un recorrido de 38 km. Algunos autores llaman Itatita al curso inferior del Huépil, por lo cual consideran al Itata como formado por la confluencia del Cholguán y del Itatita.

Un importante tributario del curso medio es el río Diguillín, que nace en la falda suroeste del volcán Chillán (3.211 m) y tiene un recorrido de 102 km, casi todo a través de la depresión intermedia. Por su ribera izquierda o poniente, el Itata en este trayecto recibe sólo pequeños esteros generados en la Cordillera de la Costa.

El principal afluente del Itata es el Ñuble, cuya hoya es de 5.097 Km². Nace al pie del paso de Buraleo, al oriente de los nevados de Chillán (3.212 m). Desarrolla su curso superior en dirección N-NW y a 40 km de su origen recibe desde el norte su principal afluente, el río Los Sauces. Tras un recorrido de 155 km, el Ñuble se junta en el borde oriental de la cordillera de la Costa al Itata en el punto llamado Confluencia. En su primer tramo, hasta la junta del río Los Sauces, corre el Ñuble en un cajón muy estrecho, de márgenes quebradas, características que conserva hasta salir al Valle Central. Aparte del río Los Sauces, incrementan el caudal del río Ñuble esteros de escaso caudal y, a poco de cruzar la Carretera 5 Sur, recibe por el sur, procedente de La Montaña, el río Cato. A 10 km de la confluencia con el Itata, afluye al Ñuble, también por el sur, otro importante afluente que es el río Chillán, que nace en la falda poniente de los nevados de Chillán, importante nudo orográfico que domina el paisaje cordillerano de la región. Inmediatamente aguas abajo de la confluencia con el río Chillán, el río Ñuble recibe aporte más importante desde el norte que es el río Changaral.

Después de la junta del Ñuble, el Itata desarrolla su curso inferior en el corazón de la Cordillera de la Costa, donde sólo recibe esteros menores, siendo el río Lonquén el de mayor caudal. Drena un área de cierta importancia (1.075 km²) de los cerros costeros al sur y al este de la ciudad de Quirihue, con una red de diseño extremadamente complejo.

6.2. DEFINICIÓN DE CUENCAS

En la figura siguiente se muestran todas las cuencas principales de interés en este estudio, y en la Tabla 2 se detalla el área de cada una de ellas.

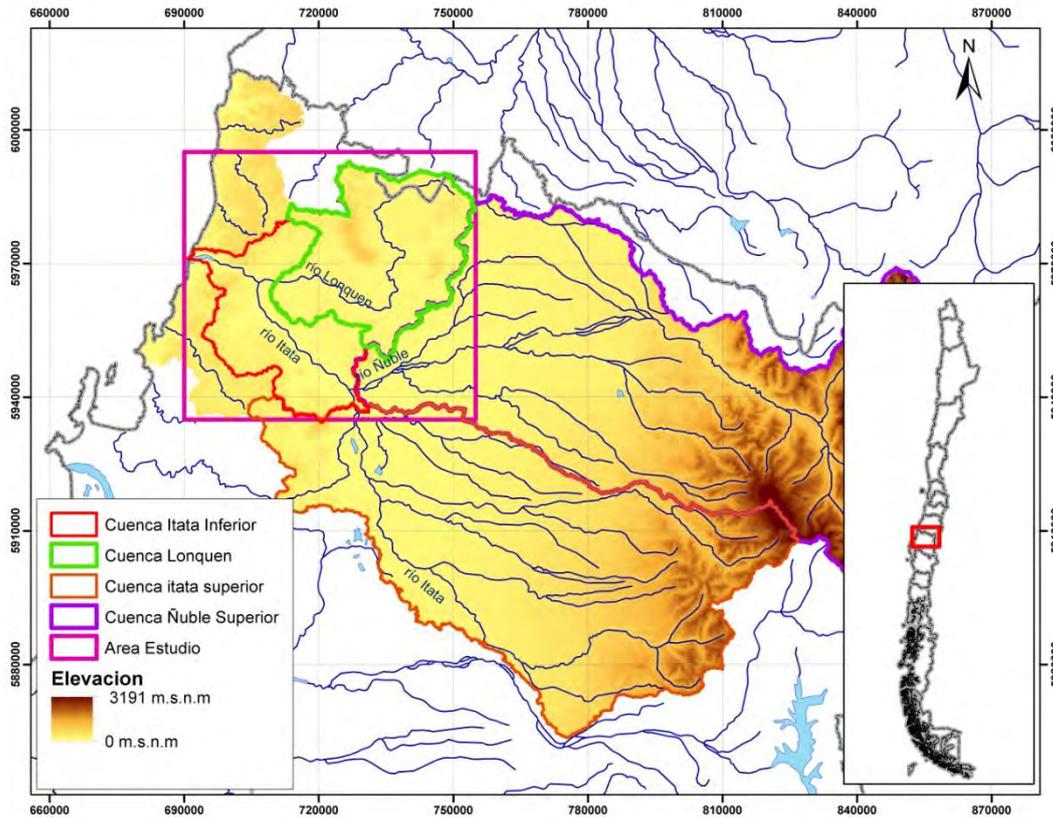


Figura 4. Esquema general de subcuencas

Tabla 2. Áreas de las cuencas de estudio

Cuenca	A (km ²)
Itata Total	11.773,3
Itata Superior	4.445,8
Itata Inferior	2.053,2
Ñuble	5.271,9
Lonquén	1.182,0

6.3. RED FLUVIOMÉTRICA

Una vez revisados en profundidad los antecedentes asociados a este estudio, en particular la disponibilidad de registros hidrometeorológicos, se ha definido la metodología más adecuada para el relleno de estadística, bajo la premisa de que el recurrir se fundamenta por la carencia de medidas directas.

En una caracterización hidrológica es el caudal la variable de estado del sistema, y en la cuenca del río Itata se dispone de un número importante de estaciones fluviométricas, en donde se debe verificar las secciones donde estas se emplazan, en relación a la zona de estudio.

Se dispone de estaciones fluviométricas situadas en puntos estratégicos para los fines de este Estudio. En efecto, la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea controla la descarga de la cuenca del Río Itata Superior. La estación Río Itata en Paso Hondo, registra las descargas de la cuenca anterior y la del río Ñuble. Por último, los registros en las estaciones ríos Itata en Coelemu y Río Lonquén en Trehuaco representan el drenaje total de la cuenca del Itata. La totalidad de las estaciones fluviométricas existentes en la cuenca del Itata, así como las estaciones seleccionadas para los objetivos de este estudio, se muestran en los planos siguientes.

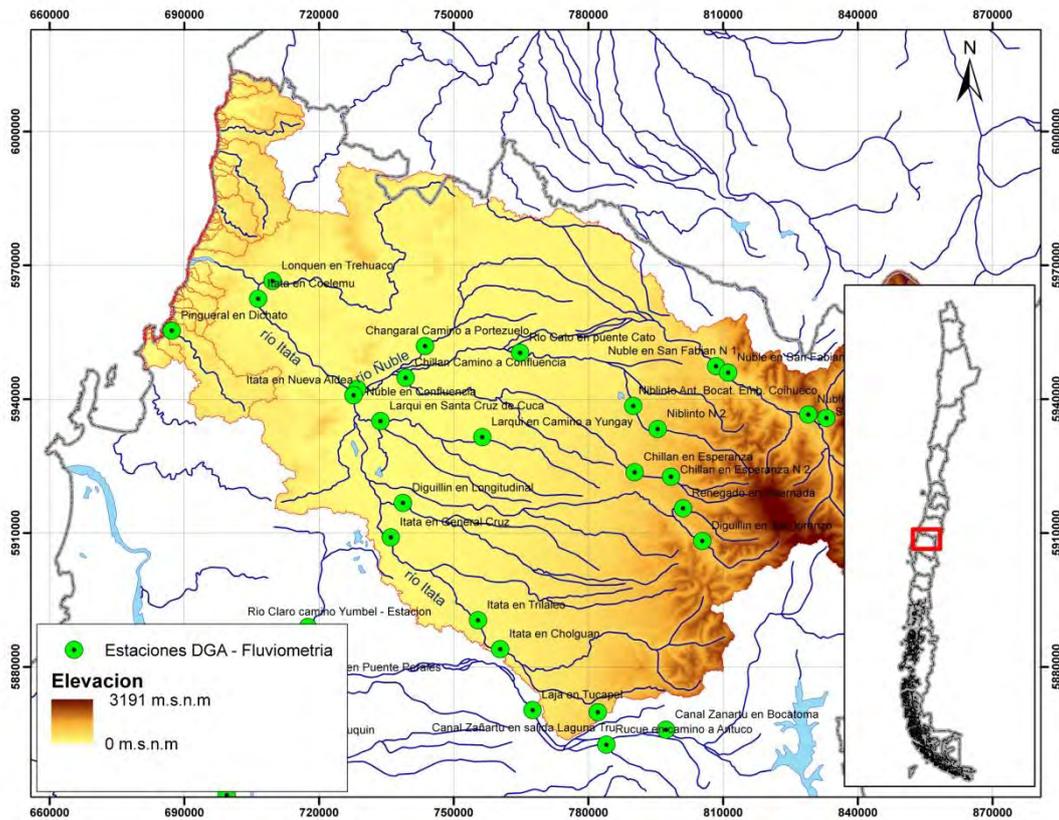


Figura 5. Estaciones fluviométricas cuenca Itata

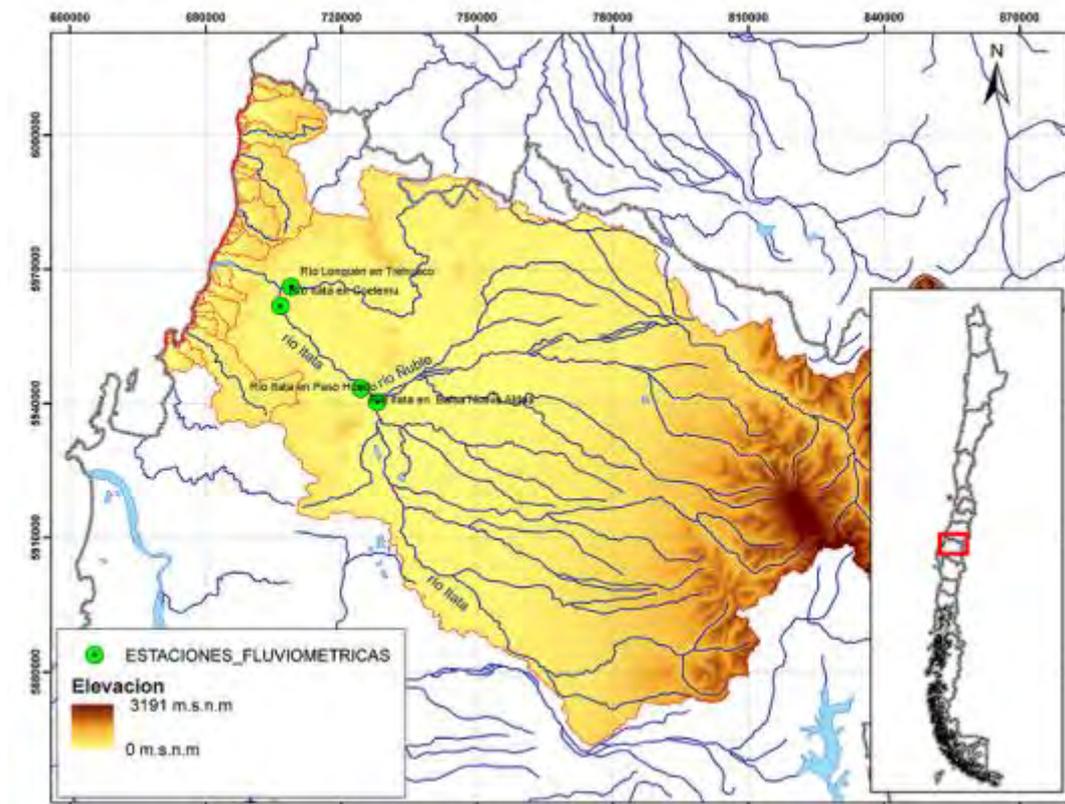


Figura 6. Estaciones fluviométricas utilizadas en el Estudio

En la Figura 7 se presenta un esquema de la cuenca del río Itata, identificando los dos aportes fundamentales en la zona de interés, el afluente del río Ñuble, y el río Lonquén.

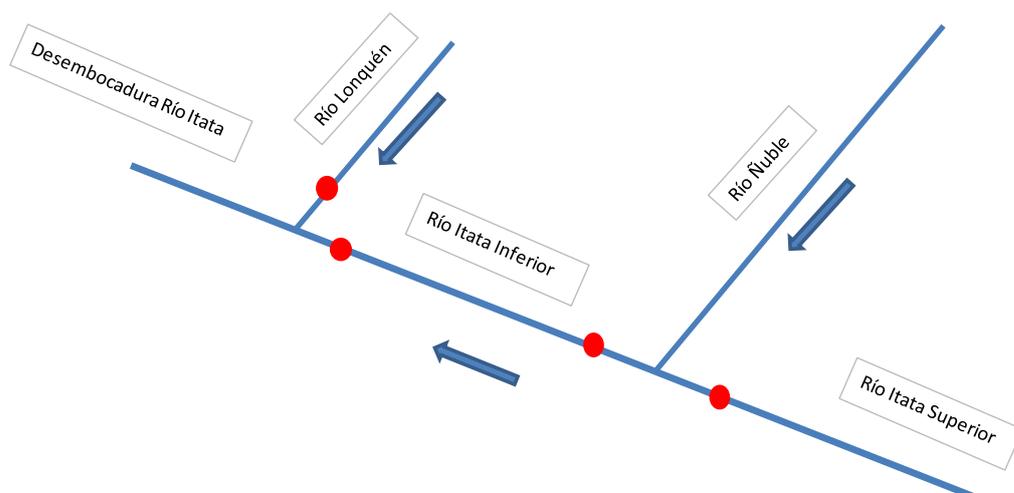


Figura 7. Esquema del río Itata y afluentes

La calidad de registros es disímil, tal como se presenta en la Tabla 3.

Se adopta como decisión para la evaluación hidrológica, considerar el período común 1986-2011 de 25 años de longitud.

Tabla 3. Estaciones fluviométricas

Estación	Inicio registros	Fin registros	Longitud (años)	Densidad información (%)
Itata en Balsa N. Aldea	1956	2012	57	94
Itata en Paso Hondo	2006	2011	6	86
Itata en Coelemu	1985	2012	28	69
Lonquén en Trehuaco	1985	2011	27	65

6.3.1. TRATAMIENTO DE REGISTROS FLUVIOMÉTRICOS

Partiendo de los registros disponibles en las cuatro estaciones fluviométricas seleccionadas, se aplicó, tal y como se detalla posteriormente, una restitución de datos que comprende la eliminación de registros anómalos (outliers), el relleno de registros faltantes, y la extensión de la estadística.

6.3.2. CORRECCIÓN DE ESTADÍSTICA

Uno de los métodos más recurridos para detectar los valores outliers es el que utiliza el concepto de cuartil de un conjunto de datos.

Si se dispone de un conjunto de datos y se ordenan de menor a mayor, de izquierda a derecha, el Cuartil 1 (Q1), es el valor tal que desde aquel hacia su izquierda se encuentra la primera cuarta parte de los valores de este conjunto de datos.

Por su parte, el Cuartil 2 (Q2), es el valor tal que desde ese valor hacia su izquierda se encuentran la primera mitad de los valores de este conjunto de datos. Y así sucesivamente.

Para detectar valores outliers extremos, se tendrá:

$$\text{Lím}_{\text{Inf}} = Q_1 - 3 (Q_3 - Q_1)$$

$$\text{Lím}_{\text{Sup}} = Q_3 + 3 (Q_3 - Q_1)$$

Los valores que sean menores que Lím_{Inf} o mayores que Lím_{Sup} se consideran valores outliers.

Aplicada esta metodología a las cuatro estaciones fluviométricas consideradas en este Estudio, resultan tres de ellas con registros anómalos, los que se identifican en la Tabla 4, según el mes y año correspondiente.

Tabla 4. Valores anómalos (outliers)

MES	RÍO ITATA EN Balsa Nueva Aldea	RÍO ITATA EN PASO HONDO	RÍO ITATA EN COELEMU	RÍO LONQUEN EN TREHUACO
Enero	1967,1996			
Febrero	1967			
Marzo	1980,2002		2002	1993
Abril	1959,1980			1997
Mayo	1972,1980,1992		1991,1992	1986,1992,2008
Junio				
Julio				
Agosto				
Septiembre	1961			1999
Octubre			1997,2002	1997,2002
Noviembre				1996
Diciembre	1966			1996

Estos valores anómalos son retirados de la estadística disponible, la cual ahora procede a rellenarse.

6.3.3. RELLENO Y EXTENSIÓN DE ESTADÍSTICAS

Eliminados ya los valores anómalos, y de acuerdo a la calidad de los registros en las cuatro estaciones de trabajo, se procedió a rellenar la estadística bajo los siguientes criterios:

- Estación río Itata en Balsa Nueva Aldea: Por interpolación directa en series mensuales.
- Estación río Itata en Coelemu: Ídem al caso anterior.

- Estación río Itata en Paso Hondo: En este caso se aplica transposición de caudales entre esta estación y río Itata en Coelemu, entre registros en longitudes equivalentes:

$$Q_{mIPH} = Q_{mmIPH} / Q_{mmIC} \times Q_{mIC}$$

Donde:

Q_{mIPH} : Caudal mensual en estación Itata en Paso Hondo

Q_{mIC} : Caudal mensual en estación Itata en Coelemu

Q_{mmIPH} : Caudal medio mensual en estación Itata en Paso Hondo

Q_{mmIC} : Caudal medio mensual en estación Itata en Coelemu

Estación río Lonquén en Trehuaco: Este relleno se efectúa en forma similar que el caso anterior:

$$Q_{mLT} = Q_{mmLT} / Q_{mmIC} \times Q_{mIC}$$

Donde:

Q_{mLT} : Caudal mensual en estación Lonquén en Trehuaco

Q_{mIC} : Caudal mensual en estación Itata en Coelemu

Q_{mmLT} : Caudal medio mensual en estación Lonquén en Trehuaco

Q_{mmIC} : Caudal medio mensual en estación Itata en Coelemu

De esta forma, el resultado de los rellenos planteados se presenta de la Tabla 8 a la 11. En todas las Tablas presentadas la simbología es la siguiente:

34.59	Dato relleno faltante
42.28	Outlier reemplazado

Tabla 5. Estación río Itata en Nueva Aldea (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1986	9,24	9,39	13,38	48,76	333,72	640,63	187,61	270,61	161,70	91,06	139,26	75,83
1987	15,17	8,70	17,47	24,18	52,77	142,81	442,98	417,36	224,83	216,42	81,60	10,26
1988	10,23	8,01	13,96	16,99	23,21	108,07	241,69	389,39	176,53	82,36	30,84	12,42
1989	5,85	4,90	5,88	7,93	12,47	101,71	190,81	231,29	129,52	45,28	14,01	13,09
1990	4,34	4,40	11,53	29,91	66,90	84,79	78,82	157,71	261,70	117,15	33,85	8,04
1991	4,84	7,28	12,05	27,21	318,71	276,53	351,52	170,19	220,73	124,21	35,49	38,15
1992	14,67	6,53	10,40	55,75	296,69	585,83	257,19	150,55	163,60	119,17	91,44	55,15

Tabla 5. Estación río Itata en Nueva Aldea (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1993	12,86	1,34	2,60	47,28	274,66	663,43	354,26	248,94	197,70	122,20	101,20	72,15
1994	11,05	3,16	7,76	51,05	121,96	240,58	386,74	136,57	220,82	125,23	110,95	89,14
1995	9,24	4,98	12,93	54,82	80,79	280,47	449,71	336,68	217,43	128,26	120,71	106,14
1996	7,43	6,80	18,09	58,59	39,61	116,76	89,62	149,84	95,60	46,88	17,56	9,52
1997	5,62	8,45	6,69	72,11	145,05	537,67	319,77	256,77	310,30	216,94	131,09	30,40
1998	11,90	9,40	12,63	22,01	46,49	62,58	70,04	78,09	61,33	18,14	90,90	25,22
1999	12,85	21,04	16,60	20,56	56,39	186,16	172,65	248,54	502,43	128,17	50,70	20,04
2000	13,80	32,68	20,57	19,11	30,10	400,44	395,19	305,77	413,03	176,90	55,22	14,69
2001	11,06	10,05	9,89	17,68	252,55	278,23	646,52	338,84	138,86	47,44	110,09	52,40
2002	9,49	33,35	15,86	47,85	91,15	211,42	197,95	455,84	290,23	362,58	150,60	56,42
2003	28,72	20,18	21,83	36,97	36,26	251,41	195,48	139,94	142,97	123,84	70,05	33,37
2004	15,56	13,65	23,10	80,30	44,54	197,94	287,58	195,36	168,63	108,64	82,50	24,16
2005	9,44	7,23	12,93	19,87	125,52	354,60	419,42	399,74	203,63	92,69	52,11	45,46
2006	24,70	13,95	17,86	51,13	55,17	334,86	503,81	341,29	200,77	137,23	60,16	38,50
2007	18,75	19,58	21,22	33,18	32,25	47,02	177,28	136,86	114,09	77,74	37,60	15,18
2008	8,34	9,80	14,69	25,79	280,00	180,71	191,23	316,29	186,63	69,27	28,12	15,43
2009	11,65	11,97	13,58	26,12	127,71	175,55	228,56	274,91	187,55	102,31	92,44	31,78
2010	18,17	21,22	18,41	22,37	26,86	90,70	139,40	133,97	104,89	59,84	38,43	21,59
2011	18,12	14,33	24,81	21,45	37,67	102,71	151,63	267,03	196,70	106,39	51,49	16,81
2012	14,36	23,19	26,23	20,52	75,48							

Tabla 6. Estación río Itata en Coelemu (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1986	80,00	80,00	80,00	191,33	929,81	1780,60	500,61	655,03	378,37	264,61	275,35	92,35
1987	35,60	17,40	36,41	72,19	127,65	444,77	1081,97	985,42	609,43	635,32	377,88	89,53
1988	21,10	12,64	22,69	47,70	111,78	319,78	626,87	968,55	466,57	289,19	212,53	97,21
1989	26,83	10,49	9,16	12,47	28,20	234,94	477,48	540,68	350,97	208,03	102,52	32,07
1990	6,94	3,12	11,35	107,53	222,24	221,37	185,32	355,42	659,73	355,00	161,66	21,36
1991	3,96	8,58	0,67	65,09	333,50	830,87	911,68	390,19	532,83	338,61	191,60	139,46
1992	57,87	15,03	24,53	120,13	444,77	1948,17	732,81	433,13	515,57	419,58	314,37	192,52
1993	72,38	12,45	12,25	124,44	556,03	1924,40	1049,87	786,97	517,37	328,83	244,17	184,62
1994	57,50	28,43	20,91	100,74	235,16	616,57	1112,36	503,19	600,33	461,71	242,30	150,32
1995	35,96	17,47	15,94	69,20	139,79	657,43	1024,74	747,07	635,70	421,84	266,63	140,39
1996	34,89	10,94	45,27	111,78	103,23	410,03	324,84	374,45	245,90	112,39	47,16	17,38
1997	40,76	7,47	3,86	174,76	129,72	1605,57	722,07	741,23	807,17	803,32	569,13	223,48
1998	46,62	22,71	11,54	68,03	156,21	233,53	228,03	218,74	176,80	63,11	44,36	164,95
1999	31,84	52,69	19,23	46,19	104,32	456,19	454,36	592,68	1204,97	380,73	253,27	106,42
2000	17,06	82,66	26,91	24,34	126,07	1167,30	1043,36	696,36	970,30	528,87	267,40	157,19
2001	97,03	84,69	34,59	78,56	1016,72	865,40	1917,87	1027,90	536,60	328,65	199,70	90,23
2002	27,65	44,95	42,28	132,77	566,68	735,90	555,55	1374,07	758,90	1016,71	536,73	264,68
2003	90,17	36,31	44,07	72,95	116,64	874,60	586,84	394,19	390,83	382,42	222,47	70,13
2004	16,28	14,70	21,45	269,29	139,40	512,41	731,58	529,97	514,20	347,03	325,77	129,49
2005	52,34	42,11	48,46	58,91	385,26	1105,43	1309,29	1222,26	613,90	330,16	257,33	184,25
2006	83,79	35,53	47,41	143,82	231,63	1084,40	666,00	800,54	659,90	532,58	307,57	187,26
2007	81,24	72,12	57,70	97,51	113,41	165,71	516,61	389,32	357,63	306,00	170,70	52,61
2008	24,71	24,97	25,91	45,87	1025,93	582,73	558,94	933,58	550,37	251,07	158,27	47,13
2009	19,51	15,05	13,80	19,43	337,79	563,87	697,71	780,00	564,67	377,00	347,63	172,93
2010	43,30	36,22	55,57	30,91	61,85	228,32	357,84	379,58	259,17	204,81	165,70	77,42
2011	41,42	22,68	27,16	84,89	104,87	262,19	391,71	650,97	507,40	383,90	250,70	117,92
2012	39,80	57,40	63,50	138,87	43,83							

Tabla 7. Estación río Itata en Paso Hondo (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1986	68,98	65,35	56,55	192,66	725,71	1098,97	414,46	568,73	329,01	226,63	221,82	72,78
1987	30,70	14,21	25,74	72,69	99,63	274,51	895,77	855,59	529,92	544,13	304,42	70,55
1988	18,19	10,32	16,04	48,03	87,24	197,37	518,99	840,95	405,70	247,68	171,22	76,61
1989	23,14	8,57	6,48	12,56	22,01	145,00	395,31	469,45	305,18	178,17	82,59	25,27
1990	5,98	2,55	8,02	108,28	173,46	136,63	153,43	308,59	573,66	304,05	130,23	16,83
1991	3,41	7,01	0,47	65,54	260,30	512,80	754,79	338,78	463,32	290,01	154,35	109,90
1992	49,90	12,28	17,34	120,97	347,14	1202,39	606,70	376,07	448,31	359,36	253,26	151,72
1993	62,41	10,17	8,66	125,30	433,98	1187,72	869,20	683,29	449,87	281,63	196,70	145,49
1994	49,58	23,22	14,78	101,44	183,54	380,54	920,93	436,90	522,01	395,44	195,20	118,46
1995	31,01	14,27	11,27	69,68	109,10	405,76	848,39	648,65	552,77	361,29	214,80	110,63
1996	30,09	8,94	32,00	112,56	80,57	253,07	268,94	325,12	213,82	96,26	37,99	13,70
1997	35,14	6,10	2,73	175,97	101,25	990,94	597,81	643,58	701,87	688,02	458,49	176,11
1998	40,20	18,55	8,16	68,50	121,92	144,13	188,79	189,92	153,73	54,05	35,74	129,99
1999	27,46	43,03	13,59	46,51	81,42	281,56	376,17	514,60	1047,77	326,08	204,04	83,86
2000	14,71	67,52	19,02	24,51	98,40	720,45	863,81	604,62	843,72	452,96	215,42	123,87
2001	83,67	69,18	24,45	79,10	793,54	534,12	1587,82	892,48	466,60	281,48	160,88	71,11
2002	23,84	36,72	29,89	133,69	442,29	454,19	459,94	1193,04	659,89	870,78	432,39	208,58
2003	77,75	29,66	31,15	73,46	91,04	539,79	485,85	342,26	339,84	327,53	179,22	55,27
2004	14,04	12,01	15,16	271,16	108,80	316,25	605,68	460,15	447,12	297,22	262,44	102,04
2005	45,13	34,40	34,26	59,32	300,69	682,26	1083,97	1061,23	533,81	282,77	207,31	145,20
2006	72,25	29,02	33,51	144,82	180,79	640	1.155,39	740,61	546,67	461,39	255,73	143,98
2007	64,9	55,38	45,39	70,24	79,99	82,4	427,71	325,65	302,28	242,65	115,76	41,34
2008	17,2	18,62	18,42	46,19	761,77	496,5	487,84	779,61	481,37	228,81	128,67	58,51
2009	22,27	13,52	15,36	37,01	312,53	457,93	575,77	657,9	478,1	303,71	277,27	117,39
2010	41,23	31,29	16,61	23,29	50,64	212,32	329,84	308,16	261,7	195	148,91	62,24
2011	35,64	20,9	31,56	75,87	78,08	235,82	366,58	603,77	450,8	328,80	201,96	92,93
2012	34,32	46,89	44,89	139,84	34,21							

Tabla 8. Estación Río Lonquén (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1986	0,36	0,27	0,27	0,85	17,76	119,99	7,32	50,71	6,55	2,83	2,03	0,29
1987	0,06	0,04	0,07	0,09	0,75	3,34	153,39	93,66	11,04	7,5	1,41	0,53
1988	0,38	0,19	0,22	0,38	0,66	3,57	67,12	94,97	13,6	3,19	0,54	0,13
1989	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	2,6	44,29	27,85	4,78	0,53	0,16	0,07
1990	0,01	0,01	0,08	0,07	1,46	1,33	1,45	3,41	4,35	1,33	0,1	0,06
1991	0,01	0,03	0,00	0,23	16,66	62,25	96,35	18,09	9,43	2,52	1,01	0,42
1992	0,12	0,01	0,15	0,44	8,49	102,19	23,47	24,32	42,94	3,12	1,46	0,58
1993	0,26	0,04	0,07	0,17	8,61	106,98	23,8	24,62	7,47	1,65	0,56	0,09
1994	0,21	0,10	0,13	0,35	1,31	31,96	75,75	8,39	11,24	1,87	0,72	0,5
1995	0,13	0,06	0,10	0,24	2,67	2,15	79,73	75,49	8,41	3,96	0,38	0,42
1996	0,13	0,04	0,27	0,39	1,97	22,64	11,31	16,28	3,95	1,63	0,24	0,05
1997	0,15	0,03	0,1	0,62	2,76	75,03	37,17	28,71	21,96	5,97	4,76	0,34
1998	0,17	0,08	0,07	0,29	0,3	3,08	1,41	4,2	4,19	0,41	0,23	0,49

Tabla 8. Estación Río Lonquén (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1999	0,12	0,18	0,12	0,16	1,99	15,81	19,9	27,31	28,56	1,46	0,15	0,32
2000	0,06	0,29	0,16	0,09	2,41	124,13	36,26	7,55	38,78	5,23	1,43	0,47
2001	0,35	0,29	0,21	0,28	23,66	30,98	135	51,15	9,96	1,58	0,22	0,01
2002	0,10	0,05	0,36	0,47	11,17	59,13	51,68	110,6	14,56	7,55	3,49	0,51
2003	0,33	0,13	0,27	0,26	0,48	8,5	8,33	7,22	4,66	2,38	1,15	0,21
2004	0,06	0,05	0,13	0,95	2,66	6,51	53,39	32,61	11,52	3,96	0,86	0,39
2005	0,19	0,15	0,29	0,21	4,73	87,94	62,77	72,13	21,06	2,73	1,33	0,55
2006	0,31	0,12	0,29	0,51	4,42	39,97	107,02	49,53	9,66	5,14	1,59	0,56
2007	0,30	0,25	0,35	0,34	2,17	9,15	14,83	12,21	4,05	1,73	0,9	0,16
2008	0,09	0,09	0,16	0,16	19,59	24,4	30,76	57,37	19,87	4,54	1,9	0,14
2009	0,07	0,05	0,08	0,07	6,45	54,21	31,55	69,58	19,94	5,36	3,28	1,39
2010	0,16	0,13	0,33	0,11	1,18	2,82	7,58	9,45	3,52	0,76	0,58	0,23
2011	0,15	0,08	0,16	0,30	2,00	14,48	17,61	26,72	11,48	3,54	1,26	0,19
2012	0,14	0,20	0,38	0,49	0,84							

6.4. CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Disponiendo de la estadística completa, entre enero de 1986 a mayo del 2012, se procedió a construir las curvas de variación estacional, para determinar el régimen hidrológico en la zona de estudio.

Tabla 9. Curva estacional Estación Río Itata en Nueva Aldea (m³/s)

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q medio (m ³ /s)	12,5	12,43	14,92	35,54	114,3	255,9	274,1	251,9	203,6	117,2	72,25	35,82

En la Figura 8 se presenta la curva estacional de la serie de caudales medios mensuales en la Estación Río Itata en Nueva Aldea, que representa el comportamiento de la cuenca del Itata Superior. Se puede observar que el régimen es preferentemente pluvial.

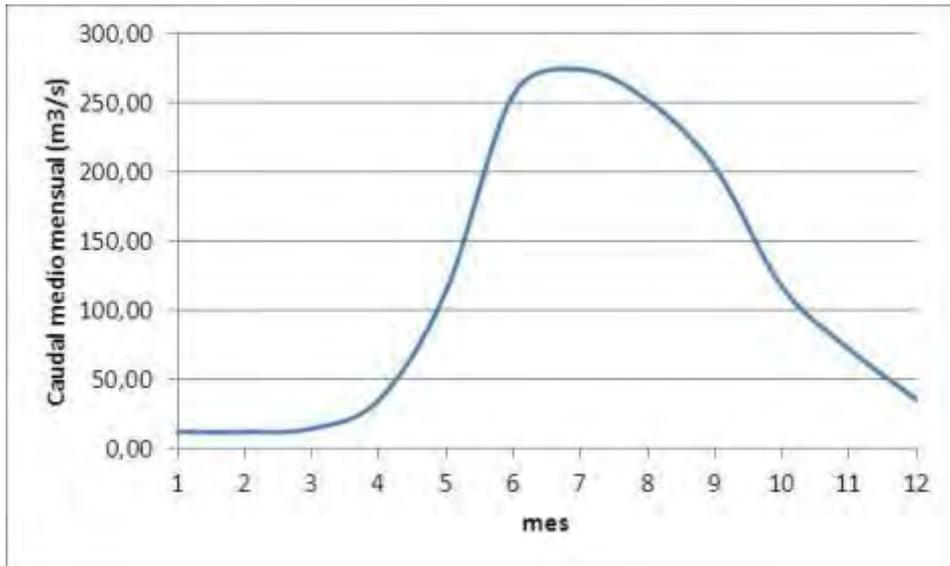


Figura 8. Curva estacional Estación Río Itata en Nueva Aldea

En la Figura 9 se presenta el autocorrelograma de la serie de caudales medios mensuales en la Estación Río Itata en Nueva Aldea. Se observa claramente el ciclo de 12 meses.

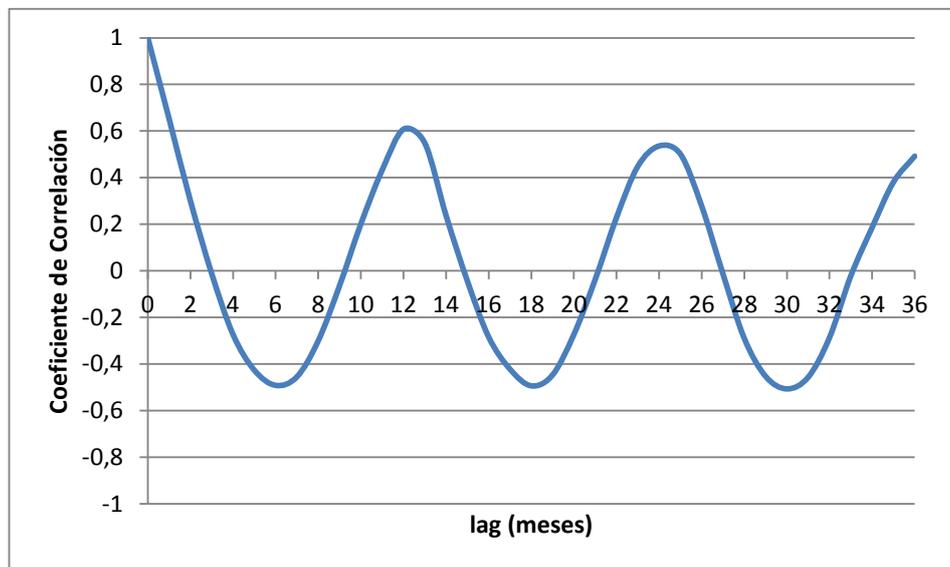


Figura 9. Autocorrelograma Estación Río Itata en Nueva Aldea

Otro factor muy relevante es el tiempo para el cual la serie temporal se independiza, y que corresponde a la regulación del sistema, información que se obtiene del autocorrelograma, cuando el coeficiente de correlación se hace estadísticamente nulo. Para la serie representativa de la descarga de la cuenca de Itata Superior, la regulación que presenta la cuenca es de tres (3)

meses. Por lo tanto, podría concluirse que el acuífero asociado a esta cuenca hidrográfica presentará una regulación superior a tres (3) meses.

Repitiendo todo el proceso para la estación Itata en Coelemu, los resultados son similares. En efecto, la curva estacional (ver Figura 10), representa un régimen preferentemente pluvial. De igual modo, el autocorrelograma correspondiente (ver Figura 11) muestra un ciclo de doce (12) meses, y una regulación de cuenca de tres (3) meses.

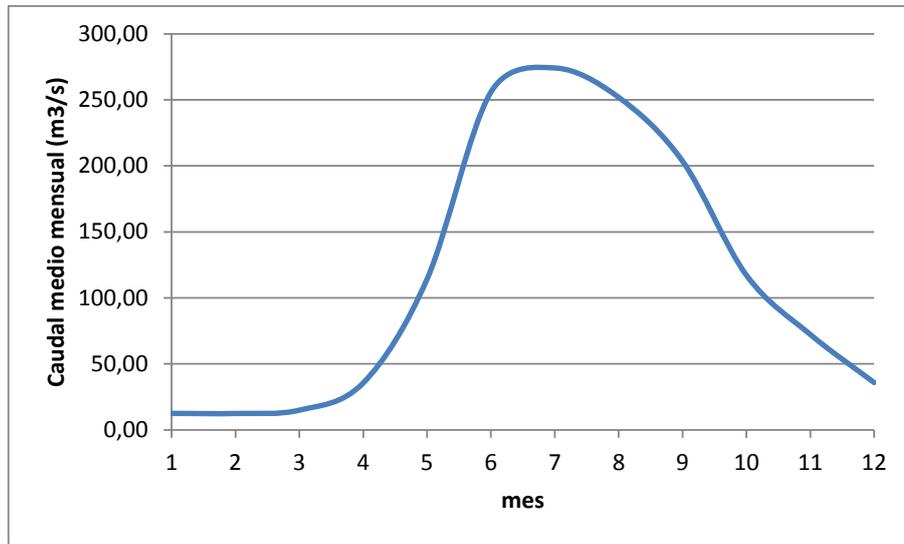


Figura 10. Curva estacional Estación Río Itata en Coelemu

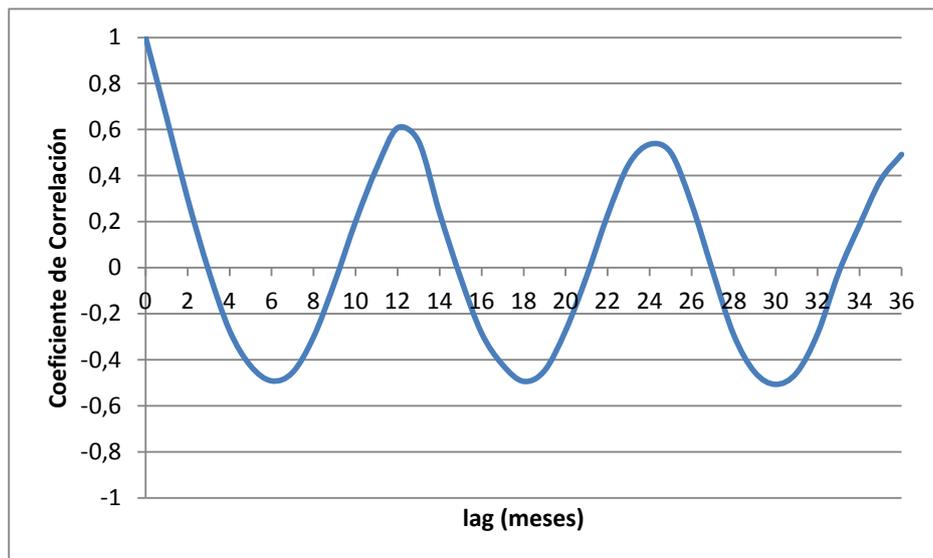


Figura 11. Autocorrelograma Estación Río Itata en Coelemu

6.5. PRECIPITACIÓN BRUTA

La precipitación bruta de escurrimiento en una cuenca resulta de la ponderación de la precipitación asociada a un área específica de una cuenca por la superficie respectiva, y es a través de la curva hipsométrica que se obtiene la superficie de las franjas de áreas entre curvas de nivel consecutivas.

Por otro lado, el perfil de precipitaciones, que corresponde al gradiente de precipitaciones totales anuales versus la cota a la que se registra, entrega la precipitación correspondiente a la cota intermedia entre dos curvas de nivel consecutivas. La tendencia en el país es que las precipitaciones aumenten con la cota (altura) hasta un cierto nivel a partir del cual la lluvia se mantiene más o menos constante.

6.6. HIPSOMETRÍA

En las cuatro cuencas de trabajo, más un quinta correspondiente a la cuenca completa del río Itata, se construyeron las curvas hipsométricas.

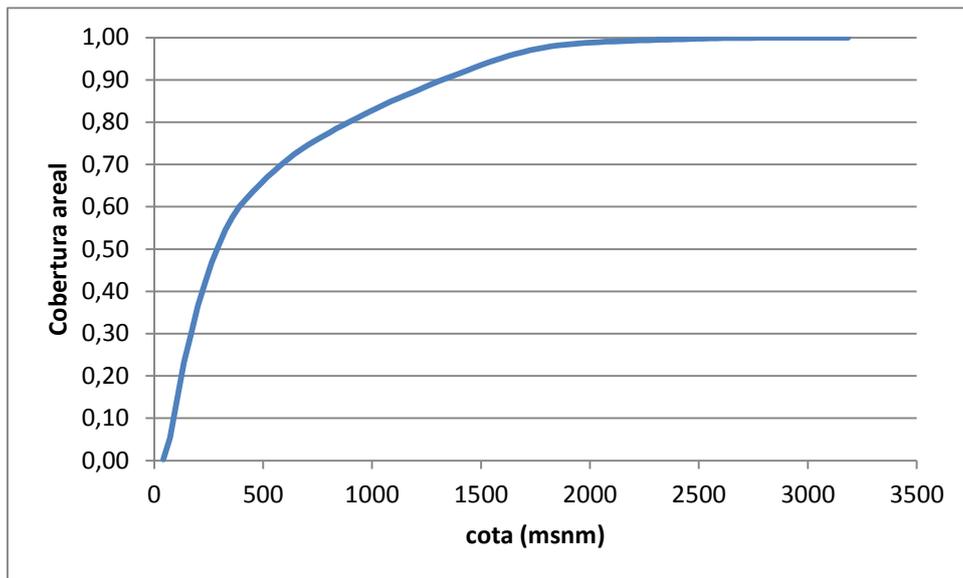


Figura 12. Hipsometría Itata Superior (control Itata en Nueva Aldea)

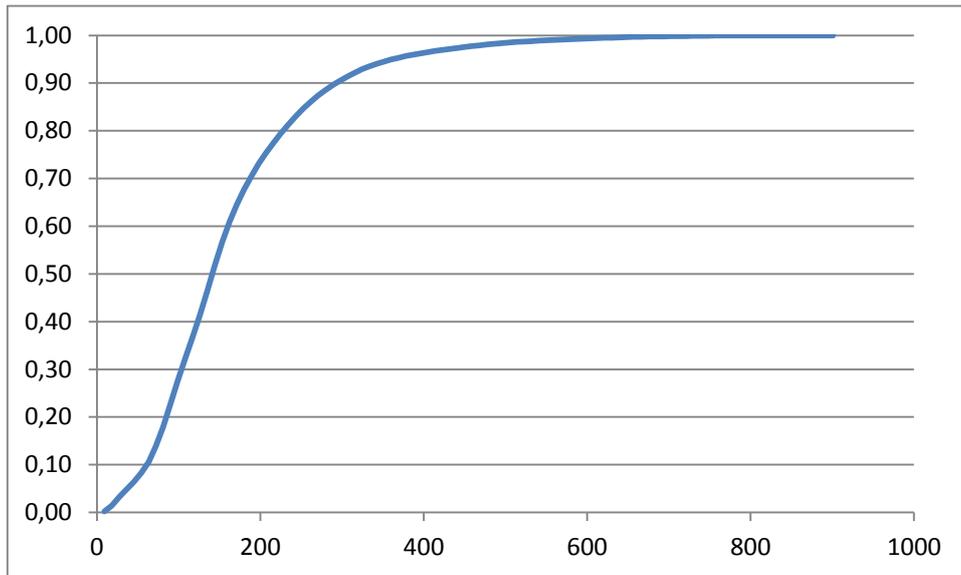


Figura 13. Hipsometría Itata Inferior (desembocadura del Itata)

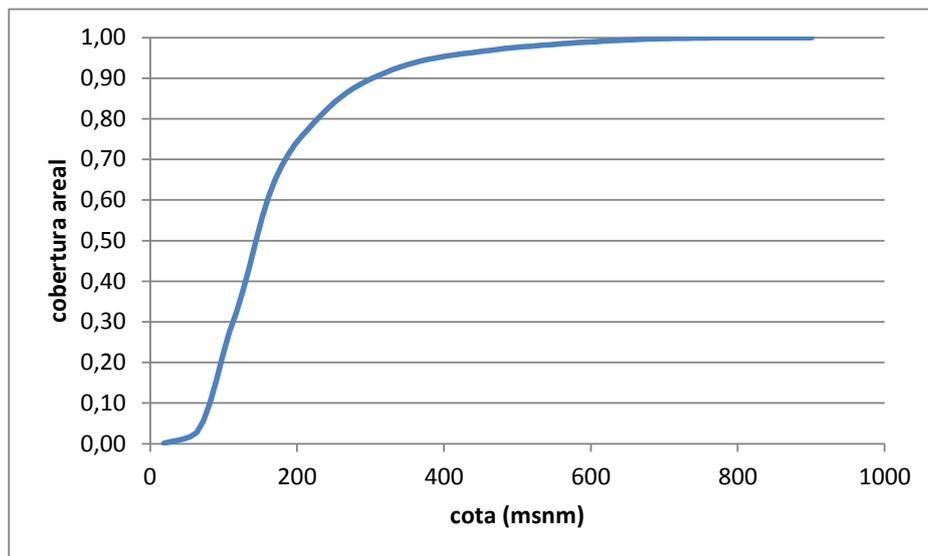


Figura 14. Hipsometría Lonquén

6.7. PERFIL DE PRECIPITACIONES

Con las dieciocho estaciones disponibles en la zona norte de la VIII Región (ver Tabla 10) se construye el perfil de precipitaciones. Se utiliza una banda de confianza de +/- el 90% de la desviación estándar.

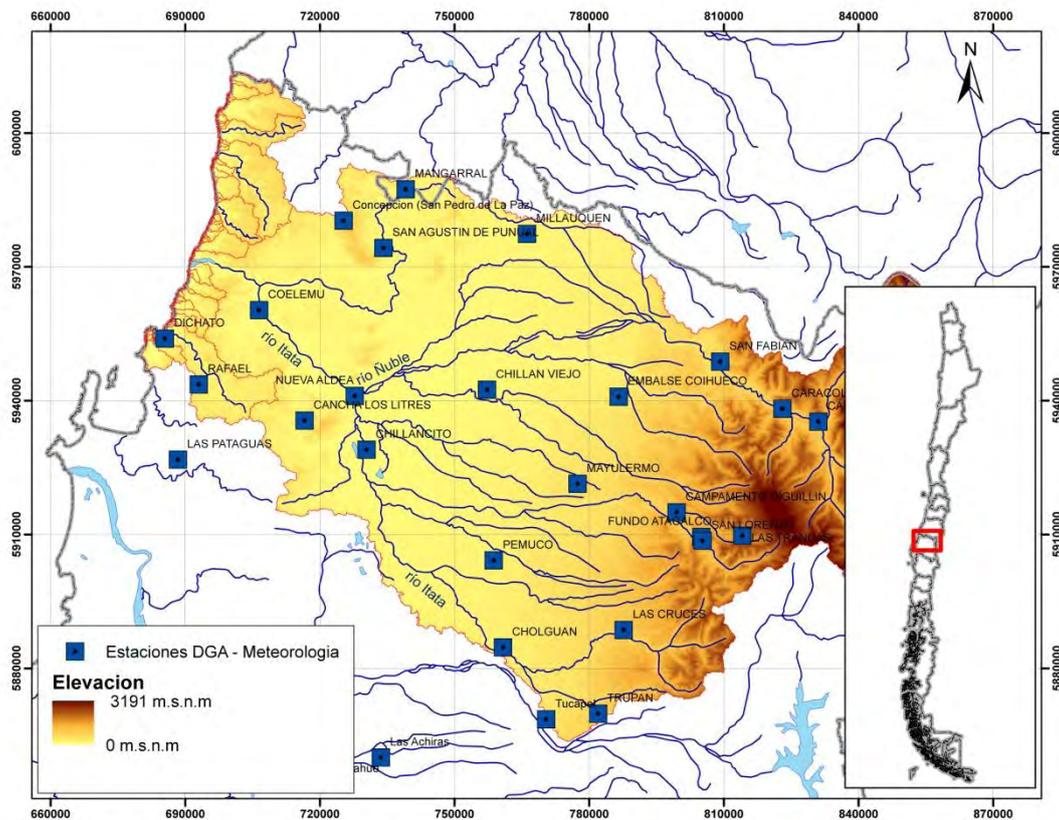


Figura 15. Estaciones Meteorológicas

Tabla 10. Estaciones meteorológicas consideradas

Estación	Cota (msnm)	Pp total anual (mm)	Banda Superior (mm)	Banda Inferior (mm)	Outlier
CARACOL	620	2.361,3	2.262,6	1.245,0	fuera rango
CAMAN	660	2.063,4	2.322,9	1.305,3	
RIO ÑUBLE EN SAN FABIAN N 2	450	1.157,7	2.006,5	988,9	
SAN FABIAN	460	1.722,8	2.021,5	1.003,9	
CHILLAN VIEJO	106	1.047,5	1.488,1	470,5	
RIO CHILLAN EN ESPERANZA N 2	575	1.582,6	2.194,8	1.177,2	
CANAL DE LA LUZ EN CHILLAN	128	485,8	1.521,3	503,7	fuera rango
MILLAUQUEN	146	880,9	1.548,4	530,8	
SAN AGUSTIN DE PUÑUAL	35	854,7	1.381,1	363,5	
MAYULERMO	385	1.473,9	1.908,5	890,9	
FUNDO ATACALCO	730	2.331,1	2.428,4	1.410,8	
LAS TRANCAS	1200	2.070,3	3.136,6	2.119,0	fuera rango
PEMUCO	200	1.131,8	1.629,8	612,2	
CHILLANCITO	40	1.022,4	1.388,7	371,1	
NUEVA ALDEA	25	948,9	1.366,1	348,5	
CANCHA LOS LITRES	173	869,1	1.589,1	571,5	
RAFAEL	210	1.266,4	1.644,8	627,2	
COELEMU	30	783,7	1.373,6	356,0	

El perfil resultante se presenta a continuación:

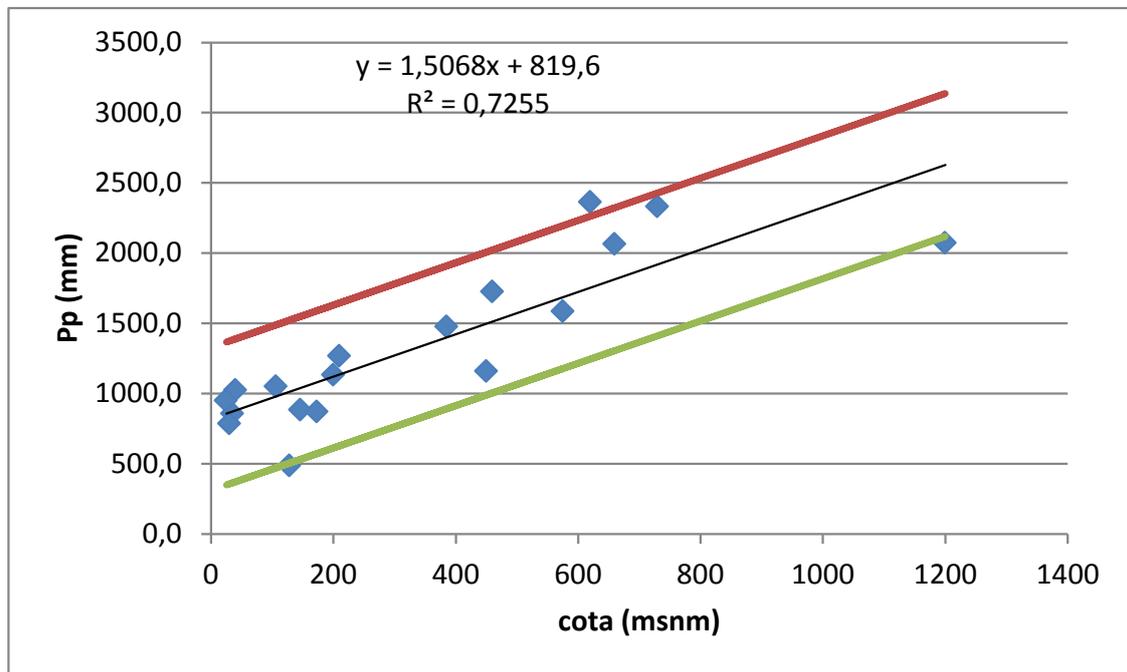


Figura 16. Gradiente de precipitaciones total de estaciones meteorológicas

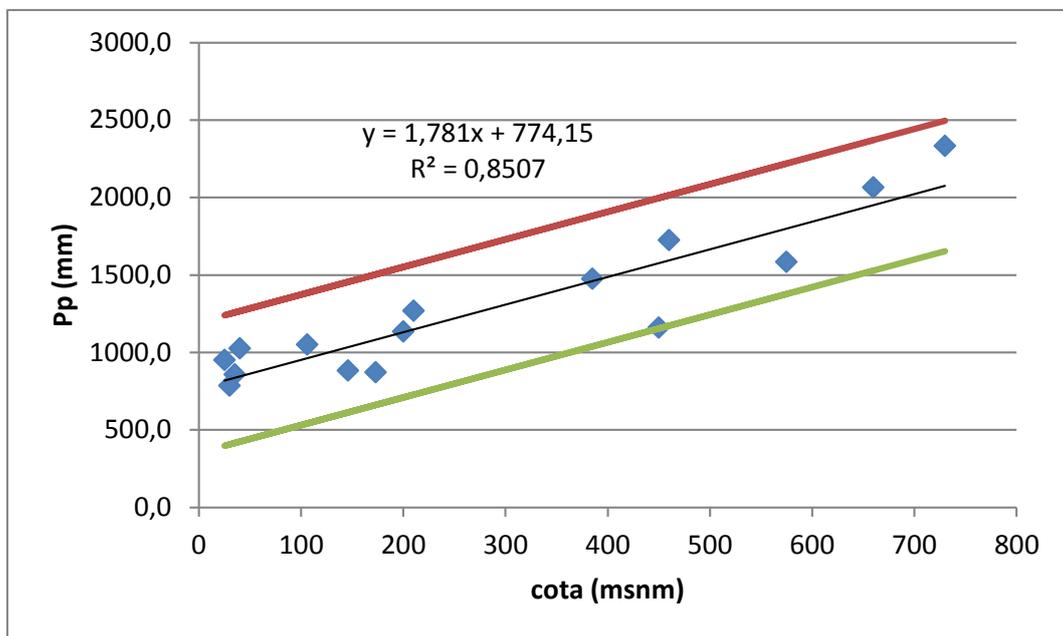


Figura 17. Gradiente de precipitaciones eliminando outliers

Se adopta entonces este último perfil (Figura 17).

Integrando la hipsometría con el perfil de precipitaciones se obtiene el aporte bruto de cada cuenca hidrográfica.

Tabla 11. Precipitación bruta cuenca Lonquén

Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)	Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)
18,91	1,32	808	0,03	0,03	464,41	2,37	1601,26	0,12	38,77
27,82	4,54	824	0,12	0,15	473,32	2,43	1617,13	0,12	38,90
36,73	3,76	840	0,10	0,25	482,23	2,26	1633,00	0,12	39,01
45,64	4,35	855	0,12	0,37	491,14	2,12	1648,87	0,11	39,13
54,55	5,99	871	0,17	0,54	500,05	1,82	1664,74	0,10	39,22
63,46	13,06	887	0,37	0,90	508,96	1,48	1680,61	0,08	39,30
72,37	32,74	903	0,94	1,84	517,87	1,65	1696,48	0,09	39,39
81,28	51,54	919	1,50	3,34	526,78	1,49	1712,35	0,08	39,47
90,19	66,75	935	1,98	5,32	535,69	1,52	1728,21	0,08	39,55
99,10	73,48	951	2,21	7,54	544,60	1,47	1744,08	0,08	39,63
108,01	67,27	967	2,06	9,60	553,51	1,46	1759,95	0,08	39,72
116,92	55,58	982	1,73	11,33	562,42	1,47	1775,82	0,08	39,80
125,83	62,44	998	1,98	13,31	571,33	1,36	1791,69	0,08	39,88
134,74	68,62	1014	2,21	15,51	580,24	1,31	1807,56	0,08	39,95
143,65	76,20	1030	2,49	18,00	589,15	1,23	1823,43	0,07	40,02
152,56	71,68	1046	2,38	20,38	598,06	1,15	1839,29	0,07	40,09
161,47	60,51	1062	2,04	22,42	606,97	0,97	1855,16	0,06	40,15
170,38	49,32	1078	1,69	24,10	615,88	1,10	1871,03	0,07	40,21
179,29	39,72	1093	1,38	25,48	624,79	1,05	1886,90	0,06	40,27
188,20	33,34	1109	1,17	26,65	633,70	1,01	1902,77	0,06	40,33
197,11	28,45	1125	1,02	27,67	642,61	1,04	1918,64	0,06	40,40
206,02	24,14	1141	0,87	28,54	651,52	0,93	1934,51	0,06	40,45
214,93	20,06	1157	0,74	29,28	660,43	0,81	1950,38	0,05	40,50
223,84	21,29	1173	0,79	30,07	669,34	0,69	1966,24	0,04	40,55
232,75	20,41	1189	0,77	30,84	678,25	0,61	1982,11	0,04	40,59
241,66	18,70	1205	0,71	31,55	687,16	0,59	1997,98	0,04	40,62
250,57	17,23	1220	0,67	32,22	696,07	0,51	2013,85	0,03	40,66
259,48	15,63	1236	0,61	32,83	704,98	0,41	2029,72	0,03	40,68
268,39	14,01	1252	0,56	33,39	713,89	0,38	2045,59	0,02	40,71
277,30	12,51	1268	0,50	33,89	722,80	0,36	2061,46	0,02	40,73
286,21	11,06	1284	0,45	34,34	731,71	0,38	2077,33	0,03	40,76
295,12	10,41	1300	0,43	34,77	740,62	0,26	2093,19	0,02	40,77
304,03	9,41	1316	0,39	35,16	749,53	0,24	2109,06	0,02	40,79
312,94	7,89	1331	0,33	35,50	758,44	0,24	2124,93	0,02	40,81
321,85	8,37	1347	0,36	35,85	767,35	0,23	2140,80	0,02	40,82

Tabla 11. Precipitación bruta cuenca Lonquén

Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)	Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)
330,76	7,71	1363	0,33	36,19	776,26	0,24	2156,67	0,02	40,84
339,67	6,58	1379	0,29	36,47	785,17	0,11	2172,54	0,01	40,85
348,58	5,90	1395	0,26	36,74	794,08	0,08	2188,41	0,01	40,85
357,49	5,43	1411	0,24	36,98	802,99	0,04	2204,28	0,00	40,85
366,40	4,96	1427	0,22	37,20	811,90	0,05	2220,14	0,00	40,86
375,31	4,40	1443	0,20	37,40	820,81	0,04	2236,01	0,00	40,86
384,22	3,89	1458	0,18	37,58	829,72	0,04	2251,88	0,00	40,86
393,13	3,51	1474	0,16	37,75	838,63	0,03	2267,75	0,00	40,86
402,04	3,34	1490	0,16	37,91	847,54	0,03	2283,62	0,00	40,87
410,95	2,63	1506	0,13	38,03	856,45	0,02	2299,49	0,00	40,87
419,86	2,78	1522	0,13	38,17	865,36	0,03	2315,36	0,00	40,87
428,77	2,62	1538	0,13	38,29	874,27	0,02	2331,22	0,00	40,87
437,68	2,36	1554	0,12	38,41	883,18	0,02	2347,09	0,00	40,87
446,59	2,40	1570	0,12	38,53	892,09	0,03	2362,96	0,00	40,88
455,50	2,45	1585	0,12	38,65	901,00	0,02	2378,83	0,00	40,88

Tabla 12. Precipitación bruta cuenca Itata Inferior

Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)	Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)
9,01	4,61	790	0,12	0,12	459,51	3,73	1592,54	0,19	67,26
18,02	24,80	806	0,63	0,75	468,52	3,56	1608,58	0,18	67,44
27,03	36,83	822	0,96	1,71	477,53	3,42	1624,63	0,18	67,62
36,04	32,31	838	0,86	2,57	486,54	3,17	1640,68	0,17	67,78
45,05	33,36	854	0,90	3,47	495,55	2,92	1656,72	0,15	67,93
54,06	38,82	870	1,07	4,54	504,56	2,37	1672,77	0,13	68,06
63,07	46,39	886	1,30	5,85	513,57	2,25	1688,82	0,12	68,18
72,08	66,69	903	1,91	7,76	522,58	1,98	1704,86	0,11	68,29
81,09	84,16	919	2,45	10,21	531,59	1,81	1720,91	0,10	68,39
90,10	99,45	935	2,95	13,16	540,60	1,80	1736,96	0,10	68,49
99,11	102,06	951	3,08	16,23	549,61	1,72	1753,01	0,10	68,58
108,12	94,43	967	2,89	19,13	558,62	1,63	1769,05	0,09	68,67
117,13	91,67	983	2,86	21,98	567,63	1,50	1785,10	0,09	68,76
126,14	95,55	999	3,03	25,01	576,64	1,39	1801,15	0,08	68,84

Tabla 12. Precipitación bruta cuenca Itata Inferior

Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)	Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)
135,15	104,18	1015	3,35	28,36	585,65	1,35	1817,19	0,08	68,91
144,16	108,73	1031	3,55	31,92	594,66	1,25	1833,24	0,07	68,99
153,17	99,98	1047	3,32	35,24	603,67	1,15	1849,29	0,07	69,05
162,18	87,32	1063	2,94	38,18	612,68	1,13	1865,33	0,07	69,12
171,19	75,21	1079	2,57	40,75	621,69	1,11	1881,38	0,07	69,19
180,20	66,00	1095	2,29	43,04	630,70	1,04	1897,43	0,06	69,25
189,21	57,57	1111	2,03	45,07	639,71	1,16	1913,47	0,07	69,32
198,22	51,82	1127	1,85	46,93	648,72	0,97	1929,52	0,06	69,38
207,23	45,74	1143	1,66	48,58	657,73	0,91	1945,57	0,06	69,44
216,24	43,43	1159	1,60	50,18	666,74	0,76	1961,61	0,05	69,48
225,25	40,13	1175	1,50	51,68	675,75	0,69	1977,66	0,04	69,53
234,26	37,69	1191	1,42	53,10	684,76	0,66	1993,71	0,04	69,57
243,27	35,51	1207	1,36	54,46	693,77	0,56	2009,75	0,04	69,60
252,28	32,47	1223	1,26	55,72	702,78	0,53	2025,80	0,03	69,64
261,29	29,55	1240	1,16	56,88	711,79	0,47	2041,85	0,03	69,67
270,30	26,75	1256	1,06	57,95	720,80	0,43	2057,89	0,03	69,70
279,31	23,84	1272	0,96	58,91	729,81	0,47	2073,94	0,03	69,73
288,32	21,51	1288	0,88	59,78	738,82	0,37	2089,99	0,02	69,75
297,33	19,90	1304	0,82	60,61	747,83	0,33	2106,04	0,02	69,77
306,34	17,84	1320	0,75	61,35	756,84	0,33	2122,08	0,02	69,80
315,35	16,09	1336	0,68	62,03	765,85	0,31	2138,13	0,02	69,82
324,36	14,27	1352	0,61	62,65	774,86	0,31	2154,18	0,02	69,84
333,37	12,58	1368	0,55	63,19	783,87	0,13	2170,22	0,01	69,85
342,38	11,11	1384	0,49	63,68	792,88	0,09	2186,27	0,01	69,85
351,39	9,77	1400	0,43	64,11	801,89	0,04	2202,32	0,00	69,86
360,40	9,00	1416	0,40	64,52	810,90	0,05	2218,36	0,00	69,86
369,41	8,12	1432	0,37	64,89	819,91	0,04	2234,41	0,00	69,86
378,42	7,07	1448	0,32	65,21	828,92	0,04	2250,46	0,00	69,87
387,43	6,18	1464	0,29	65,50	837,93	0,03	2266,50	0,00	69,87
396,44	5,68	1480	0,27	65,76	846,94	0,03	2282,55	0,00	69,87
405,45	5,23	1496	0,25	66,01	855,95	0,02	2298,60	0,00	69,87
414,46	4,97	1512	0,24	66,25	864,96	0,03	2314,64	0,00	69,87
423,47	4,70	1528	0,23	66,48	873,97	0,02	2330,69	0,00	69,87
432,48	4,39	1544	0,22	66,69	882,98	0,02	2346,74	0,00	69,88

Tabla 12. Precipitación bruta cuenca Itata Inferior

Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)	Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q Acumulado (m ³ /s)
441,49	4,17	1560	0,21	66,90	891,99	0,03	2362,78	0,00	69,88
450,50	3,42	1576	0,17	67,07	901,00	0,02	2378,83	0,00	69,88

Tabla 13. Precipitación bruta cuenca Itata Superior

Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q acumulado (m ³ /s)	cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q acumulado (m ³ /s)
41,76	11,02	849	0,30	0,30	1629,76	21,90	3676,75	2,55	214,95
73,52	228,48	905	6,56	6,85	1661,52	20,54	3733,32	2,43	217,38
105,28	408,42	962	12,45	19,31	1693,28	18,78	3789,88	2,26	219,64
137,04	381,73	1018	12,33	31,63	1725,04	17,45	3846,45	2,13	221,76
168,80	296,90	1075	10,12	41,75	1756,80	15,01	3903,01	1,86	223,62
200,56	295,05	1131	10,58	52,34	1788,56	14,34	3959,58	1,80	225,42
232,32	239,06	1188	9,00	61,34	1820,32	12,44	4016,14	1,58	227,01
264,08	218,64	1244	8,63	69,97	1852,08	10,17	4072,70	1,31	228,32
295,84	183,20	1301	7,56	77,53	1883,84	7,89	4129,27	1,03	229,36
327,60	164,88	1358	7,10	84,63	1915,60	6,79	4185,83	0,90	230,26
359,36	131,90	1414	5,91	90,54	1947,36	6,02	4242,40	0,81	231,07
391,12	107,61	1471	5,02	95,56	1979,12	5,46	4298,96	0,74	231,81
422,88	87,12	1527	4,22	99,78	2010,88	4,81	4355,53	0,66	232,47
454,64	74,75	1584	3,75	103,53	2042,64	4,10	4412,09	0,57	233,05
486,40	76,44	1640	3,98	107,51	2074,40	3,46	4468,66	0,49	233,54
518,16	71,89	1697	3,87	111,38	2106,16	2,96	4525,22	0,42	233,96
549,92	65,59	1754	3,65	115,02	2137,92	3,15	4581,79	0,46	234,42
581,68	61,56	1810	3,53	118,56	2169,68	2,90	4638,35	0,43	234,85
613,44	63,15	1867	3,74	122,30	2201,44	2,73	4694,91	0,41	235,25
645,20	57,08	1923	3,48	125,78	2233,20	2,38	4751,48	0,36	235,61
676,96	48,14	1980	3,02	128,80	2264,96	2,11	4808,04	0,32	235,93
708,72	48,54	2036	3,13	131,93	2296,72	2,16	4864,61	0,33	236,27
740,48	42,92	2093	2,85	134,78	2328,48	2,02	4921,17	0,32	236,58
772,24	41,83	2150	2,85	137,63	2360,24	1,99	4977,74	0,31	236,90
804,00	39,51	2206	2,76	140,40	2392,00	2,06	5034,30	0,33	237,22
835,76	42,97	2263	3,08	143,48	2423,76	2,08	5090,87	0,34	237,56
867,52	39,18	2319	2,88	146,36	2455,52	2,19	5147,43	0,36	237,92
899,28	36,76	2376	2,77	149,13	2487,28	2,18	5204,00	0,36	238,28
931,04	36,92	2432	2,85	151,98	2519,04	2,10	5260,56	0,35	238,63
962,80	35,76	2489	2,82	154,80	2550,80	1,58	5317,12	0,27	238,89
994,56	35,79	2545	2,89	157,69	2582,56	1,30	5373,69	0,22	239,11
1026,32	35,43	2602	2,92	160,61	2614,32	1,16	5430,25	0,20	239,31

Tabla 13. Precipitación bruta cuenca Itata Superior

Cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q acumulado (m ³ /s)	cota (msnm)	Área (km ²)	Pp (mm)	Q (m ³ /s)	Q acumulado (m ³ /s)
1058,08	35,68	2659	3,01	163,62	2646,08	1,03	5486,82	0,18	239,49
1089,84	32,94	2715	2,84	166,46	2677,84	0,87	5543,38	0,15	239,65
1121,60	31,93	2772	2,81	169,26	2709,60	0,77	5599,95	0,14	239,78
1153,36	31,11	2828	2,79	172,05	2741,36	0,60	5656,51	0,11	239,89
1185,12	29,64	2885	2,71	174,77	2773,12	0,53	5713,08	0,10	239,99
1216,88	30,48	2941	2,84	177,61	2804,88	0,45	5769,64	0,08	240,07
1248,64	31,42	2998	2,99	180,60	2836,64	0,38	5826,21	0,07	240,14
1280,40	31,21	3055	3,02	183,62	2868,40	0,28	5882,77	0,05	240,19
1312,16	29,96	3111	2,96	186,57	2900,16	0,25	5939,33	0,05	240,24
1343,92	27,00	3168	2,71	189,29	2931,92	0,24	5995,90	0,04	240,28
1375,68	28,23	3224	2,89	192,17	2963,68	0,20	6052,46	0,04	240,32
1407,44	27,41	3281	2,85	195,02	2995,44	0,18	6109,03	0,03	240,36
1439,20	27,42	3337	2,90	197,93	3027,20	0,15	6165,59	0,03	240,39
1470,96	27,58	3394	2,97	200,89	3058,96	0,15	6222,16	0,03	240,41
1502,72	27,65	3450	3,03	203,92	3090,72	0,14	6278,72	0,03	240,44
1534,48	26,75	3507	2,97	206,89	3122,48	0,11	6335,29	0,02	240,47
1566,24	25,67	3564	2,90	209,80	3154,24	0,19	6391,85	0,04	240,50
1598,00	22,64	3620	2,60	212,39	3186,00	0,08	6448,42	0,02	240,52

7. GEOLOGÍA Y FORMACIONES PERMEABLES

7.1. MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La Región del Biobío, como resultado de la configuración tectónica de Chile central y de la orogénesis de los Andes, presenta tres zonas morfoestructurales bien diferenciadas, que son, de oeste a este, la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal, dispuestas paralelas entre sí, y alineadas norte-sur.

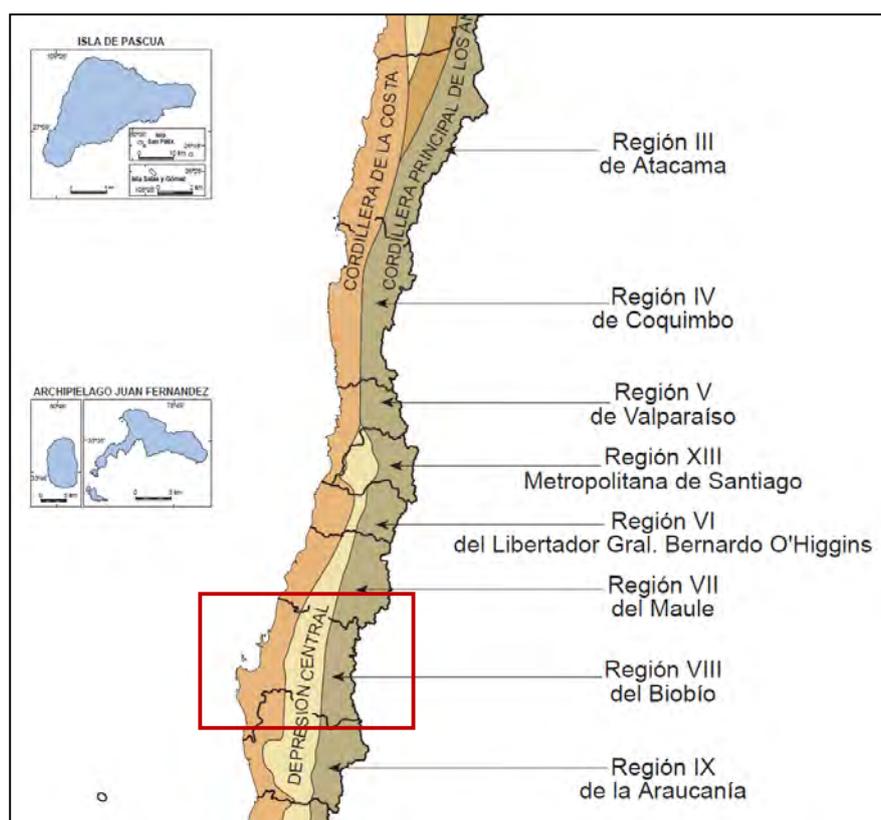


Figura 18. Dominios morfoestructurales de la zona central de Chile. Modificado de Sernageomin (2000).

Estratigráficamente, las rocas más antiguas están representadas por rocas metamórficas paleozoicas, que se distribuyen principalmente en el sector occidental de la Cordillera de la Costa. Discordantemente sobre ellas se exponen los estratos de Pocillas-Coronel de Maule-Quirihue y rocas de la Formación Santa Juana, asignadas al Triásico y que incluyen sedimentitas clásticas y volcanitas, expuestas en el sector de Pocillas-Coronel de Maule-Quirihue, y sedimentitas marinas y continentales, en el extremo suroeste del área.

Las rocas cretácicas están representadas por la Formación Quirquina, transgresivas sobre el basamento metamórfico, en la zona costera, y por potentes secuencias volcano-sedimentarias de la Formación Río Blanco, en la Cordillera Andina.

Las rocas terciarias corresponden a sedimentitas marinas y continentales (Formación Curanilahue), con mantos de carbón en la región costera, y a sedimentitas (Formación Cura-Mallín) en la Cordillera Andina. Sobre la unidad anterior se disponen, discordantemente, potentes coladas de lavas andesítico-basálticas atribuidas al Plioceno-Pleistoceno y sobre estas últimas se disponen Volcanes y lavas (Pleistoceno Superior-Holoceno), conformadas por más de 1.000 m de lavas andesíticas a basálticas y depósitos piroclásticos, calcoalcalinos, bien conservados.

También, y de importancia para el presente Estudio, se reconocen sedimentos no consolidados de edad Cuaternario depositados en ambientes de origen fluvial, fluvioglacial, glacial, coluvial y lacustre. Existiendo además en la Cordillera de la Costa terrazas marinas desarrolladas probablemente durante el Pleistoceno y Holoceno.

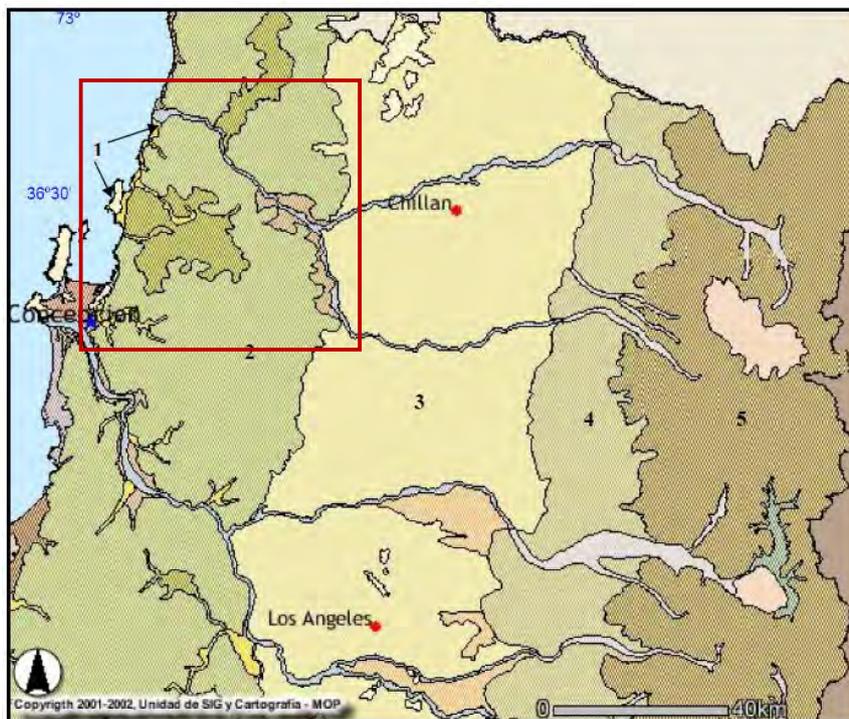


Figura 19. Geomorfología de la región del Biobío. Fuente: Cartografía MOPIT.

Las unidades morfoestructurales corresponden a: 1. Planicies litorales. 2. Cordillera de la Costa. 3. Depresión Central. 4. Precordillera. 5. Cordillera Andina.

7.2. ESTRATIGRAFÍA

La cuenca Itata Bajo está formada principalmente por las siguientes formaciones geológicas:

Basamento Metamórfico (Serie Oriental SE). Paleozoico: Rocas caracterizadas por un metamorfismo de baja presión y alta temperatura en la Serie Oriental, y por metamorfismo de alta presión y baja temperatura en la Serie Occidental.

La base de esta unidad es desconocida, y su techo lo constituyen, parcialmente, las unidades estratificadas que corresponden a rocas sedimentarias del Cretácico y Terciario, que la sobreyacen en discordancia angular y de erosión.

Las rocas metamórficas que se distribuyen en la región más occidental del área, como una franja prácticamente continua de dirección general NNE-SSW, corresponden a la Serie Oriental, compuesta por esquistos, filitas, gneises y metareniscas.

Basamento Intrusivo (Batolito de la Costa, Pzg). Paleozoico-Triásico inf.: Rocas intrusivas del Paleozoico-Triásico inferior. Se distribuye como una franja continua de dirección general NNE-SSW, conformando gran parte de la Cordillera de la Costa.

Integrado por un complejo plutónico cuya composición varía entre tonalita y granodiorita, con sectores menos extensos de diorita cuarcífera y granito.

Estas rocas han sido sometidas a intensos fenómenos cataclásticos, evidenciados en el fracturamiento de cristales de cuarzo y feldespato.

Tiene una relación de contacto intrusivo con las rocas del Basamento Metamórfico e infrayace de forma discordante erosiva, a las series sedimentarias y sedimentario-volcánicas del Triásico.

Formación sedimentaria Plio-Cuaternaria (PPIIm): Comprende sedimentitas lagunares y fluviales, representadas por areniscas tobáceas, limonitas y conglomerados, con intercalaciones de arcillolitas y tobas. El aporte es principalmente andesítico en las areniscas.

Corresponde a la Formación Mininco. Se distribuye en la Depresión Central, y los afloramientos se observan en los valles de los ríos y esteros. En la zona de estudio afloran en la zona de confluencia entre el río Itata y el Ñuble.

Sedimentos de Terrazas Marinas (Plhstm). Cuaternario: Terrazas de abrasión marina, cubiertas por sedimentos arenosos y limosos, parcialmente estratificados, compuestos por material proveniente de las erupciones volcánicas de la Cordillera Andina.

Sedimentos de Terrazas Fluviales (Hstf). Cuaternario: Depósitos sedimentarios, que se distribuyen en los valles de los ríos, constituyendo amplios niveles aterrazados.

Compuestos por gravas y ripios, con clastos redondeados a subredondeados de andesitas y granitos de diámetro entre los 8 y 30 cm, con fracciones variables de arenas y limos. Espesores máximos alcanzan los 20 m.

Sedimentos de Valles Actuales (Hsva). Cuaternario: materiales no consolidados, representados por gravas, ripios y arenas, que constituyen el relleno actual de los ríos y esteros.

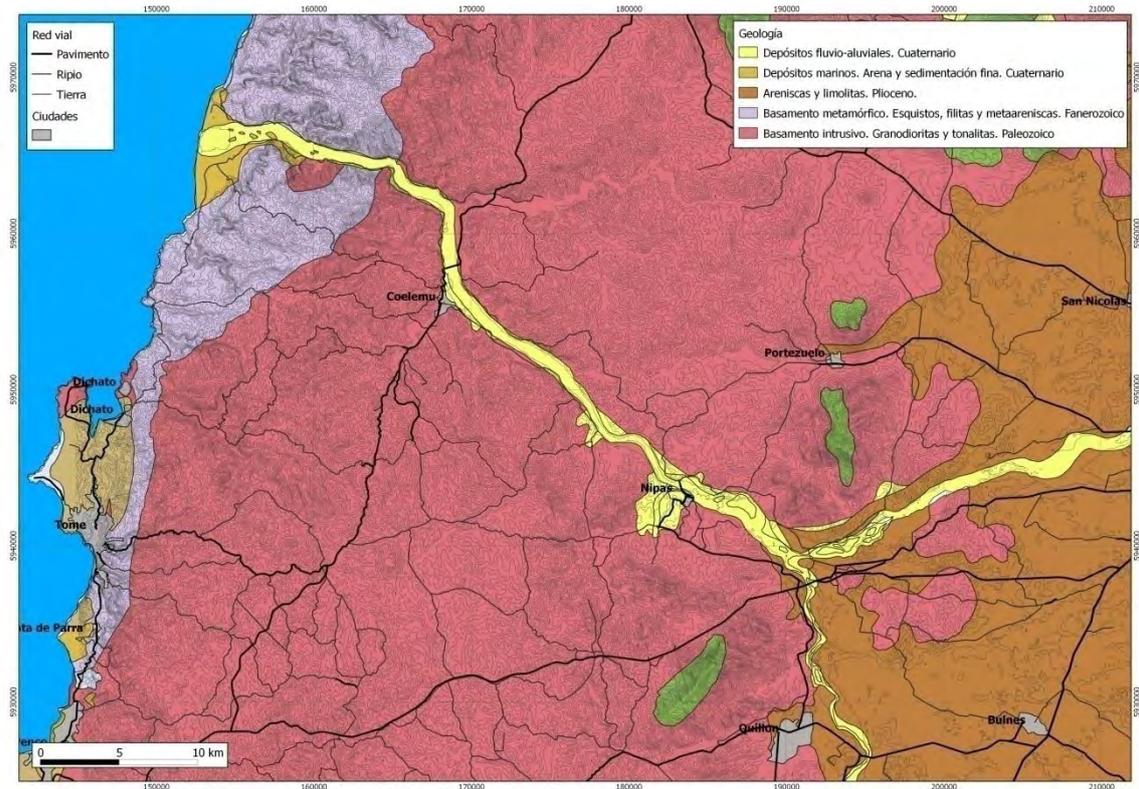


Figura 20. Geología de la zona de Estudio.

7.3. COLUMNAS DE SONDEOS DISPONIBLES

Se han obtenido 7 registros litológicos en la zona de estudio, 2 de ellos incluidos en el informe final de la Instalación de Piezómetros Operativos, regiones del Maule y Biobío, realizado por Compañía Chilena de Perforaciones Ltda. para la Dirección General de Aguas. Los otros 5 registros se han obtenido de los expedientes facilitados por la Dirección General de Aguas.

Los piezómetros se ubican en la margen izquierda del río Itata, a 800 metros del cauce el piezómetro #5 y a 1400 metros el piezómetro #6. Tienen 30 y 33 metros de profundidad, respectivamente, y los materiales atravesados corresponden al relleno aluvial cuaternario compuesto por arenas, arcillas, maicillo y gravas. El piezómetro #6 atraviesa el basamento intrusivo a los 31 m de profundidad.

Tabla 14. Expedientes con registros litológicos en la zona de estudio

Expte.	Propietario pozo	Este	Norte	Datum	Huso	Prof.
ND 801 1422	ESSBIO S.A.	169092	5955467	1984	19	150
ND 801 1770	SOCIEDAD AGRICOLA SANTA RITA LTDA.	192202	5940216	1984	19	30
ND 801 1773	SOC. AGRICOLA Y FORESTAL LOMAS DE QUINCHAMALI	192274	5937031	1984	19	80
ND 801 2501	COMITE DE AP RURAL DE EL CENTRO-CEMENTERIO	186177	5942066	1984	19	30
ND 801 6391	DOMINGA VIDAL PLACENCIA	707319	5963691	1956	18	16

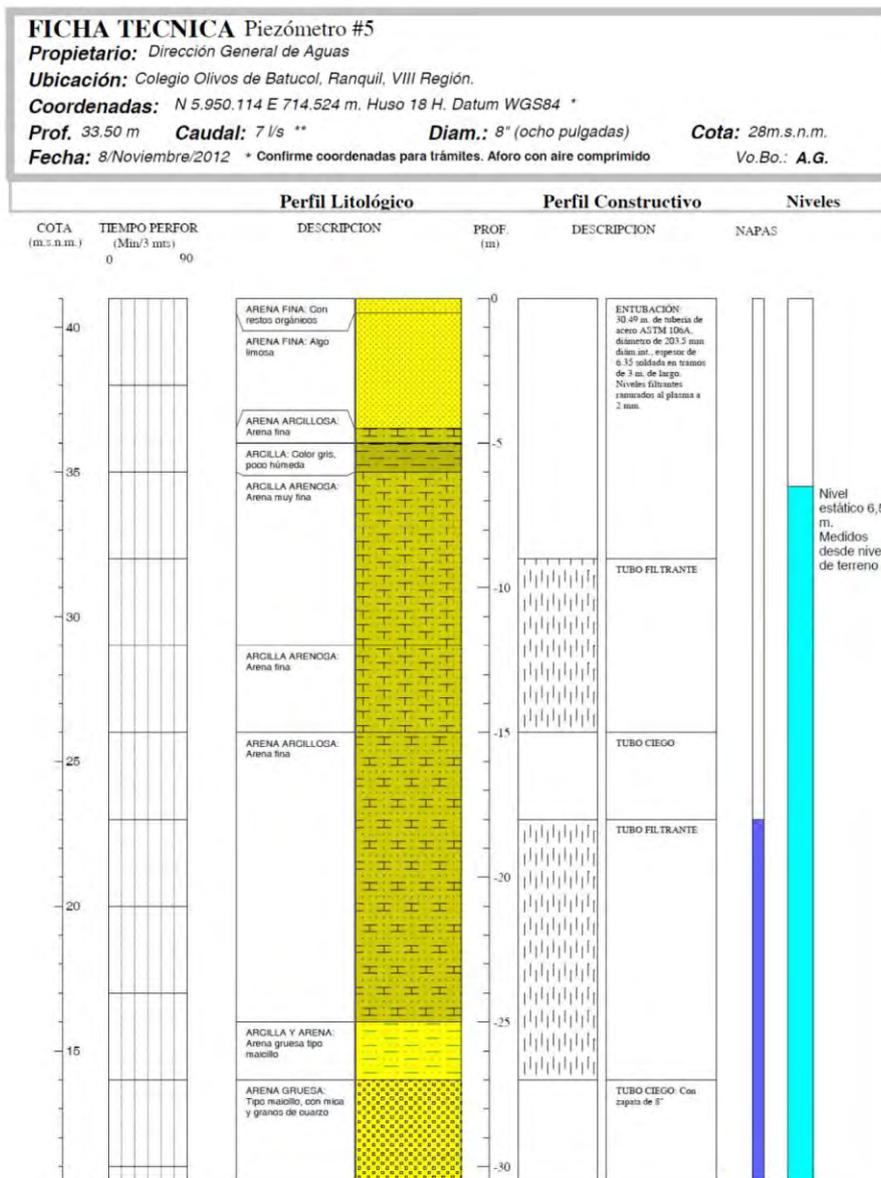


Figura 21. Columna litológica del piezómetro #5.

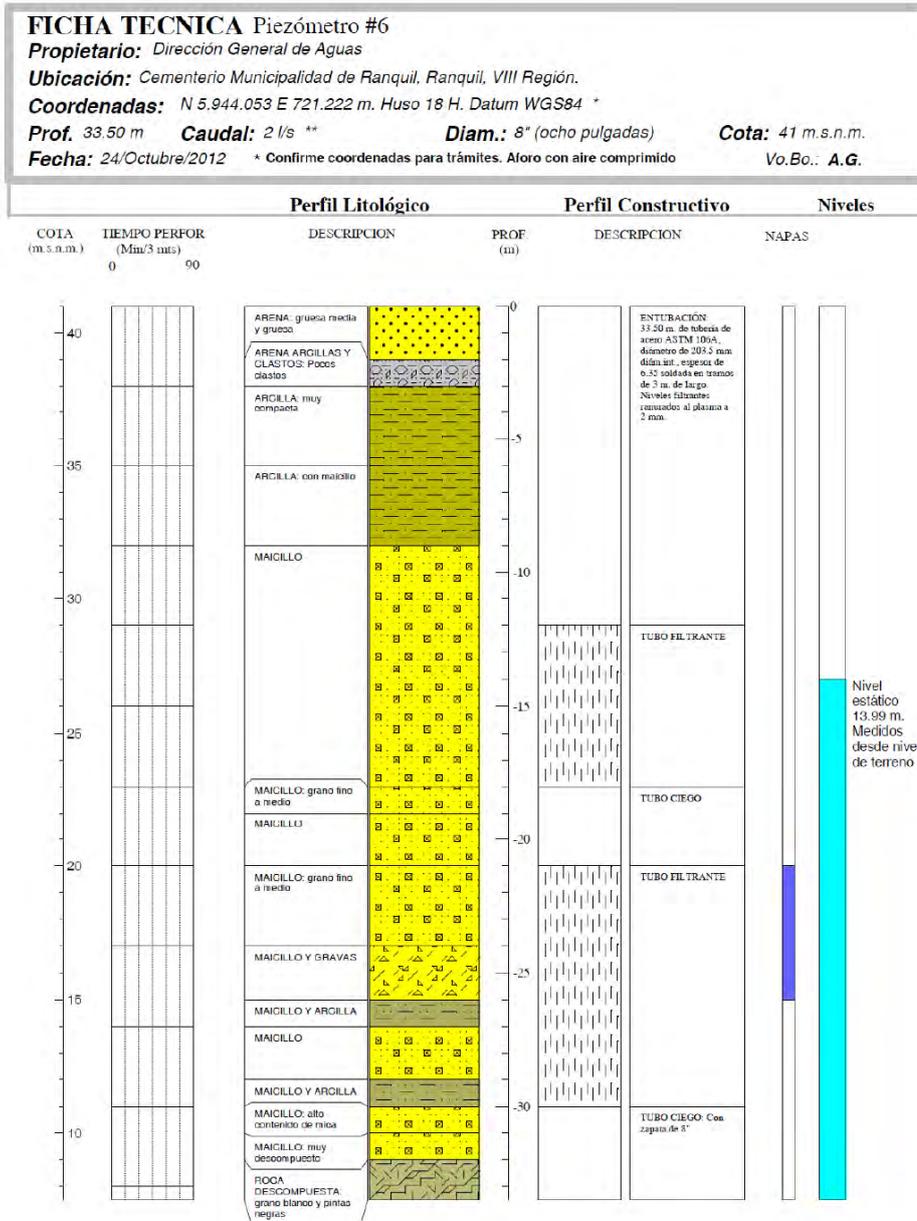


Figura 22. Columna litológica del piezómetro #6.

Los registros litológicos de los otros sondeos se incluyen en la tabla siguiente:

Tabla 15. Registros litológicos en la zona de estudio

Sondeo	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Descripción
1422	0	3	Tierra vegetal
1422	3	13,5	Ripio, bolones, arena y arcilla
1422	13,5	22,5	Grava, arcilla, arena y limo
1422	22,5	24	Arcilla
1422	24	31,5	Arcilla, limo, poca grava

Tabla 15. Registros litológicos en la zona de estudio

Sondeo	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Descripción
1422	31,5	54	Arcilla, poca arena
1422	54	81	Arena, poca arcilla
1422	81	126	Arcilla, poca arena, limo
1422	126	141	Arcilla, arena gruesa, poca grava
1422	141	144	Arena, grava, poco limo
1422	144	150	Arcilla, arena gruesa
1770	0	0,8	Tierra vegetal
1770	0,8	5	Franco limoso
1770	5	18	Grava y arena gruesa
1770	18	24	Grava y arena fina
1770	24	30	50 % arena y 50 % arcilla
1773	0	4	Arena fina, arcilla
1773	4	10	Arcilla, arena
1773	10	15	Arena, arcilla, tosca
1773	15	20	Arena, arcilla
1773	20	21,6	Arena gruesa, tosca
1773	21,6	28	Arena gruesa, grava, arcilla
1773	28	36	Arcilla, arena fina
1773	36	41	- desconocido
1773	41	45	Arcilla, arena gruesa
1773	45	48	- desconocido
1773	48	50	- desconocido
1773	50	52	Arena gruesa, arcilla
1773	52	58	Arena gruesa, grava, arcilla
1773	58	60	Arena gruesa, grava
1773	60	76	Arena gruesa, grava, arcilla
1773	76	78	Arena fina, arcilla
1773	78	80	Arcilla, arena fina
2501	0	0,3	Tierra vegetal
2501	0,3	7	Arena muy fina, limo arcilloso
2501	7	8,5	Arena fina a gruesa
2501	8,5	13	Arena fina a gruesa, grava fina a media, arcilla
2501	13	20,1	Arena fina, limo arcilloso
2501	20,1	23	Arena gruesa a fina, grava fina a gruesa, bolón, arcilla
2501	23	25	Grava gruesa a fina, bolón, arena gruesa
2501	25	26,5	Grava media a fina, arena fina a media, arcilla
2501	26,5	28	Arena fina a media, maicillo
2501	28	30	Arena fina a media, maicillo, material descompuesto

Tabla 15. Registros litológicos en la zona de estudio

Sondeo	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Descripción
6391	0	0,1	Tierra vegetal
6391	0,1	4	Arena fina
6391	4	6	Arena media
6391	6	11	Arena gruesa

7.4. FORMACIONES PERMEABLES

Atendiendo a la estratigrafía de la zona de estudio, se pueden agrupar las distintas formaciones en función de su comportamiento hidrogeológico:

Basamento: Corresponde a la formación de muy baja permeabilidad sobre la cual se depositan los materiales sedimentarios de edad Cuaternario.

Se incluyen en esta unidad el Basamento Intrusivo y el Basamento Metamórfico.

Desde el punto de vista hidrogeológico se consideran prácticamente impermeables, aunque debido a la alta meteorización superficial a la que se exponen pueden actuar como acuíferos superficiales de poco espesor y bajo rendimiento hidráulico.

Depósitos de baja permeabilidad: Estos depósitos se asimilan a la formación Mininco, ya que esta formación la constituyen en su mayor parte materiales consolidados.

Depósitos de alta permeabilidad: Esta formación constituye el acuífero principal, ya que es el que mejores características hidráulicas posee. Está formado por materiales detríticos no consolidados de origen mayoritariamente fluvial así como los depósitos de terrazas marinas.

8. ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

8.1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de servir de apoyo para la caracterización geológica y geométrica del acuífero Itata Bajo, se ha realizado un estudio de prospección geofísica con el método eléctrico de Sondeos Eléctricos Verticales.

En dicho estudio se ha localizado la profundidad del basamento rocoso del acuífero en los distintos puntos investigados, además de detectar distintas formaciones geológicas que conforman el relleno sedimentario suprayacente.

8.2. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Con anterioridad a la planificación de la campaña de prospección geofísica se hizo un breve análisis del tipo de acuífero a investigar, así como de la realidad física del terreno, con el objetivo de elegir el método de prospección más adecuado tanto a los materiales a investigar como el de mejor viabilidad en el proceso de ejecución.

La geología del acuífero Itata Bajo, tal y como se ha mencionado anteriormente, corresponde a un relleno sedimentario no consolidado que descansa sobre un basamento intrusivo y metamórfico. Si se induce una corriente eléctrica en estos materiales, se observan fuertes contrastes en la respuesta obtenida, debido a las características tan particulares de cada uno de los mismos. Por este motivo resulta apropiado la utilización de un método de prospección geofísica de tipo eléctrico.

Por otro lado, los métodos eléctricos son capaces de detectar la posición de la napa (contacto zona no saturada-zona saturada), lo cual confiere una mayor información al conjunto de datos a emplear en el modelo hidrogeológico.

De forma adicional, al tratarse de un acuífero costero, el empleo de un método eléctrico permitiría la posibilidad de definir la cuña de intrusión salina.

La presencia de tendidos eléctricos por gran parte de la zona de estudio y el espacio útil para la realización de las prospecciones desaconsejaron la utilización de métodos electromagnéticos (TEM), que también dan relación de resistividades eléctricas.

Aunque la tomografía eléctrica resulta un método eléctrico con alta capacidad de definición para los materiales de la zona de estudio, se desestimó debido a las dimensiones de la zona de estudio, que hacía que una campaña de tomografía eléctrica fuese totalmente inviable para el objeto del presente estudio.

El método que mejor reúne los requisitos para las presentes condiciones era el de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), cuyo registro de datos en terreno resulta confiable, motivo por el cual fue el elegido para la realización de la presente campaña de prospección geofísica.

8.3. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

Los sondeos eléctricos verticales SEVs son una técnica geofísica perteneciente al grupo de los métodos eléctricos en corriente continua (geoelectrica). Consiste fundamentalmente en introducir corriente eléctrica a través de dos electrodos de corriente (A y B) y registrar la diferencia de potencial en un punto mediante dos electrodos de potencial (M y N), como se muestra en la Figura 23.

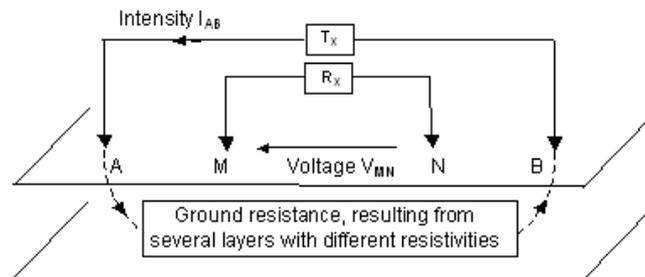


Figura 23. Distribución de cuadripolos para un dispositivo simétrico de prospección geoelectrica.

En la realización de los SEVs los electrodos de corriente se van desplazando registrándose medidas de intensidad I y diferencia de potencial V para cada

una de las posiciones con las que se calcularán las resistividades aparentes de los materiales (ver Figura 24).

APPARENT RESISTIVITY = (coefficient) x voltage / intensity

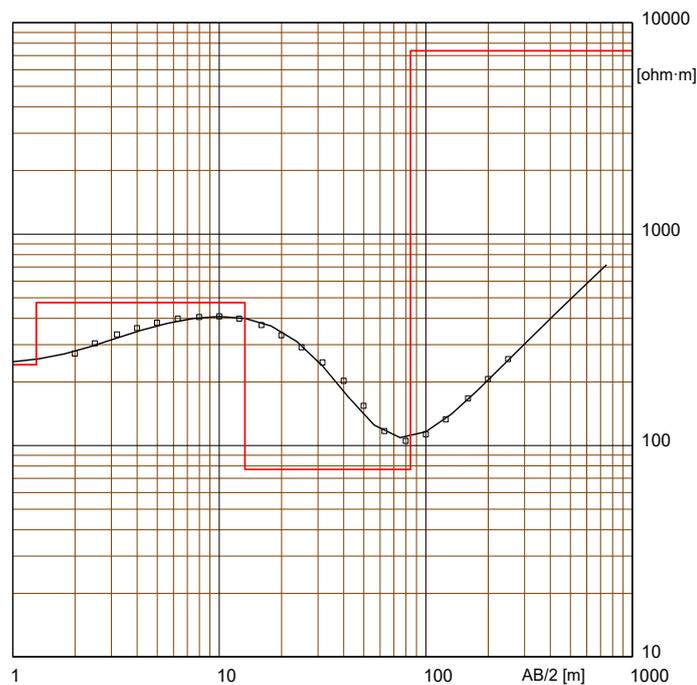
$$\text{Rho} = K \times V_{MN} / I_{AB}$$

$$K = 2 \times \text{Pi} / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)$$

Units: Rho (ohm.m), K (m), V_{MN} (mV), I_{AB} (mA)

Figura 24. Relación de la resistividad aparente con el posicionamiento del cuadripolo y los valores obtenidos de intensidad I y diferencia de potencial V.

Finalmente se obtienen una gráfica resistividad aparente – distancia AB a partir de la cual se definirá el número de capas, junto con sus profundidades, espesores y valores de resistividad real de los materiales (ver Figura 25).



Modelo	Resistividad	Espesor	Profundidad
	[ohm.m]	[m]	[m]
	241	1.3	
	475	12	1.3
	77	71	13
	7358		84

Figura 25. Inversión de sondeo eléctrico vertical SEV.

El equipo geofísico de prospección geoelectrica empleado ha sido un Syscal R1 Plus Switch 72 marca Iris Instruments que posee las siguientes características:

- Sistema compacto de transmisor, receptor y generador en el mismo aparato.
- Voltajes de salida de hasta 600V.
- Potencias de salida de 200W.
- Intensidades máximas de hasta 2.5 A.
- Precisión de medidas de voltaje e intensidad de 0.5%.
- Compensación automática del potencial espontáneo.
- Control de ruidos mediante selección de stacks (entre 1 y 255).
- Medidas de polarización inducida y cargabilidad.
- Memoria interna para 2700 medidas.
- Baterías internas recargables de 12V. Posibilidad de conexión a batería externa.
- Sistema automático de elección de electrodos y rangos de medida mediante microprocesador.
- Etc.

Además, se necesitaron diversos accesorios para la realización de los SEVs: cables específicos para sondeos eléctricos verticales largos (AB 1000 metros), electrodos o picas, mazas, baterías, etc.

Para el proceso de procesado e inversión de datos se empleó el programa WinSEV 6.0 de Geo2X.



Figura 26. Equipo geoelectrico Syscal R1 Plus SW72 (Iris Instruments).

8.4. CAMPAÑA DE TERRENO

Se realizó un total de 45 sondeos eléctricos verticales (SEVs) con AB comprendidos entre 400 y 1000 metros (dependiendo de la disponibilidad espacial y de la detección o no del basamento). Los SEVs se midieron con dispositivo simétrico tipo Schlumberger y diez medidas por ciclo decimal. Para obtener buenas lecturas se emplearon separaciones MN de 1m, 10m y 50m.

La ubicación de los sondeos eléctricos se muestra en el plano 1.

En la tabla siguiente se indica la ubicación de cada SEV en coordenadas UTM WGS84 huso 19S, la cota, longitud AB y orientación de las alas.

Tabla 16. Información sobre los SEVs realizados durante el mes de Julio de 2013.

ENSAYO	X UTM	Y UTM	Z (msnm)	LONGITUD AB (m)	ORIENTACIÓN
SEV-1	707847	5958123	13,5	500	SE-NW
SEV-2	706839	5962147	31,0	632	S-N
SEV-3	708673	5958478	20,0	632	SE-NW
SEV-4	707965	5959530	32,5	500	SE-NW
SEV-5	710736	5955524	37,0	632	SE-NW
SEV-6	713312	5953344	21,5	500	SE-NW
SEV-7	716507	5949685	25,0	632	E-W
SEV-8	705006	5958207	21,0	400	SW-NE
SEV-9	704183	5957216	28,0	500	SW-NE
SEV-10	691802	5972573	9,0	500	SSW-NNE
SEV-11	693041	5972033	12,0	500	ESE-WNW
SEV-12	697513	5970567	17,0	1000	SE-NW
SEV-13	703954	5968082	20,0	632	SSE-NNW
SEV-14	707197	5965463	17,0	500	E-W
SEV-15	707179	5964357	13,5	632	S-N
SEV-16	691207	5967854	9,0	800	S-N
SEV-17	691033	5969959	7,0	800	S-N
SEV-18	692285	5969294	12,0	632	E-W
SEV-19	693442	5969861	14,0	800	SW-NE
SEV-20	691979	5968485	10,0	800	SSW-NNE
SEV-21	694605	5970523	11,0	800	E-W
SEV-22	698142	5969162	15,0	800	ESE-WNW
SEV-23	702081	5968581	12,0	400	E-W
SEV-24	702246	5968272	15,0	632	ENE-WSW

Tabla 16. Información sobre los SEVs realizados durante el mes de Julio de 2013.

ENSAYO	X UTM	Y UTM	Z (msnm)	LONGITUD AB (m)	ORIENTACIÓN
SEV-25	706002	5963759	15,0	500	S-N
SEV-26	706168	5960399	11,0	500	SW-NE
SEV-27	716193	5954154	34,5	800	ESE-WNW
SEV-28	716911	5950335	25,0	632	SW-NE
SEV-29	717197	5952176	95,0	1000	SE-NW
SEV-30	720140	5950178	80,0	632	S-N
SEV-31	720226	5947752	87,0	632	E-W
SEV-32	726970	5942818	25,0	500	ESE-WNW
SEV-33	723592	5946584	56,5	800	E-W
SEV-34	728999	5942553	25,0	1000	SW-NE
SEV-35	730994	5943386	36,0	632	SW-NE
SEV-36	728836	5941355	29,0	1000	ESE-WNW
SEV-37	730497	5941184	30,0	1000	E-W
SEV-38	729637	5939922	52,0	800	SSW-NNE
SEV-39	727373	5938104	31,0	800	S-N
SEV-40	718141	5944451	35,0	632	ESE-WNW
SEV-41	718759	5945830	38,0	632	ESE-WNW
SEV-42	721905	5944111	42,0	500	ENE-WSW
SEV-43	721146	5945538	30,0	500	SE-NW
SEV-44	723223	5944445	37,0	632	SE-NW
SEV-45	725989	5941727	40,0	800	SE-NW

La ubicación y distribución de las investigaciones se realizó tratando de cubrir la totalidad del acuífero a estudiar y con la finalidad de poder realizar perfiles transversales y longitudinales del acuífero.

Se prestó especial atención a la ubicación de investigaciones tanto a la zona de inicio del modelo, aguas arriba, como a la zona de desembocadura, ya que para la construcción de un modelo numérico resulta de especial interés una correcta definición geométrica del acuífero en límites abiertos.

La realización del trabajo de terreno se llevó a cabo atendiendo al siguiente procedimiento:

- Posicionamiento del SEV. Se sitúa el centro del dispositivo mediante una estaca y se define la dirección de ambas alas evitándose, en la medida de lo posible, cambios laterales y desniveles topográficos.

- Colocación de los distintos MN y primera posición del AB en campo. Se clavan los distintos MN y el AB en su primera posición asegurándose que presentan buenas resistencias de contacto.
- Lecturas según la secuencia de medidas planificada. Se realizan lecturas para los distintos AB con sus correspondientes MN asegurando su buena calidad (tiempos largos de medida con varias repeticiones por medida, buen factor de calidad Q y repeticiones regulares para corroborar la bondad de las mismas) y manteniendo un control del gráfico del SEV. En caso de lecturas bajas de diferencia de potencial se mejorará la inyección clavando más los electrodos y/o regándolos con agua salada.
- Control de posibles fugas. Control regular de posibles fugas en los electrodos de corriente mediante el seguimiento del gráfico y medidas prueba.
- Solape de los distintos MN. Los solapes para las distintas separaciones MN se realizan en dos medidas para comprobar su bondad y poder hacer una buena corrección de los datos obtenidos.

El trabajo de campo se desarrolló dentro de lo previsto. Los niveles de ruido eléctrico en la zona de estudio fueron bastante bajos, lo que permitió, incluso en zonas de bajas lecturas de diferencia de potencial, obtener medidas geoelectricas de buena calidad. Las principales dificultades se tuvieron en la zona de desembocadura del río Itata debido a las bajísimas resistividades eléctricas asociadas a la intrusión marina, cuestión que se solventó mejorando al máximo la inyección de corriente en el terreno regando abundantemente los electrodos A y B con agua salada.

Apenas se detectaron cambios litológicos laterales, ya que las curvas de interpretación de los SEVs dibujan contornos suaves.

Un ensayo (SEV-8) quedó condicionado en cuanto a su apertura de ala por el poco espacio disponible en su ubicación, no obstante, ésta fue suficiente para detectar la profundidad del basamento rocoso.

8.5. PROCESADO E INVERSIÓN DE DATOS

Una vez realizada la toma de datos en campo se pasa al procesado e inversión de los mismos en gabinete. Dentro de esta etapa podemos destacar:

- Corrección de los valores de resistividad aparente obtenidos en campo de acuerdo con los solapes de los distintos MN.
- Modelo inicial obtenido por el programa WinSEV 6.0 sin incluir información adicional. El programa proporciona un modelo inicial simple que ajuste debidamente los datos de campo.
- Interpretación, de acuerdo a la información geológica disponible, modificando los distintos parámetros de este modelo inicial (número de capas, resistividad eléctrica de las mismas, espesores y profundidades) para obtener modelos mejorados.
- Si por cualquier motivo (contacto más profundo de lo esperado, escasa penetración del SEV,...) no se alcanzara el contacto objetivo el interpretador podrá hacer una estimación de profundidad mínima del mismo mediante la introducción en el modelo de valores de resistividad aparente esperada.

Como se ha mencionado anteriormente, los datos de terreno adquiridos resultaron no mostrar anomalías, lo que permitió obtener modelos geoeléctricos con buen ajuste. Los empalmes son coherentes, las curvas son interpretables, y no existen medidas discordantes con las tendencias, salvo algún caso puntual, en el que se observan ligeros cambios laterales que no distorsionan de manera significativa la tendencia seguida por la curva y que, por lo tanto, no tienen gran influencia en el modelo final obtenido.

8.6. RESULTADOS

La interpretación geofísica de los SEVs se presenta en la lámina 1 donde los gráficos muestran las resistividades aparentes utilizadas para el modelo (cuadrados negros), corregidas de acuerdo con los empalmes MN, el modelo final (línea roja) y la curva de ajuste de este modelo (curva en color negro).

El comportamiento geoelectrico de los distintos materiales presentes en la zona sería el siguiente:

- **Depósitos detríticos no consolidados cuaternarios:** Como norma general para estos materiales la resistividad eléctrica decrece con la disminución del tamaño de grano medio de la litología, pudiéndose dar valores, en ausencia de agua, desde pocas decenas de ohmios*metro (arcillas y limos) hasta varios cientos (arenas gruesas y gravas) o incluso algunos miles (bolos). La presencia de agua y su salinidad condiciona, principalmente en el caso de agua salada, de manera importante los valores resistividad eléctrica que presentan los materiales detríticos. De esta forma y para una misma litología, ésta será menos resistiva si tiene presencia de agua dulce y significativamente menos resistiva si alberga agua salada.
- **Depósitos Plio-Cuaternarios consolidados:** presentarán en general resistividades más altas que los depósitos no consolidados.
- **Basamento rocoso:** Los valores de resistividad eléctrica esperados para el basamento intrusivo (granodioritas y tonalitas) serán mucho más altos que el de los materiales suprayacentes (detríticos no consolidados) mientras que el del metamórfico (esquistos, filitas y metaareniscas) será sensiblemente inferior.

Algunos de estos valores han sido corroborados con la columna del piezómetro #6 que se encuentra a unos 600 metros del SEV n° 42, relativamente cerca y a cota similar (42 msnm). Dicha correlación se muestra en la figura siguiente:

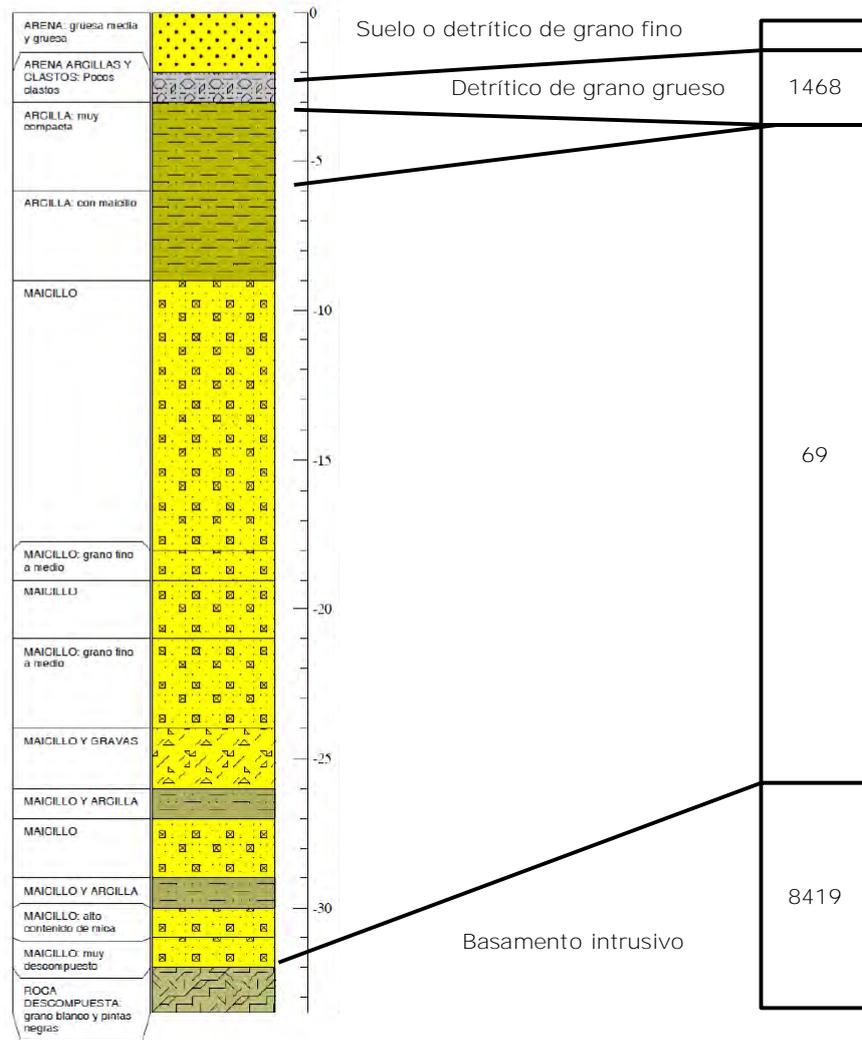


Figura 27. Correlación entre piezómetro #6 y SEV n° 42.

Respecto al piezómetro #5, éste se encuentra a 2 km del SEV más cercano, y no atraviesa el basamento, por lo que no se puede establecer una correlación fiable con los materiales atravesados.

Por otro lado, también se ha realizado una correlación de la columna del sondaje 2501 con los SEV 43 y 44, cuya disposición se presenta en la figura siguiente:

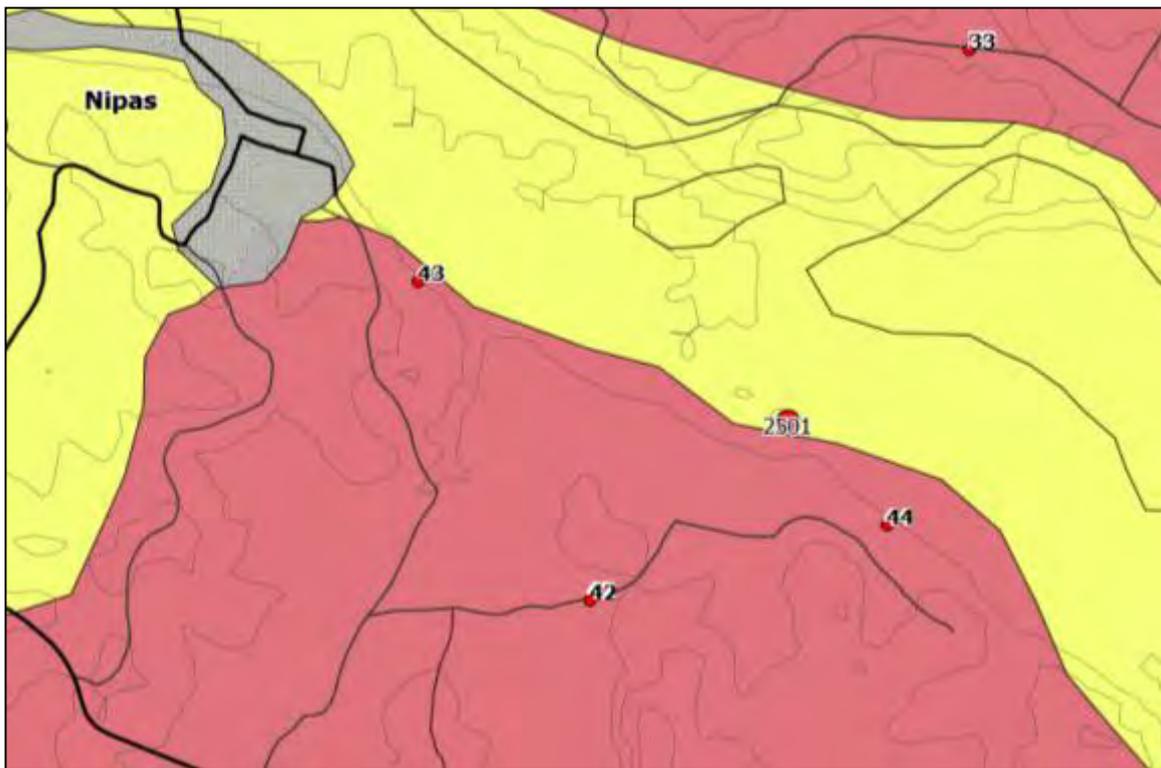


Figura 28. Ubicación de los SEV 43 y 44 y del sondaje 2501.

Dicha correlación se presenta a continuación:

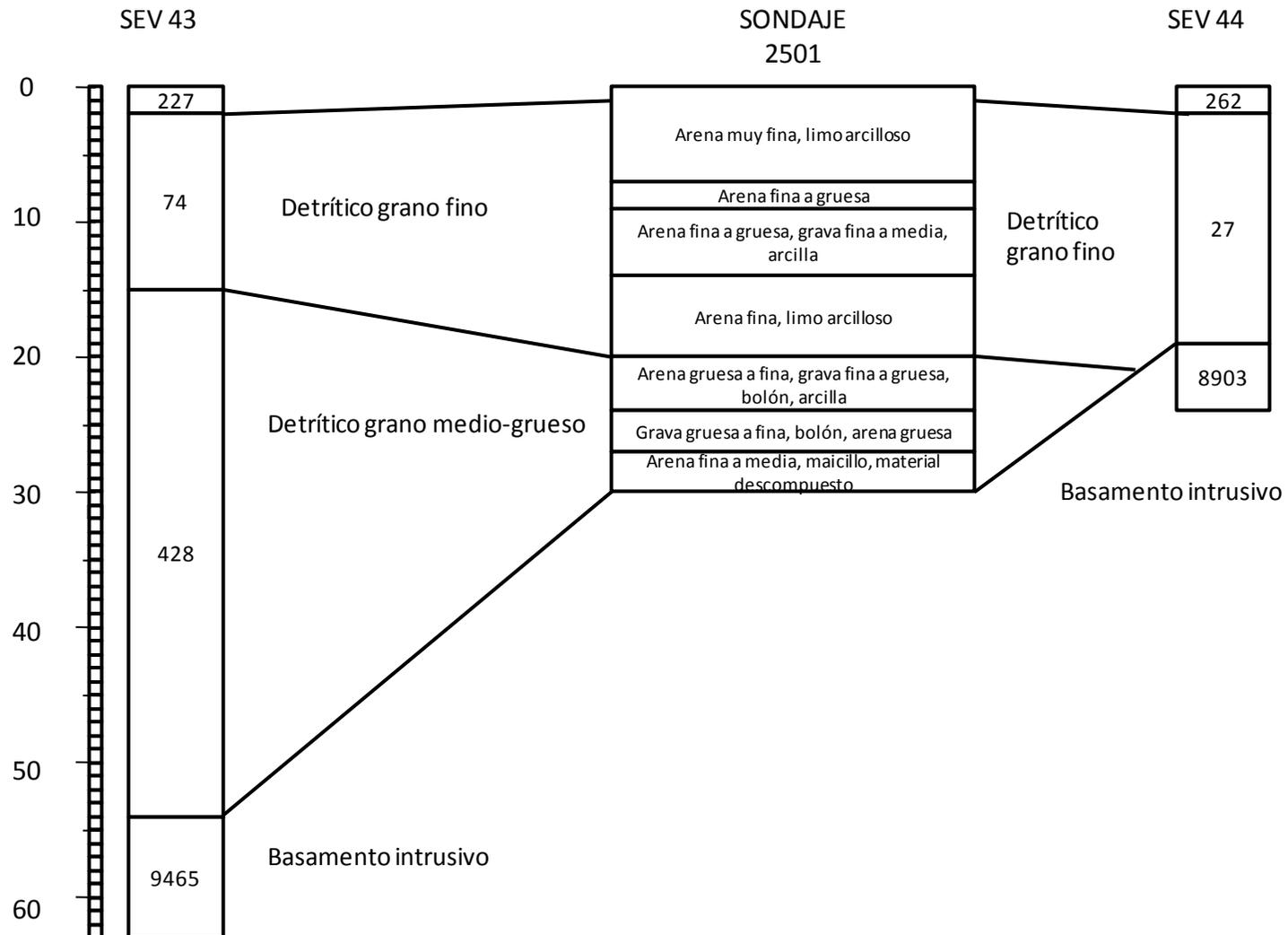


Figura 29. Correlación entre los SEV 43 y 44 y el sondaje 2501.

Como se observa en la correlación realizada, los materiales detríticos de grano fino corresponden a resistividades bajas frente a los depósitos de grano grueso cuya resistividad es superior.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para los 45 SEVs realizados en este estudio. En las tablas de resultados se describen las capas detectadas con su resistividad eléctrica (ohm*m), espesores (m), cotas (m.s.n.m.) y atribución geológica.

En el presente informe no se realizan las atribuciones geológicas respecto a las resistividades, salvo algunas muy claras que reflejan el basamento, ya que falta contrastar esta información con la de columnas de sondajes existentes y recopilación de trabajo de terreno actualmente en ejecución.

Tabla 17. Resultados de la campaña geofísica.

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
1	707847	5958123	13,5	500,0	0,0	1,3	1,3	241	
					1,3	13,0	11,7	475	
					13,0	84,0	71,0	77	
					84,0			7.358	Basamento intrusivo
2	706839	5962147	31,0	632,0	0,0	1,0	1,0	324	
					1,0	19,0	18,0	906	
					19,0	37,0	18,0	450	
					37,0	126,0	89,0	67	
					126,0			8.716	Basamento intrusivo
3	708673	5958478	20,0	632,0	0,0	1,7	1,7	589	
					1,7	15,0	13,3	204	
					15,0	60,0	45,0	57	
					60,0			8.900	Basamento intrusivo
4	707965	5959530	32,5	500,0	0,0	1,0	1,0	3.457	
					1,0	2,3	1,4	989	
					2,3	11,0	8,7	1.303	
					11,0	13,0	2,0	695	
					13,0	164,0	151,0	362	
					164,0			6.875	Basamento intrusivo

Tabla 17. Resultados de la campaña geofísica.

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
5	710736	5955524	37,0	632,0	0,0	4,1	4,1	987	
					4,1	17,0	12,9	1.159	
					17,0	86,0	69,0	146	
					86,0	115,0	29,0	402	
					115,0			7.806	Basamento intrusivo
6	713312	5953344	21,5	500,0	0,0	2,0	2,0	121	
					2,0	2,8	0,8	95	
					2,8	10,0	7,2	394	
					10,0	54,0	44,0	80	
					54,0			8.500	Basamento intrusivo
7	716507	5949685	25,0	632,0	0,0	0,5	0,5	274	
					0,5	2,1	1,7	1.528	
					2,1	26,0	23,9	529	
					26,0	56,0	30,0	102	
					56,0			8.659	Basamento intrusivo
8	705006	5958207	21,0	400,0	0,0	2,4	2,4	216	
					2,4	6,9	4,5	48	
					6,9	49,0	42,1	58	
					49,0			7.633	Basamento intrusivo
9	704183	5957216	28,0	500,0	0,0	2,8	2,8	181	
					2,8	21,0	18,2	35	
					21,0			8.327	Basamento intrusivo
10	691802	5972573	9,0	500,0	0,0	1,5	1,5	60	
					1,5	5,1	3,6	102	
					5,1	6,3	1,2	39	
					6,3	32,0	25,7	3	
					32,0			71	
11	693041	5972033	12,0	500,0	0,0	0,9	0,9	109	
					0,9	2,4	1,6	17	
					2,4	3,0	0,6	56	
					3,0			166	Basamento metamórfico
12	697513	5970567	17,0	1000,0	0,0	4,7	4,7	1.098	
					4,7	55,0	50,3	151	
					55,0	278,0	223,0	94	Basamento metamórfico
					278,0			2.409	Basamento intrusivo
13	703954	5968082	20,0	632,0	0,0	0,6	0,6	658	

Tabla 17. Resultados de la campaña geofísica.

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
					0,6	5,7	5,1	215	
					5,7	20,0	14,3	55	
					20,0	128,0	108,0	228	
					128,0			9.597	Basamento intrusivo
14	707197	5965463	17,0	1000,0	0,0	0,9	0,9	214	
					0,9	2,7	1,8	923	
					2,7	6,8	4,1	238	
					6,8	18,0	11,2	313	
					18,0	91,0	73,0	25	
					91,0			8.653	Basamento intrusivo
15	707179	5964357	13,5	500,0	0,0	0,8	0,8	781	
					0,8	21,0	20,2	227	
					21,0	64,0	43,0	39	
					64,0	77,0	13,0	139	
					77,0			7.486	Basamento intrusivo
16	691207	5967854	9,0	500,0	0,0	1,3	1,3	525	
					1,3	5,6	4,3	28	
					5,6	15,0	9,4	130	
					15,0	61,0	46,0	21	
					61,0	78,0	17,0	46	
					78,0			112	Basamento metamórfico
17	691033	5969959	7,0	800,0	0,0	1,7	1,7	1.298	
					1,7	187,0	185,3	4	
					187,0			80	
18	692285	5969294	12,0	500,0	0,0	1,4	1,4	528	
					1,4	46,0	44,6	132	
					46,0			25	
19	693442	5969861	14,0	800,0	0,0	1,3	1,3	63	
					1,3	8,4	7,1	775	
					8,4			47	
20	691979	5968485	10,0	800,0	0,0	4,4	4,4	55	
					4,4	17,0	12,6	127	
					17,0	129,0	112,0	19	
					129,0			193	Basamento metamórfico
21	694605	5970523	11,0	800,0	0,0	4,9	4,9	234	
					4,9	15,0	10,1	105	
					15,0	23,0	8,0	158	
					23,0	143,0	120,0	20	

Tabla 17. Resultados de la campaña geofísica.

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
					143,0			114	Basamento metamórfico
22	698142	5969162	15,0	800,0	0,0	1,5	1,5	73	
					1,5	9,2	7,7	636	
					9,2	60,0	50,8	15	
					60,0			8.358	Basamento intrusivo
23	702081	5968581	12,0	500,0	0,0	1,7	1,7	6.126	
					1,7	13,0	11,3	109	
					13,0	31,0	18,0	114	
					31,0	37,0	6,0	28	
					37,0			15	
24	702246	5968272	15,0	800,0	0,0	0,3	0,3	10	
					0,3	1,4	1,1	634	
					1,4	6,1	4,7	34	
					6,1	68,0	61,9	127	
					68,0			634	Basamento metamórfico
25	706002	5963759	15,0	800,0	0,0	6,3	6,3	53	
					6,3	76,0	69,7	135	
					76,0			10.140	Basamento intrusivo
26	706168	5960399	11,0	800,0	0,0	2,2	2,2	353	
					2,2	5,5	3,3	99	
					5,5	108,0	102,5	211	
					108,0			4.875	Basamento intrusivo
27	716193	5954154	34,5	800,0	0,0	1,6	1,6	479	
					1,6	16,0	14,4	44	
					16,0	137,0	121,0	382	
					137,0			9.242	Basamento intrusivo
28	716911	5950335	25,0	632,0	0,0	1,1	1,1	97	
					1,1	7,5	6,4	1.422	
					7,5	182,0	174,5	577	
					182,0			5.950	Basamento intrusivo
29	717197	5952176	95,0	1000,0	0,0	1,1	1,1	231	
					1,1	19,0	17,9	73	
					19,0	145,0	126,0	327	
					145,0			7.959	Basamento intrusivo
30	720140	5950178	80,0	632,0	0,0	1,4	1,4	36	
					1,4	10,0	8,6	129	

Tabla 17. Resultados de la campaña geofísica.

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
					10,0	155,0	145,0	426	
					155,0			7.219	Basamento intrusivo
31	720226	5947752	87,0	632,0	0,0	0,4	0,4	129	
					0,4	63,0	62,6	45	
					63,0	104,0	41,0	281	
					104,0			8.780	Basamento intrusivo
32	726970	5942818	25,0	632,0	0,0	0,1	0,1	62	
					0,1	2,3	2,2	1.475	
					2,3	26,0	23,7	426	
					26,0	132,0	106,0	171	
				132,0			6.250	Basamento intrusivo	
33	723592	5946584	56,5	800,0	0,0	0,3	0,3	1.748	
					0,3	9,2	8,9	21	
					9,2	41,0	31,8	78	
					41,0			8.326	Basamento intrusivo
34	728999	5942553	25,0	632,0	0,0	1,5	1,5	1.471	
					1,5	6,4	4,9	1.968	
					6,4	54,0	47,6	397	
					54,0	167,0	113,0	113	
				167,0			8.904	Basamento intrusivo	
35	730994	5943386	36,0	632,0	0,0	0,7	0,7	1.072	
					0,7	5,8	5,2	190	
					5,8	21,0	15,2	85	
					21,0			5.333	Basamento intrusivo
36	728836	5941355	29,0	1000,0	0,0	1,3	1,3	1.814	
					1,3	26,0	24,7	390	
					26,0	135,0	109,0	23	
					135,0			7.500	Basamento intrusivo
37	730497	5941184	30,0	1000,0	0,0	2,2	2,2	1.462	
					2,2	13,0	10,8	134	
					13,0	38,0	25,0	310	
					38,0	180,0	142,0	83	
					180,0	195,0	15,0	165	
			195,0			6.641	Basamento intrusivo		
38	729637	5939922	52,0	800,0	0,0	1,6	1,6	857	
					1,6	11,0	9,4	21	

Tabla 17. Resultados de la campaña geofísica.

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
					11,0			9.954	Basamento intrusivo
39	727373	5938104	31,0	632,0	0,0	1,6	1,6	522	
					1,6	9,1	7,5	963	
					9,1	118,0	108,9	232	
					118,0			4.572	Basamento intrusivo
40	718141	5944451	35,0	632,0	0,0	1,4	1,4	101	
					1,4	15,8	14,4	28	
					15,8	16,0	0,2	259	
					16,0			8.609	Basamento intrusivo
41	718759	5945830	38,0	632,0	0,0	1,2	1,2	940	
					1,2	9,3	8,1	108	
					9,3	64,0	54,7	389	
					64,0			7.523	Basamento intrusivo
42	721905	5944111	42,0	500,0	0,0	1,1	1,1	102	Tierra vegetal
					1,1	3,6	2,5	1.468	Detrítico grano grueso
					3,6	26,0	22,4	69	Detrítico grano fino
					26,0			8.419	Basamento intrusivo
43	721146	5945538	30,0	1000,0	0,0	1,6	1,6	227	Tierra vegetal
					1,6	16,0	14,4	74	Detrítico grano fino
					16,0	54,0	38,0	428	Detrítico grano grueso
					54,0			9.465	Basamento intrusivo
44	723223	5944445	37,0	632,0	0,0	0,9	0,9	262	Tierra vegetal
					0,9	19,0	18,2	27	Detrítico grano fino
					19,0			8.903	Basamento intrusivo
45	725989	5941727	40,0	800,0	0,0	1,0	1,0	199	
					1,0	3,6	2,7	49	
					3,6	47,0	43,4	164	
					47,0	89,0	42,0	69	
					89,0	113,0	24,0	158	

Tabla 17. Resultados de la campaña geofísica.

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
					113,0			8.651	Basamento intrusivo

9. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELO CONCEPTUAL

9.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO

9.1.1. FORMACIONES PERMEABLES

Atendiendo a la estratigrafía de la zona de estudio, se pueden agrupar las distintas formaciones en función de su comportamiento hidrogeológico:

Basamento: Corresponde a la formación de muy baja permeabilidad sobre la cual se depositan los materiales sedimentarios de edad Cuaternario.

Se incluyen en esta unidad el Basamento Intrusivo y el Basamento Metamórfico. Desde el punto de vista hidrogeológico se consideran prácticamente impermeables, aunque debido a la alta meteorización superficial a la que se exponen pueden actuar como acuíferos superficiales de poco espesor y bajo rendimiento hidráulico.

Depósitos de baja permeabilidad: Estos depósitos se asimilan a la formación Mininco, ya que esta formación la constituyen en su mayor parte materiales consolidados.

Depósitos de alta permeabilidad: Esta formación constituye el acuífero principal, ya que es el que mejores características hidráulicas posee. Está formado por materiales detríticos no consolidados de origen mayoritariamente fluvial, así como los depósitos de terrazas marinas.

9.1.2. GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO

9.1.2.1. TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL

El acuífero Itata Bajo discurre por un valle de suave pendiente rodeado de elevaciones montañosas.

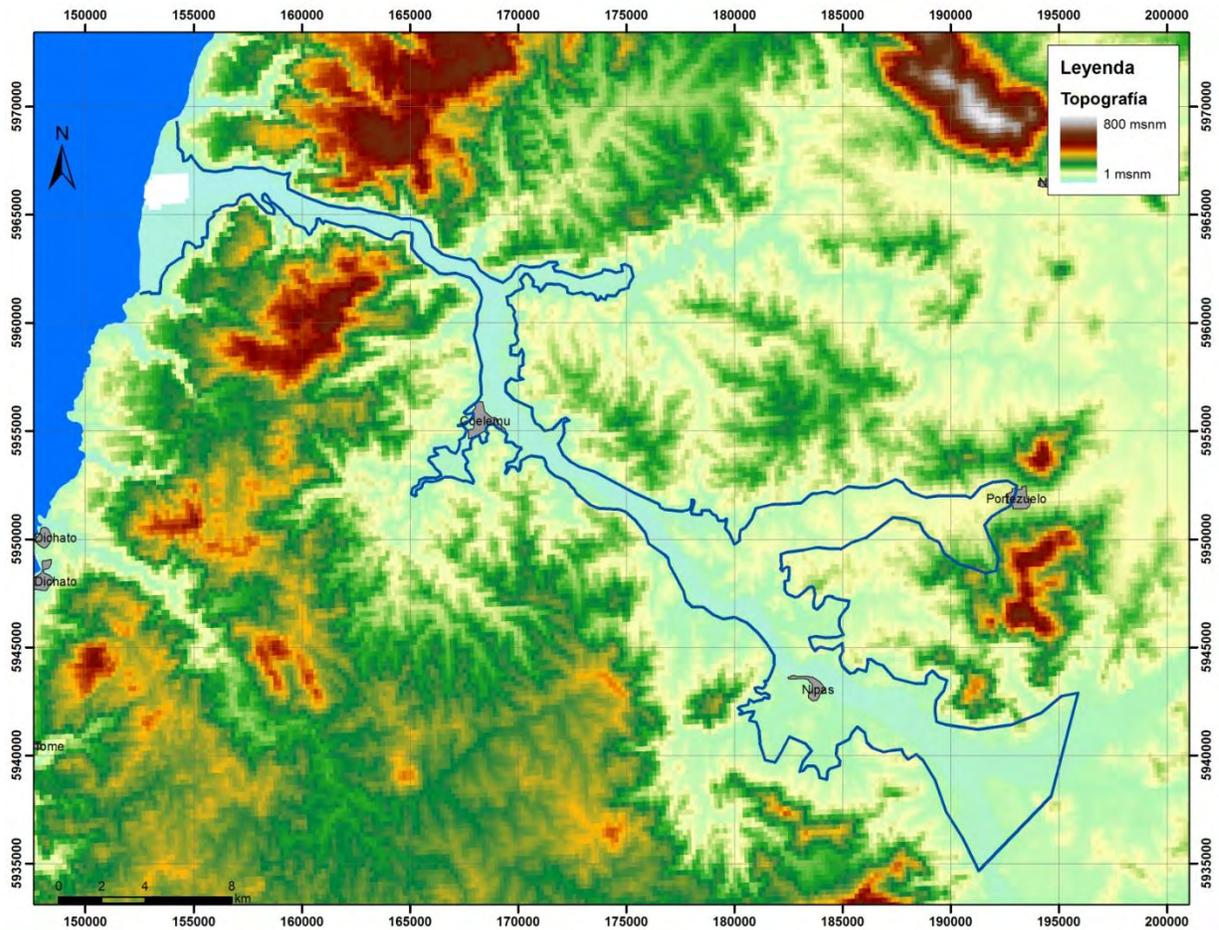


Figura 30. Topografía superficial

9.1.2.2. BASAMENTO

La determinación de la posición del basamento se ha realizado principalmente con la interpolación de perfiles geofísicos realizados, contrastados con las observaciones realizadas en terreno y la información geológica existente.

Se muestran a continuación un mapa de la cota del basamento y una serie de figuras con algunos de los perfiles hidrogeológicos realizados, en los cuales la información se sintetiza en acuífero detrítico (formación de alta y baja permeabilidad), y basamento (metamórfico e intrusivo).

Asimismo, se han incorporado a los perfiles la posición del nivel estático obtenido durante la campaña de terreno.

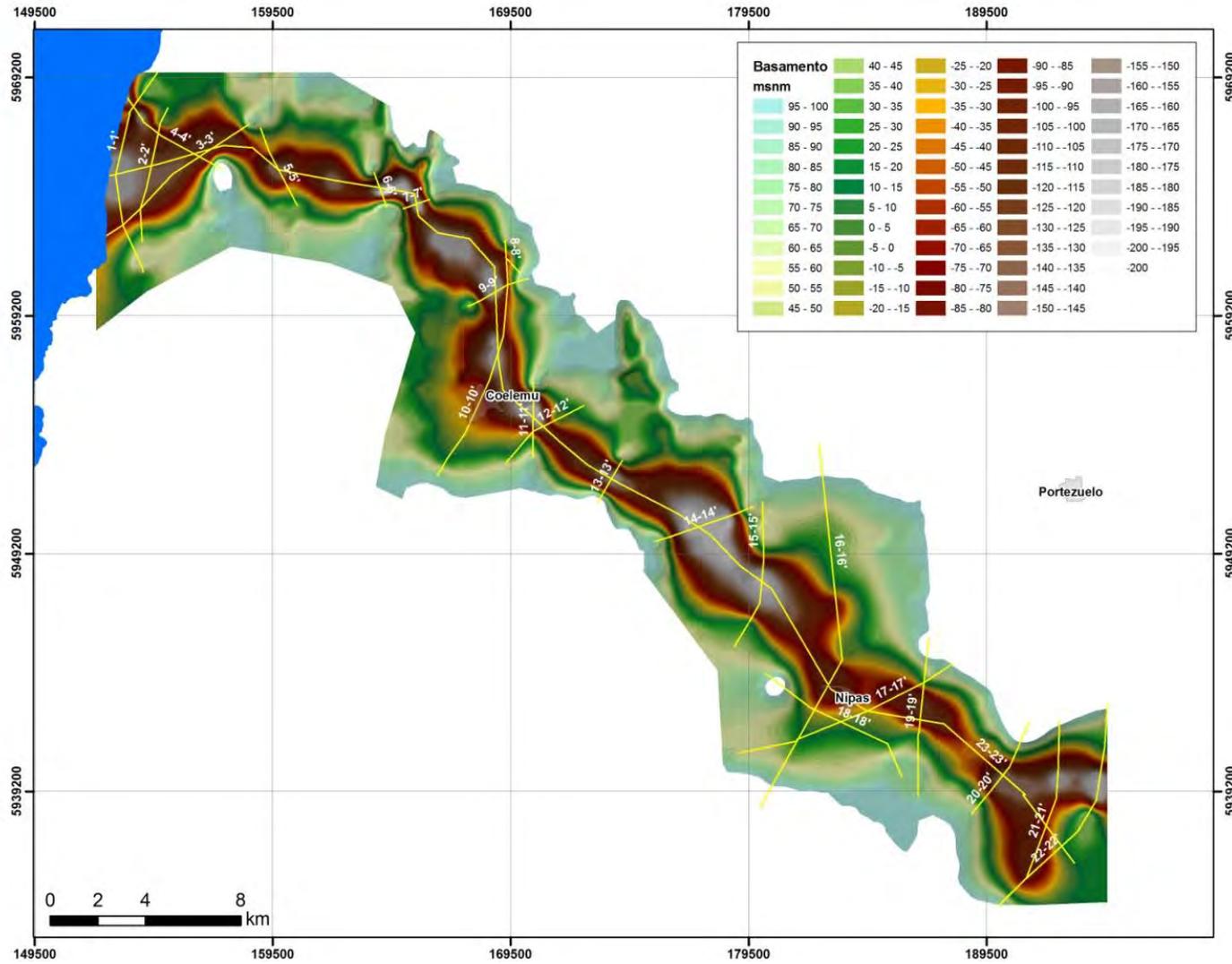


Figura 31. Basamento del acuífero Itata Bajo

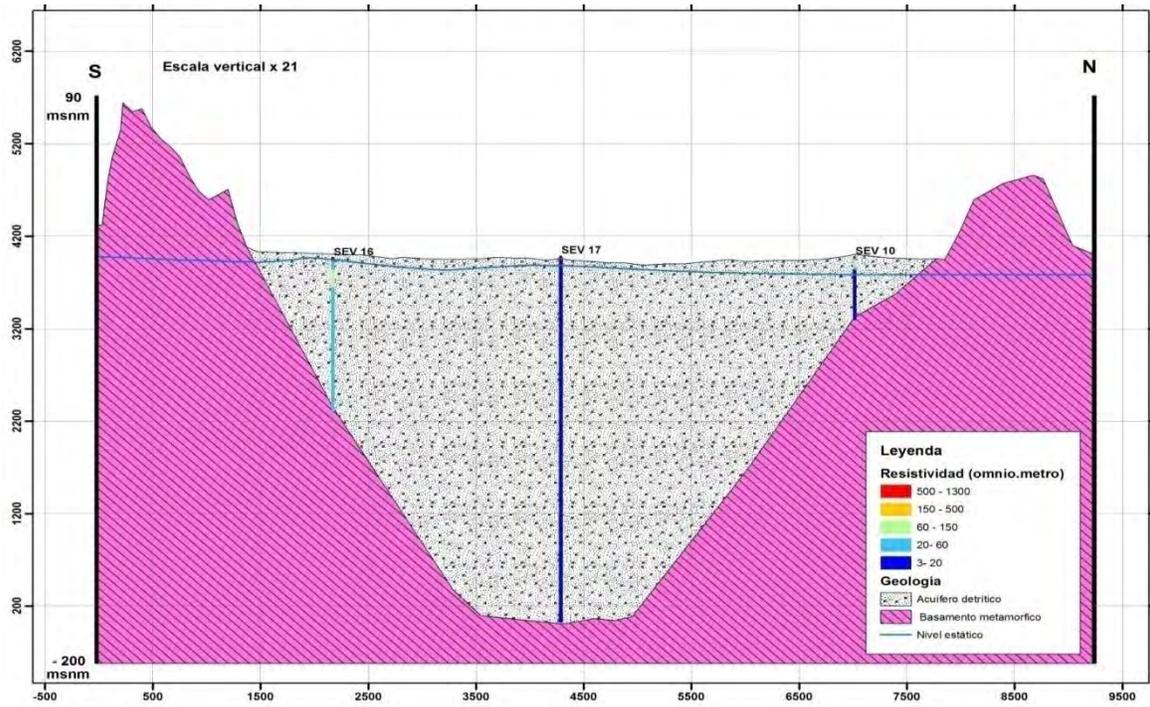


Figura 32. Perfil 1-1'

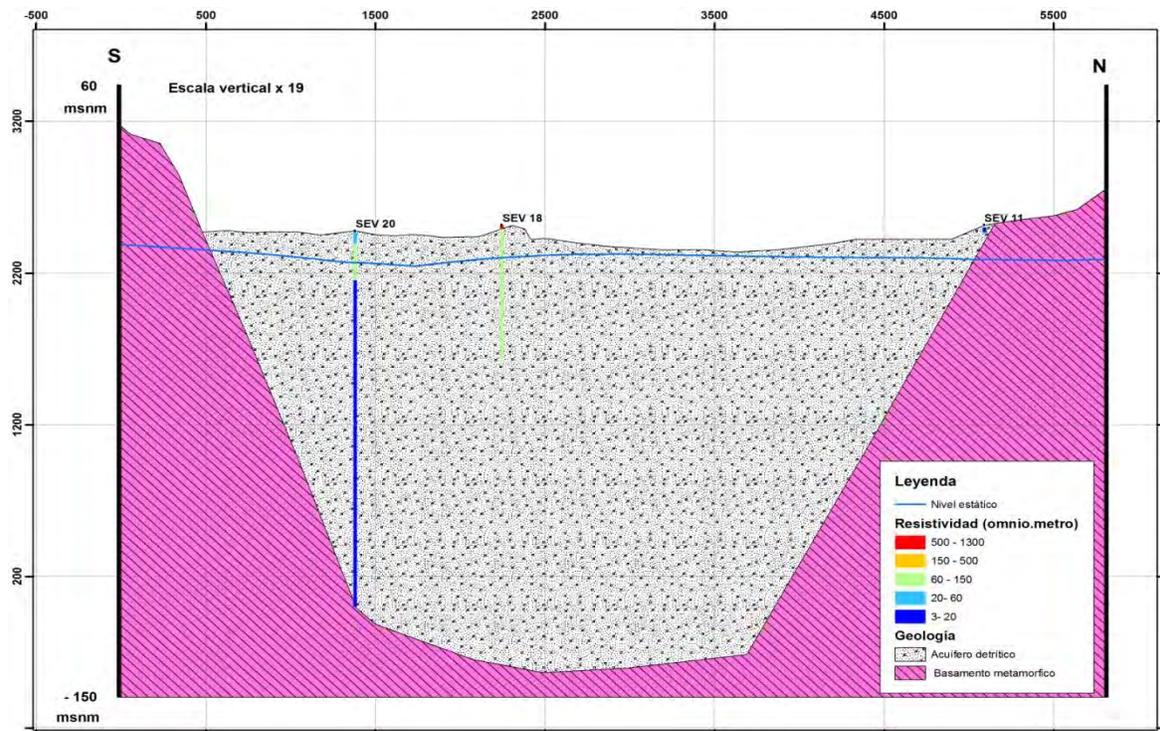
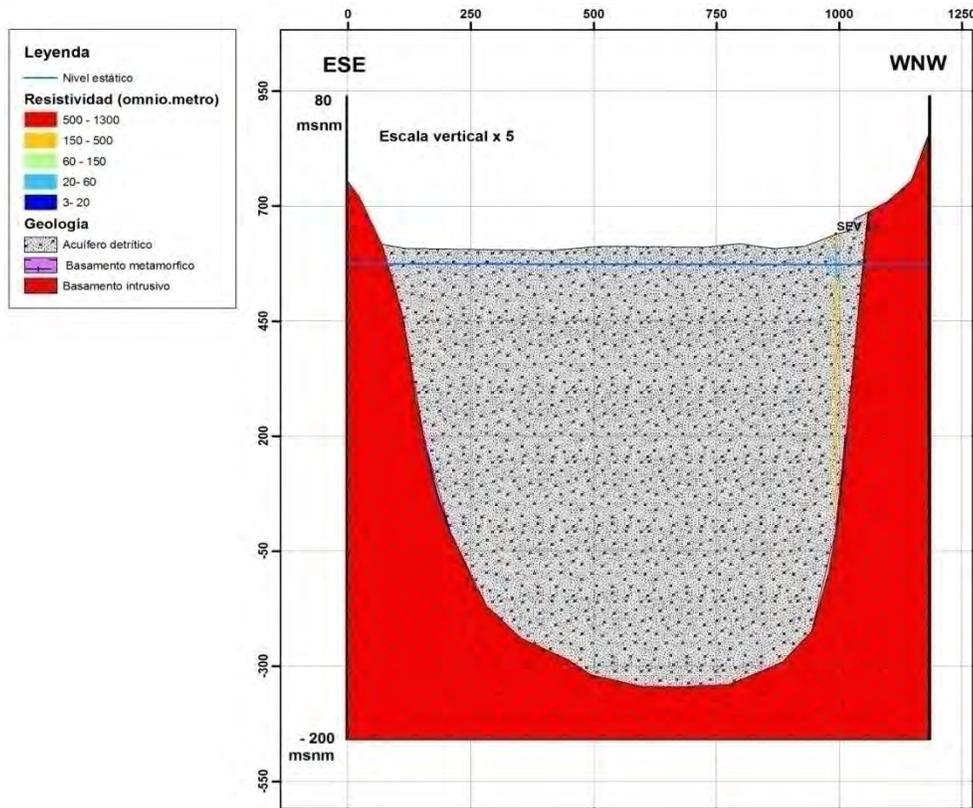
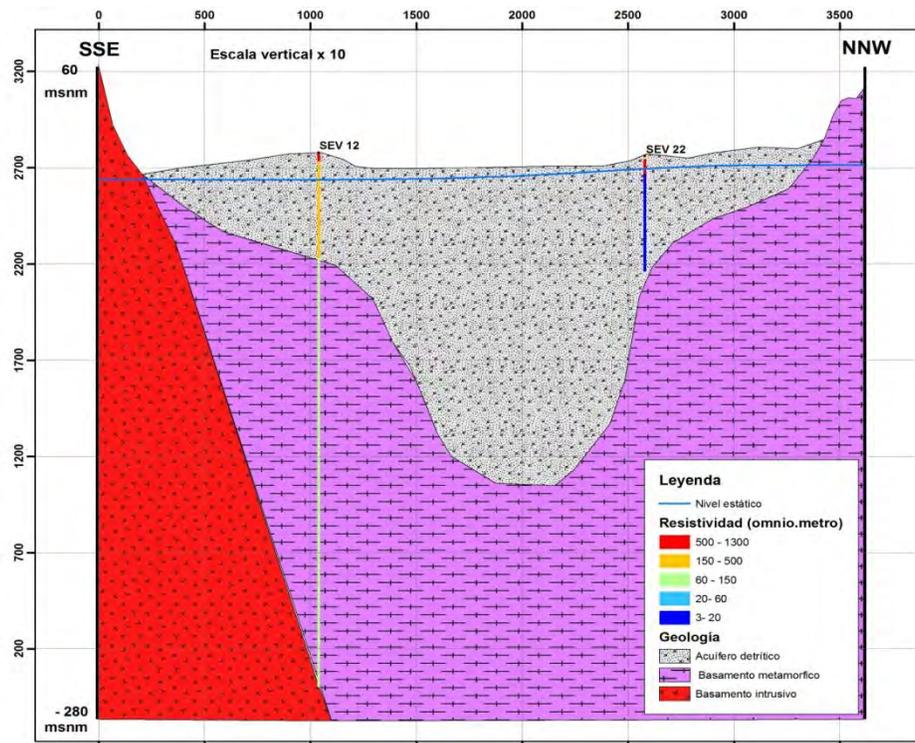


Figura 33. Perfil 2-2'



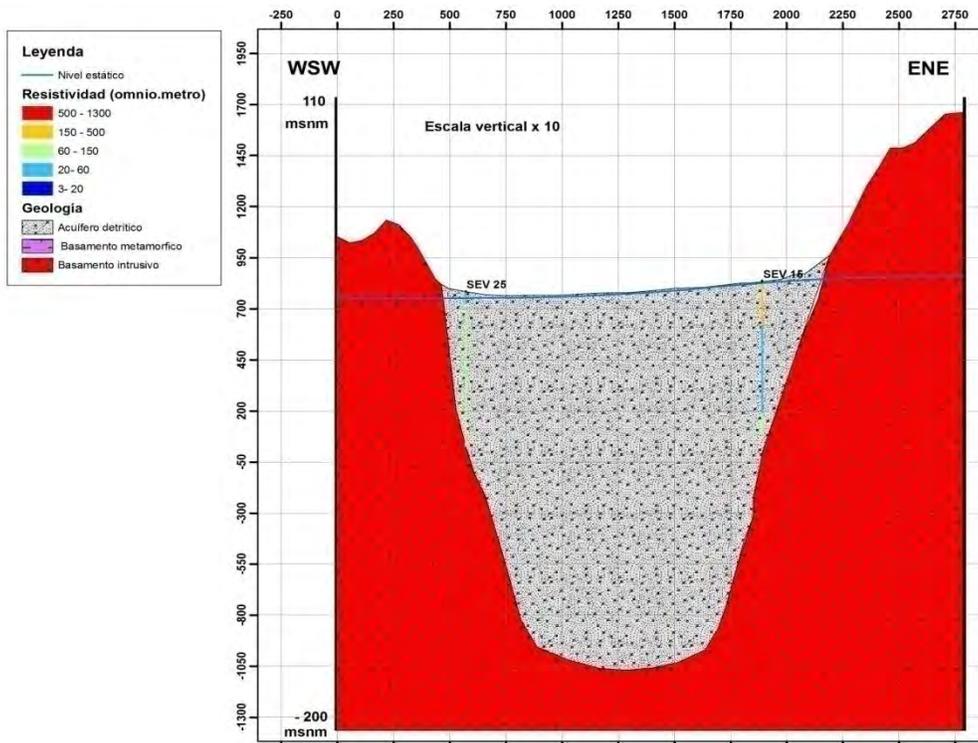


Figura 36. Perfil 9-9'

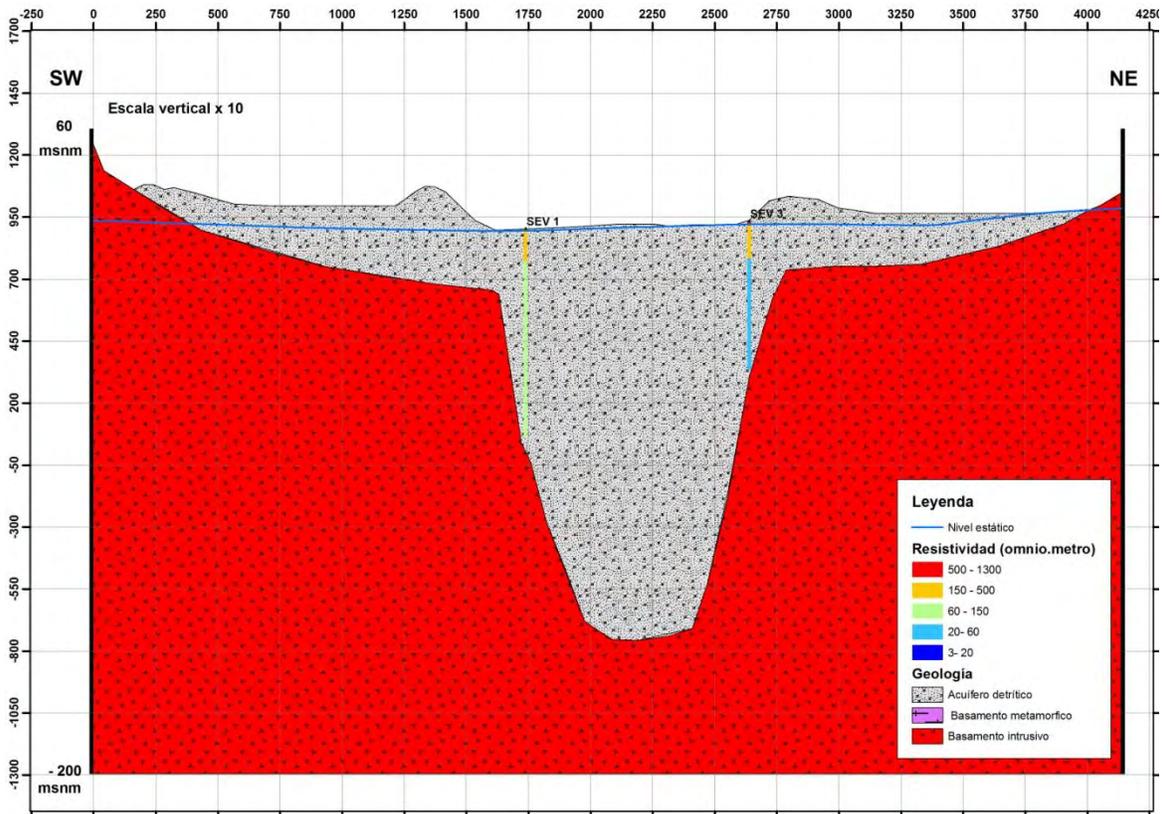


Figura 37. Perfil 12-12'

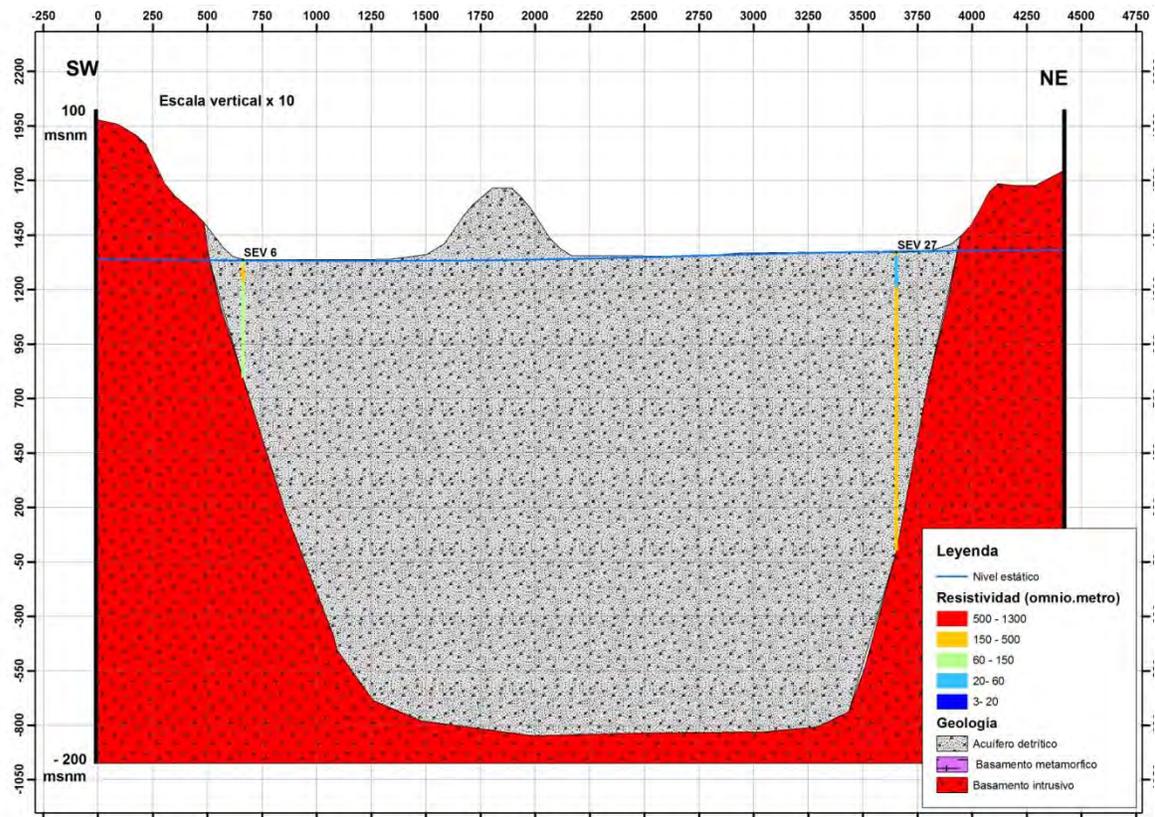


Figura 38. Perfil 14-14'

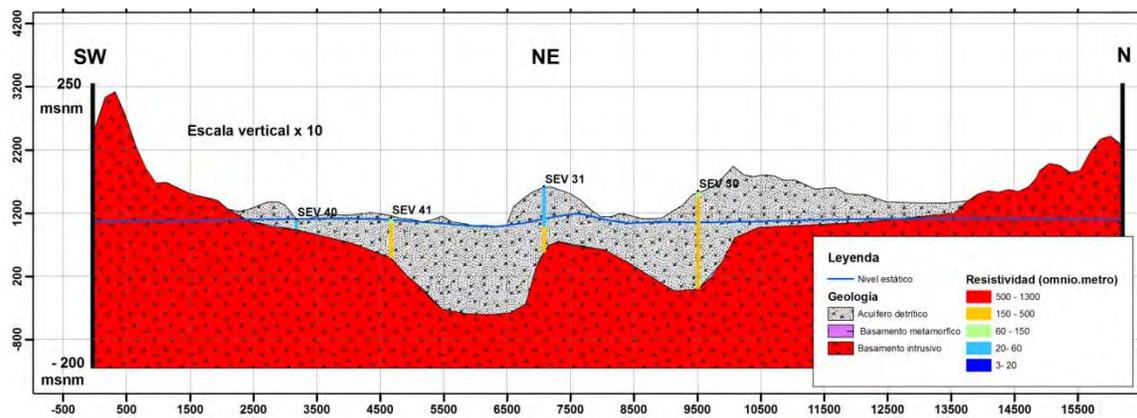


Figura 39. Perfil 16-16'

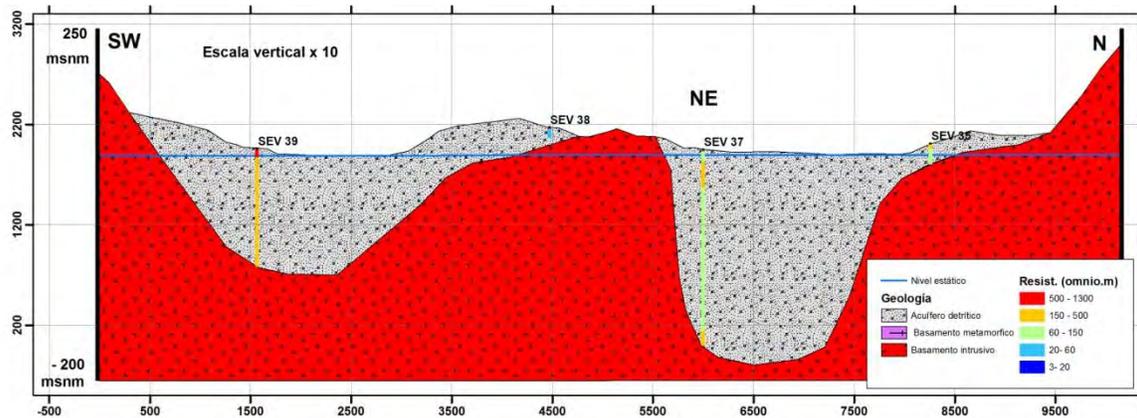


Figura 40. Perfil 22-22'

9.1.3. LÍMITES DEL SISTEMA

El acuífero Itata Bajo está limitado por el contacto con el basamento impermeable, el cual no se puede considerar como un sistema cerrado puesto que éste le cede agua de forma subsuperficial al acuífero detrítico.

El sistema se considera abierto en las siguientes zonas (ver Figura 41):

- Confluencia con el río Ñuble, donde tanto el acuífero del río Itata como el del río Ñuble presentan continuidad hacia aguas arriba.
- Confluencia con el río Lonquen, donde, al igual que con el río Ñuble, hay una conexión hidráulica con el relleno aluvial de éste.
- Desembocadura, considerado como la descarga natural del sistema.

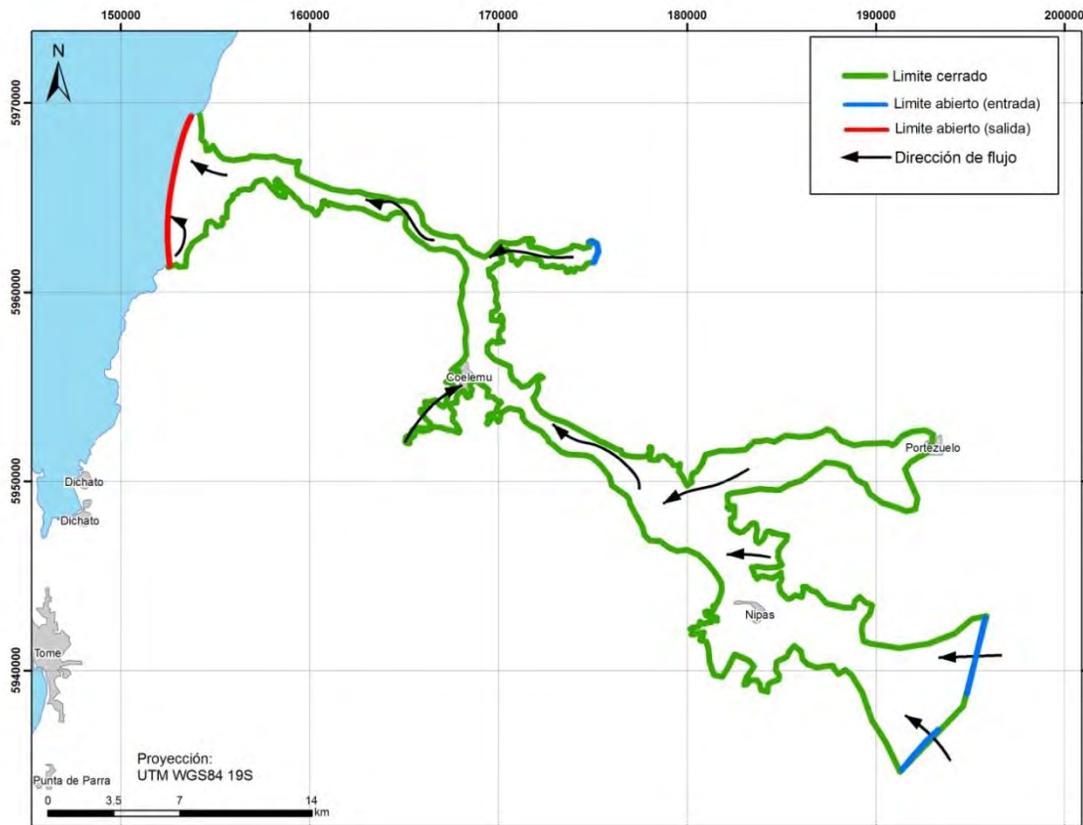


Figura 41. Límites del sistema Itata-bajo

9.2. PARÁMETROS ELÁSTICOS

9.2.1. RECOPIACIÓN DE PARÁMETROS ELÁSTICOS

Resulta de especial interés establecer de manera precisa los parámetros elásticos del acuífero, ya que su correcta definición es vital para obtener un buen ajuste en la calibración del modelo numérico, tanto desde el punto de vista del funcionamiento hidráulico, como para la evaluación del flujo de agua subterránea.

Los parámetros elásticos, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, sólo se obtienen de la interpretación de ensayos de bombeo, y cuando no existen, o son escasos, es habitual utilizar aproximaciones basadas en el caudal específico del pozo, como la Thiem o Galofré, donde también intervienen otros factores, como depresiones asociadas a pérdidas de carga en el pozo y zona próxima del acuífero, que pueden desviar notablemente los valores respecto a los reales, por

lo que siempre deben estar contrastados o utilizarse como referencias, pero no como únicos valores.

En el trabajo realizado por AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA para la DGA, se realizó una interpretación de las curvas de bombeo de los expedientes con dicha información.

Se incluyen a continuación los resultados obtenidos para los pozos ubicados en el acuífero Itata Bajo:

Tabla 18. Transmisividad del acuífero Itata Bajo. Fuente: Estudio hidrogeológico Itata y Biobío. AQUATERRA INGENIEROS LTDA.

Expediente			X	Y	T (m ² /d)	Expediente			X	Y	T (m ² /d)
ND	801	872	192381	5940481	106	ND	801	2407	190345	5939864	505
ND	801	1397	194125	5938754	245	ND	801	2409	190496	5939946	848
ND	801	1421	179186	5956060	35	ND	801	2410	190458	5940143	467
ND	801	1422	169092	5955467	51	ND	801	2411	190755	5939894	811
ND	801	1459	195005	5939110	886	ND	801	2412	190199	5939942	302
ND	801	1481	191079	5938001	1.397	ND	801	2413	190767	5939683	743
ND	801	1645	191962	5939973	150	ND	801	2418	189481	5938928	1
ND	801	1645	192214	5940340	166	ND	801	2442	189151	5941262	232
ND	801	1645	192356	5940549	461	ND	801	2501	186177	5942066	712
ND	801	1664	193366	5936911	124	ND	801	2532	190253	5938392	62
ND	801	1767	190309	5938198	119	ND	801	6208	189462	5966226	32
ND	801	1770	192202	5940216	474	ND	801	6390	169607	5960817	10
ND	801	1773	192274	5937031	155	ND	801	6391	169341	5959453	17
ND	801	1859	179258	5946044	6	ND	801	6394	171860	5954474	34
ND	801	1919	184098	5940556	8	ND	801	6394	171860	5954480	48
ND	801	1927	171908	5954773	20	ND	801	6429	169206	5955503	115
ND	801	2271	192069	5936260	30	ND	801	6680	192217	5938764	112
ND	801	2318	189065	5942678	13	ND	801	6684	169402	5960613	97
ND	801	2318	189079	5942878	8	ND	801	6709	172004	5952103	5
ND	801	2377	188949	5941398	457	ND	801	6821	189496	5939012	236

Tabla 18. Transmisividad del acuífero Itata Bajo. Fuente: Estudio hidrogeológico Itata y Biobío. AQUATERRA INGENIEROS LTDA.

Expediente			X	Y	T (m ² /d)	Expediente			X	Y	T (m ² /d)
ND	801	2389	190262	5938463	4	ND	801	7135	194709	5938274	2
ND	801	2391	190276	5938402	530	ND	801	7470	192291	5937114	125
ND	801	2391	190340	5938434	53						

Asimismo, para verificar los parámetros recopilados, se han reinterpretado algunos de las pruebas de gasto constante de las cuales se dispone de la información de origen, y se han obtenido parámetros de coeficiente de almacenamiento.

Para realizar esta tarea se ha empleado el software Pibe 2.0, desarrollado por el departamento Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante (España), el cual permite simular los descensos producidos en un pozo a partir de un caudal de bombeo, con diferentes métodos: Theis, Hantush y Neuman.

9.2.2. CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÁSTICOS

A los efectos de verificar los parámetros elásticos recopilados, se han reinterpretado varios ensayos de bombeo, de los cuales se disponía de información de descensos frente a tiempo y caudales de bombeo.

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-1421.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 50 l/s durante 24 horas. Los datos obtenidos durante la misma fueron los siguientes:

Tabla 19. Prueba de gasto constante expte. ND-801-1421

Tiempo (seg)	Profundidad (m)	Tiempo (seg)	Profundidad (m)
0	14,0	8.700	66,8
60	35,3	10.800	67,6
120	37,8	14.400	69,6

Tabla 19. Prueba de gasto constante expte. ND-801-1421

Tiempo (seg)	Profundidad (m)	Tiempo (seg)	Profundidad (m)
180	39,2	18.000	71,4
240	41,1	21.600	72,7
300	43,2	25.200	74,2
600	44,6	28.800	75,4
900	46,5	32.400	76,2
1.200	48,3	36.000	76,8
1.500	51,3	39.600	77,0
1.800	53,3	43.200	76,9
2.100	53,6	46.800	77,0
2.400	55,3	50.400	77,0
3.000	57,5	54.000	77,0
3.600	59,5	57.600	77,0
4.200	61,0	61.200	77,0
4.800	61,9	64.800	77,0
5.400	63,3	68.400	77,0
6.000	63,8	72.000	77,0
6.600	64,4	75.600	77,0
7.200	65,3	79.200	77,0
7.800	65,9	82.800	77,0
8.700	66,8	86.400	77,0

Se han incorporado estos datos al software de interpretación mencionado y se obtuvo el siguiente ajuste:

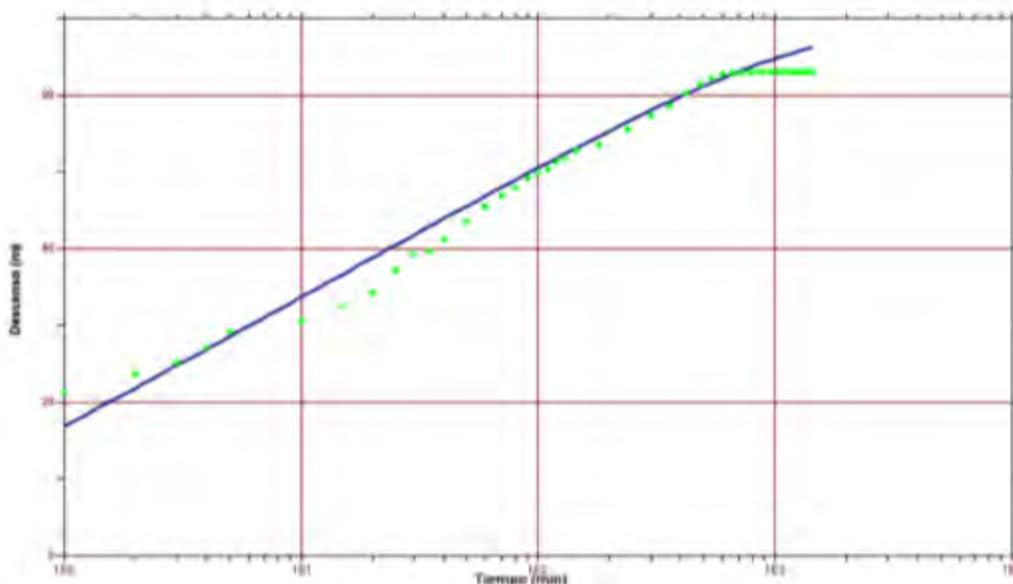


Figura 42. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-1421

Según el ajuste obtenido se obtiene una transmisividad de $48 \text{ m}^2/\text{d}$, prácticamente idéntica a la ofrecida por el estudio de AQUATERA ($51 \text{ m}^2/\text{d}$), para un coeficiente de almacenamiento de 0,2.

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-1459.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 15 l/s durante 24 horas. Los datos obtenidos durante la misma fueron los siguientes:

Tabla 20. Prueba de gasto constante expte. ND-801-1459

Tiempo (seg)	Profundidad (m)	Tiempo (seg)	Profundidad (m)
0	3,76	9.600	7,03
60	5,70	10.200	7,03
120	6,10	10.800	7,03
180	6,21	11.700	7,03
240	6,27	12.600	7,03
300	6,33	13.500	7,03
360	6,36	14.400	7,03
420	6,37	15.300	7,03
480	6,38	16.200	7,03

Tabla 20. Prueba de gasto constante expte. ND-801-1459

Tiempo (seg)	Profundidad (m)	Tiempo (seg)	Profundidad (m)
540	6,42	17.100	7,03
600	6,43	18.000	7,03
720	6,47	19.800	7,03
840	6,48	21.600	7,03
960	6,50	23.400	7,03
1.080	6,51	25.200	7,03
1.200	6,59	27.000	7,03
1.500	6,63	28.800	7,03
1.800	6,66	32.400	7,03
2.100	6,69	36.000	7,03
2.400	6,73	39.600	7,03
3.000	6,76	43.200	7,03
3.600	6,81	46.800	7,03
4.200	6,86	50.400	7,03
4.800	6,88	54.000	7,03
5.400	6,89	57.600	7,03
6.000	6,92	61.200	7,03
6.600	6,92	64.800	7,03
7.200	6,92	68.400	7,03
7.800	6,94	72.000	7,03
8.400	6,96	75.600	7,03
9.000	6,98	79.200	7,03
9.600	7,03	82.800	7,03
10.200	7,03	86.400	7,03

Tras la interpretación se obtuvo un valor de 401 m²/d para la transmisividad y de 0.05 para el coeficiente de almacenamiento. En los antecedentes analizados la transmisividad asciende a 886 m²/d, mayor que la interpretada en el presente estudio.

El ajuste gráfico de esta prueba es el siguiente:

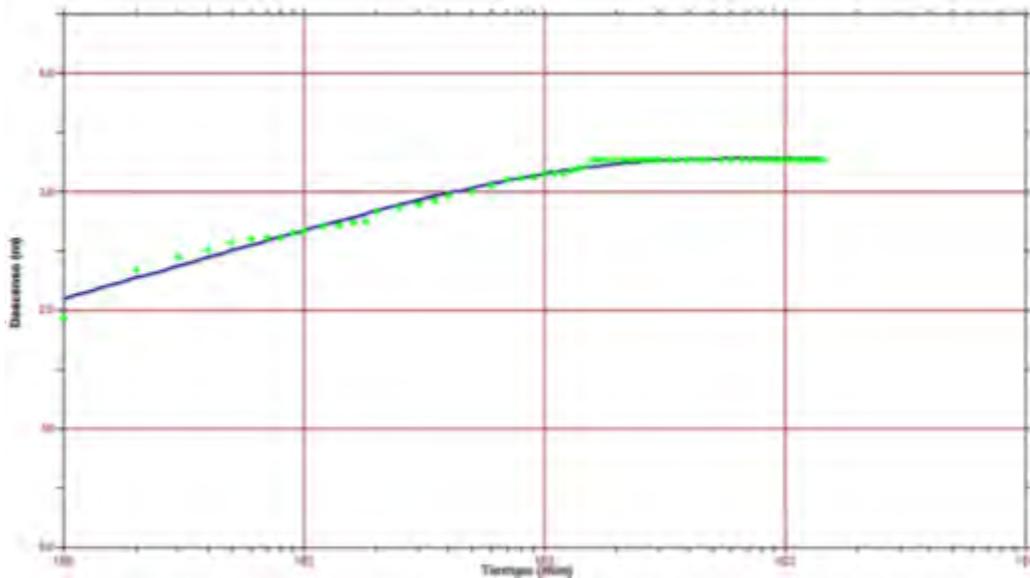


Figura 43. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-1459

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-1481.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 45 l/s durante 24 horas.

En este ensayo se ha obtenido una transmisividad de 90 m²/d, y un coeficiente de almacenamiento de 0,05. En los antecedentes analizados se obtuvo una transmisividad de 1.397 m²/d.

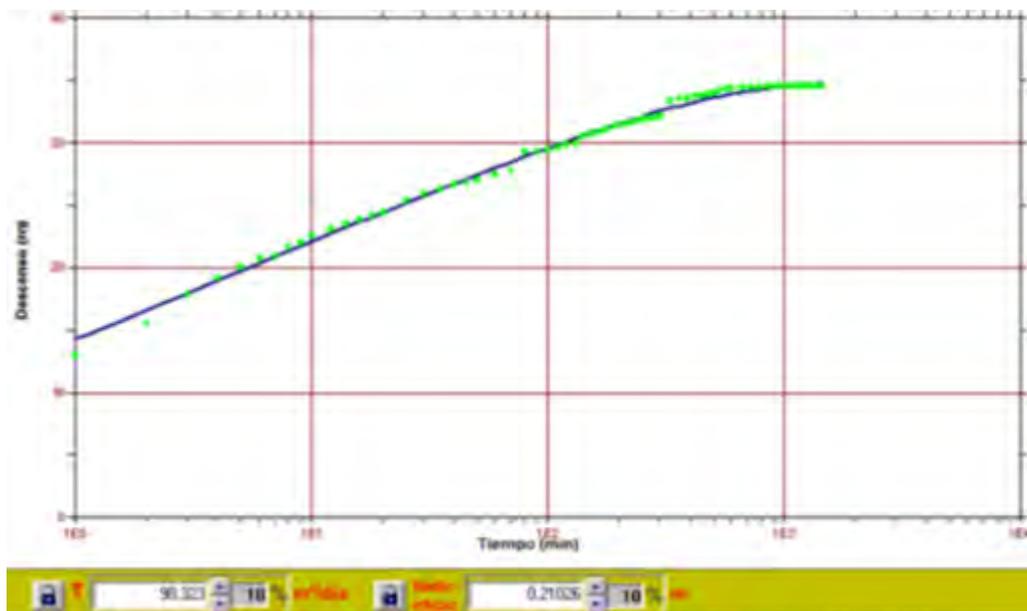


Figura 44. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-1481

AQUATERRA INGENIEROS LTDA. realizó una interpretación de los datos obtenidos durante la prueba mediante el software Aquifer Test versión 2.5, determinando la transmisividad utilizando los métodos de Cooper – Jacob y Theis, donde el ajuste se realiza a una recta cuando la curva de gasto presenta un régimen transitorio, y sin tener en cuenta el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

En el momento en el que el régimen comienza a ser estacionario, es decir, los descensos se mantienen constantes con el tiempo y la gráfica de descensos frente al tiempo comienza a ser asintótica, el ajuste no puede ser lineal, sino que se debe tratar de ajustar a dicha gráfica. Este ajuste sólo puede hacerse teniendo en cuenta otros parámetros además de la transmisividad del acuífero, como por ejemplo el coeficiente de almacenamiento.

El método empleado en el presente estudio (Hantush, con el software PIBE 2.0) ha permitido introducir valores de coeficiente de almacenamiento para ajustar a la gráfica obtenida a partir de la prueba de gasto realizada. Asimismo, se ha obtenido un buen ajuste ya que la línea calculada (azul en la Figura 44) es fiel a los datos observados (punteado verde en la misma figura).

El emplear un método distinto e incluir un parámetro adicional (coeficiente de almacenamiento) puede ser el motivo de la disparidad entre el valor obtenido por AQUATERRA y el calculado en el presente Estudio.

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-2271.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 6,3 l/s durante 24 horas.

En este ensayo se ha obtenido una transmisividad de 18 m²/d y un coeficiente de almacenamiento de 0,25. En los antecedentes analizados se obtuvo una transmisividad de 30 m²/d.

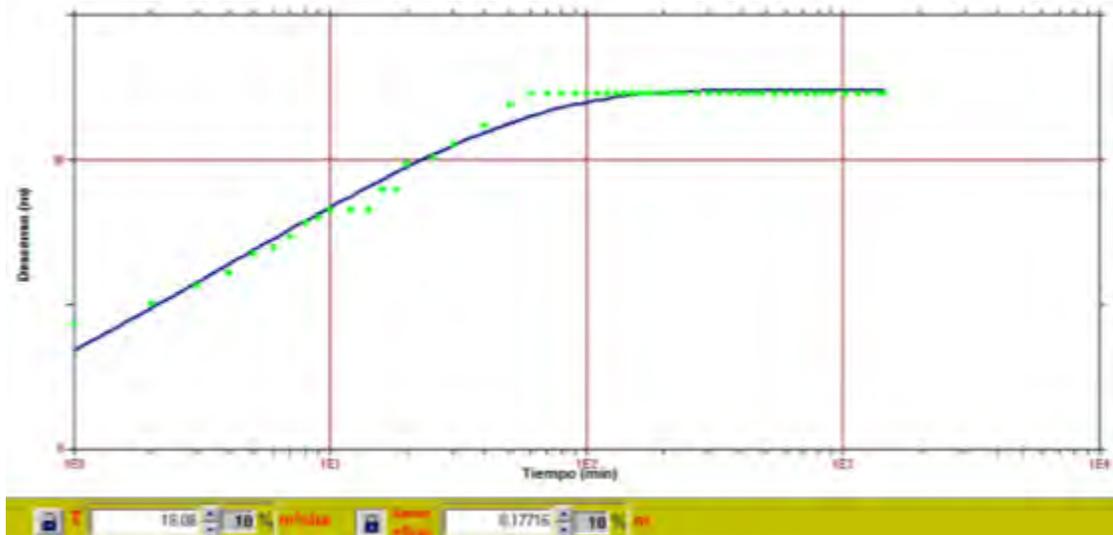


Figura 45. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-2271

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-2532.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 12 l/s durante 24 horas.

La transmisividad obtenida ha sido $31 \text{ m}^2/\text{d}$ y el coeficiente de almacenamiento de 0,01. En los antecedentes analizados se obtuvo una transmisividad de $62 \text{ m}^2/\text{d}$.

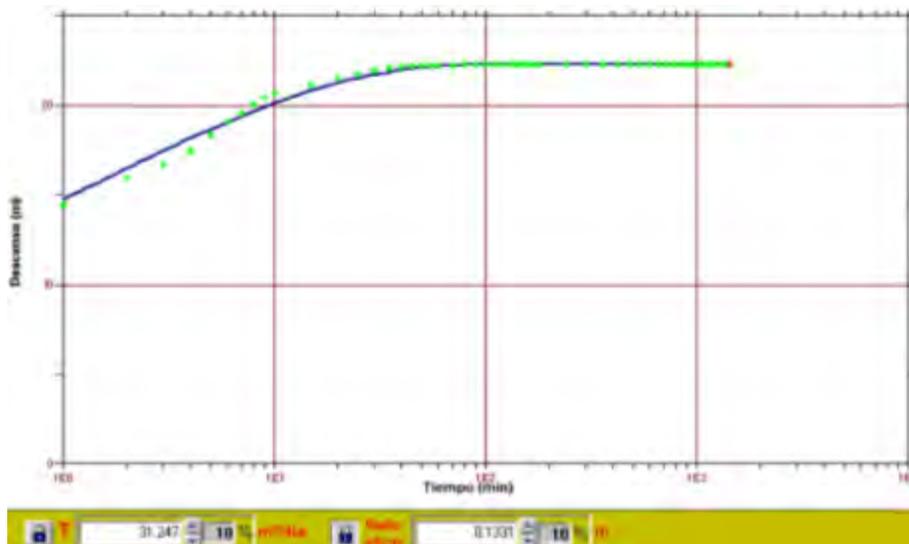


Figura 46. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-2532

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-6429.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 20 l/s durante 24 horas.

La transmisividad obtenida ha sido de 126 m²/d y el coeficiente de almacenamiento de 0,01. En los antecedentes analizados se obtuvo una transmisividad de 115 m²/d.

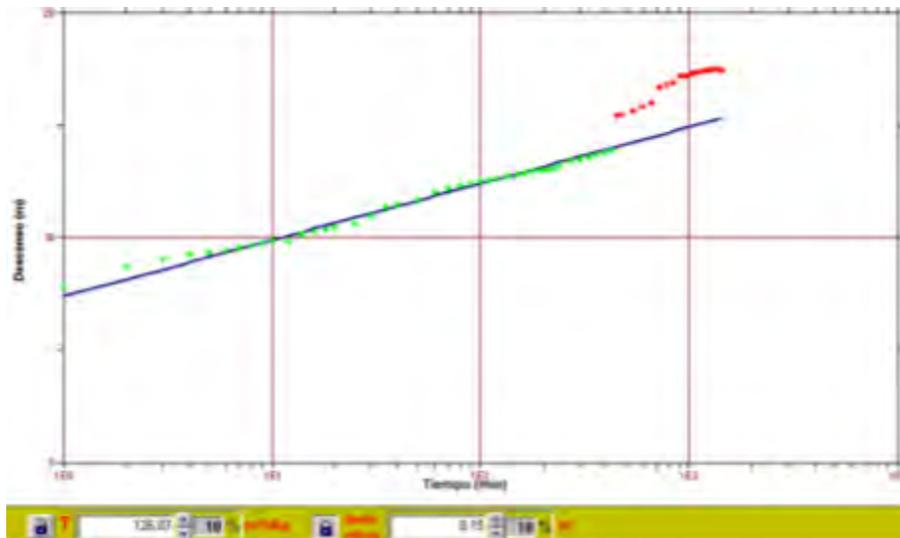


Figura 47. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-6429

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-7135.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 90 l/s durante 24 horas.

La transmisividad obtenida ha sido de 139 m²/d y el coeficiente de almacenamiento de 0,3. En los antecedentes analizados se obtuvo una transmisividad de 236 m²/d.

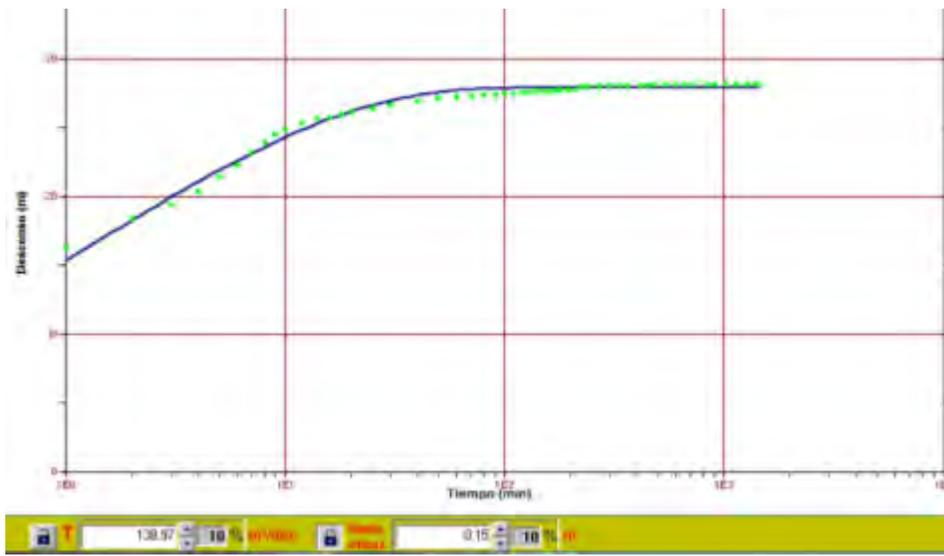


Figura 48. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-7135

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-2318.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 7,2 l/s durante 24 horas.

La transmisividad obtenida ha sido de 9,5 m²/d y el coeficiente de almacenamiento de 0,4. En los antecedentes analizados se obtuvo una transmisividad de 13 m²/d.

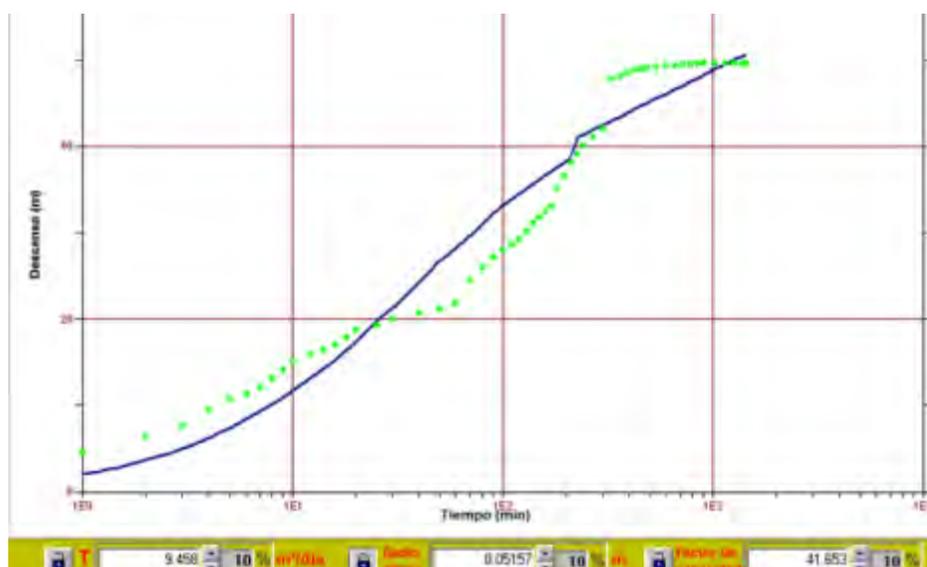


Figura 49. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-2318

Reinterpretación de la prueba de gasto del expediente ND-801-6684.

En este pozo se realizó una prueba de gasto constante a 90 l/s durante 24 horas.

La transmisividad obtenida ha sido de 108 m²/d y el coeficiente de almacenamiento de 0,01. En los antecedentes analizados se obtuvo una transmisividad de 97 m²/d.

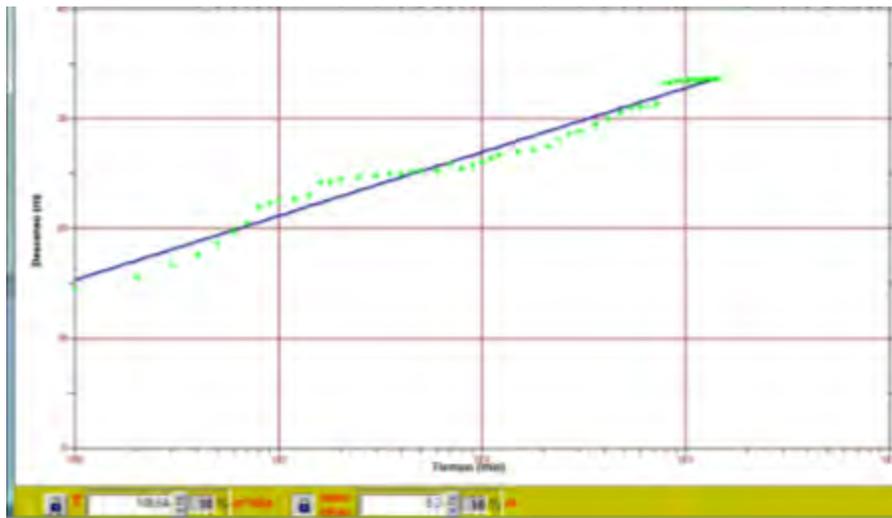


Figura 50. Interpretación de la prueba de gasto constante del pozo ND-6684

9.2.3. PARÁMETROS ELÁSTICOS OBTENIDOS

Se incluye a continuación una tabla resumen de los parámetros elásticos obtenidos en el presente estudio:

Tabla 21. Parámetros elásticos obtenidos

Expediente		X	Y	T (m ² /d)	S
ND	801 1422	169092	5955467	48	0,20
ND	801 1459	195005	5939110	401	0,05
ND	801 1481	191079	5938001	90	0,05
ND	801 2271	192069	5936260	18	0,25
ND	801 2532	190253	5938392	31	0,01
ND	801 6429	169206	5955503	126	0,01

Expediente			X	Y	T (m ² /d)	S
ND	801	6821	189496	5939012	139	0,30
ND	801	2318	189065	5942678	9.4	0,40
ND	801	6684	169402	5960613	108	0,01

9.3. TRABAJO DE TERRENO

Como actividad fundamental a llevar a cabo se consideró una campaña de terreno de medición de niveles de agua en las captaciones de la zona e este estudio, orientada a la generación de curvas equipotenciales. La campaña realizada fue exhaustiva y en ella se determinaron las captaciones subterráneas existentes en la zona de estudio (sondajes, punteras, etc.).

Durante el catastro realizado se obtuvo información técnica de las captaciones de agua (profundidad de perforación, diámetro, características de los equipos de elevación, etc.), del uso del agua (volumen de explotación, tipo de uso, etc.), de las características hidráulicas (caudales explotación, nivel estático y dinámico, etc.), y de las características químicas del agua (conductividad, pH y temperatura). Asimismo, se tomaron muestras de agua las que fueron enviadas siguiendo la correcta cadena de custodia para su análisis en laboratorio.

De forma adicional se realizaron reconocimientos litológicos puntuales para confirmar y/o modificar la cartografía geológica existente.

Las fichas de las captaciones se incluyen en el Anexo 1 del presente documento.

9.3.1. CATRASTO DE CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS

Se catastraron 200 puntos de agua subterránea y se hizo una estimación de los usos y demandas de la zona. Asimismo, se realizaron encuestas para obtener la estimación total de captaciones en la zona y por tanto de explotación y uso del agua.

9.3.2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AGUA CATASTRADOS

Se incluye en el Anexo 2 detalle de la información obtenida de los puntos catastrados en terreno. Las coordenadas UTM corresponden al origen WGS84.

Se presenta a continuación la distribución geográfica de los puntos catastrados:

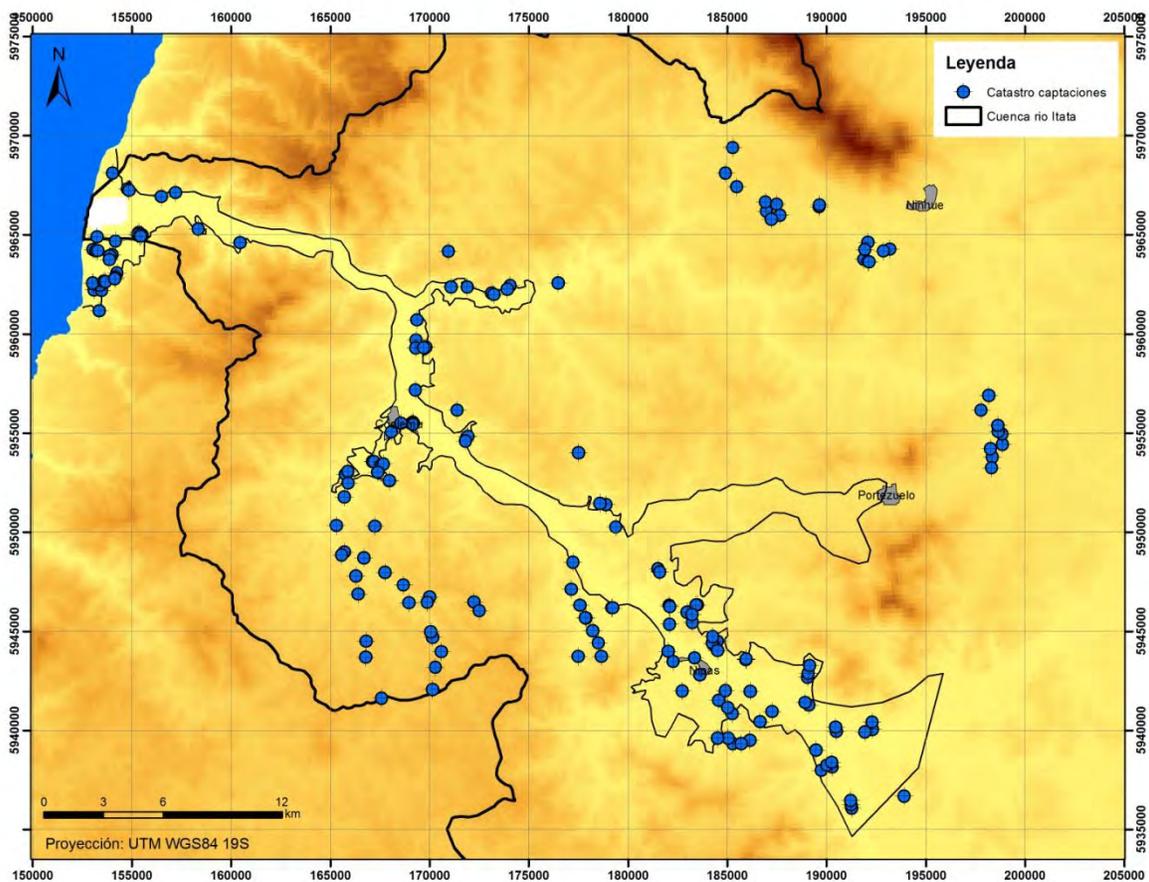


Figura 51. Distribución geográfica de las captaciones catastradas

9.3.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS POZOS CATASTRADOS

Se incluye en el Anexo 2 las características técnicas relevantes de los pozos catastrados, tales como tipo de punto, profundidad de perforación, profundidad de habilitación, diámetros, potencia y tipo de bomba, etc.

En líneas generales son pozos de poca entidad (poca profundidad y bajo caudal de explotación), predominando las punteras como tipología principal. Tan solo se catastraron unos pocos sondeos de cierta profundidad (40-50 metros).

9.3.4. CAMPAÑA DE PIEZOMETRÍA

A continuación se incluyen los registros de nivel piezométrico estático y/o dinámicos, además de los caudales de bombeo, tomados durante la campaña de terreno realizada en agosto de 2013.

Tabla 22. Campaña de piezometría

Pozo	X	Y	Cota (msnm)	Cota Nivel Piezométrico (msnm)	Q (l/s)	PNPE (m)	PNPD (m)	Q esp. (l/s/m)
1	696485	5969817	8,00	1,00	0,10	7,00		
2	693485	5969817	7,98	0,98	0,10	7,00		
3	693637	5969682	8,79	1,79	0,10	7,00		
4	693635	5969682	8,91	3,02	0,10	5,89		
5	693415	5969739	9,24	4,65	0,00	4,59		
6	693509	5969649	9,11	4,11	0,00	5,00		
7	693551	5969634	8,97	7,97	0,50	1,00		
8	691374	5969730	4,27	4,27	0,00	0,00		
11	691055	5967087	4,09	0,82	0,00	3,27		
12	691436	5967033	6,94	5,94	0,00	1,00		
13	691373	5967300	4,99	3,69	0,00	1,30		
14	691018	5967440	12,89	11,54	0,00	1,35		
15	691015	5967441	11,78	10,13	0,10	1,65		
16	691582	5967490	7,09	6,14	3,50	0,95		
17	691666	5967470	7,98	6,28	0,10	1,70		
18	692182	5967652	4,80	2,80	0,10	2,00		
19	692130	5967589	4,54	2,39	0,10	2,15		
20	692068	5968793	-0,88	-2,48	0,10	1,60		
21	691948	5968748	2,69	1,14	0,10	1,55		
22	691912	5968550	-0,07	-1,87	0,10	1,80		
23	691125	5969111	4,14	1,94	0,10	2,20		
24	691267	5969027	2,18	-1,05	0,10	3,23		
25	691360	5969047	3,06	-0,04	0,10	3,10		
27	698529	5968992	15,94	11,41	15,50	4,53	5,00	32,98
28	706561	5959355	10,24	7,06	20,00	3,18	15,00	1,69
29	706661	5959427	8,99	4,57	6,60	4,42	14,00	0,69
31	706687	5959344	6,39	2,10	9,80	4,29	25,00	0,47
33	706048	5959401	21,15	16,45	0,10	4,70		
34	705559	5958996	31,15	26,60	0,10	4,55		

Tabla 22. Campaña de piezometría

Pozo	X	Y	Cota (msnm)	Cota Nivel Piezométrico (msnm)	Q (l/s)	PNPE (m)	PNPD (m)	Q esp. (l/s/m)
35	704961	5958059	31,00	25,30	0,10	5,70		
37	704519	5957587	26,00	25,30	0,10	0,70		
38	704519	5957587	25,94	24,34	0,00	1,60		
39	704583	5957559	29,84	25,92	0,20	3,92		
41	705044	5957424	30,05	28,60	0,20	1,45		
42	704722	5957015	31,88	31,88	0,10	0,00		
43	705288	5956549	34,36	33,86	0,00	0,50		
44	705297	5956554	30,28	24,68	1,00	5,60		
45	703100	5957019	39,05	37,55	0,50	1,50		
46	703244	5957140	39,21	34,21	0,50	5,00		
47	703227	5956556	36,36	36,11	0,10	0,25		
48	702975	5955890	41,64	41,64	0,10	0,00		
50	714262	5951887	28,76	26,46	0,00	2,30		
51	714091	5950510	61,90	60,60	0,10	1,30		
52	714477	5949693	30,53	30,53	0,10	0,00		
53	714750	5949028	42,68	42,68	0,00	0,00		
54	714701	5949051	38,35	32,05	0,00	6,30		
55	715040	5948368	76,22	75,17	0,20	1,05		
56	715288	5947741	76,67	73,37	0,10	3,30		
57	715392	5947042	87,42	85,27	0,10	2,15		
58	714215	5947117	54,92	50,47	0,50	4,45		
60	716102	5949450	40,57	29,22	0,00	11,35		
61	718758	5947094	33,06	29,61	0,50	3,45		
62	718981	5946561	29,50	28,50	1,00	1,00		
63	719343	5945054	39,92	38,92	1,00	1,00		
64	719349	5945062	38,34	38,34	0,00	0,00		
65	720077	5946674	29,44	29,44	0,00	0,00		
66	720068	5946686	25,00	25,00	0,00	0,00		
67	720084	5946676	28,67	26,77	0,20	1,90		
69	721139	5944475	46,54	41,04	0,20	5,50		
70	721774	5943758	37,72	31,72	3,00	6,00		
71	722766	5944825	24,86	13,61	0,00	11,25		
72	721573	5944077	45,74	28,54	0,00	17,20		
73	721524	5944948	44,86	43,16	0,00	1,70		
74	723793	5943731	64,80	63,80	0,10	1,00		
75	723157	5943273	72,76	72,16	0,00	0,60		
76	722598	5942365	48,42	48,42	0,50	0,00		
77	721718	5942259	42,30	42,00	0,50	0,30		
78	722148	5942221	44,88	43,33	3,00	1,55		
79	721504	5942552	52,16	52,16	3,00	0,00		
80	720969	5942571	46,33	10,33	0,00	36,00		
88	727479	5939011	36,68	13,68	0,00	23,00		
89	730161	5939072	76,53	68,53	35,00	8,00		

Tabla 22. Campaña de piezometría

Pozo	X	Y	Cota (msnm)	Cota Nivel Piezométrico (msnm)	Q (l/s)	PNPE (m)	PNPD (m)	Q esp. (l/s/m)
90	728795	5942536	29,19	21,19	15,00	8,00		
91	728405	5942425	32,36	24,36	15,00	8,00		
92	728797	5942900	33,86	28,74	0,00	5,12		
93	726970	5942555	30,88	25,78	0,00	5,10		
94	726938	5942755	29,75	22,95	11,70	6,80		
95	725676	5943954	30,58	23,78	6,80	6,80		
96	725489	5944088	30,67	5,67	2,00	25,00		
97	725681	5945365	47,86	44,86	7,00	3,00		
98	725744	5945549	44,21	44,21	0,50	0,00		
99	725842	5945944	45,91	44,91	0,50	1,00		
100	722641	5946437	31,01	31,01	0,50	0,00		
101	722670	5946447	38,23	38,23	0,00	0,00		
102	722670	5946463	32,42	25,42	2,00	7,00		
103	721249	5946980	24,12	23,27	0,20	0,85		
104	731159	5966641	78,85	72,15	0,10	6,70		
105	730835	5966572	82,67	82,67	0,10	0,00		
106	730085	5967058	74,56	61,56	0,10	13,00		
110	729916	5966700	93,09	90,84	0,50	2,25		
111	727758	5968990	87,06	87,06	0,10	0,00		
112	727784	5969085	94,91	94,36	0,10	0,55		
113	726881	5969831	107,00	106,75	0,10	0,25		
114	725934	5967867	115,00	111,35	0,10	3,65		
115	725578	5967342	119,00	119,00	0,50	0,00		
116	725664	5967856	117,00	116,00	0,10	1,00		
117	725783	5969458	113,00	107,00	0,10	6,00		
118	725486	5970104	114,00	114,00	0,10	0,00		
119	726220	5970547	151,00	151,00	0,50	0,00		
120	725978	5969788	111,00	110,20	0,10	0,80		
121	725752	5968692	102,00	101,50	0,10	0,50		
122	725752	5968692	102,10	100,50	0,10	1,60		
123	725087	5968944	114,61	105,01	0,10	9,60		
124	725298	5968526	122,79	122,39	0,10	0,40		
125	725620	5969245	105,41	104,41	0,20	1,00		
126	725067	5969403	105,18	105,18	0,10	0,00		
127	723663	5970261	116,34	109,04	0,10	7,30		
128	723145	5970985	126,90	115,20	0,10	11,70		
129	723595	5972232	126,25	125,95	0,10	0,30		
130	735665	5955848	86,51	83,01	0,20	3,50		
131	735607	5956285	86,08	64,08	11,00	22,00		
132	736218	5956470	91,86	81,86	0,10	10,00		
133	736229	5956984	97,40	96,05	0,20	1,35		
134	736051	5957110	82,28	80,53	0,20	1,75		
135	736050	5957434	81,57	77,92	0,10	3,65		

Tabla 22. Campaña de piezometría

Pozo	X	Y	Cota (msnm)	Cota Nivel Piezométrico (msnm)	Q (l/s)	PNPE (m)	PNPD (m)	Q esp. (l/s/m)
136	735261	5958238	90,25	79,25	0,10	11,00		
137	735691	5958979	87,95	86,95	0,20	1,00		
138	735593	5955313	98,80	96,60	0,10	2,20		
200	692353	5972891	0,00	-1,25	1,00	1,25		
201	693048	5972049	3,00	-2,00	0,50	5,00		
202	693126	5971980	7,00	2,20	0,20	4,80		
204	695456	5971719	7,00	5,20	0,10	1,80		
205	708987	5967916	15,00	5,20	0,50	9,80		
206	714393	5965980	17,00	15,00	0,00	2,00		
207	711978	5965995	19,00	18,70	1,00	0,30		
208	711820	5965834	20,00	19,67	0,50	0,33		
209	711014	5965683	26,00	25,80	0,00	0,20		
210	711123	5965586	15,00	13,50	0,20	1,50		
211	709814	5966057	13,00	11,00	0,50	2,00		
212	708991	5966103	45,00	44,70	18,00	0,30	0,30	
214	707545	5963161	39,00	34,25	1,50	4,75		
215	707085	5963555	16,00	11,20	1,30	4,80		
216	707039	5963155	6,00	1,00	0,50	5,00		
217	707445	5963145	29,00	22,00	0,20	7,00		
218	706895	5961044	7,00	7,00	3,00	0,00		
219	709333	5958510	28,00	11,00	2,50	17,00	44,16	0,09
220	709380	5958543	27,00	20,00	0,20	7,00		
221	709250	5958321	38,00	26,85	0,10	11,15	11,15	
222	708914	5959886	38,00	37,30	0,10	0,70		
223	714882	5957382	90,00	89,25	1,00	0,75		
224	716103	5954685	36,00	33,50	0,00	2,50		
225	715806	5954759	36,00	35,50	0,10	0,50		
226	716524	5953523	38,00	37,00	0,30	1,00		
227	718509	5951289	31,00	30,70	0,14	0,30		
228	718593	5951118	26,00	26,00	0,00	0,00		
229	718972	5949406	16,00	13,00	1,60	3,00	3,00	
230	718990	5949326	31,00	28,40	1,00	2,60	2,60	
231	720367	5949334	35,00	35,00	0,23	0,00		
232	720312	5949340	34,00	32,40	0,80	1,60		
233	719841	5949000	42,00	32,70	0,40	9,30		
234	720082	5948479	47,00	47,00	0,14	0,00		
235	720086	5948872	27,00	22,00	0,00	5,00		
236	718922	5948463	21,00	16,00	0,15	5,00		
237	721267	5947456	50,00	48,60	0,00	1,40		
238	721051	5947305	28,00	26,85	0,00	1,15		
239	721025	5947377	33,00	25,40	0,00	7,60		
240	721060	5947708	56,00	54,70	0,00	1,30		
241	704227	5945649	260,00	260,00	1,10	0,00		

Tabla 22. Campaña de piezometría

Pozo	X	Y	Cota (msnm)	Cota Nivel Piezométrico (msnm)	Q (l/s)	PNPE (m)	PNPD (m)	Q esp. (l/s/m)
242	706806	5945919	221,00	221,00	0,14	0,00		
243	707024	5947014	238,00	236,40	0,20	1,60		
244	707355	5947789	172,00	170,20	0,20	1,80		
245	706970	5948537	145,00	145,00	1,10	0,00		
246	706896	5948834	135,00	135,00	1,10	0,00		
247	705899	5950355	118,00	116,50	1,75	1,50	22,00	0,09
248	709151	5950183	205,00	203,77	0,55	1,23		
249	709408	5949738	231,00	225,20	0,10	5,80		
250	706956	5950575	134,00	132,90	0,85	1,10		
251	706817	5950311	164,00	164,00	0,30	0,00		
252	705671	5951273	121,00	121,00	0,00	0,00		
253	704781	5951958	101,00	101,00	0,10	0,00		
254	703778	5952757	91,00	84,00	0,00	7,00		
255	702493	5954469	46,00	43,80	0,20	2,20		
256	702795	5953115	75,00	73,25	0,70	1,75		
257	702673	5952969	98,00	92,50	1,10	5,50		
258	703309	5951870	112,00	111,30	1,10	0,70		
259	703356	5950960	143,00	143,00	0,33	0,00		
260	703619	5948552	173,00	173,00	0,60	0,00		
261	703543	5947753	187,00	185,40	0,00	1,60		

PNPE: Profundidad nivel piezométrico estático

PNPD: Profundidad nivel piezométrico dinámico

Q esp.: Caudal específico

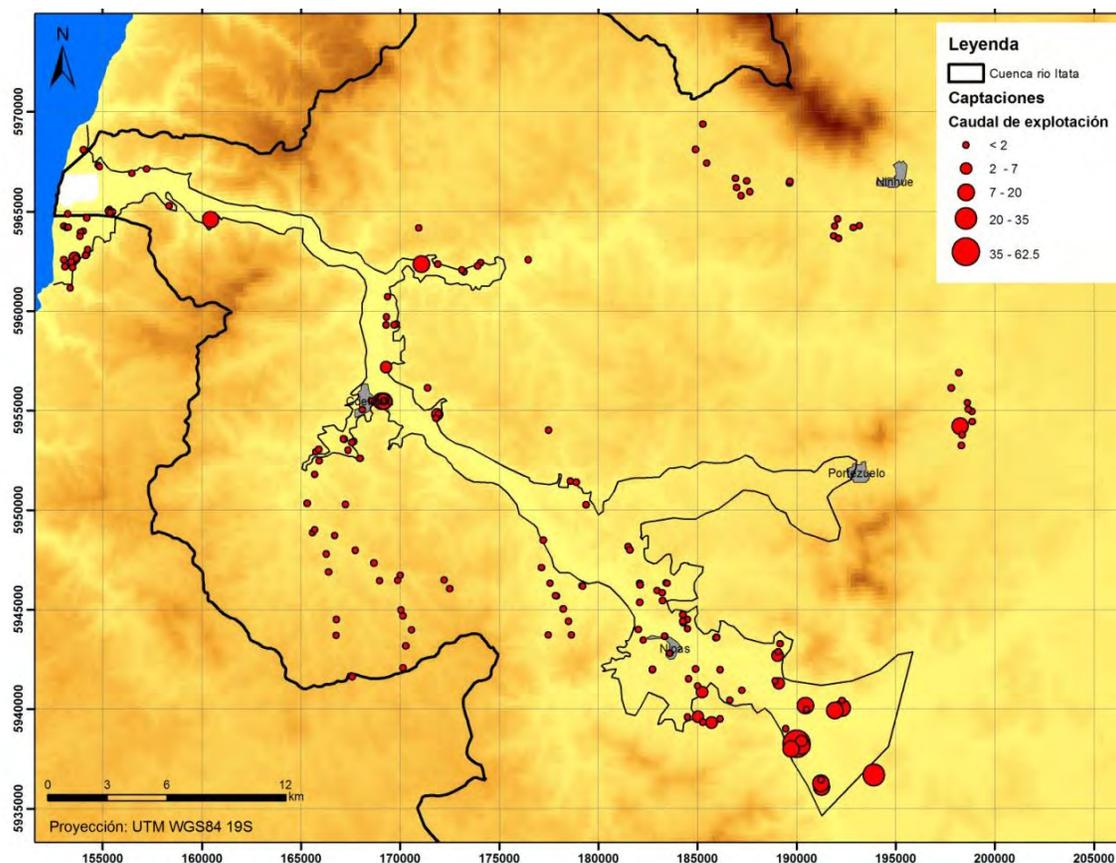


Figura 52. Caudales de explotación catastrados

9.3.5. CAMPAÑA DE CALIDAD DE AGUAS

Durante la campaña de terreno se registraron **“in-situ” la conductividad, pH y temperatura del agua** en los puntos catastrados. De forma complementaria se tomaron en 5 puntos muestras de agua subterránea y otras 5 de agua superficial para su análisis de elementos mayoritarios en laboratorio.

Los resultados obtenidos reflejan aguas poco mineralizadas (conductividad eléctrica máxima registrada de 732 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y media de 233 $\mu\text{S}/\text{cm}$), la cual incrementa ligeramente hacia la zona de desembocadura (SW).

Los diagramas de Piper obtenidos tanto en muestras de agua subterránea como en muestras de agua superficial (ver Figura 54 y Figura 55) manifiestan que se tratan de aguas Bicarbonatadas Cálcidas y Magnésicas, tipo Bicarbonatado.

Asimismo, los resultados de las muestras de agua superficial reflejan valores muy parecidos unas de otras, y los de aguas subterráneas poseen mayor variabilidad aunque todas dentro de la misma caracterización hidroquímica.

En el Anexo 3 se incluyen los resultados del laboratorio de las 10 muestras analizadas.

Se muestran a continuación los datos obtenidos durante la campaña de medidas "in-situ".

Tabla 23. Calidad química "in-situ"

Nº	Conductividad (µS/cm)	pH	Temp (°C)	Fecha
1	148,5	9	13,8	18-jul-13
7	732	7,5	14,3	18-jul-13
9	69,2	9	9,5	18-jul-13
15	492	7,2	6,8	22-jul-13
22	384	6,8	18,3	22-jul-13
27	418	6,5	17	23-jul-13
28	330	6,6	14,9	23-jul-13
29	408	6,5	16,7	23-jul-13
31	310	6,5	17,6	23-jul-13
33	124	8	4,2	24-jul-13
36	270	6,8	16,2	24-jul-13
37	375	6,6	14,5	24-jul-13
38	441	6,6	15,5	24-jul-13
39	125	7	19,2	24-jul-13
43		7,2	14,3	26-jul-13
44		6,3	16,2	26-jul-13
46		6,9	12,3	26-jul-13
47		6,8	15,2	26-jul-13
48	146,9	7,2	14,5	26-jul-13
49	177	7,2	15,6	26-jul-13
51	80	9	10,6	29-jul-13
55	139	8	10,8	29-jul-13
56	114,3	7,4	10,9	29-jul-13
60	555	7	16,1	30-jul-13
61	260	6,8	14,5	30-jul-13

Tabla 23. Calidad química "in-situ"

Nº	Conductividad (µS/cm)	pH	Temp (°C)	Fecha
62	148,8	7,3	13,7	30-jul-13
63	148,8	7,3	13,7	30-jul-13
67	165,8	7,2	12,8	30-jul-13
88	248	7,3	16,2	05-ago-13
94	216	7,6	15,2	06-ago-13
99	405	7,1	11,2	06-ago-13
102	238	7,2	15	06-ago-13
104	216	7,9	7,7	08-ago-13
107	205	7,6	18,5	08-ago-13
111	148,2	6,9	14	08-ago-13
216	228	6,8	12	31-jul-13
217	194,2	6,8	10,4	31-jul-13
220	306	6,8	12,7	31-jul-13
222	335	5,9	15,7	31-jul-13
223	111,3	7,2	14,2	01-ago-13
224	225	6,5	12	01-ago-13
226	208	6,2	11,5	01-ago-13
227	102	7,1	12,5	01-ago-13
229	159,1	7	10,7	02-ago-13
234	240	6,7	12,9	02-ago-13
248	63,5	7,5	9	09-ago-13
249	69,8	7,6	13,7	09-ago-13
256	165	7	13,6	10-ago-13
257	108,1	7,1	17,9	10-ago-13
259	108	6,5	15,9	10-ago-13
261	104	6,5	12,4	10-ago-13

Las coordenadas de las muestras de agua tomadas para análisis en laboratorio se incluyen a continuación (proyección UTM WGS84 H18S):

Tabla 24. Muestras tomadas para análisis en laboratorio de elementos mayoritarios

Tipo	Muestra	X	Y	Z
Agua Superficial	ITATA 1	727927	5940232	3,00
	ITATA 2	720045	5946706	18,00
	ITATA 3	713392	5953406	22,00
	ITATA 4	706896	5961040	16,00

Tabla 24. Muestras tomadas para análisis en laboratorio de elementos mayoritarios

Tipo	Muestra	X	Y	Z
	ITATA 5	700044	5968903	5,00
Agua subterránea	36	704261	5957715	24,00
	44	705297	5956554	30,28
	61	718758	5947094	33,06
	70	721774	5943758	37,72
	204	695456	5971719	7,00

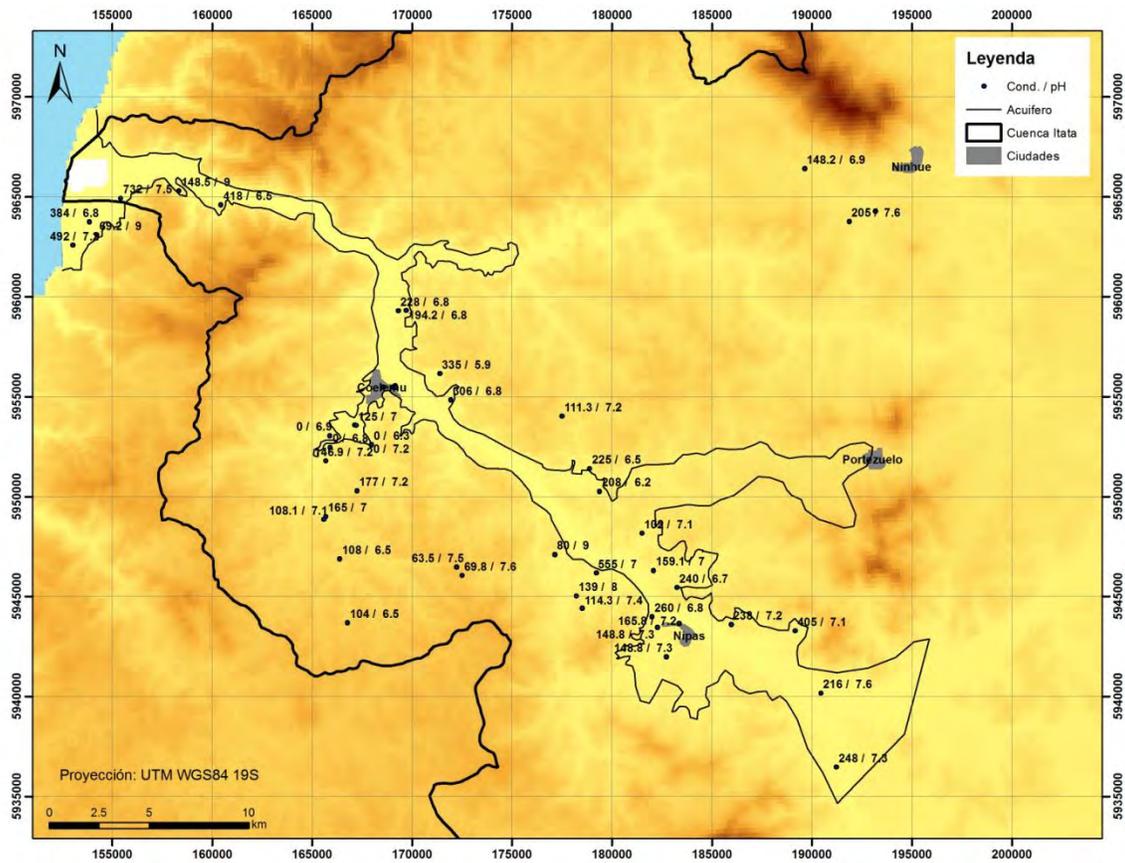


Figura 53. Campaña de calidad química "in-situ"

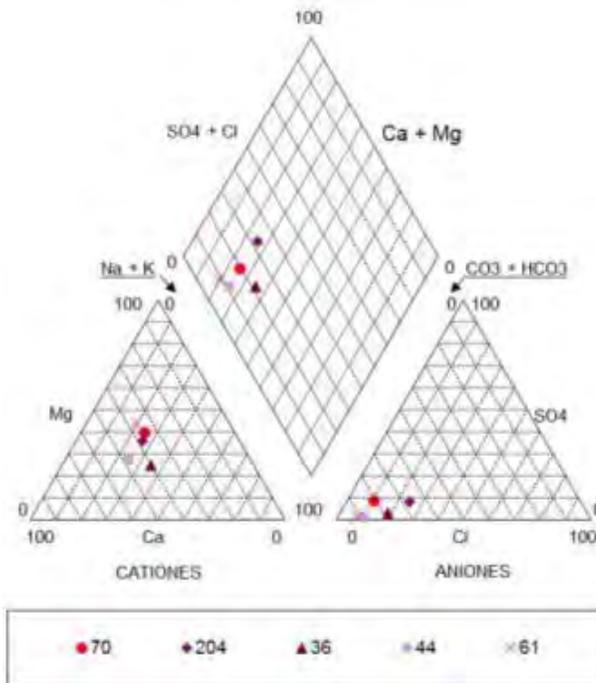


Figura 54. Diagrama de Piper de en muestras de agua subterránea

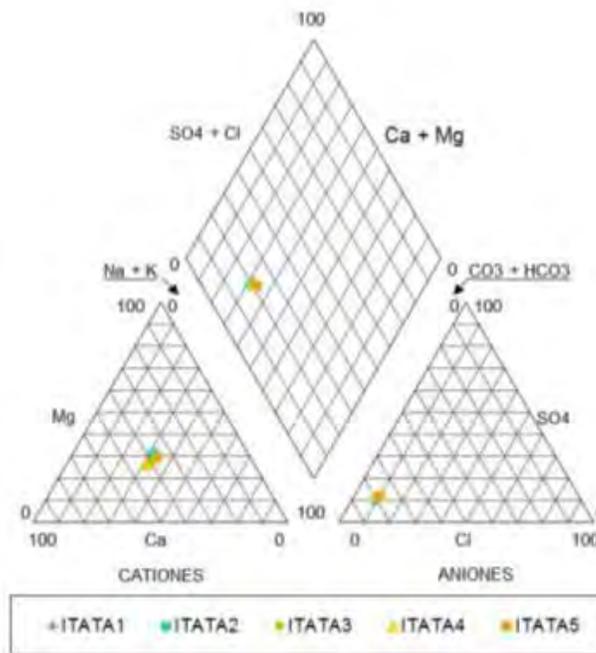


Figura 55. Diagrama de Piper de en muestras de agua superficial

Los diagramas de Piper reflejan facies bicarbonatadas cálcicas y magnésicas. Asimismo, las muestras de agua subterránea tienen composiciones un poco más variables de unos puntos a otros, a diferencia de las muestras de aguas

superficiales las cuales presentan prácticamente la misma composición a lo largo de todo el tramo del río estudiado.

Por otro lado, se ha elaborado un diagrama de Schoeller-Berkaloff (ver Figura 56) en el cual se observa que las aguas subterráneas están más mineralizadas que las superficiales, y que en las subterráneas las mayores variaciones corresponden a los sulfatos.

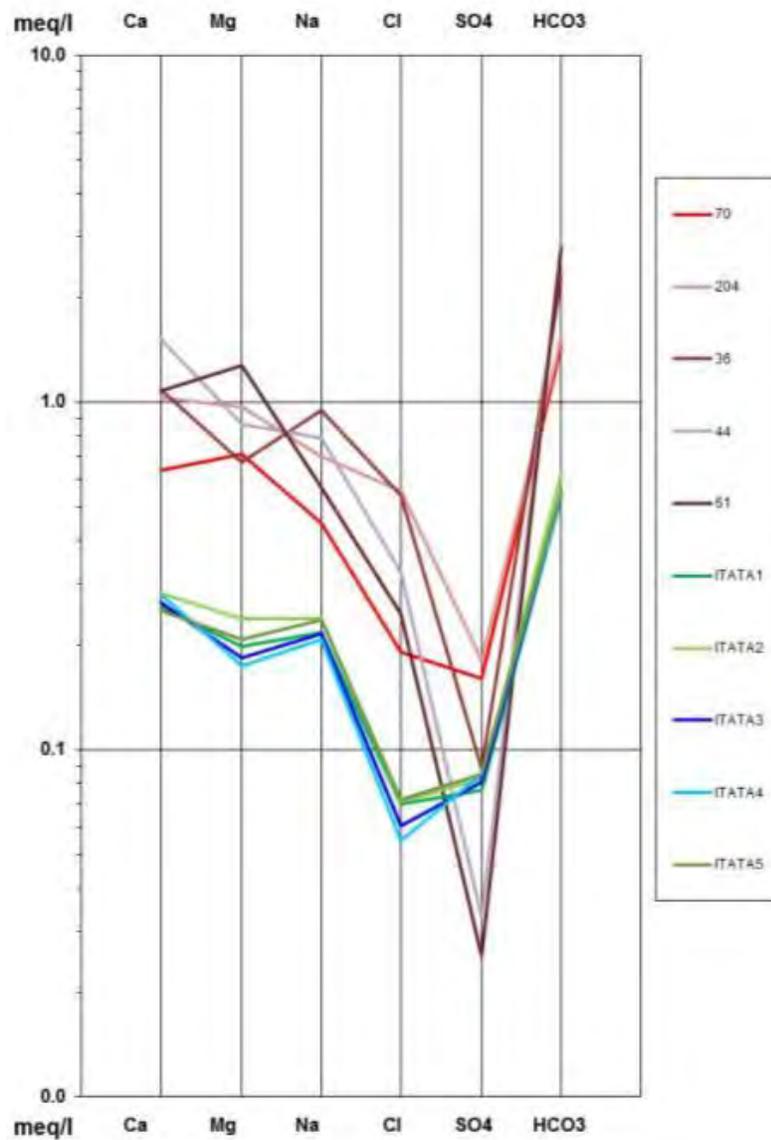


Figura 56. Diagrama de Schoeller-Berkaloff

9.3.6. CAMPAÑA DE AFOROS

Con el objetivo de determinar la relación entre los cursos fluviales Itata y Lonquén con el acuífero, se realizó una campaña de aforos en ambos ríos entre los días 22 y 27 de octubre de 2013. El tramo considerado en el río Itata abarcó desde la confluencia con el río Ñuble hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, mientras que el sector del río Lonquén cubrió desde la Quebrada Pachagua hasta su desembocadura en el río Itata.

Tabla 25. Localización de los puntos aforados

Punto	Cauce	Sub-Sub Cuenca [DGA]	Comuna
1	Lonquén	8144: Río Lonquén Entre Estero Corontas y Río Itata	Treguaco
2	Lonquén		
3	Lonquén		
4	Lonquén		
5	Lonquén		
6	Lonquén		
17	Lonquén		
7	Itata	8140: Río Itata Entre Río Ñuble Bajo Estero Chudal	Portezuelo/Ranquil
8	Itata		
9	Itata		
10	Itata		
11	Itata		
12	Itata	8141: Río Itata Entre Estero Chudal y Río Lonquen	Treguaco/Coelemu
13	Itata		
14	Itata		
15	Itata	8145: Río Itata entre Río Lonquen y desembocadura	Treguaco/Coelemu
16	Itata	8145: Río Itata entre Río Lonquen y desembocadura	
18	Itata	8145: Río Itata entre Río Lonquen y desembocadura	
19	Itata	8145: Río Itata entre Río Lonquen y desembocadura	
20	Itata	8145: Río Itata entre Río Lonquen y desembocadura	

El trabajo de medición de caudales realizado en la campaña de terreno siguió las siguientes etapas:

- Identificar y localizar los puntos en los que se realizarían los aforos, ubicar sus vías de acceso (Gabinete).
- Identificar las estaciones de aforo de la red de medición establecida por la DGA y averiguar (telefónicamente o a través del portal DGA para las

estaciones con medición en tiempo real) los últimos valores de caudal registrados por dicha institución. Esto con el fin de planificar la campaña y estimar los recursos logísticos necesarios para su ejecución (Gabinete).

- Localizar las secciones de medición y ubicar sus vías de acceso (Terreno).
- Efectuar los aforos (Terreno).
- Medir parámetros fisicoquímicos (pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica) del agua en cada punto de aforo (Terreno).
- Analizar los resultados obtenidos de las mediciones de caudal y caracterizar el comportamiento hidrogeológico del río Itata en el tramo de estudio (Gabinete).

Para los trabajos de aforo se adoptó la siguiente metodología:

Determinación de la sección del cauce natural donde se efectuará el aforo. Medición del ancho del cauce con huincha (en los cauces vadeables –Lonquén-, puentes sobre el río Itata y mediante boyas para los puntos en el río Itata aforados desde bote.

Las mediciones de las abscisas, en los aforos realizados con bote en el río Itata, se efectuó con GPS (error: +/- 3 m). Este procedimiento fue chequeado y validado en el Aforo 18 con los cimientos que sostienen la estructura que atraviesa el cauce.

Medición de caudal utilizando el método de aforos completos por puntos mediante el uso de molinetes. Este método se basa en la estimación del caudal utilizando mediciones puntuales de velocidad en varios tramos de la sección y a distintas profundidades. (Ven Te Chow, et al, 1994).

Para cada sección del cauce definida, se midió la velocidad del agua a intervalos regulares y a distintas profundidades, las cuales variaban en función de la

profundidad total del cauce en el punto de medida, como se resume en la tabla siguiente:

Tabla 26. Profundidad de mediciones puntuales de velocidad

hc: Profundidad del Cauce (m)	N° de Mediciones de velocidad	Profundidad de Medición
< 0,6	1	0,6 · hc
0,6 – 3,0	2	0,2 · hc; 0,8 · hc
3,0 >	3	0,2 · hc; 0,6 · hc; 0,8 · hc

El equipamiento a utilizar para la determinación de las velocidades fue el siguiente:

- Molinete Pigmeo Gurley, número 625 A. Para caudales y profundidades de cauce menores (río Lonquén).
- Molinete Gurley tipo price número 622 A. Para caudales y profundidades de cauce mayores (río Itata).

El cálculo de la velocidad para cada subsección o tramo se realiza, dependiendo del molinete empleado, según la fórmula indicada por el fabricante, a saber:

- Gurley 622: $v = 0,672 \cdot n/t + 0,0054$
- Gurley 625:
 - $v = 0,293 \cdot n/t + 0,0095$

Donde

v: velocidad del agua, expresada en m/s

n: número de vueltas del molinete

t: tiempo de medida de las revoluciones del molinete, en segundos.

- Medición in situ de parámetros físico químicos del agua (pH, Ta y conductividad eléctrica) con una sonda combo Hanna 98130.
- Registro de mediciones en fichas de terreno

Una vez seleccionadas y localizadas los 20 puntos en los que realizarían las mediciones de caudal se procedió a aforar en cada una de ellas, siguiendo la metodología señalada anteriormente.

En la tabla siguiente se presentan las ubicaciones de aforo medidas con GPS, así como la fecha y hora en la que se realizaron los aforos.

Tabla 27. Aforos, fechas y emplazamientos

Punto	Río	Coordenadas UTM WGS84 H18S				Aforo	
		Original		Terreno		Hora	Fecha
		Este	Norte	Este	Norte		
1	Lonquén	713153	5965466	713259	5965507	11:10	22/10/2013
2	Lonquén	709918	5965904	709837	5965957	12:40	22/10/2013
3	Lonquén	708233	5966383	708272	5966408	13:30	22/10/2013
4	Lonquén	707223	5965583	707287	5965548	14:15	22/10/2013
5	Lonquén	716274	5966857	716314	5966821	8:45	22/10/2013
6	Lonquén	711176	5965229	711189	5965229	15:10	22/10/2013
7	Itata	725784	5942633	725838	5942724	16:10	26/10/2013
8	Itata	723402	5944649	723006	5944768	15:00	26/10/2013
9	Itata	720034	5946908	719982	5947176	13:54	22/10/2013
10	Itata	717381	5950152	717008	5950005	10:00	26/10/2013
11	Itata	714166	5952842	714392	5952509	15:20	25/10/2013
12	Itata	709260	5956952	706992	5957115	11:40	25/10/2013
13	Itata	706489	5961711	706192	5961654	11:00	23/10/2013
14	Itata	706498	5964497	706349	5964402	11:00	24/10/2013
15	Itata	705819	5966050	706211	5966209	12:24	24/10/2013
16	Itata	703365	5967952	705197	6968187	13:40	24/10/2013
17	Lonquén	717177	5966204	717230	5966092	9:35	22/10/2013
18	Itata	699211	5969647	699146	5969386	16:00	26/10/2013
19	Itata	696316	5970875	696501	5971195	11:20	27/10/2013
20	Itata	691237	5971120	-	-	13:30	27/10/2013

La diferencia entre las coordenadas propuestas originalmente y aquellas medidas en terreno en las que se realizaron los aforos se debe a que las ubicaciones originales no correspondían a secciones de aforo aceptables (por alta turbulencia, elevada ramificación, presencia de obstáculos) o por una falta de acceso físico al emplazamiento.

Los resultados obtenidos, de caudal y de parámetros fisicoquímicos del agua en cada punto de aforo, se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 28. Resultados mediciones de caudal, Ríos Itata y Lonquén

Punto	Río	Aforo		Calidad de Aguas		
		Caudal (m ³ /s)	Sección (m)	pH	Ta	CE (mS)
1	Lonquén	0,48	14,2	8,01	17,7	0,17
2	Lonquén	0,46	7,8	8,10	19,4	0,17
3	Lonquén	0,44	9,1	8,12	19,7	0,18
4	Lonquén	0,46	15,0	8,24	20,0	0,18
5	Lonquén	0,35	8,7	8,12	12,8	0,17
6	Lonquén	0,45	6,8	8,17	20,2	0,18
7	Itata	224	171	9,08	20,5	0,05
8	Itata	250	89	8,20	18,5	0,05
9	Itata	480	300	7,90	15,5	0,07
10	Itata	302	315	8,20	15,4	0,05
11	Itata	235	266	8,92	21,0	0,05
12	Itata	266	560	8,46	15,3	0,04
13	Itata	413	454	8,30	16,1	0,03
14	Itata	323	360	8,29	16,4	0,04
15	Itata	250	440	8,34	16,5	0,03
16	Itata	338	380	8,80	17,7	0,04
17	Lonquén	0,38	8,55	8,11	15,5	0,15
18	Itata	309	385	8,33	18,1	0,04
19	Itata	285	527	8,42	18,0	0,05

Se observa como el río Lonquén presenta un flujo en torno a los 350 l/s antes de incorporar el caudal del Lonquén (puntos 5 y 7) y de unos 450 l/s tras su confluencia (puntos 1-4).

Cabe destacar que, durante la campaña de aforos, el cauce del río Lonquén portaba un caudal muy inferior al su promedio histórico, lo cual fue ratificado por comentarios de habitantes locales y por las trazas observadas en el cauce.

Asimismo, la profundidad, el ancho y el fondo de arena (limpia y bien seleccionada) presentaron características similares durante todo el trazado aforado.

Por su parte, el curso del río Itata presenta mayores variaciones de caudal en el tramo de estudio, con secciones que oscilan entre 90 y 560 m, y un fondo parejo, conformado por arenas y gravas, con pequeñas variaciones en la profundidad.

Las aguas aforadas en el río Lonquén se observaron incoloras (cristalinas) con valores de pH: 8,1 y conductividad eléctrica: 0,17 mS/cm; mientras que, las aguas aforadas en el río Itata, se observaron turbias a semiturbias con valores de pH entre 7,9 - 9,1 y conductividad eléctrica: 0,05 mS/cm.

En total se obtuvo el caudal pasante en 19 secciones, 12 en el Itata, 7 en el Lonquén.

En el punto de aforo N° 20, en el río Itata, se realizaron en 2 días 3 intentos por aforar esta sección, sin embargo, las condiciones especiales de oleaje y corrientes no lo permitieron. En efecto, las condiciones de corriente y contracorriente en la desembocadura dificultaban enormemente obtener medidas representativas del flujo en dicho punto.

El detalle y las fotografías de la campaña de aforos se incluyen en el Anexo 4.

En la figura siguiente se muestran la ubicación de los puntos de aforo.

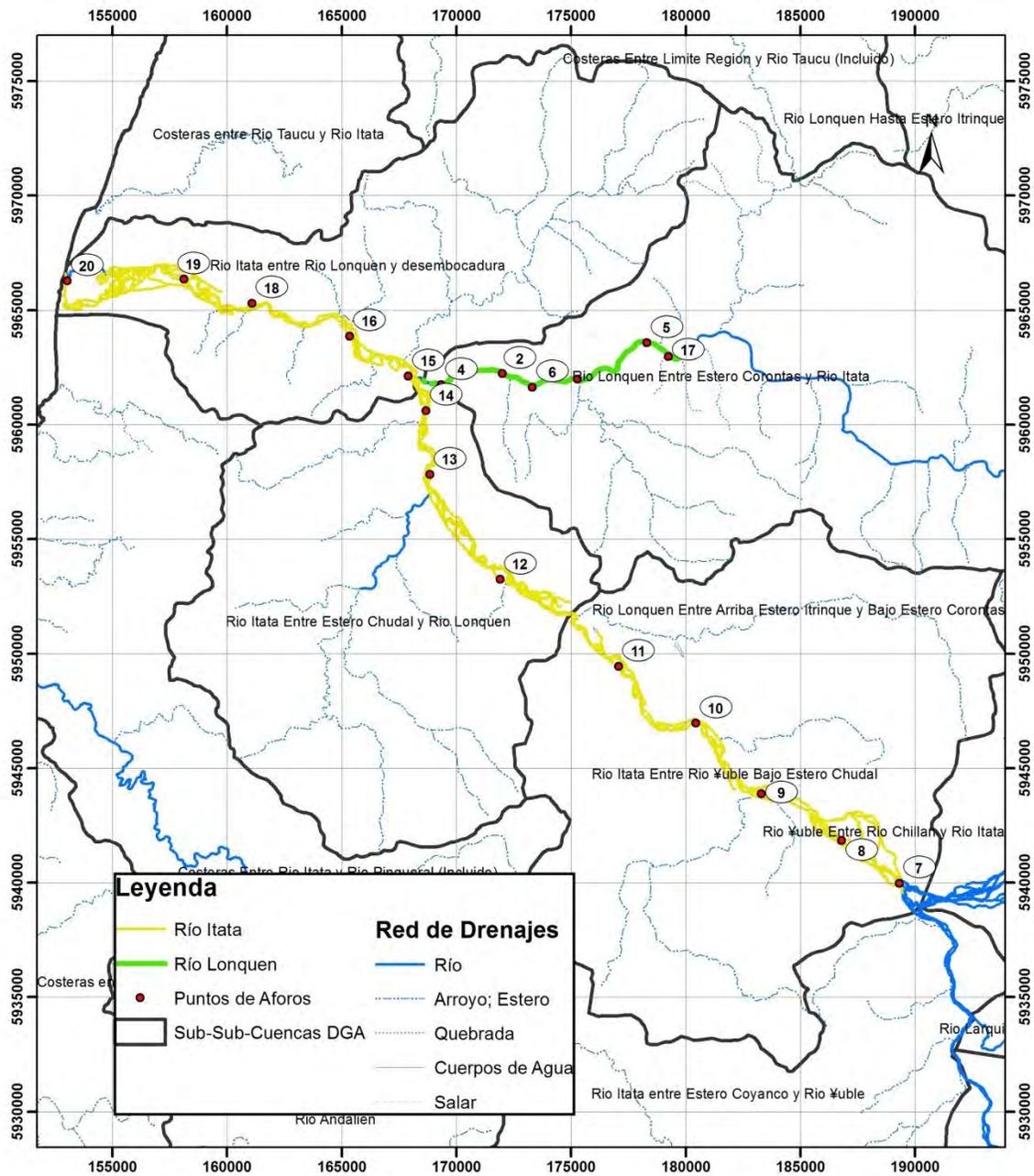


Figura 57. Ubicación puntos de aforo

En las figuras siguientes se muestra la distribución y valores de los caudales aforados.

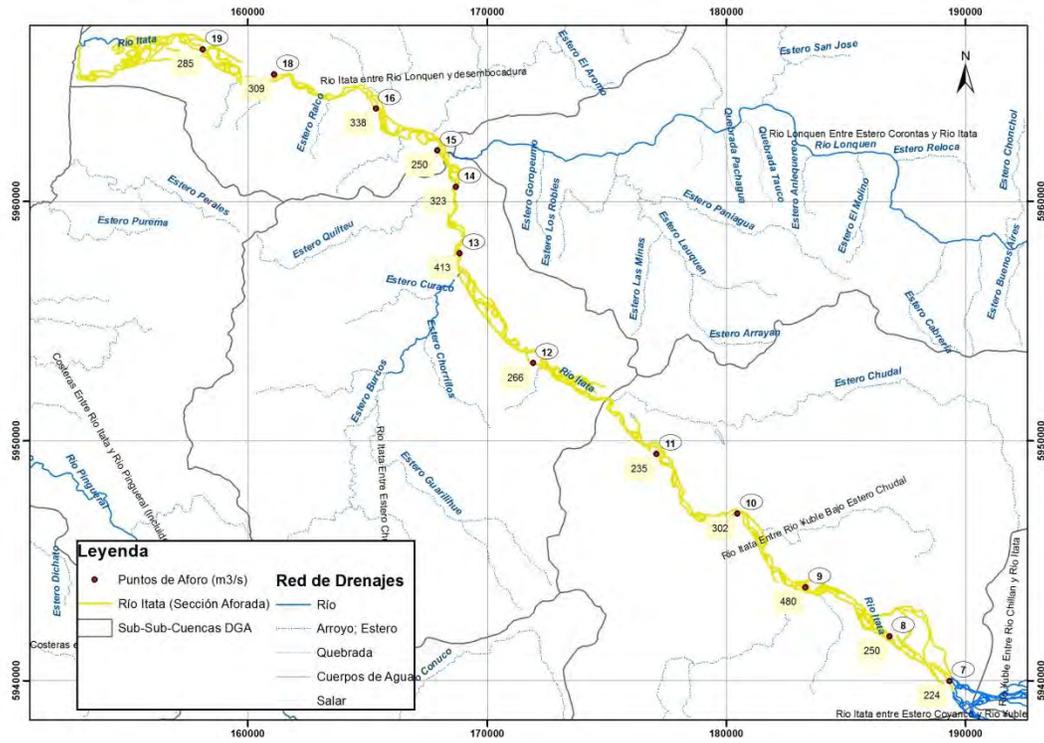


Figura 58. Caudales medidos, río Itata

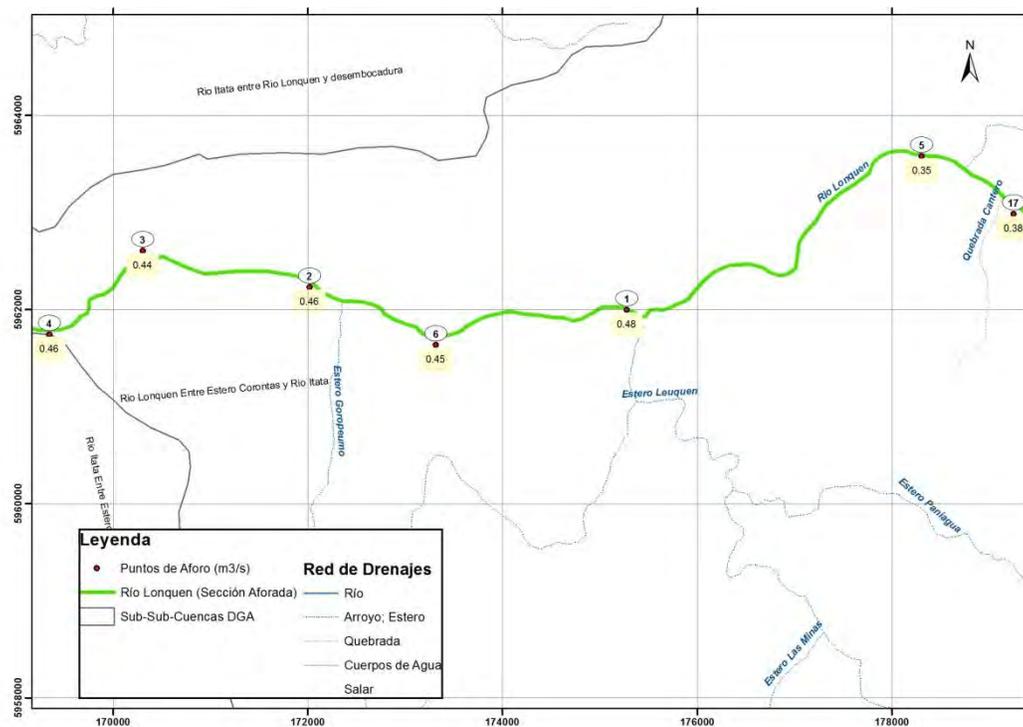


Figura 59. Caudales medidos, río Lonquén

En la figura siguiente se muestra en rojo las zonas en las que el río es perdedor (cede agua al acuífero), y en azul las zonas en las que es ganador (el río actúa como dren del acuífero), trazados según los resultados obtenidos en los aforos realizados. Si bien, para establecer esta relación adecuadamente se ha realizado una corrección del caudal aforado en el punto 9, ya que este aforo se realizó un día (22/10/13), en el cual el río llevaba 2,25 más caudal que en días posteriores, durante los que se realizaron los aforos en puntos vecinos. De esta forma, para poder comparar unos datos con otros y poder establecer así si el río es ganador o perdedor, se ha normalizado el valor de 480 m³/s a el valor de 213 m³/s (2,25 veces inferior).

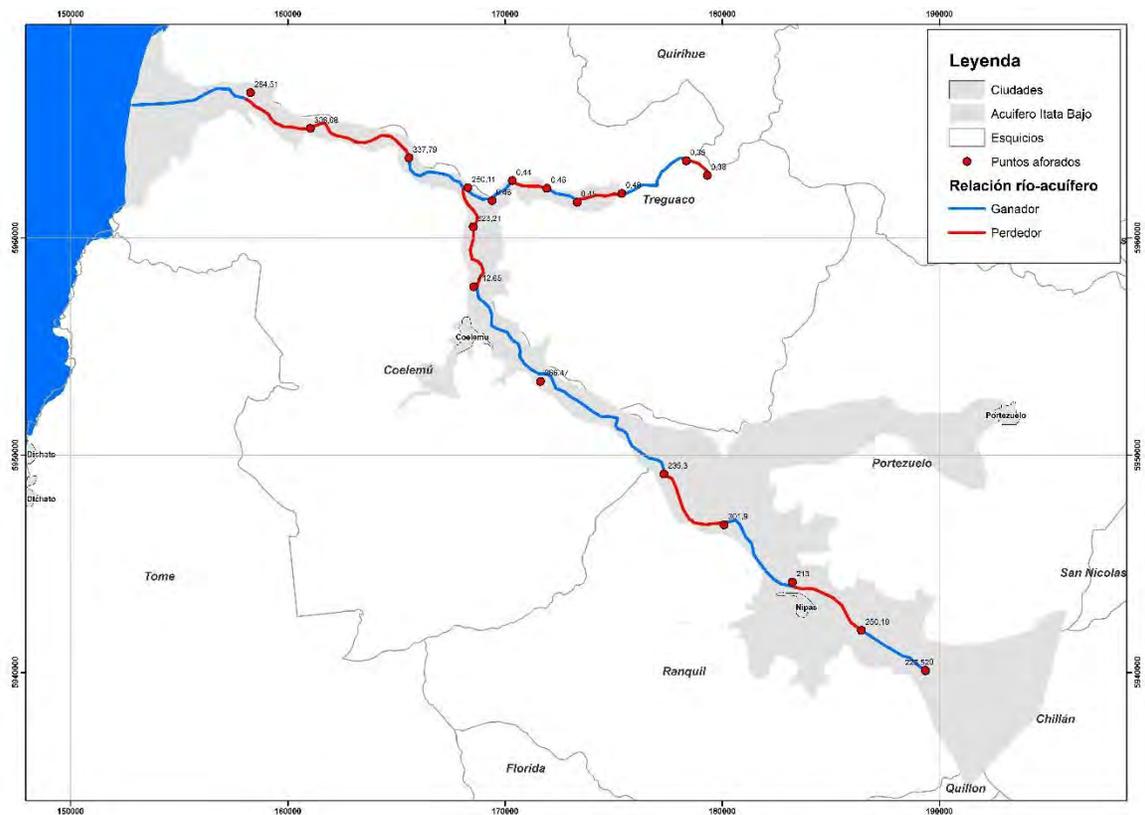


Figura 60. Relación río-acuífero según aforos realizados.

9.3.7. CATASTRO DE LA DEMANDA AGRÍCOLA, MINERA, SANITARIA E INDUSTRIAL

Se catastraron 200 pozos, tratando de determinar el tipo de uso principal del agua en cada uno de los puntos catastrados: abastecimiento (A), riego (R) o ganado (G) y cuando fue posible se identificó el uso alternativo o secundario.

También se buscó determinar la distribución del uso del agua durante los meses de verano e invierno, la tipología y hectáreas de cultivos existentes. Igualmente se identificó el estado de las captaciones, en uso: (U), abandonada: (FU) o reserva (RS).

De los 200 puntos catastrados, 66 tienen como uso principal el riego, 107 se utilizan para agua potable, 9 para uso industrial y 1 se utiliza para abreviar ganado. 17 de ellos no pudieron clasificarse.

Respecto de si están en uso o no, 18 de ellos se encuentran abandonados, 154 se encuentran en uso, 24 se catalogaron como de reserva (sin uso en el momento del catastro, pero que pudiera estarlo si incrementa la demanda y/o se avería el pozo principal), y 4 no pudieron clasificarse.

De la información recabada en terreno, la superficie regada por los 200 pozos sería de alrededor de 167 ha.

En cuanto al bombeo, de la información recabada se tiene que en general los pozos de riego se bombean unas pocas horas al día, entre 1/2 a 9 horas, en tanto que los pozos para agua potable bombean un mayor tiempo llegando algunos a 24 horas diarias.

De los 200 pozos, 21 se utilizan exclusivamente para riego, 66 sólo para agua potable, 1 sólo para uso industrial, 65 tienen usos secundarios o alternos, 30 de ellos son tanto para riego como para agua potable, dos se usan para agua potable y uso industrial y 12 pozos se utilizan complementariamente para abreviar ganado.

Se incluye, en el Anexo 2, una tabla con los tipos de usos del agua en los puntos catastrados, así como la distribución del uso en meses de verano e invierno, la tipología y hectáreas de cultivos existentes.

9.4. EQUIPOTENCIALES Y FLUJOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Atendiendo a la campaña de piezometría realizada, se ha representado un mapa de isopiezas y trazado las direcciones de flujo principales.

La componente de flujo principal de la cuenca está dirigida hacia el acuífero del Itata-bajo, es decir, en la parte norte de la cuenca la dirección de flujo es hacia el sur y en la parte sur de la cuenca la dirección de flujo es hacia el norte. En el acuífero el flujo se dirige de forma general de este a oeste (hacia aguas abajo).

Asimismo, se observan algunos conos de depresión, provocados quizás por bombeos puntuales, y componentes de flujo perpendiculares al principal, correspondientes con extensiones del acuífero en los laterales y con los depósitos de terrazas fluviales que alcanzan mayor cota que el lecho principal.

En la Figura 61 se presenta un mapa de isopiezas junto con las direcciones de flujo principales y los puntos en los cuales se han realizado las medidas de nivel piezométrico.

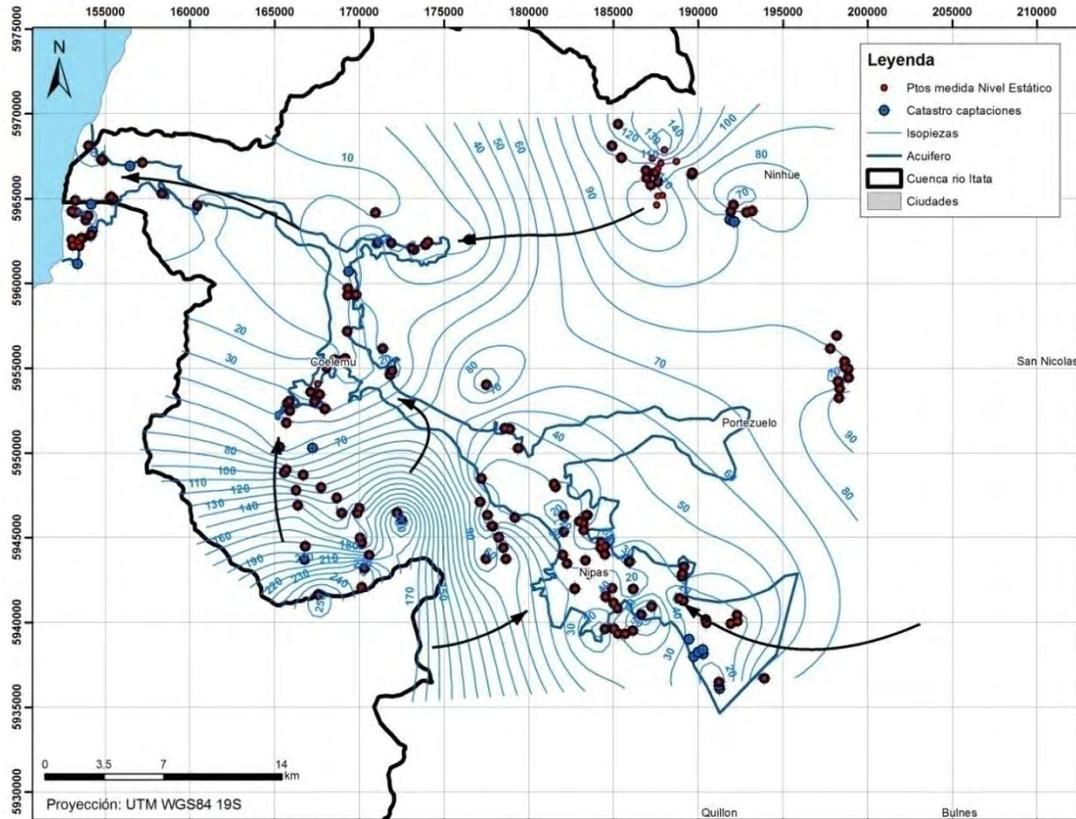


Figura 61. Mapa de equipotenciales y direcciones de flujo

9.5. BALANCE HÍDRICO

La cuenca de Itata-bajo posee un régimen hidrológico próximo al natural, con poca acción antrópica y muy influenciado por el sistema superficial.

Para la realización del balance hídrico se han tenido en cuenta los siguientes elementos:

- Entradas
 - Infiltración por precipitación directa.
 - Entradas laterales por escorrentía subsuperficial (infiltración en cuencas aportantes).
 - Flujo subterráneo en límites abiertos (río Ñuble, Itata alto y Lonquén)
 - Infiltración directa desde cauces (río Itata y Lonquén)

- Salidas
 - Bombeos.
 - Subterráneas hacia el mar
 - Afloramientos al sistema superficial (río ganador)

9.5.1. ENTRADAS

El hecho de que el sistema funcione prácticamente en régimen natural hace que no siempre se produzca infiltración desde cauces, ni infiltración por precipitación directa, ya que el acuífero se encuentra saturado prácticamente todo el año, exceptuando el verano, impidiendo por tanto la infiltración e incluso generando zonas de afloramiento hacia el sistema superficial.

9.5.1.1. Infiltración por precipitación directa y recarga de cuencas laterales

Para la cuantificación de la infiltración por precipitación directa, así como por recarga de cuencas laterales, se ha realizado un balance hidrometeorológico en el suelo, calculando la evapotranspiración por cuencas, el umbral de escorrentía y finalmente la infiltración en el acuífero.

El cálculo del balance hídrico se ha realizado subdividiendo el ámbito de estudio en 25 zonas, de las cuales una corresponde al propio acuífero Itata bajo y las otras 24 zonas son subcuencas con punto de drenaje dicho acuífero.

Se incluyen en la Figura 62 las 24 subcuencas definidas, así como el acuífero Itata bajo.

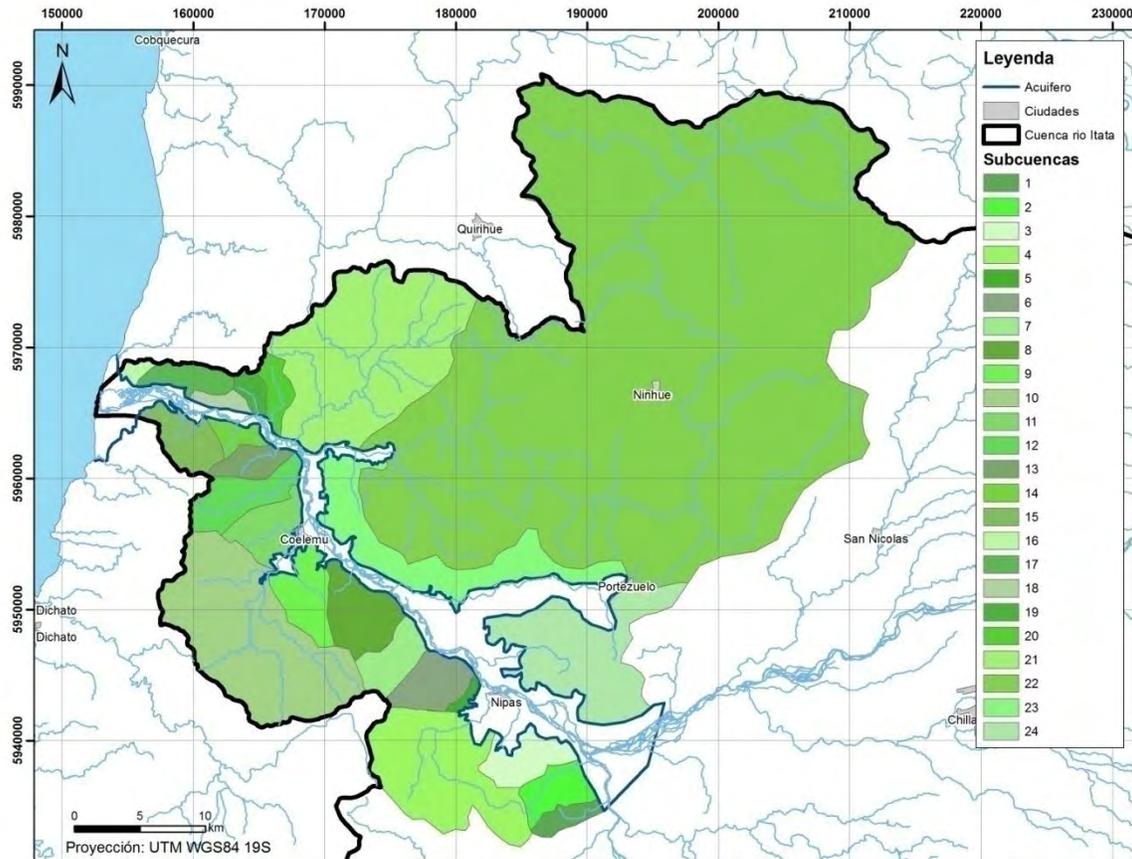


Figura 62. Subcuencas aportantes a Itata-bajo

- **Cálculo del umbral de escorrentía**

La asignación de un valor de umbral de escorrentía se ha realizado en base a la metodología propuesta por el S.G.S (SoilConservationService), en el cual se debe obtener, para cada cuenca en este caso, la siguiente zonificación el terreno:

- Usos del suelo
- Pendientes
- Permeabilidad

En función de la clasificación realizada se puede obtener un valor de umbral de escorrentía atendiendo a la tabla siguiente:

Tabla 29. Estimación del umbral de escorrentía

Uso de la tierra	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Rotación de cultivos pobres	> 3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	< 3	R / N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	> 3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	< 3	R / N	47	25	16	13
Praderas	> 3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	70	33	18	13
		Muy buena	80	41	22	15
	< 3	Pobre	58	25	12	7
		Media	80	35	17	10
		Buena	12	55	22	14
		Muy buena	250	100	25	16
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	> 3	Pobre	62	26	15	10
		Media	80	34	19	14
		Buena	100	42	22	15
	< 3	Pobre	75	34	19	14
		Media	95	42	22	15
		Buena	120	50	25	16
Masas forestales (bosques, monte bajo,...)	----	Muy clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	75	34	22	16
		Espesa	90	47	31	23
		Muy espesa	120	65	43	33
Barbecho	> 3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	< 3	R/ N	20	14	11	8
Cultivos en hilera	> 3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	< 3	R / N	28	19	14	11
Cereales de invierno	> 3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	< 3	R / N	34	21	14	12

Tabla 29. Estimación del umbral de escorrentía

Uso de la tierra	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Notas : N denota cultivo según las curvas de nivel. R denota cultivo según la línea. Las zonas abancaladas se incluirán entre las pendientes < 3 % Los núcleos urbanos, edificaciones rurales, caminos,... no se tendrán en cuenta al representar un porcentaje despreciable del área total. En caso contrario deberán diferenciarse los porcentajes de las superficies impermeables ($P_o \sim 0$) y de los distintos tipos de suelo, atribuyendo a cada uno el valor correspondiente de P_o según la tabla. Al estimar el valor de P_o para el cálculo, deben tenerse en cuenta las modificaciones futuras previsibles en la cuenca, tales como urbanizaciones, repoblaciones, cambios de cultivos, supresión de barbechos,...						
Tipo de terreno		Pendiente	Umbral de Escorrentía (P_o) (mm)			
Rocas permeables	> 3	3				
	< 3	5				
Rocas impermeables	> 3	2				
	< 3	4				
Firmes granulares sin pavimento	----	2				
Adoquinados	----	1.5				
Pavimentos bituminosos o de hormigón	----	1				

Tabla 30. Grupos de suelo

Grupo	Infiltración	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa	Perfecto
			Arenosa-limosa	
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa	Bueno a moderado
			Franca	
			Franco-arcillo-arenosa	
			Franco-limosa	
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa	Imperfecto
			Franco-arcillo-limosa	
			Arcillo-arenosa	
D	Muy lenta	Pequeña (litosuelo u de horizontes arcilla)	Arcillosa	Pobre a muy pobre

Los usos del suelo se han determinado a partir de la información cartográfica generada por la Comisión Nacional de Riego (CNR), y los resultados obtenidos son los siguientes:

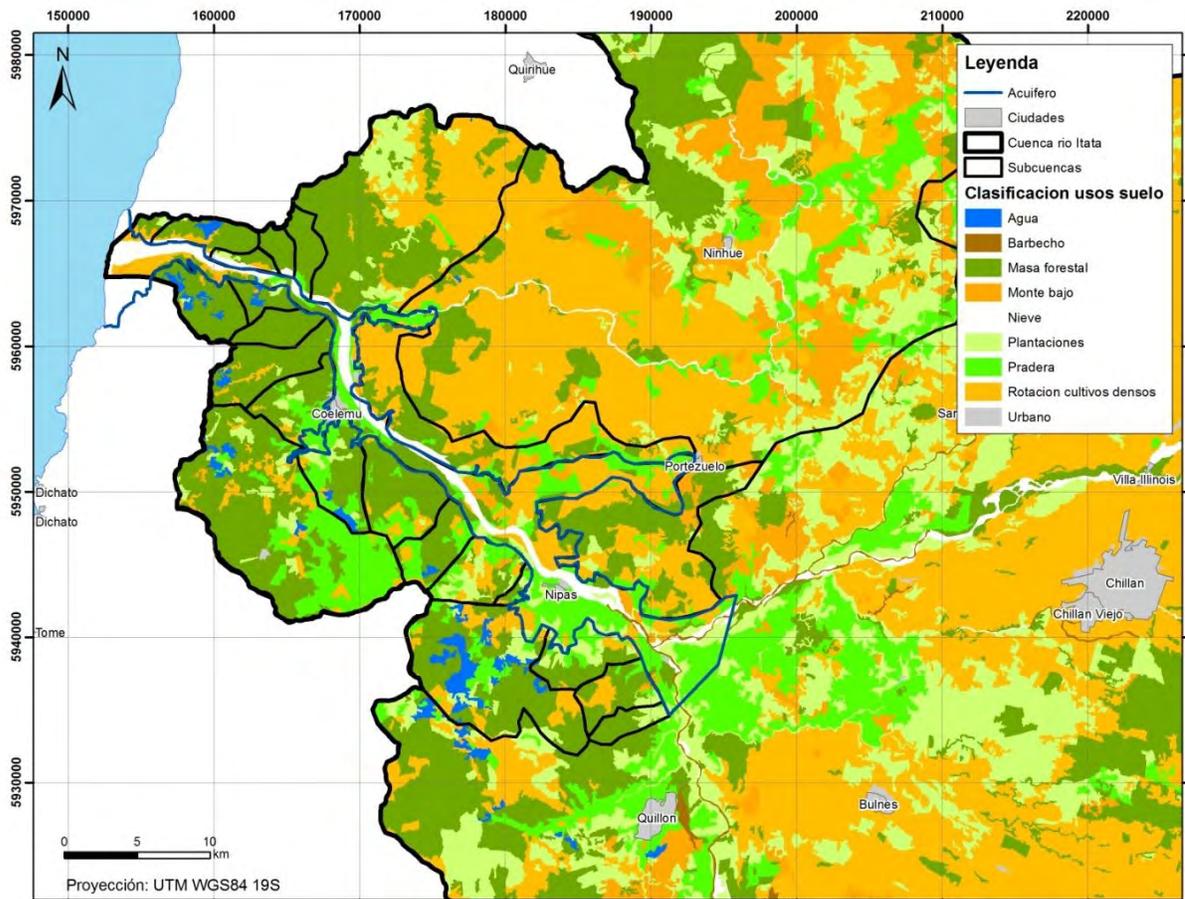


Figura 63. Clasificación de usos del suelo. Elaboración propia a partir de información facilitada por la CNR.

La clasificación por pendientes mayores y menores al 3% se incluye a continuación:

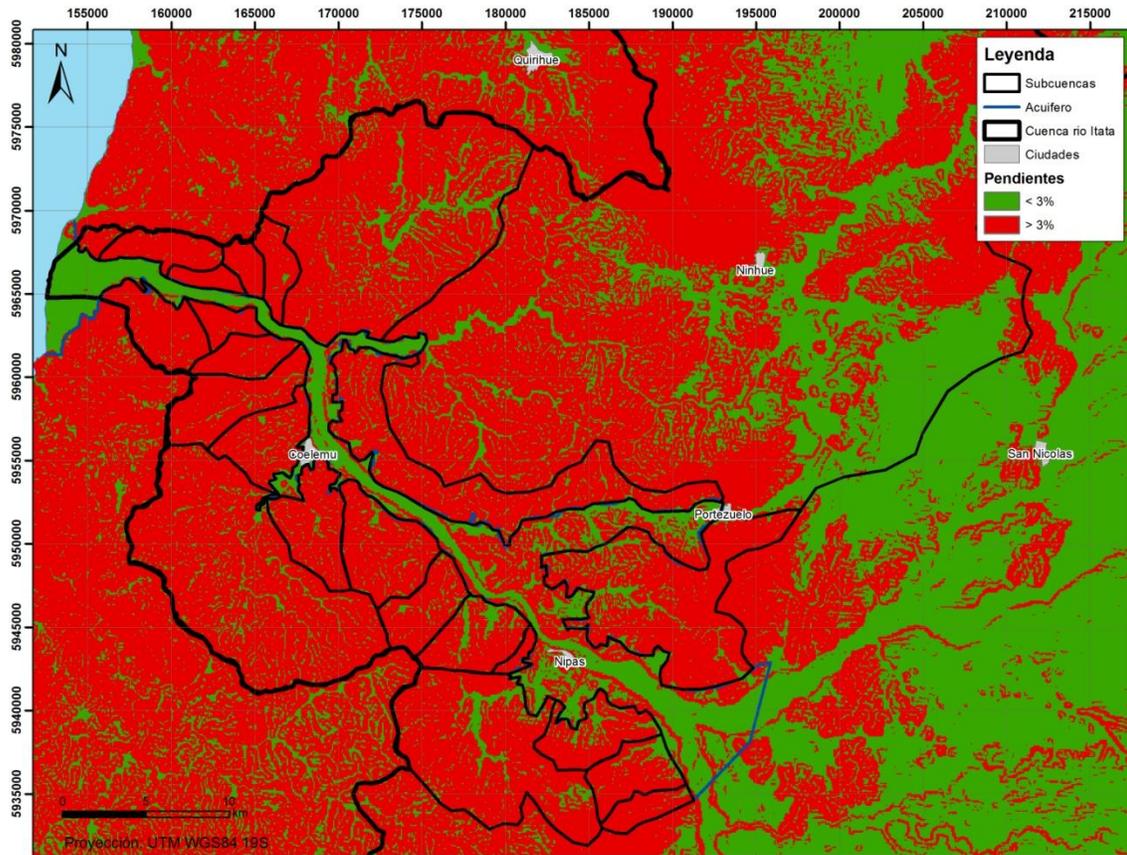


Figura 64. Clasificación de pendientes.

La permeabilidad del terreno se ha establecido en función de la geología existente, asignando valores de la "A" a la "D" en función de facilidad para la producción de escorrentía (mayor impermeabilidad):

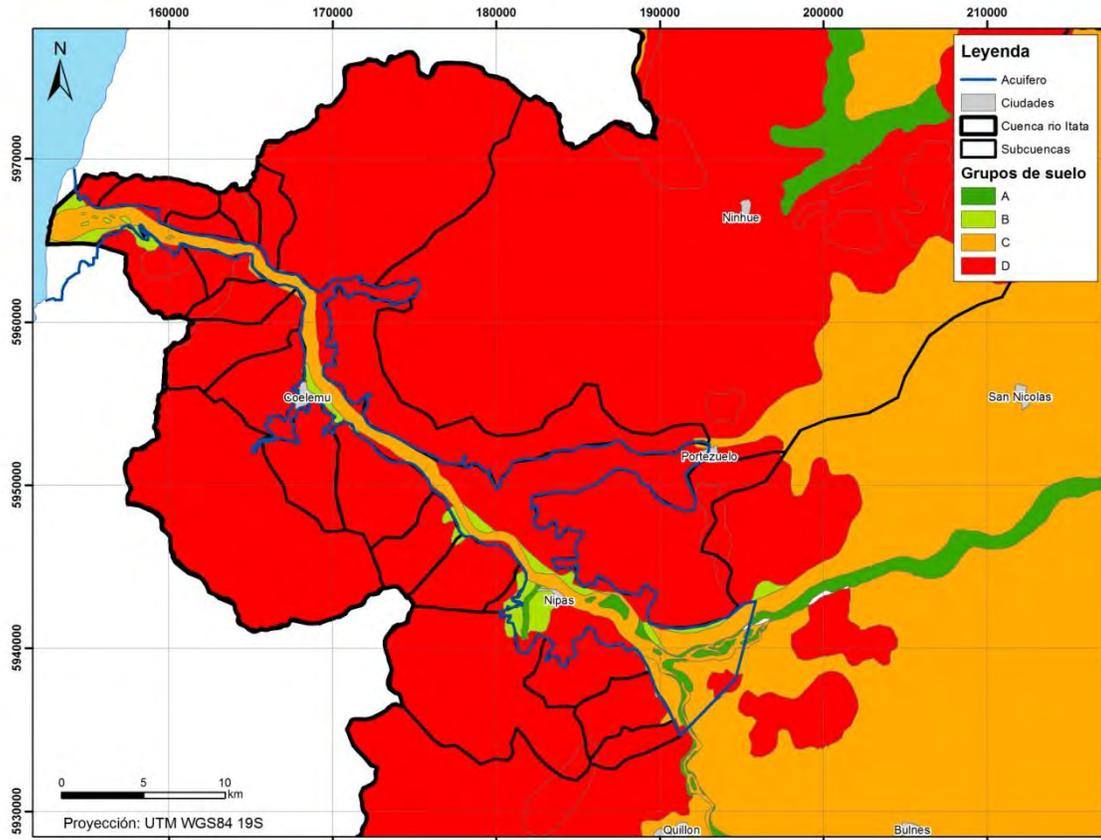


Figura 65. Clasificación en grupos de suelo.

Intersectando las tres zonificaciones del terreno, y teniendo en cuenta los valores proporcionados por la Tabla 29, se obtiene la siguiente zonificación de Po:

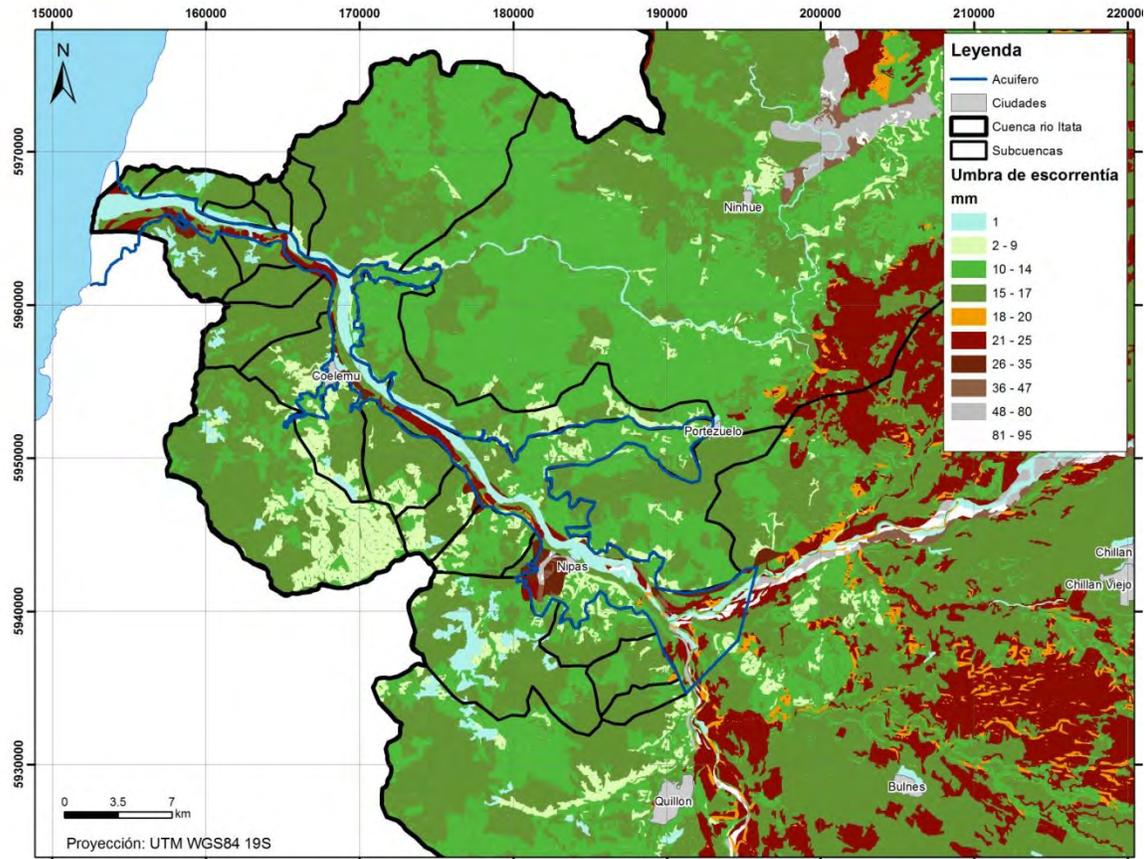


Figura 66. Clasificación del umbral de escorrentía.

Posteriormente, haciendo una media ponderada a la superficie en cada cuenca, se ha obtenido el valor medio del umbral de escorrentía:

Tabla 31. Umbral de escorrentía por subcuenca

Zona	Área permeable (km ²)	Po (mm)
Cuenca 1	7,95	15,37
Cuenca 2	16,16	14,65
Cuenca 3	19,36	14,10
Cuenca 4	78,44	12,60
Cuenca 5	2,80	22,21
Cuenca 6	19,92	13,26
Cuenca 7	17,29	14,03
Cuenca 8	27,97	14,41
Cuenca 9	22,51	12,58
Cuenca 10	122,86	13,24
Cuenca 11	19,68	14,01

Tabla 31. Umbral de escorrentía por subcuenca

Zona	Área permeable (km ²)	Po (mm)
Cuenca 12	24,14	15,23
Cuenca 13	11,43	16,19
Cuenca 14	7,26	14,90
Cuenca 15	19,51	15,15
Cuenca 16	3,19	14,14
Cuenca 17	12,76	12,90
Cuenca 18	4,93	10,47
Cuenca 19	5,97	14,74
Cuenca 20	9,84	15,00
Cuenca 21	144,25	13,70
Cuenca 22	961,60	19,83
Cuenca 23	64,21	12,09
Cuenca 24	78,91	13,76

Por otro lado, el área permeable del acuífero Itata bajo, una vez descontado el área ocupada por lámina de agua (33 km²), es de 150 km², y el valor de P₀ asignado es de 12 mm, considerando que el grupo de suelo es el D (zonas con nivel freático alto), la pendiente es menor del 3%, y el uso mayoritario del terreno se puede clasificar como praderas entre medias y bien pobladas.

- **Cálculo de la infiltración**

Una vez obtenido el umbral de escorrentía, se han definido las características del suelo (espesor radicular y capacidad de campo), ya que el valor de la evapotranspiración es muy susceptible a las características del mismo.

Para ello se han consultado estudio agronómicos, concretamente en el Proyecto **“Modelo de Zonificación de Distritos de Conservación en Territorios Degradados para Planes y Programas de Conservación de Recursos Naturales”** se incluían dos análisis granulométricos y ensayos para la determinación de características físico-químicas en suelos de la zona de estudio (Suelo Cauquenes).

De dichas muestras se extrajeron los datos necesarios para este estudio: Espesor radicular del suelo, Capacidad de Campo y Punto de Marchitez.

Los datos utilizados fueron los siguientes:

Tabla 32. Características de los suelos en la zona de estudio

CAUQUENES 1					Adoptado
Profundidad (cm)	15	40	70	90	0,9 m
CC	20,31	16,66	21,7	21,19	19,97 %
Pmp	11,09	6,47	8,25	8,03	8,46 %
CAUQUENES 2					Adoptado
Profundidad (cm)	15	32	53	80	0,8 m
CC	16,57	20,88	19,85	23,29	20,15 %
Pmp	8,18	7,08	6,21	10,59	8,02 %

Adoptado final
 0,85 m
 0,2006 CC
 0,0824 PM

Los valores utilizados fueron 0,85 metros de espesor radicular de suelo, 0,2006 para la capacidad de campo, y 0,0824 para el punto de marchitez.

Estos valores se han introducido en el software EASY_BAL, desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña, el cual realiza el cálculo de la evapotranspiración potencial con el método de Thornthwaite con valores diarios de precipitación y temperatura.

Todos los datos diarios y cálculos realizados para la obtención de la infiltración se incluyen en formato digital.

Tabla 33. Resultados obtenidos para la recarga por infiltración directa en acuífero y subcuencas aportantes según balance hidrometeorológico realizado

Zona	Área permeable (km ²)	Recarga mm/año	Recarga (hm ³ /año)	Recarga (l/s)	PP bruta (hm ³ /a)	ETR (hm ³ /a)	ETR (l/s)
Acuífero	150,01	2,98	0,447	14,18	68,32	62,23	1.973,37
Cuenca 1	7,95	24,39	0,194	6,15	3,62	3,30	104,53
Cuenca 2	16,16	20,07	0,324	10,28	7,36	6,70	212,54
Cuenca 3	19,36	16,76	0,325	10,29	8,82	8,03	254,68
Cuenca 4	78,44	7,65	0,600	19,03	35,72	32,54	1.031,89
Cuenca 5	2,80	59,92	0,168	5,32	1,28	1,16	36,86

Zona	Área permeable (km ²)	Recarga mm/año	Recarga (hm ³ /año)	Recarga (l/s)	PP bruta (hm ³ /a)	ETR (hm ³ /a)	ETR (l/s)
Cuenca 6	19,92	11,74	0,234	7,42	9,07	8,27	262,10
Cuenca 7	17,29	16,35	0,283	8,96	7,87	7,17	227,47
Cuenca 8	27,97	18,63	0,521	16,53	12,74	11,60	367,98
Cuenca 9	22,51	7,55	0,170	5,39	10,25	9,34	296,15
Cuenca 10	122,86	11,60	1,425	45,17	55,95	50,97	1616,19
Cuenca 11	19,68	16,27	0,320	10,15	8,96	8,16	258,85
Cuenca 12	24,14	23,56	0,569	18,03	10,99	10,01	317,51
Cuenca 13	11,43	29,31	0,335	10,62	5,20	4,74	150,33
Cuenca 14	7,26	21,59	0,157	4,97	3,31	3,01	95,56
Cuenca 15	19,51	23,11	0,451	14,30	8,89	8,09	256,67
Cuenca 16	3,19	17,00	0,054	1,72	1,45	1,32	41,99
Cuenca 17	12,76	9,60	0,123	3,89	5,81	5,29	167,85
Cuenca 18	4,93	0,00	0,000	0,00	2,25	2,05	64,91
Cuenca 19	5,97	20,65	0,123	3,91	2,72	2,48	78,53
Cuenca 20	9,84	22,20	0,219	6,93	4,48	4,08	129,48
Cuenca 21	144,25	14,37	2,072	65,71	65,69	59,84	1.897,62
Cuenca 22 (Cuenca Lonquén)	961,60	50,71	48,765	1.546,32	437,91	398,92	12.649,66
Cuenca 23	64,21	3,69	0,237	7,52	29,24	26,64	844,71
Cuenca 24	78,91	14,75	1,164	36,91	35,93	32,73	1.037,98
Total	1.852,96	464,45	59,28	1.879,71	843,84	768,70	24.375,39

Por tanto, el volumen de entradas por infiltración directa en el acuífero y por cuencas aportantes es el siguiente:

- Infiltración directa en el acuífero: 14,18 l/s
- Cuencas aportantes: 1.879,7 l/s

Cabe destacar que las cuencas aportantes no tienen definición de acuífero como tal, debido a que el agua infiltrada no se almacena en un acuífero de entidad, sino en los primeros metros de alteración de la roca (<10 m), por lo que el agua infiltrada puede volver a incorporarse fácilmente al sistema superficial, por lo que la cifra obtenida puede tratarse como orden de magnitud para cuantificar los recursos potenciales de agua subterránea (o subsuperficial) en las cuencas aportantes, y que esta recarga, en caso de no ser extraída por captaciones, se incorpora al sistema Itata-bajo, ya sea de forma subterránea, subsuperficial o directamente superficial.

9.5.1.2. Entradas por flujo subterráneo

En el sistema acuífero Itata bajo se pueden considerar tres zonas de entrada por flujo subterráneo (ver Figura 67):

- Acuífero asociado a Itata alto (continuación aguas arriba del sistema estudiado).
- Acuífero asociado a río Ñuble (continuación aguas arriba del sistema estudiado).
- Acuífero asociado a río Lonquén (continuación margen derecha del sistema estudiado).

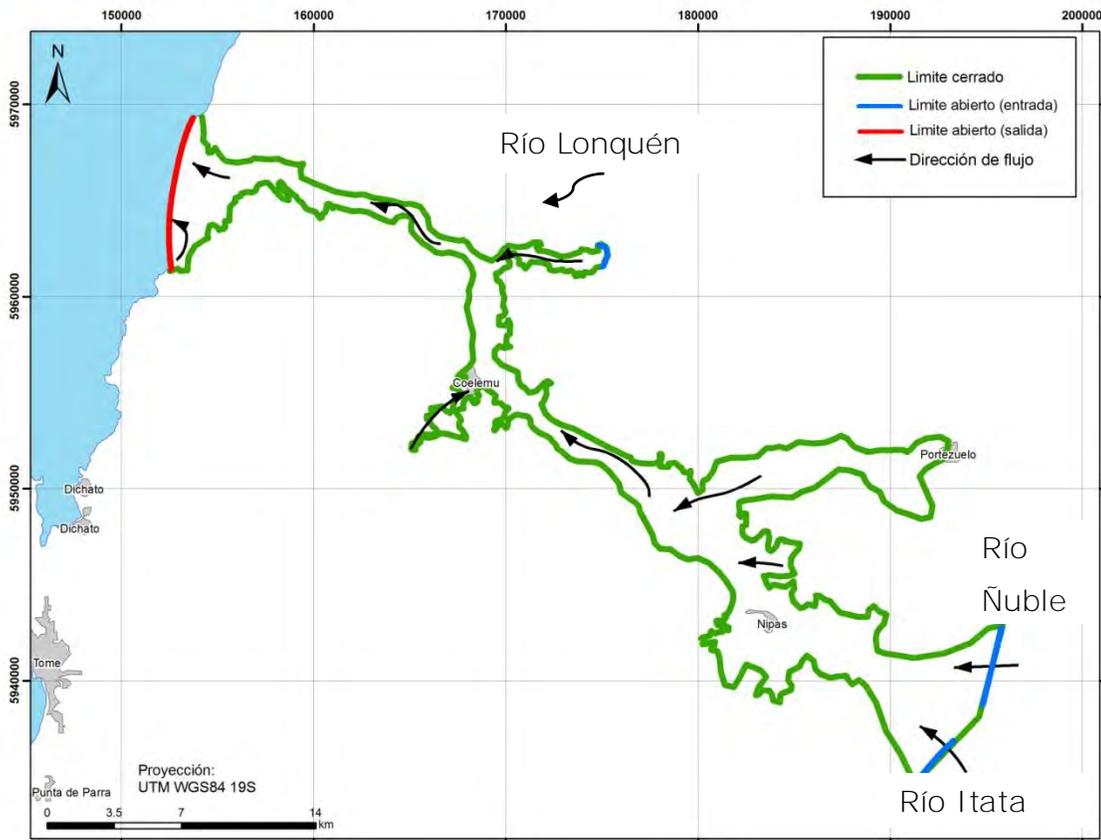


Figura 67. Límites del sistema Itata-bajo

Dichas entradas están limitadas por la sección acuífera y por las características hidráulicas del acuífero, y el volumen de paso por las mismas puede ser determinado por la fórmula de Darcy, tal y como se expone a continuación:

$$Q=A*k*i$$

Donde,

Q= Caudal de paso [L^3/t]

A= Área de la sección [L^2]

K= permeabilidad del terreno [L^2/t]

i= gradiente hidráulico

El área de paso se obtiene directamente de los perfiles geológicos realizados en el capítulo 9.1.2.

Sección Itata alto: 264.000 m²

Sección Ñuble: 430.000 m²

Sección Lonquén: 150.000 m²

La permeabilidad se obtiene a partir de los parámetros elásticos recopilados y recalculados:

Permeabilidad Itata alto:

En esta sección se encuentra el expediente ND-801/1773, en el cual AQUATERRA calculó una transmisividad de 150 m²/d (ver Tabla 21), y que suponiendo un espesor saturado de 150 m (obtenido con la geofísica) se obtiene una permeabilidad de 1,00 m/d.

Permeabilidad Ñuble:

En esta sección se encuentra el expediente ND-801/1422, del cual se obtuvo un valor de transmisividad de 400 m²/d (ver Tabla 21), y que suponiendo un espesor saturado de 200 m (obtenido con la geofísica) se obtiene una permeabilidad de 2,00 m/d.

Permeabilidad Lonquén:

En esta sección, el valor más cercano de transmisividad es de 97 m²/d, perteneciente al expediente ND-801/6684. El espesor saturado en esta zona es de unos 100 metros, por lo que la permeabilidad es de 1.00 m/d.

Por último, el gradiente se ha obtenido de las equipotenciales generadas en el capítulo 9.4, definido como 0,013 para Itata superior y Ñuble, y de 0,0108 para el Lonquén.

Se incluyen a continuación las entradas calculadas por recarga subterránea.

Tabla 34. Recarga por entradas subterráneas

Zona de entrada subterránea	Área (m ²)	Gradiente	T (m ² /d)	K (m/d)	Q (hm ³ /año)	Q (l/s)
Itata	264.000	0,0130	400	1,25	1,57	49,82
Ñuble	430.000	0,0130	150	2,00	4,09	129,83
Lonquén	150.000	0,0108	100	1,00	0,59	18,74

9.5.1.3. Entradas por infiltración desde cauces

Las entradas por infiltración de cauces es un elemento de importancia en este sistema, por este motivo se han realizado aforos diferenciales en distintos puntos del río Itata y río Lonquén.

Atendiendo a los datos proporcionados por los servicios satelitales de la Dirección General de Aguas, se puede analizar el caudal infiltrado del río Itata durante el periodo de verano:

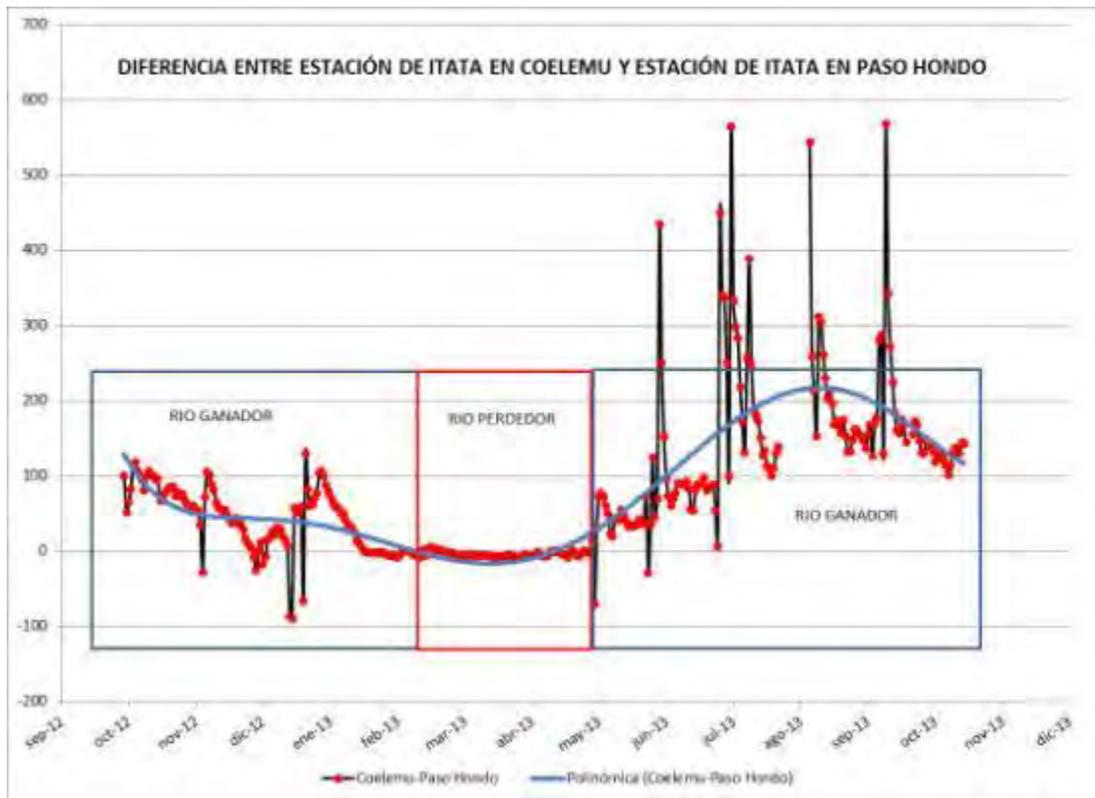


Figura 68. Diferencia entre caudal aforado en estación de Itata en Coelemu e Itata en Paso Hondo

El volumen perdido entre ambas estaciones en verano fue de 2.461 l/s (77,60 hm³).

No obstante, según los aforos realizados, el río es ganador o perdedor en función del tramo, y por tanto de la relación entre las equipotenciales del acuífero y la cota de la lámina de agua del río.

Asimismo en la modelación realizada se obtiene una infiltración desde el sistema superficial de 110 l/s en invierno y una salida en forma de afloramientos de 2.130 l/s.

9.5.1.4. Resumen de entradas

Se incluye a continuación un resumen de las entradas al sistema acuífero Itata-bajo:

Tabla 35. Entradas al sistema Itata-bajo

Entradas	Q (l/s)
Recarga directa lluvia	14
Laterales cuencas aportantes*	333
Subterránea Lonquen	19
Subterránea Itata superior	180
Infiltración Río Itata**	110
Total entradas	656

* En las entradas laterales se ha descontado la aportación subterránea de la cuenca del río Lonquen (cuenca 22), ya que esta entrada se ha calculado teniendo en cuenta la sección subterránea. Asimismo, la diferencia entre un cálculo y otro pone de manifiesto que la capacidad de almacenamiento de la cuenca del río Lonquén es escasa y el volumen infiltrado acaba siendo parte del sistema superficial.

** Calculada en la modelación

9.5.2. SALIDAS

El sistema tiene como salida principal la descarga hacia el mar. No obstante también se han identificado extracciones que suponen una merma en el sistema.

Las salidas por bombeos de aguas subterráneas en el sistema Itata Bajo (incluyendo cuenca y Lonquén) se han cuantificado en 2.609.280 m³ anuales. No obstante, se estima que puede existir un 25% de explotación adicional, por lo que la extracción por bombeos se estima en 3.266.000 m³ anuales.

Las salidas por descarga natural se calcularán en el modelo numérico con mayor precisión, no obstante se ha realizado una aproximación empleando la fórmula de Darcy, al igual que para las entradas por flujo subterráneo.

Según el mapa de isopiezas realizado, el gradiente estimado en la zona de desembocadura es muy bajo, de en torno al 0,08%.

La permeabilidad como parámetro elástico no se conoce como tal debido a que no se conoce ninguna prueba de bombeo realizada en la zona de desembocadura. No obstante, se ha realizado un perfil geofísico en el cual se determina el espesor del acuífero y una aproximación a la litología obtenida, en el cual predominan los sedimentos detríticos no consolidados de grano fino-medio, correspondientes con arenas y limos fundamentalmente.

A esta litología le corresponderían valores de permeabilidad de en torno a los 50 m/d tal y como se especifica en la bibliografía siguiente:

Urish, D.W., Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationships in glacial outwash aquifers. 1981. Donde se establece para arenas medias un valor de 0,000636 m/s, equivalentes a 55 m/d.

Papadopulos, S.S., and S.P. Larson, Aquifers storage of heated water; II, Numerical simulation of field results. 1978. Donde se establece para una litología de arenas, arcilla y limo una permeabilidad de 0,0005 m/s, equivalentes a 43 m/d.

El área de desembocadura, según los perfiles geológicos realizados (perfil 1-1'), es de 0,68 km².

De esta forma, subterráneamente deben salir unos 10 hm³/año, y en forma de surgencia el resto de excedentes de la recarga, hecho que se observa en superficie ya que incrementa de forma notable el ancho del cauce del río Itata en la zona de desembocadura, formando una especie de lago natural, tal y como se observa en la imagen aérea siguiente:



Figura 69. Imagen satelital del área de desembocadura del río Itata

9.5.3. BALANCE

El resumen del balance hídrico, previo a la realización del modelo numérico, se calcula de la siguiente forma:

Balance hídrico en el acuífero Itata-bajo

Tabla 36. Balance hídrico del sistema Itata-bajo

Entradas			Salidas		
Concepto	Q (hm ³ /año)	Q (l/s)	Concepto	Q (hm ³ /año)	Q (l/s)
Recarga directa lluvia	0,45	14	Bombeos	3,20	101
Laterales	10,51	333	Subterráneas	10,00	317
Subterránea Lonquén	0,59	19	Afloramientos	155,25	4.923
Subterránea Itata superior	5,67	180			
Infiltración Río Itata	151,23	4.796			
Total entradas	168,45	5.342	Total salidas	168,45	5.342

Balance hídrico en cuencas aportantes

El balance hídrico de las cuencas aportantes debe tenerse en cuenta de forma complementaria al sistema superficial, ya que la recarga obtenida puede volver al sistema superficial durante su escorrentía subsuperficial.

Tabla 37. Balance hídrico cuencas aportantes

Zona	Recarga (hm ³ /año)	Recarga (l/s)
Cuenca 1	0,194	6,15
Cuenca 2	0,324	10,28
Cuenca 3	0,325	10,29
Cuenca 4	0,600	19,03
Cuenca 5	0,168	5,32
Cuenca 6	0,234	7,42
Cuenca 7	0,283	8,96
Cuenca 8	0,521	16,53
Cuenca 9	0,170	5,39
Cuenca 10	1,425	45,17
Cuenca 11	0,320	10,15
Cuenca 12	0,569	18,03
Cuenca 13	0,335	10,62
Cuenca 14	0,157	4,97

Zona	Recarga (hm³/año)	Recarga (l/s)
Cuenca 15	0,451	14,30
Cuenca 16	0,054	1,72
Cuenca 17	0,123	3,89
Cuenca 18	0,000	0,00
Cuenca 19	0,123	3,91
Cuenca 20	0,219	6,93
Cuenca 21	2,072	65,71
Cuenca 22	48,765	1.546,32
Cuenca 23	0,237	7,52
Cuenca 24	1,164	36,91
Total	58,83	1.865,52

10. MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO

Una vez desarrollado el modelo conceptual del acuífero, se ha llevado a cabo un modelo numérico que permita la simulación del comportamiento del acuífero replicando la situación actual, y se ha simulado una serie de escenarios con la finalidad de disponer de una herramienta de gestión de los recursos en la cuenca Itata bajo.

El modelo numérico se ha calibrado en régimen permanente, y la información utilizada ha sido la expuesta en apartados anteriores tales como la geofísica, catastro realizado, piezometría, aforos, estudios previos, etc.

Se detalla a continuación el procedimiento llevado a cabo para la ejecución y calibración del modelo, así como los escenarios simulados.

10.1. DISCRETIZACIÓN Y MALLADO DEL MODELO

El modelo se ha realizado considerando una única capa acuífera, formada por el volumen entre el basamento y la superficie topográfica, obtenida mediante la extrapolación entre los perfiles geológicos trazados en apartados anteriores.

El mallado se ha realizado considerando 450 columnas y 365 filas, con tamaño de celdas de 100x100 metros y orientación norte sur.

La proyección geográfica se ha realizado en coordenadas UTM WGS84 18S, y las coordenadas locales (modelo) son:

X máximo: 4.35125E+4 m

Y máximo: 3.51546E+4 m



Figura 70. Mallado y celdas activas del modelo

La definición de celdas activas e inactivas ha sido basada en la delimitación de acuífero realizada en fases anteriores al estudio. En la Figura 70 se incluyen en blanco las celdas activas y en verde las inactivas.

10.2. GEOMETRÍA DEL MODELO

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el modelo numérico se ha desarrollado en una única capa acuífera, delimitada por el basamento definido en el apartado 9.1.2, a partir de los datos recopilados y de geofísica.

La topografía ha sido obtenida por el Servicio Regional de Mapas de GEOSUR.

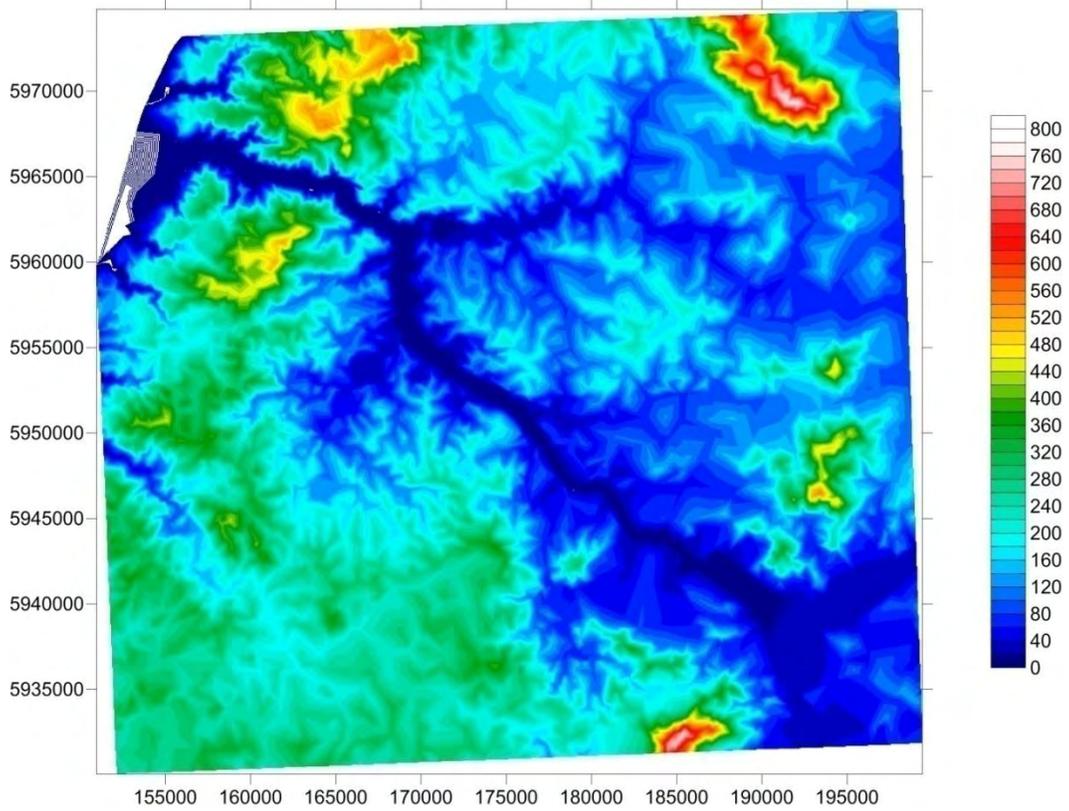


Figura 71. Topografía introducida en el modelo

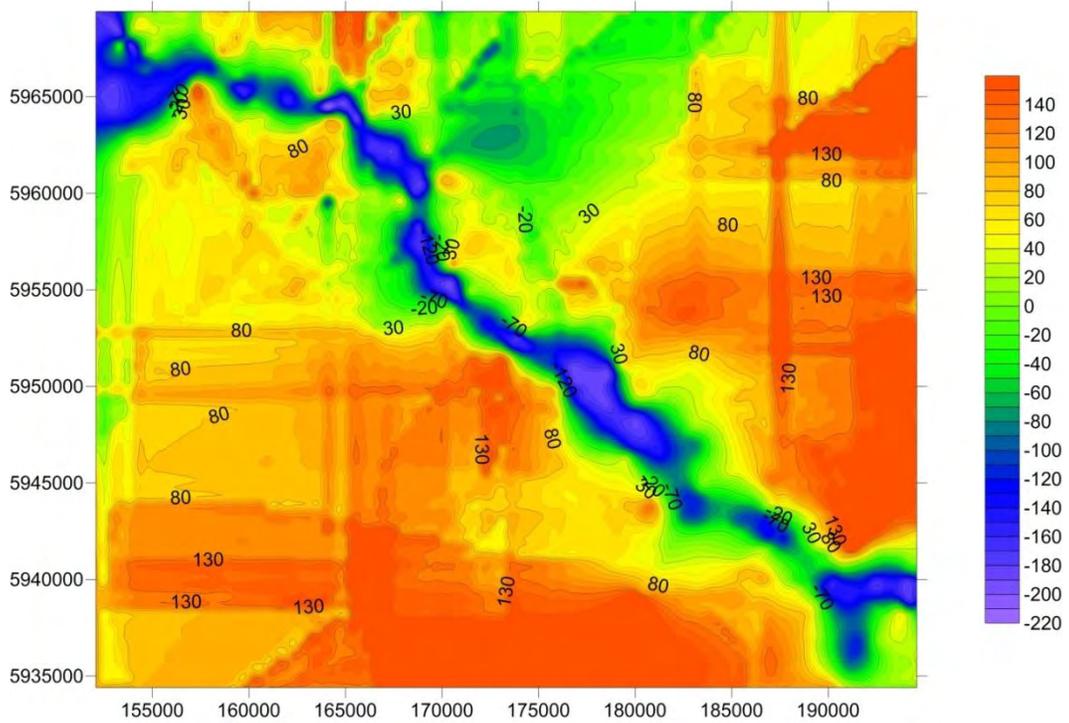


Figura 72. Basamento introducido en el modelo

10.3. PARÁMETROS ELÁSTICOS

Los parámetros elásticos introducidos han sido permeabilidad y coeficiente de almacenamiento, aunque este último no se ha modificado durante la calibración ya que no afecta a la calibración en régimen estacionario.

Se consideró isótropo en la horizontal ($k_x/k_y=1$) y anisótropo en la vertical (k_z/k_x aprox. 0,1-0,01).

La zonificación de la permeabilidad se realizó atendiendo a los datos recopilados, y fue modificada durante la calibración para ajustar los niveles observados a los calculados.

La distribución de permeabilidades obtenidas fue la siguiente:

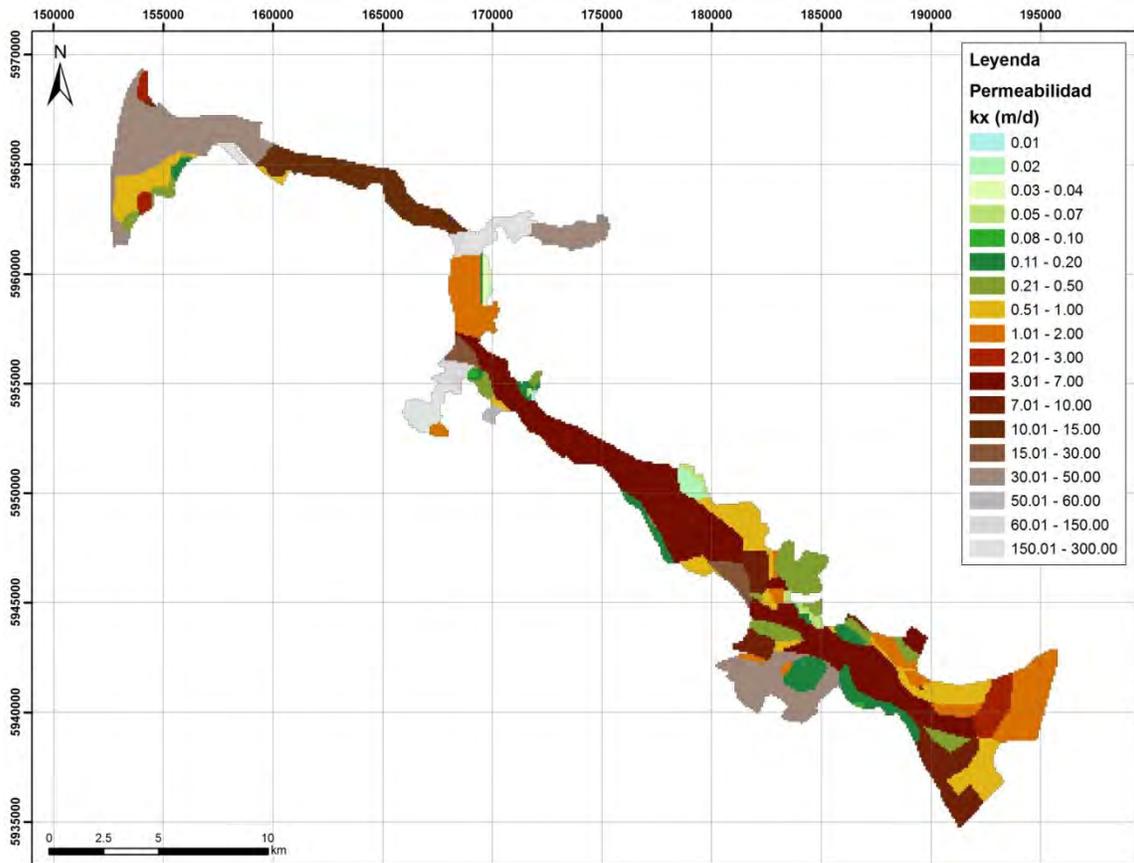


Figura 73. Distribución de la permeabilidad K_x en el acuífero Itata bajo.

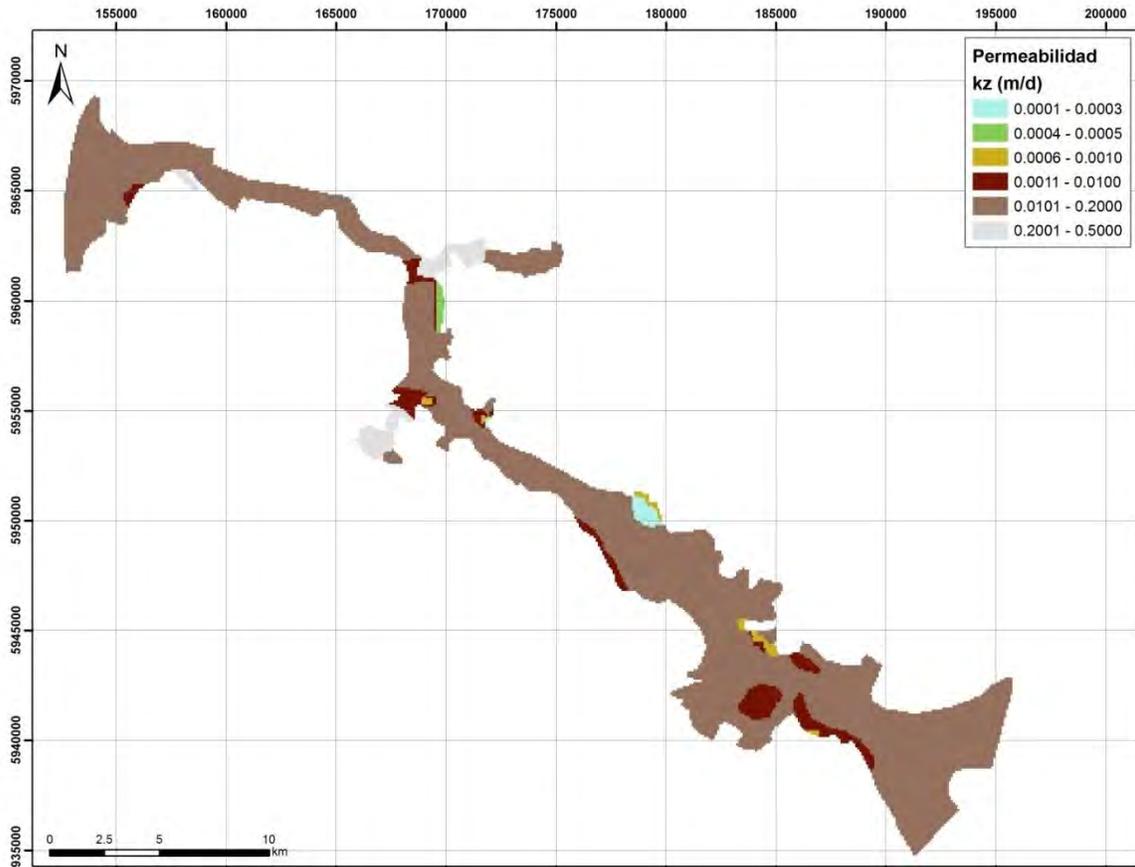


Figura 74. Distribución de la permeabilidad Kz en el acuífero Itata bajo.

10.4. CONDICIONES DE CONTORNO

10.4.1. BORDES

Se han establecido dos tipos de borde: impermeable y celdas de nivel constante (Constant Head Boundary).

Tal y como se mencionó en el modelo conceptual, el acuífero presenta conexión tanto aguas arriba del río Itata, como del río Ñuble y del Lonquén, zonas en las cuales se ha incluido la condición de borde de celda constante (CHB) teniendo en cuenta la piezometría observada durante la campaña de terreno y estudios previos.

Asimismo, también se mencionó la descarga hacia el mar de forma subterránea en desembocadura, zona en la cual se ha incluido también borde de nivel constante (0 msnm).

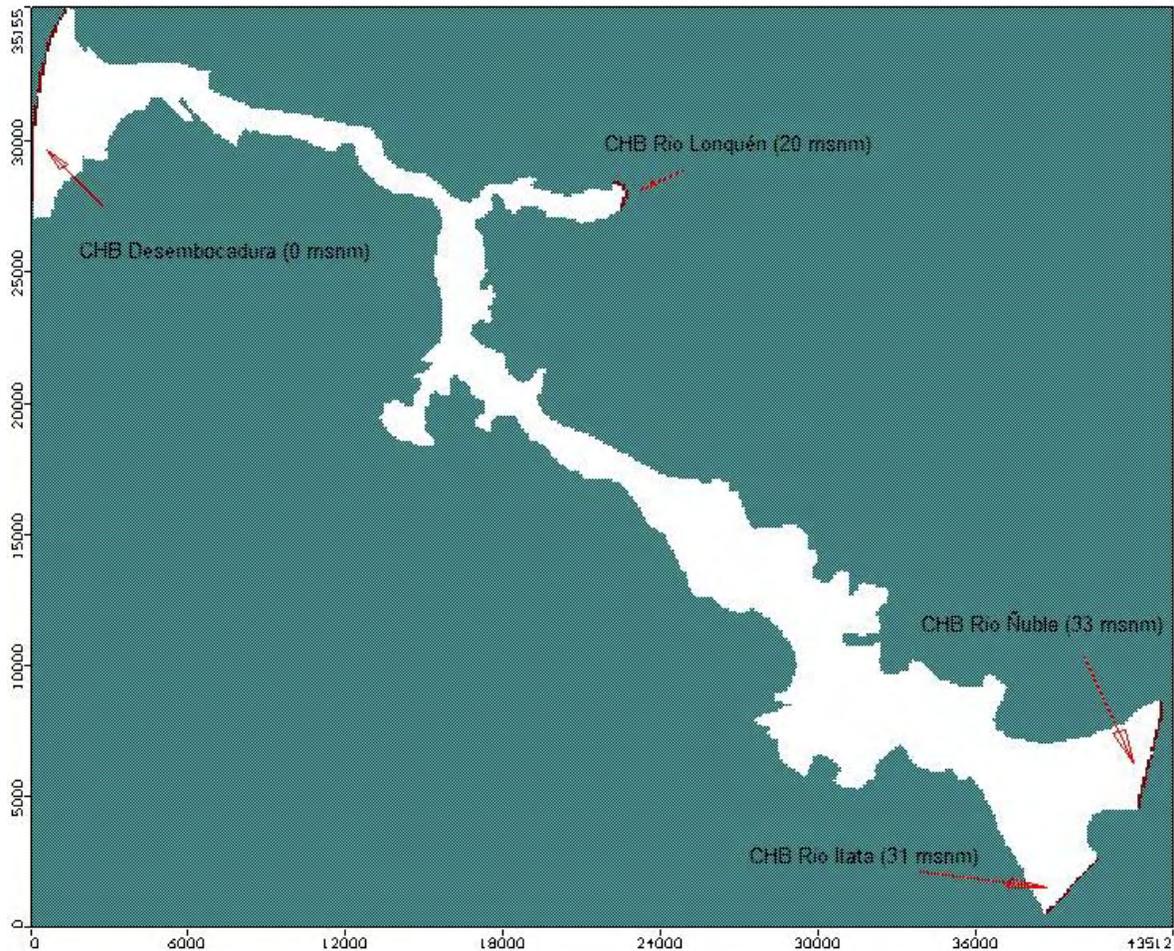


Figura 75. Asignación de celdas de nivel constante en el acuífero Itata Bajo

Asimismo, las entradas laterales por escorrentía subsuperficial de cuencas aportantes y las entradas subterráneas del sector de Coelemú, se han introducido como pozos de inyección.

En la figura siguiente se muestran los pozos de inyección del sector de Coelemú.

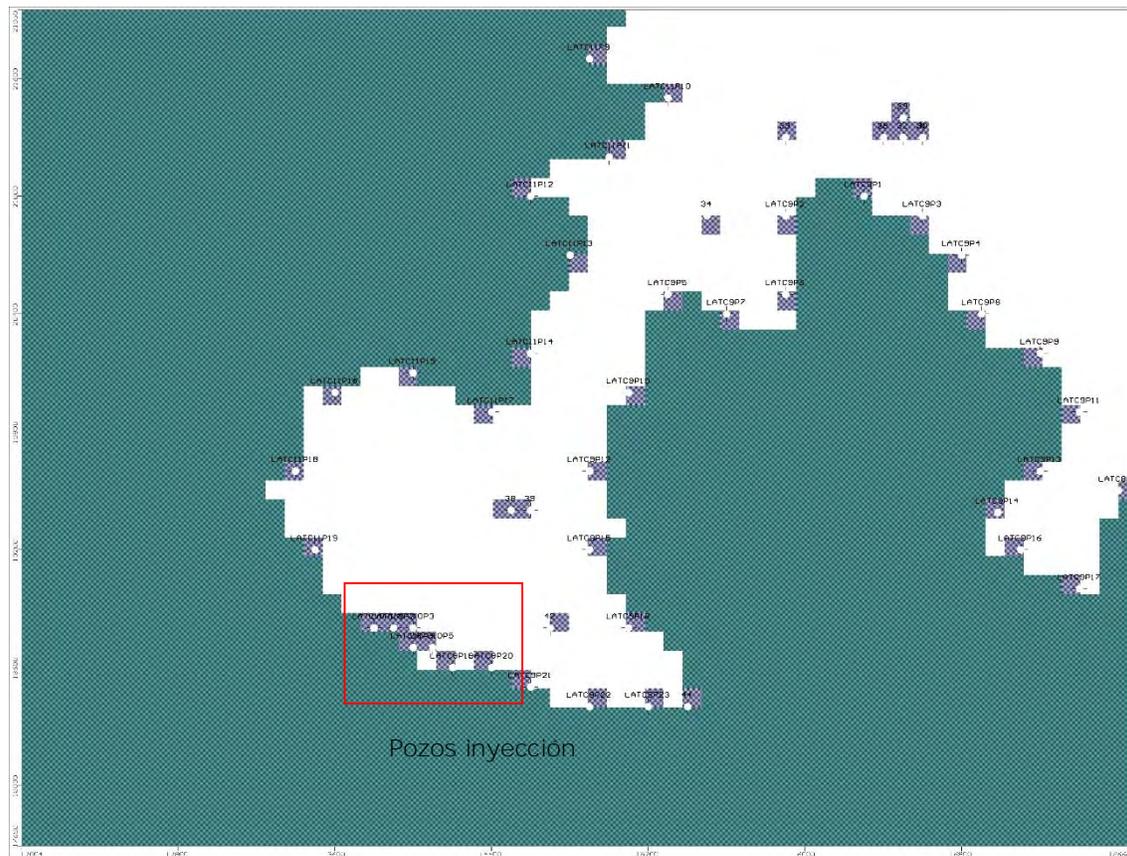


Figura 76. Pozos de inyección en sector Coelemú

10.4.2. RÍOS

Se han incluido como condición de río (River) los cauces de los ríos Ñuble, Itata y Lonquén, en sus tramos incluidos en el marco del presente estudio.

La sección y profundidad del agua introducidos han sido los obtenidos durante la campaña de aforos, asimismo la permeabilidad y espesor de los materiales del lecho han sido establecidos en 0,1 m/d y 0,5 m de espesor.

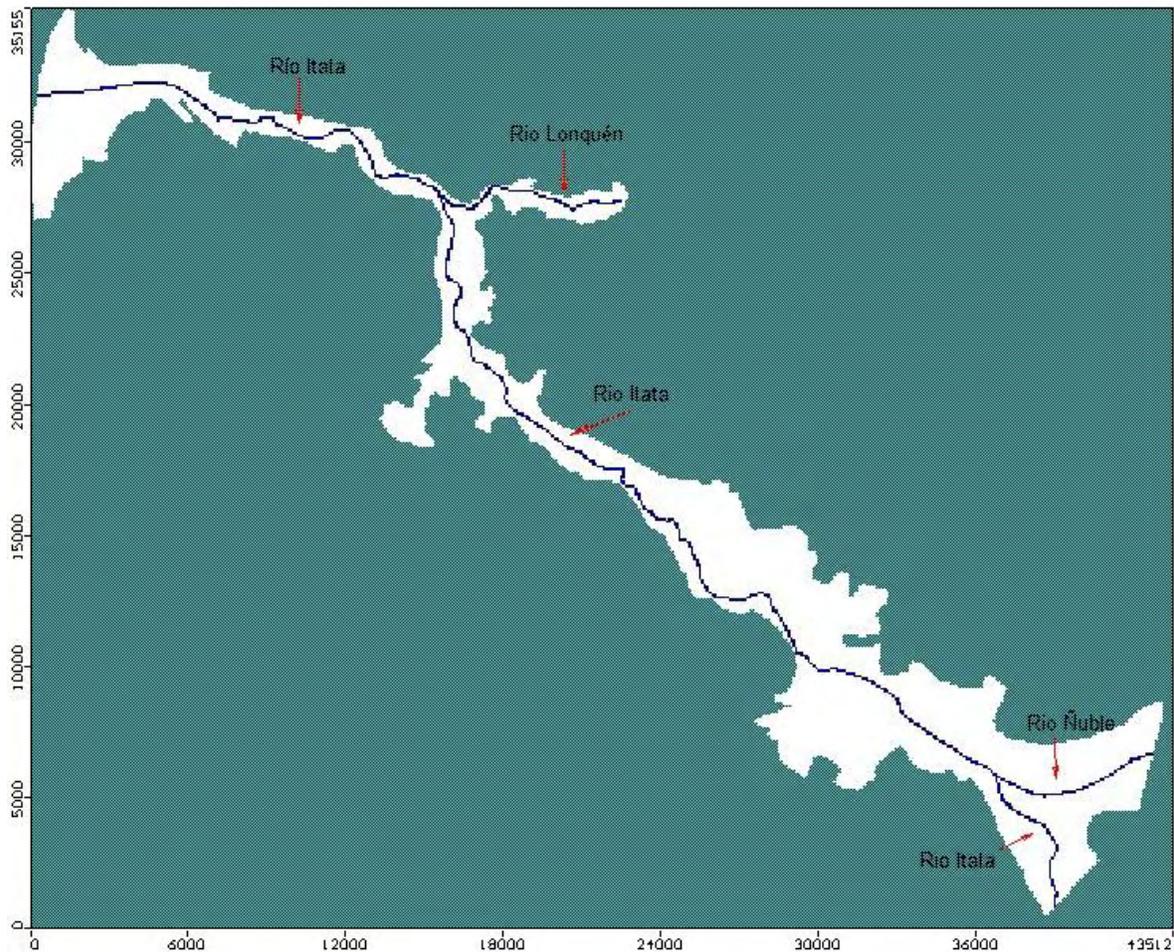


Figura 77. Asignación de celdas tipo río (River) en el acuífero Itata Bajo

10.4.3. RECARGA

La recarga por infiltración directa en el acuífero se ha incluido de forma homogénea en toda la superficie utilizando el módulo de recarga (Recharge). El valor asignado ha sido el obtenido en el balance hídrico realizado (15 l/s).

Las entradas laterales se han simulado con 372 pozos de inyección y caudal distribuido por cuencas atendiendo a los cálculos realizados en el apartado de balance hídrico.

El caudal asignado ha sido un 70 % del estimado como recarga, puesto que la infiltración producida en cuencas aportantes ha podido volver al sistema superficial en algún momento del escurrimiento subsuperficial debido al bajo

espesor de la zona permeable o semi permeable de las rocas del basamento. Este valor introducido ha permitido un buen ajuste del modelo por lo que se puede considerar como válido para la cuantificación de este tipo de entradas.

El listado de pozos, así como su ubicación y caudal de inyección se incluye en formato digital como planilla Excel.

10.4.4. EXTRACCIONES POR BOMBEO

Los pozos de extracción incluidos han sido los obtenidos durante la campaña de terreno. No obstante, el valor de explotación introducido ha sido el correspondiente al periodo en el cual se ha ejecutado el modelo (invierno 2013).

10.5. PUNTOS DE OBSERVACIÓN

Se han utilizado 62 puntos de observación, distribuidos por todo el acuífero (salvo alguna zona sin puntos catastrados por no existir) de forma más o menos homogénea.

Tabla 38. Puntos de observación y nivel

Punto	X UTM	Y UTM	Cota nivel observada (msnm)
1	158351	5965300	1,00
102	185962	5943610	25,42
103	184511	5944040	23,27
11	153096	5962240	0,82
2	155354	5965120	0,98
200	154032	5968120	-1,25
201	154779	5967320	-2,00
202	154861	5967250	2,20
204	157205	5967140	5,20
208	173918	5962280	19,67
21	153885	5963950	1,14
210	173237	5961990	13,50
211	171900	5962380	11,00
215	169330	5959710	11,20
217	169715	5959320	22,00

Tabla 38. Puntos de observación y nivel

Punto	X UTM	Y UTM	Cota nivel observada (msnm)
218	169297	5957190	7,00
220	171935	5954840	20,00
221	171819	5954610	26,85
226	179383	5950280	37,00
227	181505	5948170	30,70
228	181600	5948000	26,00
229	182085	5946320	13,00
231	183483	5946330	35,00
232	183427	5946330	32,40
235	183231	5945850	22,00
236	182094	5945370	16,00
237	184499	5944510	48,60
238	184293	5944350	26,85
239	184262	5944420	25,40
24	153187	5964190	-1,05
240	184276	5944750	54,70
25	153279	5964210	-0,04
27	160445	5964610	11,41
28	169068	5955480	7,06
29	169164	5955560	4,57
3	155515	5964990	1,79
31	169195	5955480	2,10
33	168553	5955490	16,45
34	168090	5955060	26,60
35	167551	5954080	25,30
37	167139	5953590	25,30
38	167139	5953590	24,34
39	167204	5953560	25,92
42	167377	5953030	31,88
50	177226	5948500	26,46
6	155389	5964950	4,11
61	182016	5943990	29,61
62	182272	5943480	28,50
63	182727	5941990	38,92
64	182733	5942000	38,34
66	183349	5943670	25,00
67	183366	5943660	26,77

Tabla 38. Puntos de observación y nivel

Punto	X UTM	Y UTM	Cota nivel observada (msnm)
71	186160	5941980	13,61
72	185016	5941160	28,54
75	186648	5940450	72,16
88	191230	5936470	13,68
90	192324	5940070	21,19
91	191941	5939930	24,36
94	190456	5940170	22,95
95	189121	5941290	23,78
97	189037	5942700	44,86

Asimismo, han sido eliminados aquellos puntos muy próximos a otros cuyo valor no resultaba coherente con el funcionamiento hidrogeológico del sistema, ya que no todos los puntos resultan de igual fiabilidad debido a la precisión con la cual se toma la cota del terreno (GPS de mano) y de la topografía introducida en el modelo, cuya escala no permite un análisis preciso de la posición topográfica de los elementos en el modelo.

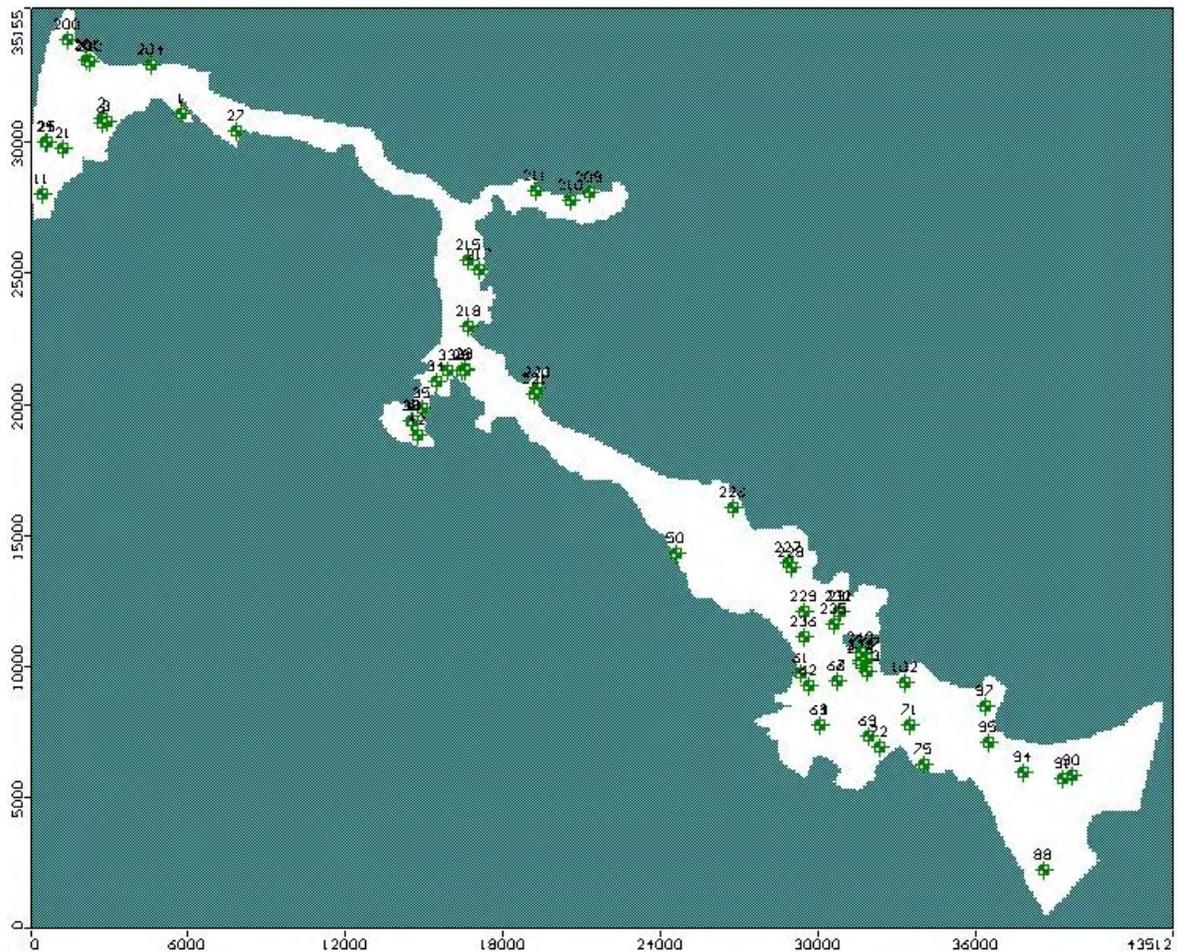


Figura 78. Puntos de observación utilizados para la calibración en el acuífero Itata Bajo

10.6. EJECUCIÓN DEL MODELO

El modelo ha sido ejecutado en régimen estacionario, con fecha de inicio agosto de 2013 y finalización septiembre de 2013, ya que los datos de nivel obtenidos se realizaron en dicho periodo.

El motor de cálculo empleado ha sido MODFLOW 2005 y WHS como "solver".

Al ejecutar el modelo el cálculo se realiza en pocos segundos (<10) y éste resulta convergente, no detectándose por tanto problemas de conectividad entre celdas.

10.7. CALIBRACIÓN DEL MODELO

El modelo se ha calibrado partiendo de los datos de permeabilidad recopilados y ajustando estos a los niveles piezométricos observados durante la campaña de agosto de 2013, obteniéndose un ajuste con un error RMS del 4.1 %, considerándose un valor por debajo de 5% como un buen ajuste.

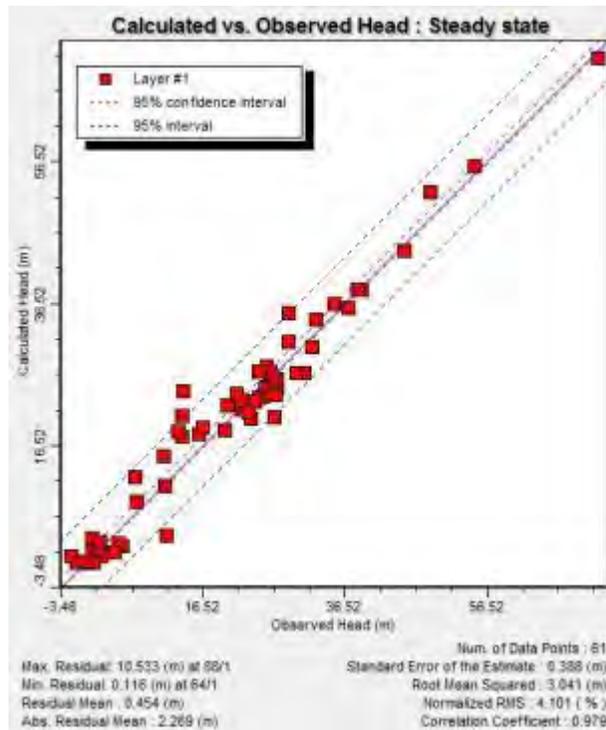


Figura 79. Niveles calculados frente a observados en el modelo del acuífero

10.8. RESULTADOS OBTENIDOS. ESCENARIOS

Una vez calibrado el modelo se han corrido 6 escenarios:

- Situación actual
- Régimen natural
- Escenario crítico
- Afección al sistema superficial
- Afección a más del 5% de la demanda
- Afección a más del 5% de las captaciones en el acuífero

10.8.1. ESCENARIO 1. SITUACIÓN ACTUAL

El primer escenario simulado, en el cual se ha realizado la calibración, es la situación actual, concretamente en el momento de la realización de la campaña de terreno (agosto 2013).

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

10.8.1.1. Niveles calculados

Los niveles calculados se distribuyen en el acuífero de acuerdo a la Figura 80 (salida gráfica tras exportación a un SIG) y a la Figura 81 (salida gráfica propia de Visual MODFLOW).

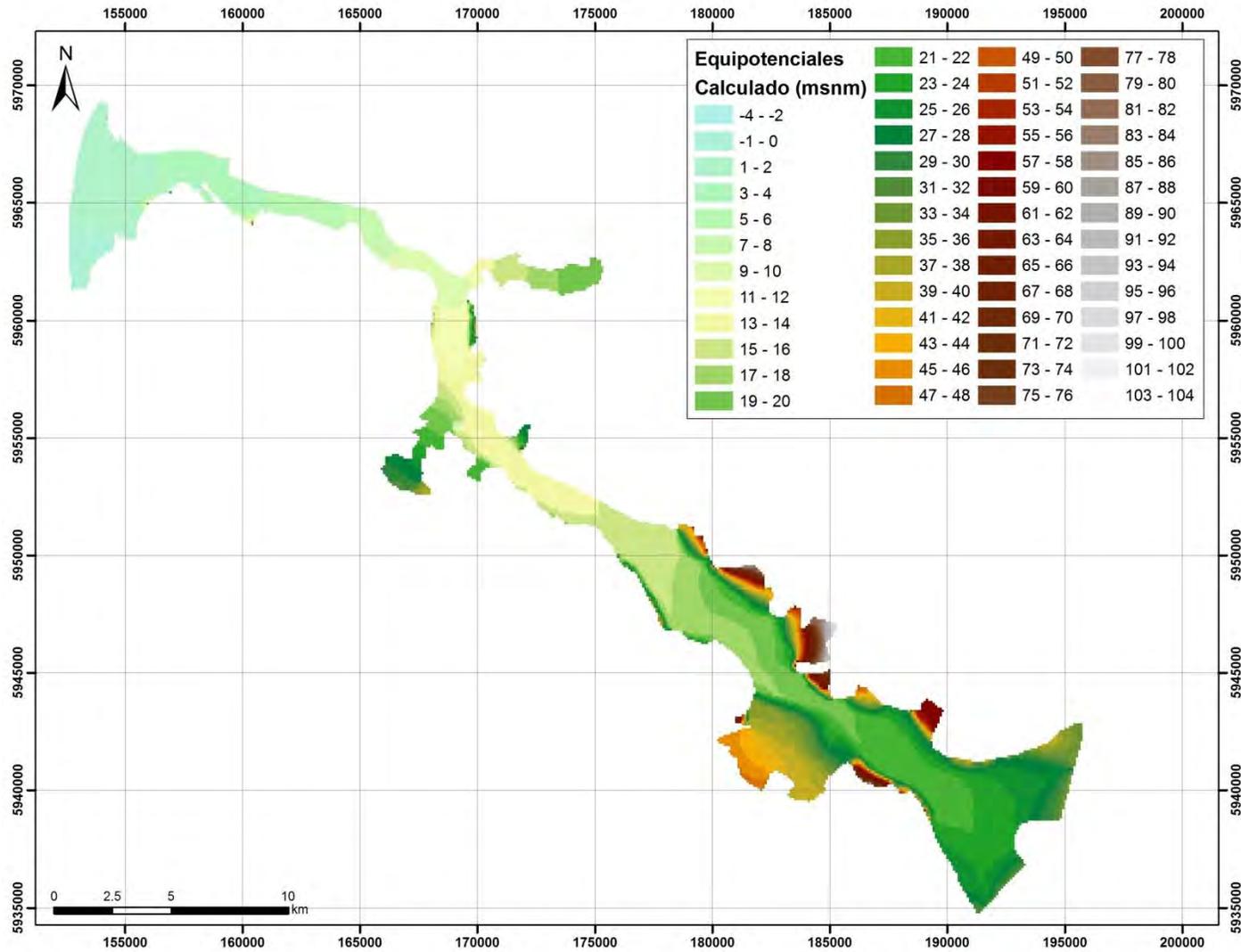


Figura 80. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo



Figura 81. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo (pantalla MODFLOW)

10.8.1.2. Balance hídrico

El balance obtenido para el periodo simulado (agosto 2013) tras la ejecución y calibración del modelo es el siguiente:

Tabla 39. Balance hídrico simulado (periodo agosto 2013)

Entradas		Salidas	
Concepto	Q (l/s)	Concepto	Q (l/s)
Recarga directa lluvia	15	Bombeos	46
Laterales	1.843	Subterráneas	133
Subterránea Lonquén	343	Afloramientos	2.133
Subterránea Itata superior			
Infiltración Río	111		
Total entradas	2.311	Total salidas	2.311

Hay un total de entradas en el sistema de 2.311 l/s, procedentes principalmente de entradas laterales. Asimismo, la principal salida del sistema es el afloramiento en el río.

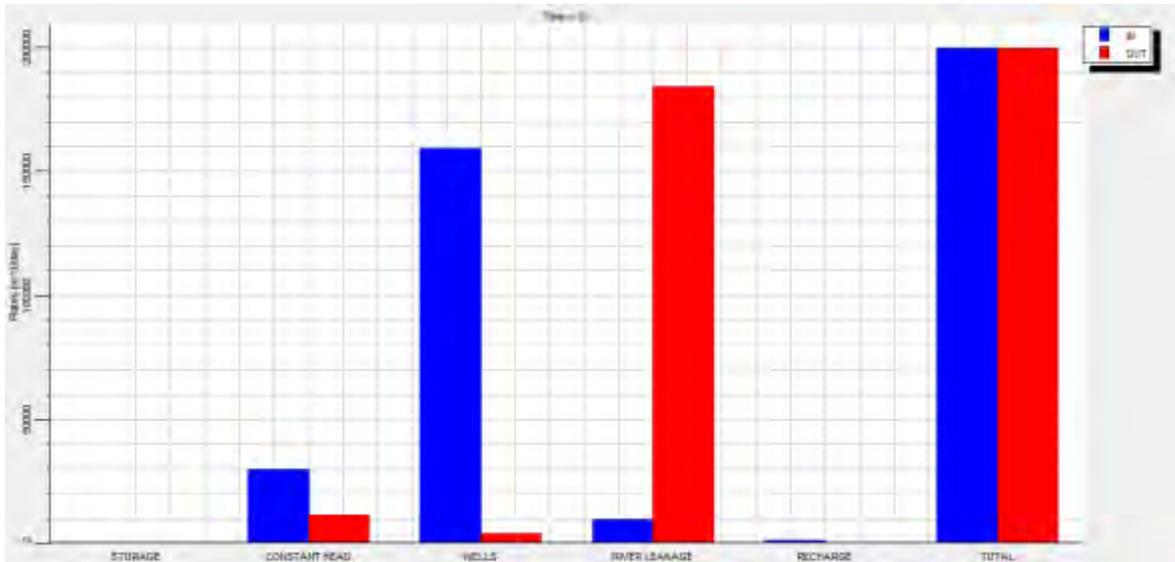


Figura 82. Balance hídrico simulado

10.8.2. ESCENARIO 2. SITUACIÓN EN RÉGIMEN NATURAL

A los efectos de conocer el funcionamiento del acuífero en régimen natural se ha desarrollado este escenario que permite cuantificar la relación sistema superficial-subterráneo sin la acción antrópica.

10.8.2.1. Recarga por precipitación en régimen natural

No se ha realizado un cálculo de la recarga para régimen natural en sentido estricto por no ser objeto del estudio. No obstante, se ha realizado una aproximación de dicha recarga aplicando un coeficiente a la precipitación media anual.

El coeficiente aplicado se ha obtenido a partir del balance hídrico realizado para el presente estudio (periodo 2012-2013), calculando la proporción de recarga efectiva en subcuencas y acuífero sobre la precipitación total.

Los coeficientes obtenidos, así como la recarga que se produciría suponiendo una precipitación de 1.275 mm/año (precipitación media anual obtenida del análisis hidrológico), serían los siguientes:

Tabla 40. Recarga por precipitación en régimen natural

Zona	Coeficiente Precip. Bruta / Recarga	Recarga (l/s) ESCENARIO 2
Acuífero	0,7%	39,71
Cuenca 1	3,7%	12,04
Cuenca 2	3,1%	20,15
Cuenca 3	2,6%	20,17
Cuenca 4	1,2%	37,29
Cuenca 5	9,2%	10,43
Cuenca 6	1,8%	14,54
Cuenca 7	2,5%	17,57
Cuenca 8	2,9%	32,39
Cuenca 9	1,2%	10,57
Cuenca 10	1,8%	88,53
Cuenca 11	2,5%	19,89
Cuenca 12	3,6%	35,34
Cuenca 13	4,5%	20,81

Zona	Coefficiente Precip. Bruta / Recarga	Recarga (l/s) ESCENARIO 2
Cuenca 14	3,3%	9,74
Cuenca 15	3,6%	28,02
Cuenca 16	2,6%	3,37
Cuenca 17	1,5%	7,62
Cuenca 18	0,0%	0,00
Cuenca 19	3,2%	7,66
Cuenca 20	3,4%	13,58
Cuenca 21	2,2%	128,78
Cuenca 22*	7,8%	3.030,49
Cuenca 23	0,6%	14,74
Cuenca 24	2,3%	72,34
	2,9%	3.695,79

*La recarga obtenida en la cuenca 22 (cuenca del río Lonquén), no se aplica como entrada en el modelo, ya que como se comentó en apartados anteriores, la condición de borde de la cuenca del río Lonquén se realiza con celda de nivel constante.

10.8.2.2. Bombeos

Para cumplir con la condición de régimen natural no se consideran extracciones por bombeos.

10.8.2.3. Niveles calculados

Los niveles calculados se distribuyen en el acuífero de acuerdo a la figura siguiente:

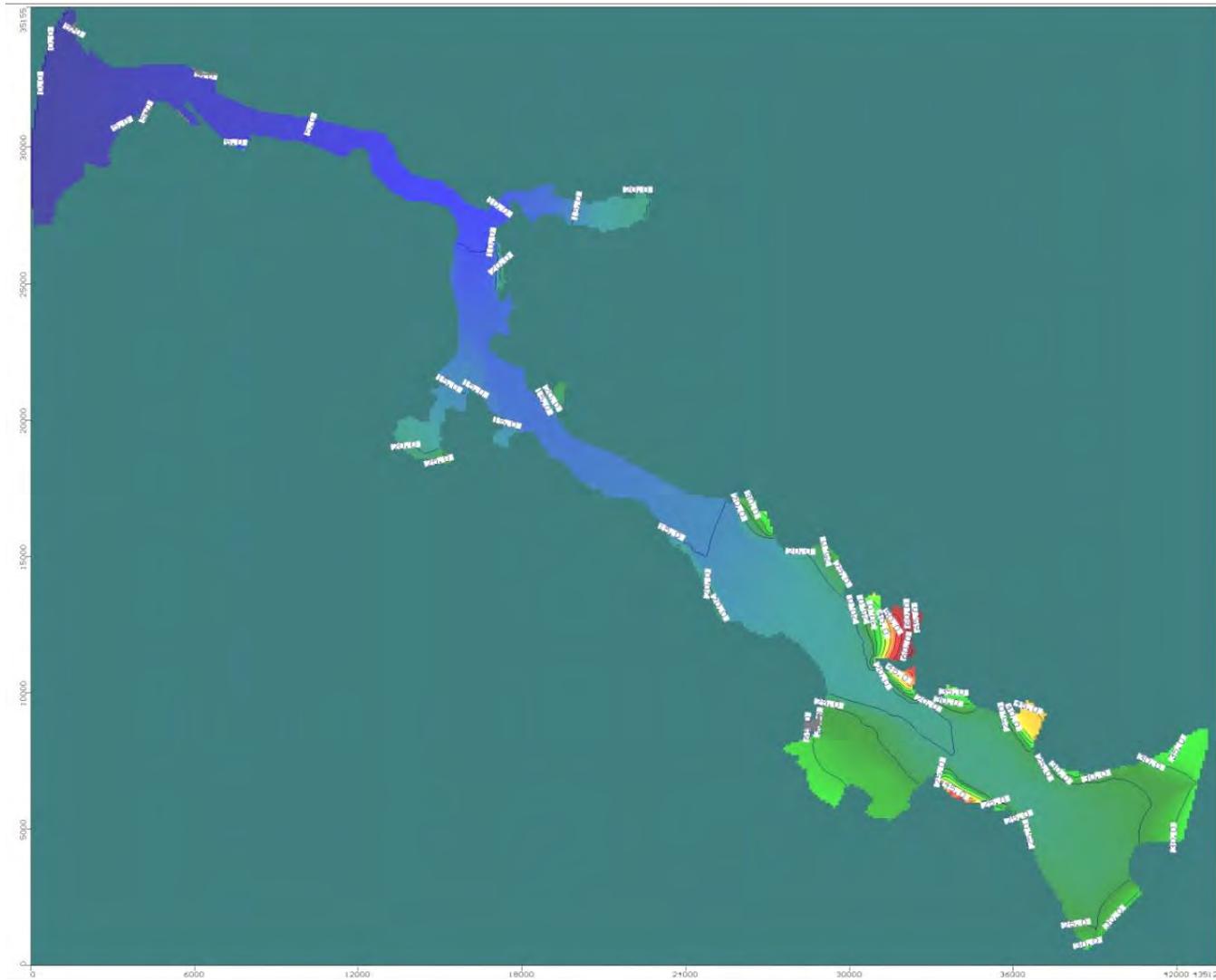


Figura 83. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo para la situación de Régimen Natural

10.8.2.4. Balance hídrico en régimen natural

El balance hídrico para el acuífero obtenido para situación de Régimen Natural es el siguiente:

Tabla 41. Balance hídrico en Régimen Natural en el acuífero

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	381,33	Subterráneas	-128,94
Laterales	588,80	Bombeos	0,00
Infiltración desde río	245,67	Afloramientos	-1.127,52
Recarga precipitación	40,77		
Total entradas	1.256,57	Total Salidas	-1.256,47

Hay un total de entradas en el sistema de 1.256 l/s, procedentes tanto de recarga lateral como subterránea, así como de infiltración de cauces superficiales en el acuífero.

Las salidas son principalmente debidas a afloramientos al sistema superficial.

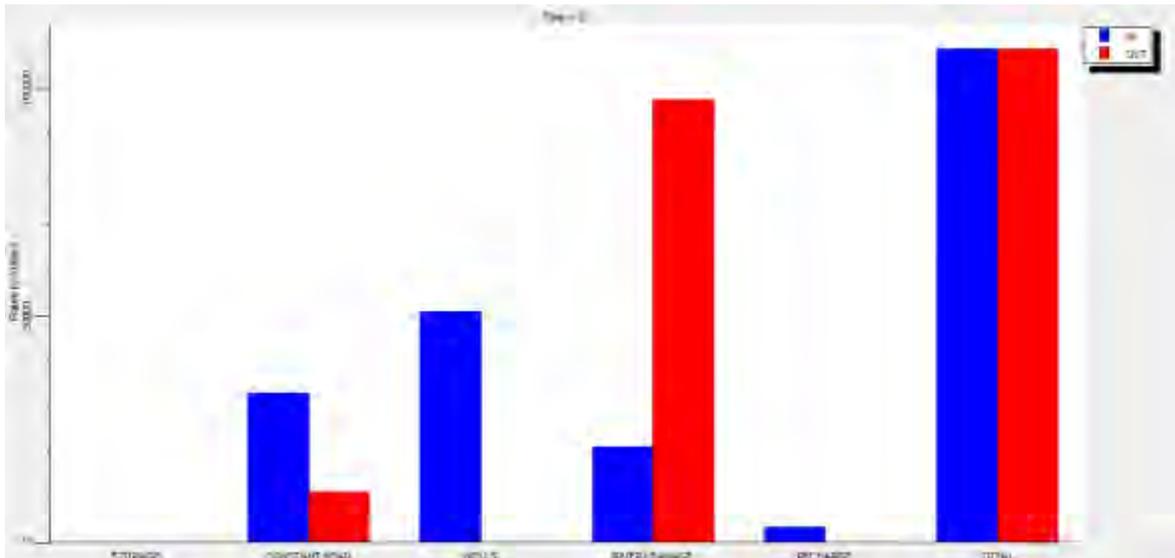


Figura 84. Gráfico de balance hídrico en régimen natural

Por otro lado, el balance hídrico en situación de régimen natural para las cuencas aportantes sería el siguiente:

Tabla 42. Balance hídrico en Régimen Natural en cuencas aportantes

Subcuenca	Salidas bombeo (l/s)	Entradas (l/s)	Balance (l/s)
1	0,00	12,04	12,04
2	0,00	20,15	20,15
3	0,00	20,17	20,17
4	0,00	37,29	37,29
5	0,00	10,43	10,43
6	0,00	14,54	14,54
7	0,00	17,57	17,57
8	0,00	32,39	32,39
9	0,00	10,57	10,57
10	0,00	88,53	88,53
11	0,00	19,89	19,89
12	0,00	35,34	35,34
13	0,00	20,81	20,81
14	0,00	9,74	9,74
15	0,00	28,02	28,02
16	0,00	3,37	3,37
17	0,00	7,62	7,62
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	7,66	7,66
20	0,00	13,58	13,58
21	0,00	128,78	128,78
22	0,00	3030,49	3030,49
23	0,00	14,74	14,74
	0,00	3583,74	3583,74

Cabe destacar que el excedente del balance hídrico en las subcuencas se transformaría en entrada lateral del acuífero, y debido al carácter de escorrentía subsuperficial de las subcuencas, parte de este volumen podría incorporarse al sistema superficial durante dicho escurrimiento, por lo que no debe considerarse como un volumen almacenado sino como un volumen de rápido tránsito subsuperficial o superficial.

10.8.3. ESCENARIO 3. SITUACIÓN CRÍTICA SIN PRECIPITACIONES

Este escenario se realiza para evaluar la respuesta del acuífero y su relación con el sistema superficial, suponiendo una situación crítica en la cual no se produzcan precipitaciones, y por tanto no haya recarga lateral ni directa en el acuífero, acompañado por una explotación del acuífero atendiendo al caudal de derechos constituidos y derechos en trámite máxima.

10.8.3.1. Recarga por precipitación en situación crítica

Se considera que no hay recarga por precipitación en este escenario.

10.8.3.2. Bombeos

Los bombeos considerados en este escenario son los correspondientes al 100% de derechos constituidos y al 100% de derechos en trámite.

Según la distribución geográfica de estos, la extracción se realizaría como sigue:

Tabla 43. Caudal de derechos aprobados y en trámite en acuífero y cuencas

Tipo derecho	Q (l/s)
Aprobados en acuífero	1287
Pendientes en acuífero	496,5
Aprobados en cuencas	370
Pendientes en cuencas	680,34
Total	2.833,84

Asimismo, la distribución por subcuencas es la siguiente:

Tabla 44. Distribución de derechos por subcuencas

Subcuenca	Aprobados (l/s)	Pendientes (l/s)
1	1	0
2	4	0
3	20	0
4	14	0
5	0	0

Tabla 44. Distribución de derechos por subcuencas

Subcuenca	Aprobados (l/s)	Pendientes (l/s)
6	14	0
7	5	1
8	4	2
9	3	9
10	39	42,28
11	0	4,5
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	5	1,6
22	213	48,56
23	48	571,4
	370	680,34



Figura 85. Distribución de pozos en el acuífero Itata Bajo para la situación crítica sin precipitación

10.8.3.3. Niveles calculados

Los niveles calculados se distribuyen en el acuífero de acuerdo a la figura siguiente:



Figura 86. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo para la situación crítica sin precipitación

10.8.3.4. Balance hídrico

El balance obtenido para situación crítica sin precipitación en el acuífero es el siguiente:

Tabla 45. Balance hídrico en el acuífero para la situación crítica

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	417,69	Subterráneas	-122,30
Laterales	0,00	Bombes	-1.068,50
Infiltración desde río	1.387,43	Afloramientos	-614,28
Recarga precipitación	0		
Total entradas	1.805,13	Total Salidas	-1.805,07

Hay un total de entradas en el sistema de 1.805 l/s, procedentes principalmente de la infiltración desde el sistema hidrológico superficial.

Las salidas se deben principalmente a bombes (1.068 l/s), pero cabe destacar que el modelo no ha permitido que se extraiga toda la demanda impuesta en el acuífero (derechos otorgados más derechos en trámite) ya que ésta supone 1.783 l/s. Esto es debido fundamentalmente a la distribución geográfica de las captaciones, ya que estas se agrupan por zonas y agotan (secado de celdas) los recursos en dichas zonas, o los disminuyen impidiendo que las captaciones extraigan todo el volumen impuesto. En la Figura 86 se observan en color gris las celdas que han quedado secas tras la simulación.

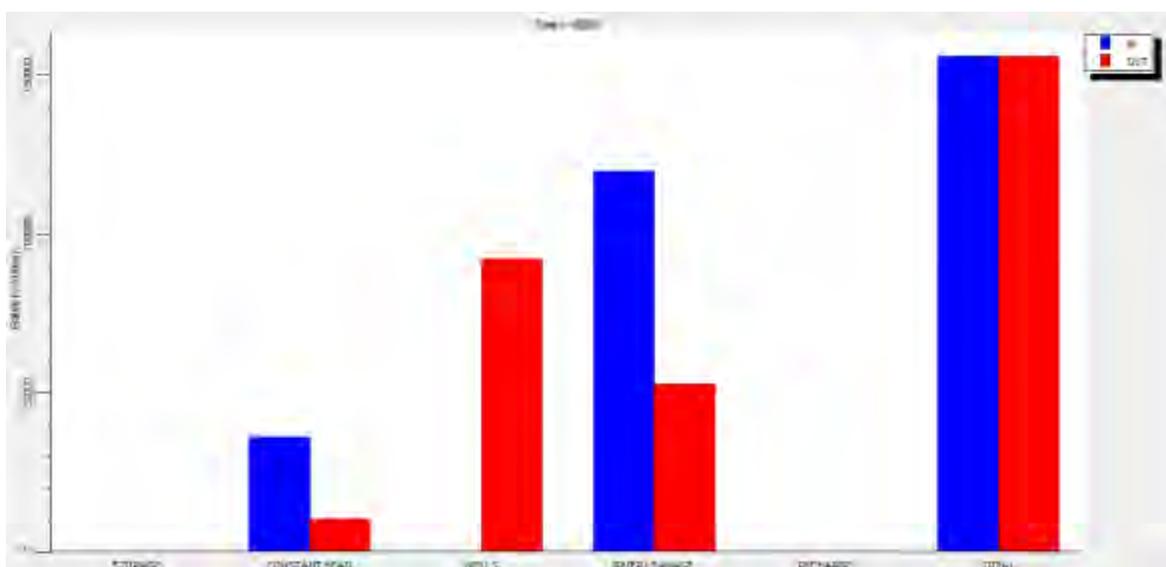


Figura 87. Gráfico de balance hídrico en situación crítica sin precipitaciones

Respecto a las cuencas aportantes, en esta situación, debido a no existir recarga por precipitación, no se podría extraer ningún porcentaje del caudal impuesto, ya que no existe ninguna otra fuente de recarga ni capacidad de almacenamiento que permitiera la extracción en época sin precipitación.

10.8.4. ESCENARIO 4. SITUACIÓN DE AFECCIÓN AL SISTEMA SUPERFICIAL

Este escenario se desarrolla atendiendo al criterio de afección al sistema superficial recogido en el estudio de "Evaluación de la Explotación Sustentable de los acuíferos de la VI Región". En este estudio se indica que el grado de interacción (recursos inducidos sobre fuentes superficiales comparados con una situación de régimen natural) debe ser menor al 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluado como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

$$\Delta Q < 10\% Q_{\text{Flujo pasante 85\%}}$$

$$\Delta Q = \text{Caudal que deja de aflorar} + \text{Aumento de la infiltración}$$

En este sentido, se desarrolla este escenario con la finalidad de determinar una extracción máxima en el acuífero y en las cuencas aportantes, hasta el punto en que el grado de interacción mencionado anteriormente sea del 10%.

Para ello se parten de los siguientes supuestos:

- Recarga por precipitación en el acuífero: determinada en el escenario 3.
- Caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia: se toma el caudal medio anual del río Itata obtenido en el análisis hidrológico, correspondiente a $116,70 \text{ m}^3/\text{s}$, **por lo que ΔQ debe ser inferior a $11,67 \text{ m}^3/\text{s}$.**
- Explotación: se realiza un tanteo partiendo de los derechos constituidos, en trámite, y captaciones catastradas en el estudio.
- Se parte de la situación actual (escenario 1) como escenario base para el cálculo de la interacción sistema superficial-subterráneo.

10.8.4.1. Recarga por precipitación en situación de afección al sistema superficial

Se considera una recarga equivalente a un periodo medio de precipitación. Ver capítulo 10.8.2.1 Recarga por precipitación en régimen natural.

10.8.4.2. Bombeos

Este componente es el que se desea obtener, motivo por el cual se ha llevado a cabo un tanteo de los bombeos a considerar.

En primer lugar se ha partido de un coeficiente de explotación de 5 veces los derechos constituidos, derechos en trámite y volumen de explotación catastrado.

Posteriormente el coeficiente se ha incrementado a 25, 50 y 250.

Para cada tanteo el volumen de explotación no incrementa proporcionalmente al coeficiente aplicado debido al secado de sectores y a la afección entre unos pozos y otros.

Los bombeos obtenidos para cada tanteo se incluyen en el apartado de balance hídrico 0.1.1.1.



Figura 88. Distribución de los pozos de bombeo para el escenario 4.

10.8.4.3. Niveles calculados y secado de celdas

Los niveles calculados y la ubicación de celdas secas obtenido para algunos de los tanteos realizados se incluyen a continuación:

Coefficiente de explotación de 5 (en gris celdas secas):



Figura 89. Niveles calculados en el modelo del acuífero Itata Bajo para el escenario 4 con coeficiente de explotación de 5

Coefficiente de explotación de 25 (en gris celdas secas):



Figura 90. Celdas secas en el escenario 4 con coeficiente de explotación de 25

Coefficiente de explotación de 50 (en gris celdas secas):



Figura 91. Celdas secas en el escenario 4 con coeficiente de explotación de 50

Coficiente de explotación de 250 (en gris celdas secas):



Figura 92. Niveles calculados y secado de celdas para el escenario 4 con coeficiente de explotación de 250

10.8.4.4. Balance hídrico y determinación de la afección al sistema superficial

Se incluye a continuación un balance hídrico para cada tanteo realizado, tanto para el acuífero como para las cuencas aportantes, además de hacer un análisis de la afección al sistema superficial según el criterio mencionado en el capítulo 10.8.4.

Balance según coeficiente de explotación de 5

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta un coeficiente de explotación de 5.

Cabe destacar que la demanda no puede ser satisfecha en todas las subcuencas, ya que ésta viene limitada por la recarga obtenida para cada una de las mismas.

Tabla 46. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 5.

Subcuenca	Explotación (l/s)	Entradas (l/s)	Balance (l/s). Salida hacia el acuífero
1	5,00	12,04	7,04
2	20,00	20,15	0,15
3	20,17	20,17	0,00
4	37,29	37,29	0,00
5	0,00	10,43	10,43
6	14,54	14,54	0,00
7	17,57	17,57	0,00
8	30,00	32,39	2,39
9	10,57	10,57	0,00
10	88,53	88,53	0,00
11	19,89	19,89	0,00
12	0,00	35,34	35,34
13	0,00	20,81	20,81
14	0,00	9,74	9,74
15	0,00	28,02	28,02
16	0,00	3,37	3,37
17	0,00	7,62	7,62
18	0,00	0,00	0,00

Subcuenca	Explotación (l/s)	Entradas (l/s)	Balance (l/s). Salida hacia el acuífero
19	0,00	7,66	7,66
20	0,00	13,58	13,58
21	33,00	128,78	95,78
22*	1.307,80	3.030,49	1.722,69
23	14,74	14,74	0,00
	1.619,10	3.583,74	1.964,64

*Tal y como se menciona en otros apartados, el excedente de la cuenca 22 (cuenca río Lonquén) no se introduce en el modelo como recarga lateral, sino que ha sido simulado como celda de nivel constante.

En el acuífero el balance hídrico resulta de la siguiente forma:

Tabla 47. Balance hídrico en el acuífero según escenario 4 y coeficiente de explotación 5.

Balance en Acuífero según Escenario 4 y coef. Explotación 5			
Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	456,85	Subterráneas	-110,77
Laterales	221,95	Bombeos	-2.189,95
Infiltración desde río	2.246,70	Afloramientos	-660,43
Recarga precipitación	35,64		
Total entradas	2.961,14	Total Salidas	-2.961,15

En este caso, para una demanda de 9-146,4 l/s se pueden extraer únicamente 2.189,95 l/s. No obstante, la afección al sistema superficial sería del 3,09% del caudal medio anual del río Itata, no superando el 10% considerado como limitante para calificar como afectado el sistema superficial.

$$\Delta Q < 10\% Q \text{ Flujo pasante } 85\%$$

$$\Delta Q = \text{Caudal que deja de aflorar} + \text{Aumento de la infiltración}$$

ΔQ (l/s): 3608.27
 ΔQ límite (l/s): 11670
 Diferencia (l/s) 8061.73
 $\% Q$ Flujo pasante 85% 3.09%

Balance según coeficiente de explotación de 25.

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta un coeficiente de explotación de 25.

Cabe destacar que la demanda no puede ser satisfecha en todas las subcuencas, ya que ésta viene limitada por la recarga obtenida para cada una de las mismas.

Tabla 48. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 25.

Subcuenca	Explotación (l/s)	Entradas (l/s)	Balance (l/s). Salida hacia el acuífero
1	12,04	12,04	0,00
2	20,15	20,15	0,00
3	20,17	20,17	0,00
4	37,29	37,29	0,00
5	0,00	10,43	10,43
6	14,54	14,54	0,00
7	17,57	17,57	0,00
8	32,39	32,39	0,00
9	10,57	10,57	0,00
10	88,53	88,53	0,00
11	19,89	19,89	0,00
12	0,00	35,34	35,34
13	0,00	20,81	20,81
14	0,00	9,74	9,74
15	0,00	28,02	28,02
16	0,00	3,37	3,37
17	0,00	7,62	7,62
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	7,66	7,66
20	0,00	13,58	13,58
21	128,78	128,78	0,00
22	3.030,49	3.030,49	0,00
23	14,74	14,74	0,00
	3.447,16	3.583,74	136,59

En el acuífero el balance hídrico resulta de la siguiente forma:

Tabla 49. Balance hídrico en el acuífero según escenario 4 y coeficiente de explotación 25.

Balance en Acuífero según Escenario 4 y coef. Explotación 25			
Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	678,64	Subterráneas	-67,90
Laterales	125,16	Bombeos	-3.595,49
Infiltración desde río	3.344,52	Afloramientos	-516,46
Recarga precipitación	31,50		
Total entradas	4.179,83	Total Salidas	-4.179,85

En este caso, para una demanda de 44.587,5 l/s se pueden extraer únicamente 3.595,49 l/s. No obstante, la afección al sistema superficial sería del 4.16% del caudal medio anual del río Itata, no superando el 10% considerado como limitante para calificar como afectado el sistema superficial.

$$\Delta Q < 10\% Q_{\text{Flujo pasante 85\%}}$$

$$\Delta Q = \text{Caudal que deja de aflorar} + \text{Aumento de la infiltración}$$

ΔQ (l/s):	4.850
ΔQ límite (l/s):	11.670
Diferencia (l/s)	6.820
% $Q_{\text{Flujo pasante 85\%}}$	4,16%

Balance según coeficiente de explotación de 50.

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta un coeficiente de explotación de 50.

Cabe destacar que la demanda no puede ser satisfecha en todas las subcuencas, ya que ésta viene limitada por la recarga obtenida para cada una de las mismas.

Tabla 50. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 50.

Subcuenca	Explotación (l/s)	Entradas (l/s)	Balance (l/s). Salida hacia el acuífero
1	12,04	12,04	0,00
2	20,15	20,15	0,00
3	20,17	20,17	0,00
4	37,29	37,29	0,00
5	0,00	10,43	10,43
6	14,54	14,54	0,00
7	17,57	17,57	0,00
8	32,39	32,39	0,00
9	10,57	10,57	0,00
10	88,53	88,53	0,00
11	19,89	19,89	0,00
12	0,00	35,34	35,34
13	0,00	20,81	20,81
14	0,00	9,74	9,74
15	0,00	28,02	28,02
16	0,00	3,37	3,37
17	0,00	7,62	7,62
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	7,66	7,66
20	0,00	13,58	13,58
21	128,78	128,78	0,00
22	3.030,49	3.030,49	0,00
23	14,74	14,74	0,00
	3.447,16	3.583,74	136,59

En el acuífero el balance hídrico resulta de la siguiente forma:

Tabla 51. Balance hídrico en el acuífero según escenario 4 y coeficiente de explotación 50.

Balance en Acuífero según Escenario 4 y coef. Explotación 50			
Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	615,53	Subterráneas	-50.55
Laterales	123,68	Bombeos	-2.877.86
Infiltración desde río	2.721,37	Afloramientos	-561.01
Recarga precipitación	28,65		
Total entradas	3.489,23	Total Salidas	-3.489.43

En este caso, para una demanda de 89.175,1 l/s se pueden extraer únicamente 2.877,86 l/s, menos incluso que en el anterior tanteo, ya que en este determinados pozos secarán de forma inmediata algunas celdas. Por este motivo, la afección al sistema superficial sería del 3.58 % del caudal medio anual del río Itata, no superando el 10% considerado como limitante para considerar afectado el sistema superficial.

$$\Delta Q < 10\% Q_{\text{Flujo pasante 85\%}}$$

$$\Delta Q = \text{Caudal que deja de aflorar} + \text{Aumento de la infiltración}$$

ΔQ (l/s):	4.182
ΔQ límite (l/s):	11.670
Diferencia (l/s)	7.487
% $Q_{\text{Flujo pasante 85\%}}$	3,58%

Balance según coeficiente de explotación de 250.

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta un coeficiente de explotación de 250.

Cabe destacar que la demanda no puede ser satisfecha en todas las subcuencas, ya que ésta viene limitada por la recarga obtenida para cada una de las mismas.

Tabla 52. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 250.

Subcuenca	Explotación (l/s)	Entradas (l/s)	Balance (l/s). Salida hacia el acuífero
1	12,04	12,04	0,00
2	20,15	20,15	0,00
3	20,17	20,17	0,00
4	37,29	37,29	0,00
5	0,00	10,43	10,43
6	14,54	14,54	0,00
7	17,57	17,57	0,00

Tabla 52. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 4 y coeficiente de explotación 250.

Subcuenca	Explotación (l/s)	Entradas (l/s)	Balance (l/s). Salida hacia el acuífero
8	32,39	32,39	0,00
9	10,57	10,57	0,00
10	88,53	88,53	0,00
11	19,89	19,89	0,00
12	0,00	35,34	35,34
13	0,00	20,81	20,81
14	0,00	9,74	9,74
15	0,00	28,02	28,02
16	0,00	3,37	3,37
17	0,00	7,62	7,62
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	7,66	7,66
20	0,00	13,58	13,58
21	128,78	128,78	0,00
22	3.030,49	3.030,49	0,00
23	14,74	14,74	0,00
	3.447,16	3.583,74	136,59

En el acuífero el balance hídrico resulta de la siguiente forma:

Tabla 53. Balance hídrico en el acuífero según escenario 4 y coeficiente de explotación 250.

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	1.093,62	Subterráneas	-15,71
Laterales	119,57	Bombeos	-3.835,17
Infiltración desde río	3.208,03	Afloramientos	-593,14
Recarga precipitación	22,78		
Total entradas	4.444,00	Total Salidas	-4.444,02

En este caso, para una demanda de 445.875 l/s se pueden extraer únicamente 3.835 l/s, y la afección al sistema superficial sería del 3,58 % del caudal medio anual del río Itata, no superando el 10% considerado como limitante para considerar afectado el sistema superficial.

$\Delta Q < 10\% Q$ Flujo pasante 85%

$\Delta Q =$ Caudal que deja de aflorar + Aumento de la infiltración

ΔQ (l/s):	4.637
ΔQ límite (l/s):	11.670
Diferencia (l/s)	7.033
% Q Flujo pasante 85%	3,97%

10.8.5. ESCENARIO 5. SITUACIÓN DE AFECCIÓN A MÁS DEL 5% DE LA DEMANDA

En este escenario se pretende obtener el límite máximo de explotación que se podría dar en el acuífero para no afectar a más del 5% de la demanda.

Para ello se parte de las siguientes hipótesis:

- Recarga por precipitación en el acuífero: determinada en el escenario 3.
- Demanda impuesta 100% de derechos constituidos y derechos en trámite, y tanteo de la demanda hasta calcular el límite máximo para no afectar a más del 5% de la demanda.

10.8.5.1. Recarga por precipitación en situación de afección al sistema superficial

Se considera una recarga equivalente a un periodo medio de precipitación. Ver capítulo 10.8.2.1 Recarga por precipitación en régimen natural.

10.8.5.2. Bombeos

Este componente es el que se desea obtener, motivo por el cual se ha llevado a cabo un tanteo de los bombeos a considerar.

En primer lugar se ha partido del 100 % de derechos constituidos y de derechos en trámite. Posteriormente se ha reducido a únicamente derechos constituidos

y se ha ido reduciendo progresivamente hasta encontrar el caudal de bombeo que no afecte a más del 5 % de la demanda impuesta.

10.8.5.3. Niveles calculados

Se incluyen a continuación los niveles calculados para cada tanteo realizado:

Explotación del 100% de derechos constituidos y en trámite



Figura 93. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos y en trámite al 100%.

Explotación del 100% de derechos constituidos

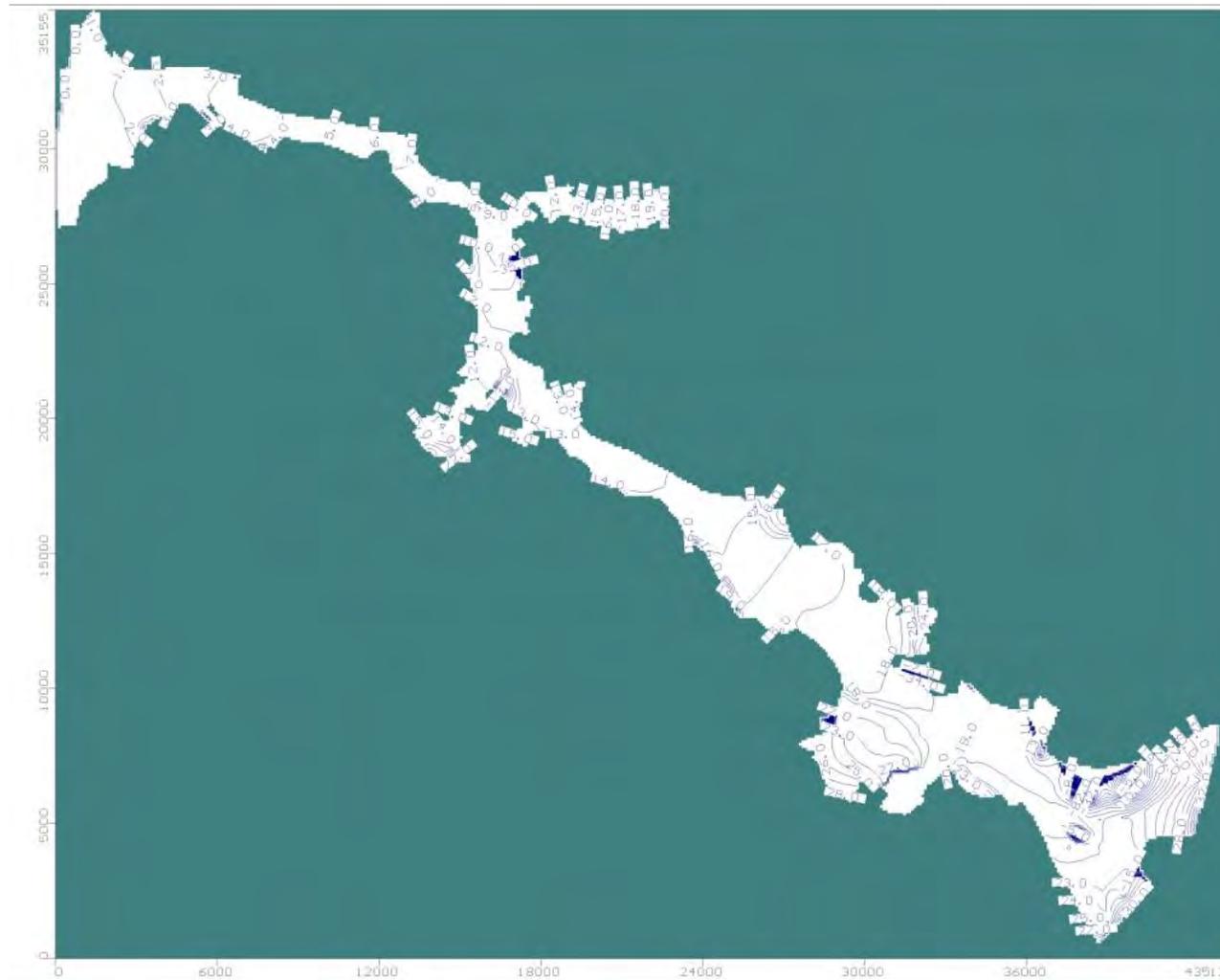


Figura 94. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 100%.

Explotación del 50% de derechos constituidos



Figura 95. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 50%.

Explotación del 25% de derechos constituidos

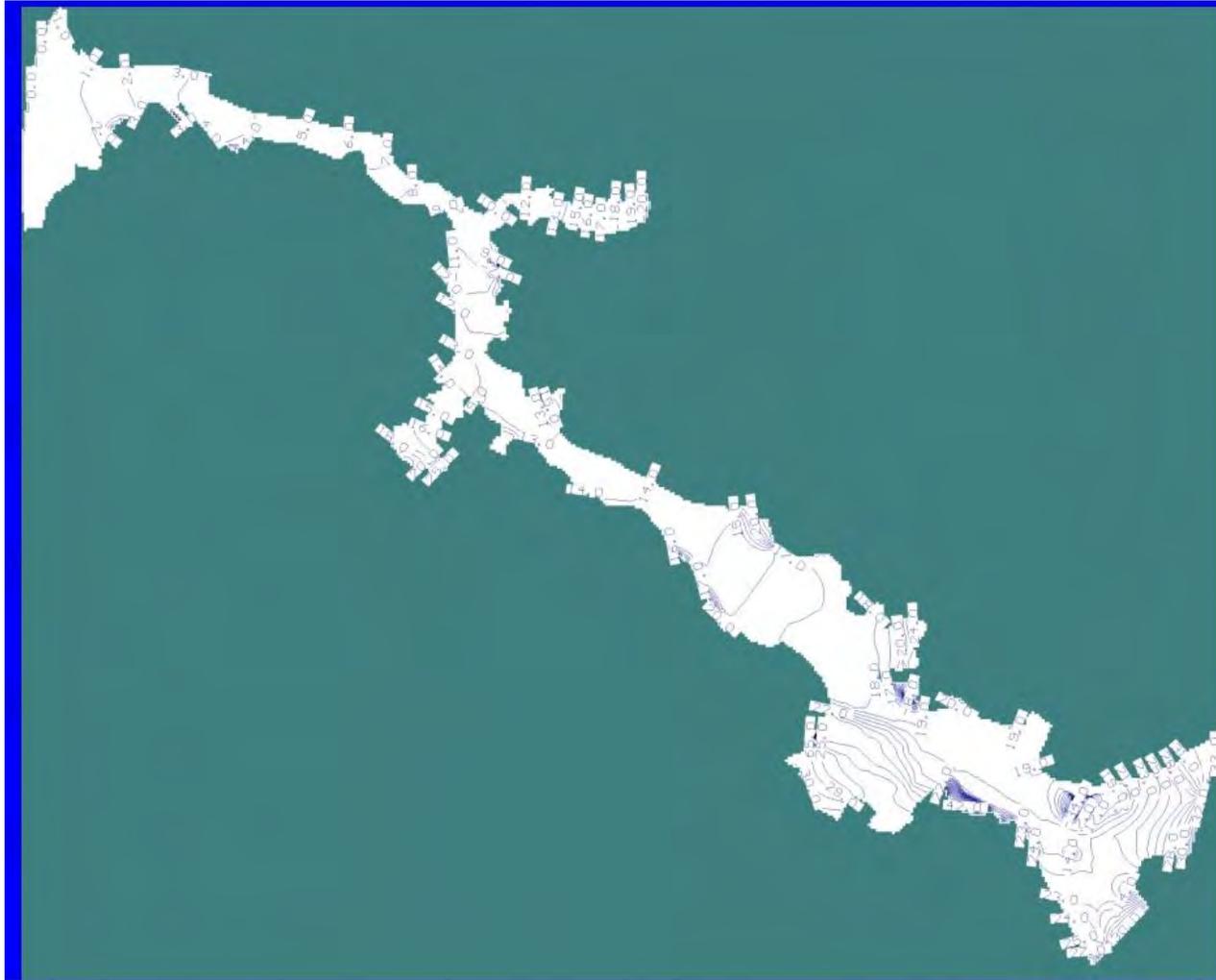


Figura 96. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 25%.

Explotación del 18.5% de derechos constituidos



Figura 97. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 18.5%.

Explotación del 17% de derechos constituidos

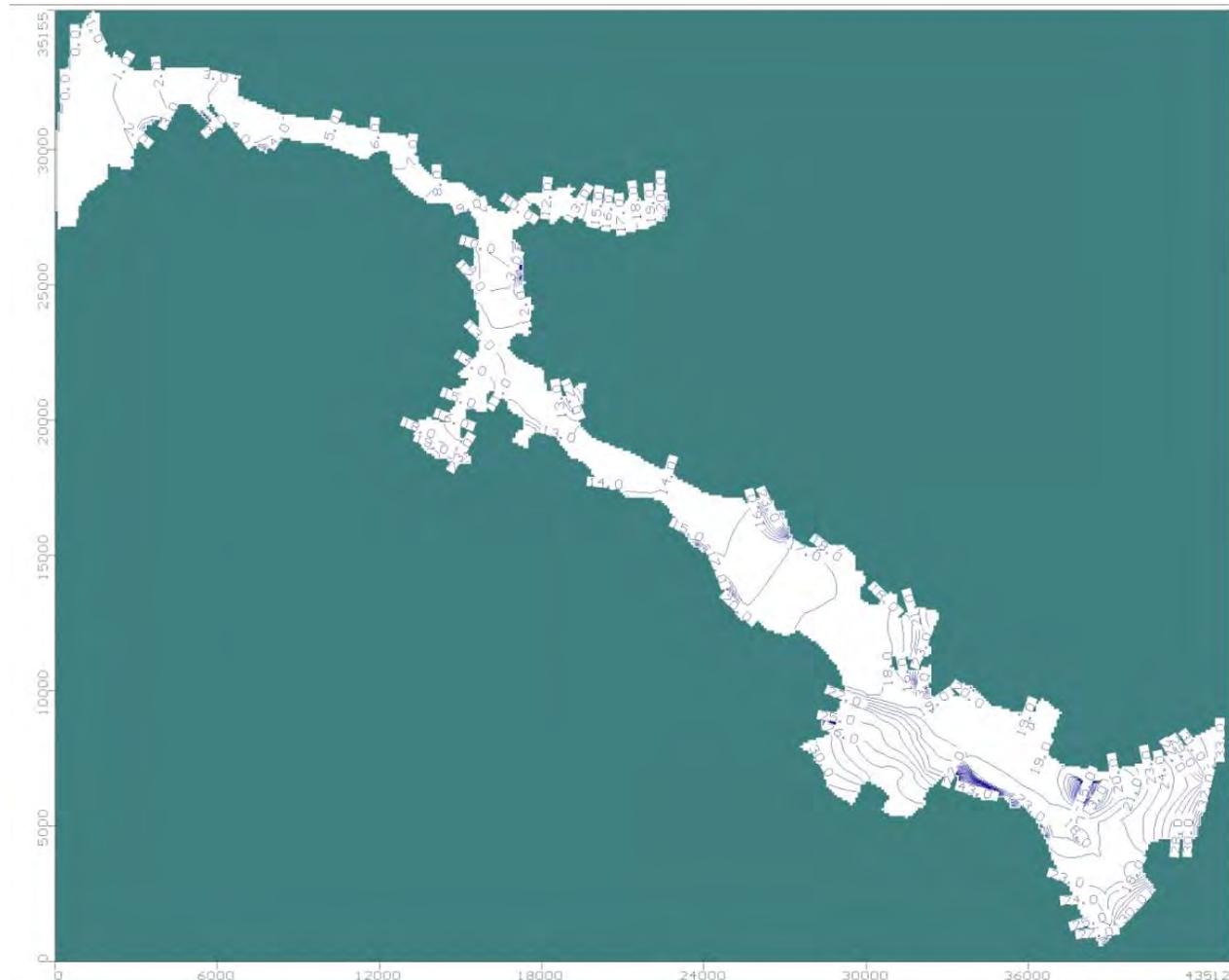


Figura 98. Isopiezas calculadas para escenario 5 suponiendo explotación de derechos constituidos al 17%.

10.8.5.4. Balance hídrico y determinación de la afección a la demanda impuesta

Se incluye a continuación un balance hídrico para cada tanteo realizado, tanto para el acuífero como para las cuencas aportantes, además de hacer un análisis de la afección a la demanda impuesta según el criterio mencionado en el capítulo 10.8.4.

Balance según explotación de derechos constituidos y en trámite al 100%.

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta una explotación según derechos constituidos y en trámite al 100%.

Tabla 54. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 100% en derechos constituidos y en trámite.

Subcuenca	Demanda (l/s)	Entradas (l/s)	Bombesos efectivos (l/s)	Balance (l/s)	% Demanda satisfecha
1	1,00	12,04	1,00	11,04	100%
2	4,00	20,15	4,00	16,15	100%
3	20,00	20,17	20,00	0,17	100%
4	14,00	37,29	14,00	23,29	100%
5	0,00	10,43	0,00	10,43	-
6	14,00	14,54	14,00	0,54	100%
7	6,00	17,57	6,00	11,57	100%
8	6,00	32,39	6,00	26,39	100%
9	12,00	10,57	10,57	0,00	88%
10	81,28	88,53	81,28	7,25	100%
11	4,50	19,89	4,50	15,39	100%
12	0,00	35,34	0,00	35,34	-
13	0,00	20,81	0,00	20,81	-
14	0,00	9,74	0,00	9,74	-
15	0,00	28,02	0,00	28,02	-
16	0,00	3,37	0,00	3,37	-
17	0,00	7,62	0,00	7,62	-
18	0,00	0,00	0,00	0,00	-
19	0,00	7,66	0,00	7,66	-
20	0,00	13,58	0,00	13,58	-
21	6,60	128,78	6,60	122,18	100%

Tabla 54. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 100% en derechos constituidos y en trámite.

Subcuenca	Demanda (l/s)	Entradas (l/s)	Bombes efectivos (l/s)	Balance (l/s)	% Demanda satisfecha
22	261,56	3.030,49	261,56	2.768,93	100%
23	619,40	14,74	14,74	0,00	2%
	1.050,34	3.583,74	444,25	3.139,50	42%

En este escenario se satisface el 100% de la demanda en todas las cuencas excepto en la cuenca 23.

En el acuífero el balance hídrico resulta de la siguiente forma:

Tabla 55. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 100% de derechos constituidos y en trámite

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	396,61	Subterráneas	-125,80
Laterales	341,29	Bombes	-1.072,50
Infiltración desde río	1.210,18	Afloramientos	-788,33
Recarga precipitación	38,46		
Total entradas	1.986,53	Total Salidas	-1.986,63

Para este caso, con una demanda impuesta de 1.783,5 l/s, tan solo se puede satisfacer el 60%.

En conjunto, es decir, todas las cuencas y el acuífero, la demanda total abastecida sería del 53% sobre la impuesta, por lo que esta situación no cumpliría con el criterio establecido de no afección a la demanda.

Balance según explotación de derechos constituidos al 100%.

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta una explotación según derechos constituidos al 100%, eliminando los derechos en trámite para comprobar la afección a la demanda en esta situación.

Tabla 56. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 100% en derechos constituidos.

Subcuenca	Demanda (l/s)	Entradas (l/s)	Bombes efectivos (l/s)	Balance (l/s)	% Demanda satisfecha
1	1,00	12,04	1,00	11,04	100%
2	4,00	20,15	4,00	16,15	100%
3	20,00	20,17	20,00	0,17	100%
4	14,00	37,29	14,00	23,29	100%
5	0,00	10,43	0,00	10,43	-
6	14,00	14,54	14,00	0,54	100%
7	5,00	17,57	5,00	12,57	100%
8	4,00	32,39	4,00	28,39	100%
9	3,00	10,57	3,00	7,57	100%
10	39,00	88,53	39,00	49,53	100%
11	0,00	19,89	0,00	19,89	-
12	0,00	35,34	0,00	35,34	-
13	0,00	20,81	0,00	20,81	-
14	0,00	9,74	0,00	9,74	-
15	0,00	28,02	0,00	28,02	-
16	0,00	3,37	0,00	3,37	-
17	0,00	7,62	0,00	7,62	-
18	0,00	0,00	0,00	0,00	-
19	0,00	7,66	0,00	7,66	-
20	0,00	13,58	0,00	13,58	-
21	5,00	128,78	5,00	123,78	100%
22	213,00	3.030,49	213,00	2.817,49	100%
23	48,00	14,74	14,74	0,00	31%
	370,00	3.583,74	336,74	3.247,01	91%

En este escenario se satisface el 100% de la demanda en todas las cuencas excepto en la 23, en la cual se satisface el 31%.

En el acuífero el balance hídrico resulta de la siguiente forma:

Tabla 57. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 100% de derechos constituidos

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	395,04	Subterráneas	-126,81
Laterales	413,14	Bombes	-730,00
Infiltración desde río	817,72	Afloramientos	-808,05
Recarga precipitación	39,03		

Tabla 57. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 100% de derechos constituidos

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Total entradas	1.664,92	Total Salidas	-1.664,86

Para este caso, con una demanda impuesta de 1.289 l/s, tan solo se puede satisfacer el 56,6%.

En conjunto, es decir, todas las cuencas y el acuífero, la demanda total abastecida sería del 64,3% sobre la impuesta, por lo que esta situación no cumpliría con el criterio establecido de no afección a la demanda.

Balance según explotación de derechos constituidos al 50%.

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta una explotación según derechos constituidos al 50%, eliminando los derechos en trámite para comprobar la afección a la demanda en esta situación.

Tabla 58. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 50% en derechos constituidos.

Subcuenca	Demanda (l/s)	Entradas (l/s)	Bombes efectivos (l/s)	Balance (l/s)	% Demanda satisfecha
1	0,50	12,04	0,50	11,54	100%
2	2,00	20,15	2,00	18,15	100%
3	10,00	20,17	10,00	10,17	100%
4	7,00	37,29	7,00	30,29	100%
5	0,00	10,43	0,00	10,43	-
6	7,00	14,54	7,00	7,54	100%
7	2,50	17,57	2,50	15,07	100%
8	2,00	32,39	2,00	30,39	100%
9	1,50	10,57	1,50	9,07	100%
10	19,50	88,53	19,50	69,03	100%
11	0,00	19,89	0,00	19,89	-
12	0,00	35,34	0,00	35,34	-
13	0,00	20,81	0,00	20,81	-
14	0,00	9,74	0,00	9,74	-
15	0,00	28,02	0,00	28,02	-
16	0,00	3,37	0,00	3,37	-

Tabla 58. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 50% en derechos constituidos.

Subcuenca	Demanda (l/s)	Entradas (l/s)	Bombes efectivos (l/s)	Balance (l/s)	% Demanda satisfecha
17	0,00	7,62	0,00	7,62	-
18	0,00	0,00	0,00	0,00	-
19	0,00	7,66	0,00	7,66	-
20	0,00	13,58	0,00	13,58	-
21	2,50	128,78	2,50	126,28	100%
22	106,50	3.030,49	106,50	2.923,99	100%
23	24,00	14,74	14,74	0,00	61%
	185,00	3.583,74	175,74	3.408,01	95%

En este escenario se sigue satisfaciendo el 100% de la demanda en todas las cuencas excepto en la 23, en la cual se satisface el 61%.

En el acuífero se satisface un 87,7 % de la demanda impuesta (553 l/s frente a 630 l/s de demanda), y resulta un global de 89,4 % demanda satisfecha frente a impuesta.

Tabla 59. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 50% de derechos constituidos

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	389.05	Subterráneas	-127.74
Laterales	460.80	Bombes	-553.21
Infiltración desde río	661.93	Afloramientos	-870.65
Recarga precipitación	39.97		
Total entradas	1551.76	Total Salidas	-1551.60

Balance según explotación de derechos constituidos al 25%.

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta una explotación según derechos constituidos al 25%, eliminando los derechos en trámite para comprobar la afección a la demanda en esta situación.

Tabla 60. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 25% en derechos constituidos.

Subcuenca	Demanda (l/s)	Entradas (l/s)	Bombes efectivos (l/s)	Balance (l/s)	% Demanda satisfecha
1	0,25	12,04	0,25	11,79	100%
2	1,00	20,15	1,00	19,15	100%
3	5,00	20,17	5,00	15,17	100%
4	3,50	37,29	3,50	33,79	100%
5	0,00	10,43	0,00	10,43	-
6	3,50	14,54	3,50	11,04	100%
7	1,25	17,57	1,25	16,32	100%
8	1,00	32,39	1,00	31,39	100%
9	0,75	10,57	0,75	9,82	100%
10	9,75	88,53	9,75	78,78	100%
11	0,00	19,89	0,00	19,89	-
12	0,00	35,34	0,00	35,34	-
13	0,00	20,81	0,00	20,81	-
14	0,00	9,74	0,00	9,74	-
15	0,00	28,02	0,00	28,02	-
16	0,00	3,37	0,00	3,37	-
17	0,00	7,62	0,00	7,62	-
18	0,00	0,00	0,00	0,00	-
19	0,00	7,66	0,00	7,66	-
20	0,00	13,58	0,00	13,58	-
21	1,25	128,78	1,25	127,53	100%
22	53,25	3030,49	53,25	2977,24	100%
23	12,00	14,74	12,00	2,74	100%
	92,50	3583,74	92,50	3491,24	100%

Para esta situación se satisface el 100% de la demanda en cuencas aportantes.

En el acuífero el balance quedaría de la siguiente forma:

Tabla 61. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 25% de derechos constituidos

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	386,88	Subterráneas	-128,17
Laterales	485,45	Bombes	-292,21
Infiltración desde río	438,53	Afloramientos	-930,51
Recarga precipitación	40,15		
Total entradas	1.351,00	Total Salidas	-1.350,89

En esta situación, la demanda satisfecha frente a la impuesta alcanza el 91.2%, y la global asciende a 93.1 %.

Balance según explotación de derechos constituidos al 17 %.

Se expone a continuación el balance hídrico en subcuencas y en acuífero teniendo en cuenta una explotación según derechos constituidos al 17%, eliminando los derechos en trámite para comprobar la afección a la demanda en esta situación.

Tabla 62. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 5 y explotación al 17% en derechos constituidos.

Subcuenca	Demanda (l/s)	Entradas (l/s)	Bombes efectivos (l/s)	Balance (l/s)	% Demanda satisfecha
1	0.17	12.04	0.17	11.87	100%
2	0.68	20.15	0.68	19.47	100%
3	3.40	20.17	3.40	16.77	100%
4	2.38	37.29	2.38	34.91	100%
5	0.00	10.43	0.00	10.43	-
6	2.38	14.54	2.38	12.16	100%
7	0.85	17.57	0.85	16.72	100%
8	0.68	32.39	0.68	31.71	100%
9	0.51	10.57	0.51	10.06	100%
10	6.63	88.53	6.63	81.90	100%
11	0.00	19.89	0.00	19.89	-
12	0.00	35.34	0.00	35.34	-
13	0.00	20.81	0.00	20.81	-
14	0.00	9.74	0.00	9.74	-
15	0.00	28.02	0.00	28.02	-
16	0.00	3.37	0.00	3.37	-
17	0.00	7.62	0.00	7.62	-
18	0.00	0.00	0.00	0.00	-
19	0.00	7.66	0.00	7.66	-
20	0.00	13.58	0.00	13.58	-
21	0.85	128.78	0.85	127.93	100%
22	36.21	3030.49	36.21	2994.28	100%
23	8.16	14.74	8.16	6.58	100%
	62.90	3583.74	62.90	3520.84	100%

Al igual que para la situación anterior, en esta se satisface el 100% de la demanda en cuencas aportantes.

En el acuífero el balance quedaría de la siguiente forma:

Tabla 63. Balance hídrico en el acuífero según escenario 5 y explotación al 17% de derechos constituidos

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	385,37	Subterráneas	-128,32
Laterales	496,06	Bombeos	-215,62
Infiltración desde río	384,49	Afloramientos	-962,21
Recarga precipitación	40,22		
Total entradas	1.306,15	Total Salidas	-1.306,16

En esta situación se abastece un 99% de la demanda impuesta, tanto para el acuífero como en global.

Asimismo se han realizado tanteos intermedios entre el 17% de explotación y el 25%, y la cifra que puede darse para no afectar a más de un 5% de la demanda es de entre el 17,5 y el 18% lo que supone una demanda global (acuífero y cuencas) de unos 284 l/s según la disposición actual de las captaciones con derechos constituidos, ya que ésta es determinante en cuanto a la afección entre unas captaciones y otras.

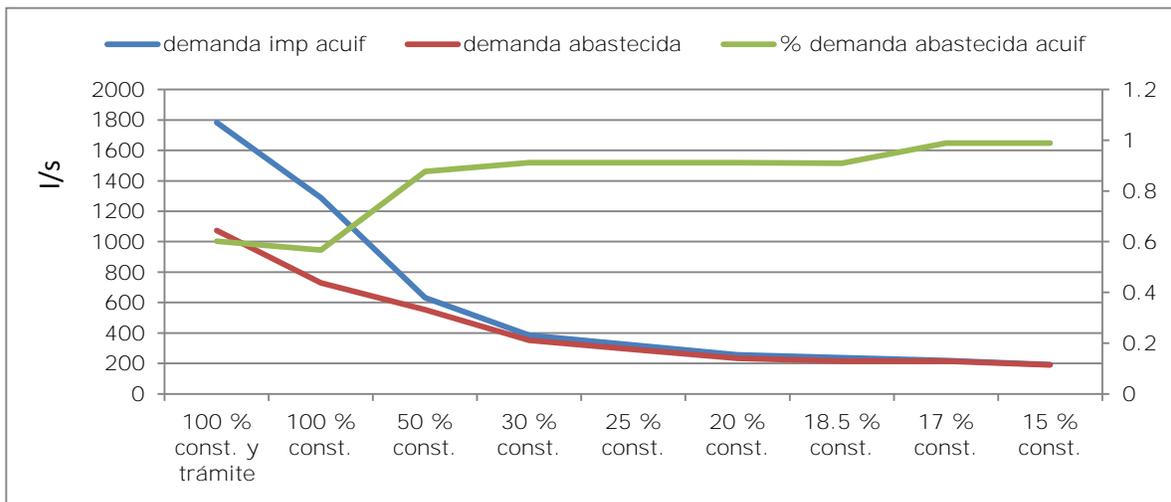


Figura 99. Demanda impuesta frente a abastecida en el acuífero según escenario 5.

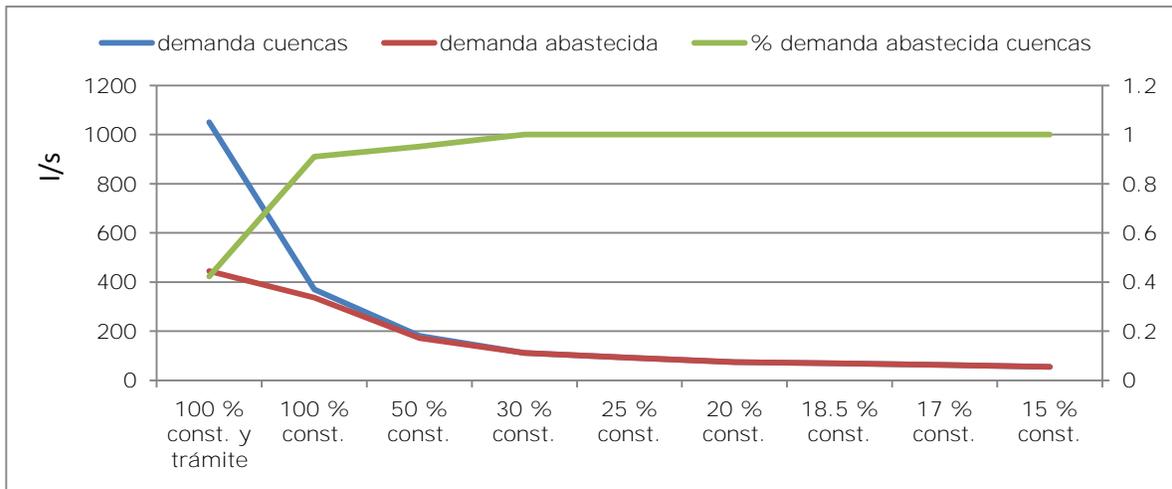


Figura 100. Demanda impuesta frente a abastecida en cuencas según escenario 5.

10.8.6. ESCENARIO 6. SITUACIÓN DE AFECCIÓN A MÁS DEL 5% DE LAS CAPTACIONES DEL ACUÍFERO

En este escenario se pretende obtener el límite máximo de explotación que se podría dar en el acuífero para no afectar a más del 5% de las captaciones, entendiendo como afección el dejar colgadas o secas (secado de celdas).

Para ello se parte de las siguientes hipótesis:

- Recarga por precipitación en el acuífero: determinada en el escenario 3.
- Demanda impuesta 100% de derechos constituidos y derechos en trámite, y tanteo de la demanda hasta calcular el límite máximo para no afectar a más del 5% de las captaciones, entendiendo como afección el que queden secas y/o colgadas.

10.8.6.1. Recarga por precipitación en situación de afección al sistema superficial

Se considera una recarga equivalente a un periodo medio de precipitación (Ver capítulo 10.8.2.1 Recarga por precipitación en régimen natural).

10.8.6.2. Bombeos

Este componente es el que se desea obtener, motivo por el cual se ha llevado a cabo un tanteo de los bombeos a considerar.

En primer lugar se ha partido del 100 % de derechos constituidos y de derechos en trámite, posteriormente se ha reducido a únicamente derechos constituidos y se ha ido reduciendo progresivamente hasta encontrar el caudal de bombeo que no afecte a más del 5 % de las captaciones.

Los bombeos máximos considerados para cumplir con la condición de no afección del 5% han sido del 15% del caudal de derechos constituidos.

10.8.6.3. Niveles calculados

Los niveles calculados son los mismos que los obtenidos para el escenario n°5, motivo por el cual se incluyen aquí únicamente el obtenido para una afección del 5% de las captaciones (ver Figura 101).



Figura 101. Isopiezas obtenidas para una explotación del 15% de los derechos constituidos.

10.8.6.4. Balance hídrico y determinación de la afección al 5% de las captaciones

Se incluye a continuación el balance hídrico obtenido, considerado con explotación máxima para no afectar a más de un 5% de las captaciones.

Tabla 64. Balance hídrico en subcuencas para Escenario 6 y coeficiente de explotación 0,15 de derechos constituidos.

Subcuenca	Demanda (l/s)	Entradas (l/s)	Bombeos efectivos (l/s)	Balance (l/s)
1	0,15	12,04	0,15	11,89
2	0,60	20,15	0,60	19,55
3	3,00	20,17	3,00	17,17
4	2,10	37,29	2,10	35,19
5	0,00	10,43	0,00	10,43
6	2,10	14,54	2,10	12,44
7	0,75	17,57	0,75	16,82
8	0,60	32,39	0,60	31,79
9	0,45	10,57	0,45	10,12
10	5,85	88,53	5,85	82,68
11	0,00	19,89	0,00	19,89
12	0,00	35,34	0,00	35,34
13	0,00	20,81	0,00	20,81
14	0,00	9,74	0,00	9,74
15	0,00	28,02	0,00	28,02
16	0,00	3,37	0,00	3,37
17	0,00	7,62	0,00	7,62
18	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	7,66	0,00	7,66
20	0,00	13,58	0,00	13,58
21	0,75	128,78	0,75	128,03
22	31,95	3.030,49	31,95	2.998,54
23	7,20	14,74	7,20	7,54
	55,50	3.583,74	55,50	3.528,24

En el acuífero el balance hídrico resulta de la siguiente forma:

Tabla 65. Balance hídrico en el acuífero según escenario 6 y coeficiente de explotación 0,15.

Entradas	Q (l/s)	Salidas	Q (l/s)
Subterráneas	384,99	Subterráneas	-128,36
Laterales	498,72	Bombeos	-190,23
Infiltración desde río	366,86	Afloramientos	-972,12
Recarga precipitación	40,23		
Total entradas	1290,79	Total Salidas	-1290,71

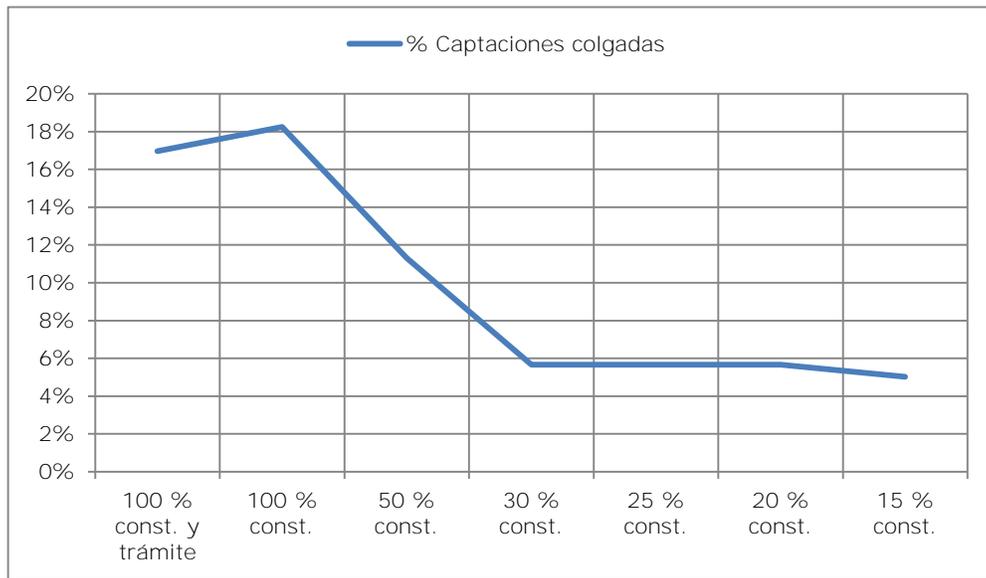


Figura 102. Afección de las captaciones en función del coeficiente de explotación de las captaciones con derechos en el acuífero.

10.8.7. ESCENARIO 7. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON INCREMENTO DE LA DEMANDA

10.8.7.1. Descripción y supuestos

Este escenario corresponde a una simulación en régimen transiente, para un periodo de 50 años, durante el cual se ha variado la recarga por precipitación directa en el acuífero, suponiendo una serie de precipitación futura idéntica a la de registros históricos, y teniendo en cuenta el coeficiente de infiltración obtenido en el capítulo de balance hídrico.

Asimismo, las condiciones de explotación introducidas corresponden a los derechos otorgados en el acuífero, y se ha ido incrementando el volumen de explotación hasta que se incumpliera alguno de estos criterios (DAHR):

- Afección al sistema superficial
- Afección al 5% de la demanda
- Afección al 5% de las captaciones

Estos criterios atienden al estudio **"Evaluación de la Explotación Sustentable de los acuíferos de la VI Región"**. Para el caso de afección al sistema superficial se ha calculado el grado de interacción (recursos inducidos sobre fuentes superficiales comparados con una situación de régimen natural) y se considera que incumple el criterio, es decir, el sistema superficial se considera afectado, cuando este grado de interacción sea mayor al 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluado como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

$$\Delta Q < 10\% Q_{\text{Flujo pasante 85\%}}$$

$$\Delta Q = \text{Caudal que deja de aflorar} + \text{Aumento de la infiltración}$$

En este sentido, se desarrolla este escenario con la finalidad de determinar una extracción máxima en el acuífero, hasta el punto en que el grado de interacción mencionado anteriormente sea del 10%, o que no se afecte a más del 5% de la demanda impuesta, o que no se afecte a más del 5% de las captaciones.

Para ello se parten de los siguientes supuestos:

- **Recarga por precipitación en el acuífero y laterales:**

Teniendo en cuenta el balance realizado en el apartado 9.5 se obtiene un coeficiente de infiltración (infiltración/precipitación bruta) para el acuífero y para las subcuencas aportantes tal y como se muestra a continuación:

Tabla 66. % de recarga sobre precipitación bruta

Zona	% Recarga según pp bruta
Acuífero	0,65%
Cuenca 1	5,36%
Cuenca 2	4,41%
Cuenca 3	3,68%
Cuenca 4	1,68%
Cuenca 5	13,16%
Cuenca 6	2,58%
Cuenca 7	3,59%
Cuenca 8	4,09%
Cuenca 9	1,66%
Cuenca 10	2,55%
Cuenca 11	3,57%
Cuenca 12	5,17%
Cuenca 13	6,44%
Cuenca 14	4,74%
Cuenca 15	5,07%
Cuenca 16	3,73%
Cuenca 17	2,11%
Cuenca 18	0,00%
Cuenca 19	4,53%
Cuenca 20	4,87%
Cuenca 21	3,15%
Cuenca 22	11,14%
Cuenca 23	0,81%
Cuenca 24	3,24%
Total	7,59%

Aplicando estos porcentajes de infiltración a una supuesta serie de precipitación (serie histórica de la estación Coelemu, repetida hacia futuro).

- **Coefficiente de almacenamiento:**

Se ha introducido el valor de 0.1 de forma homogénea en todo el ámbito del modelo, atendiendo a que es un valor característico de los acuíferos libres detríticos (grano fino-medio). El motivo de no haber introducido un valor zonificado y calibrado, al igual que se ha realizado con la permeabilidad, es debido a que el modelo ha sido calibrado en régimen estacionario y no

transiente, necesario este último para obtener una zonificación y valores de coeficiente de almacenamiento acordes a la realidad.

- **Caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia:**

Se toma el caudal medio anual del río Itata obtenido en el análisis hidrológico, correspondiente a 116,70 m³/s, por lo que ΔQ debe ser inferior a 11,67 m³/s.

- **Explotación:**

Se realiza un tanteo partiendo de los derechos constituidos y en trámite.

- **Situación inicial:**

Se parte de la situación actual (escenario 1) como escenario base para el cálculo de la interacción sistema superficial-subterráneo.

10.8.7.2. Resultados obtenidos

Como resultado de la simulación de este escenario, y teniendo en cuenta los supuestos mencionados en el apartado anterior, se ha determinado que, según la distribución de las captaciones con derechos otorgados existentes y los caudales de bombeo asignados, no se podría explotar el acuífero de forma sostenible, ya que en dicha situación solo se podría satisfacer un 66% de la demanda impuesta (861,76 l/s frente a los 1.287 l/s demandados), además de que 21 de 159 captaciones (13,2 %) se quedarían secas.

Manteniendo la distribución de las captaciones otorgadas y disminuyendo los caudales asignados al 17,7% si se daría una situación sostenible en el acuífero, ya que no se producirían descensos generalizados en el acuífero, se podría satisfacer un 99% de la demanda impuesta (226,55 l/s frente a 227,80 l/s demandados), y tan solo se afectarían a 2 captaciones sobre 159 existentes (1,26%).

En el caso de que la explotación fuese del 18% del caudal otorgado si habría una afección del 8% a la demanda impuesta, por lo que no se cumplirían los criterios definidos.

En ningún caso se vería afectado el sistema superficial, ya que la máxima afección es de 1,8% teniendo en cuenta el 100% de derechos otorgados.

Cabe destacar que se podría incrementar la explotación del acuífero con una redistribución de las captaciones, ya que el factor limitante es la afección entre captaciones cercanas.

Se muestran a continuación los gráficos de evolución de los niveles en el acuífero teniendo en cuenta una explotación del 100% (Figura 103) y del 17,7 % (Figura 104) de los derechos constituidos.

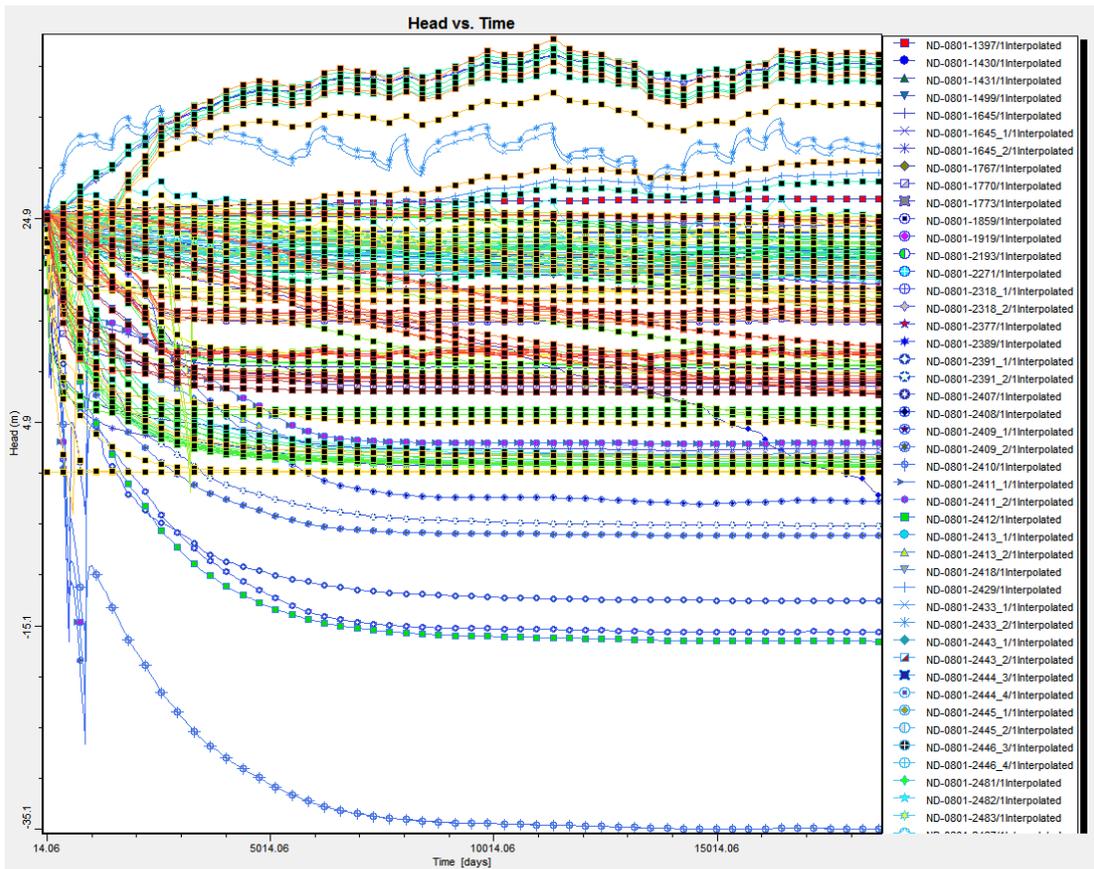


Figura 103. Evolución del nivel en las captaciones con derechos otorgados, suponiendo una extracción de los caudales otorgados.

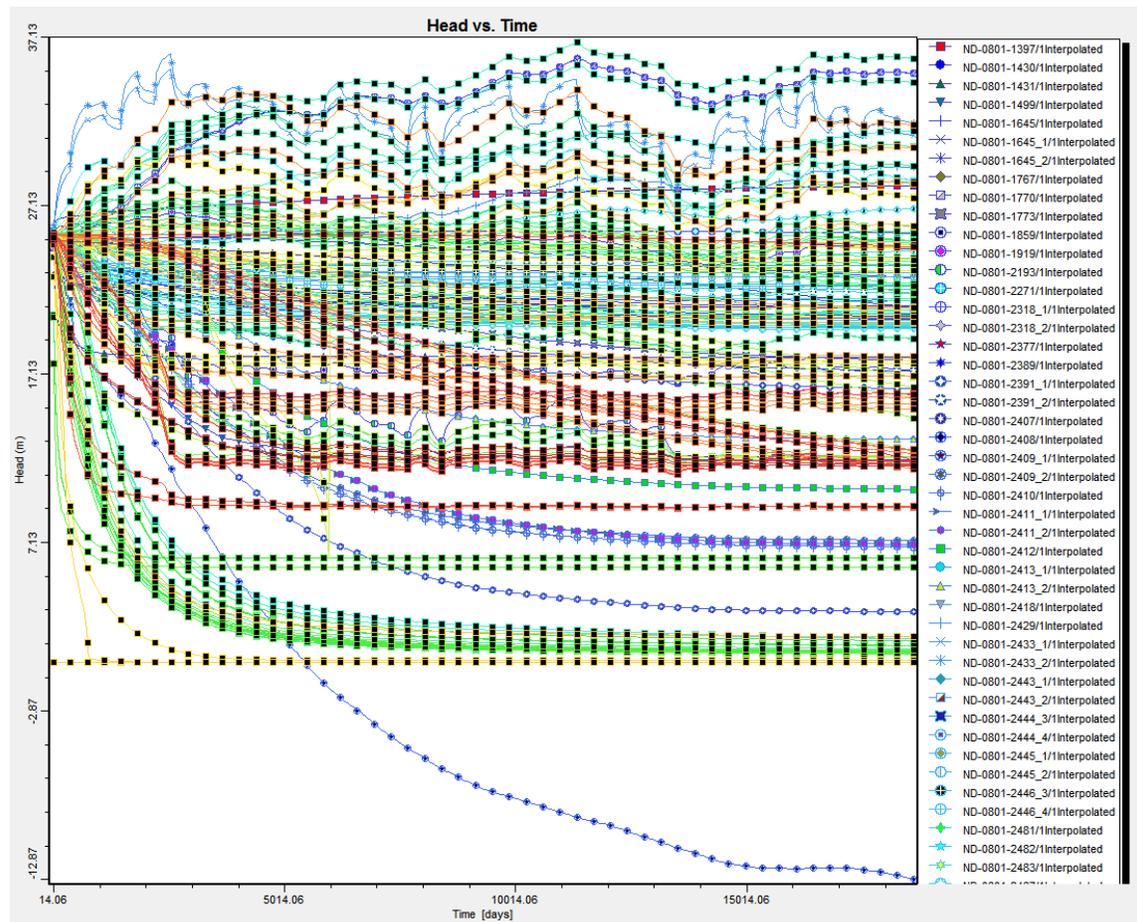


Figura 104. Evolución del nivel en las captaciones con derechos otorgados, suponiendo una extracción del 17,7% de los caudales otorgados.

11. PROPUESTA DE RED DE MONITOREO

El acuífero Itata bajo se caracteriza por tener un funcionamiento muy próximo al régimen natural, motivo por el cual no resulta necesario el establecimiento de una red de monitoreo densa. No obstante, en aras a la protección del sistema y el control periódico para futuros estudios y una mejor gestión del recurso, se propone una red de monitoreo de niveles y de calidad tal cual se incluye a continuación.

Asimismo, atendiendo a los resultados de calidad obtenidos en las muestras analizadas, puesto que éstas presentan unos resultados más o menos uniformes en todo el acuífero, no se plantean puntos de interés específico salvo en la zona de Coelemu, debido a que la acción antrópica puede modificar en calidad y/o en cantidad el agua subterránea, además de que pueda ser captada para abastecimiento, motivo por el cual se plantea un punto de monitoreo en esta zona.

Tabla 67. Puntos de monitoreo de nivel y calidad propuestos (WGS84 18S)

Punto	X UTM	Y UTM
1	160068	5964940
2	173448	5961510
3	168893	5955920
4	176212	5950070
5	189426	5939630

En cada punto de monitoreo, que debiera estar correctamente referenciado en coordenadas y en cota topográfica, se debiera tomar medidas mensuales de nivel y parámetros químicos básicos (pH, conductividad y temperatura), y trimestrales para un análisis más completo (análisis para aguas con uso urbano).

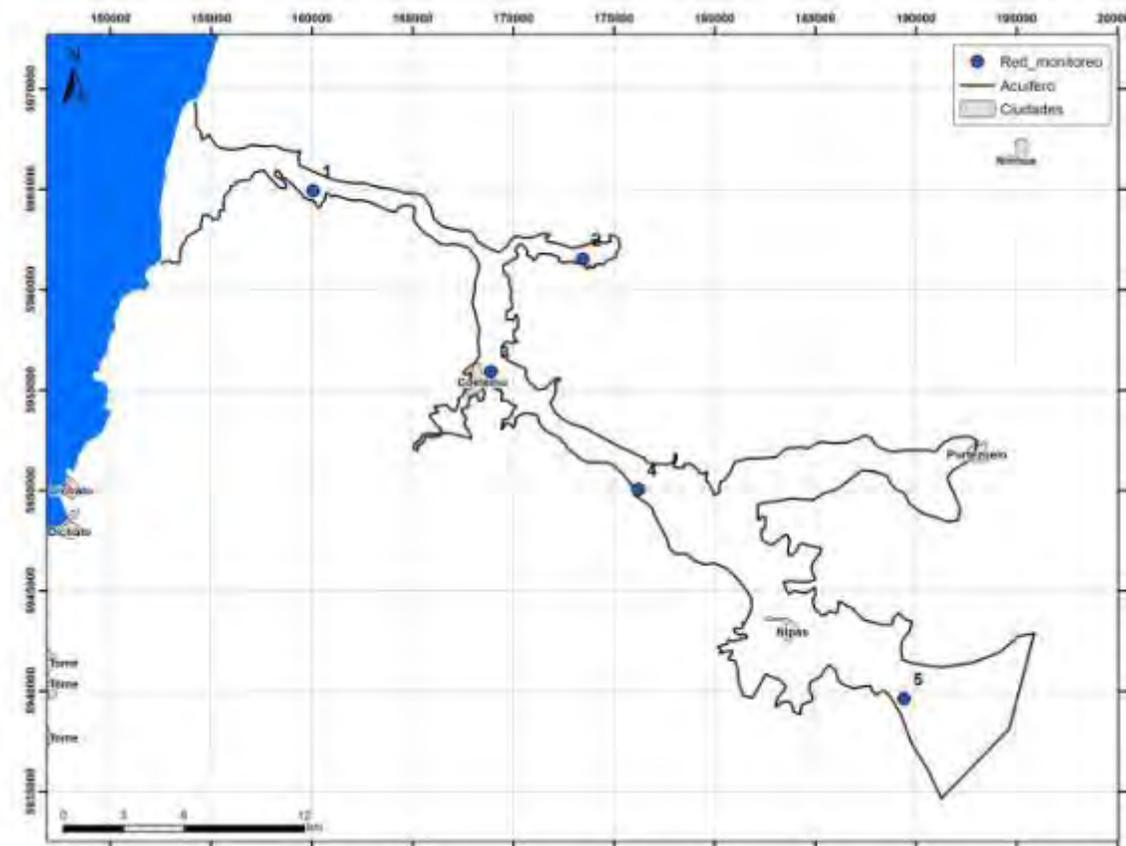


Figura 106. Red monitoreo propuesta

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

12.1. CONCLUSIONES

El presente estudio supone una mejora en el conocimiento hidrogeológico del acuífero Itata desde el punto de vista de su geometría, disponibilidad hídrica, calidad química, uso del agua y comportamiento hidrogeológico del sistema.

Los principales resultados obtenidos han sido los siguientes:

- Definición geométrica del acuífero (antecedentes y geofísica)
- Disponibilidad hídrica del acuífero y cuencas aportantes (balance hídrico)
- Calidad química (muestreo de calidad)
- Determinación del uso del agua (catastro)
- Equipotenciales y flujos de agua subterránea (campaña de piezometría)
- Simulación del comportamiento hidrogeológico (modelo numérico)
- Simulación de escenarios

Asimismo, en el presente estudio, a los efectos de ofrecer una herramienta de gestión lo más funcional posible para las labores propias de la Dirección General de Aguas, el balance hídrico realizado se ha sectorizado por cuencas aportantes, que a su vez dependen de la aportación al sistema acuífero Itata bajo, pudiendo de esta forma conocer la recarga de cada subcuenca dentro del conjunto y cómo ésta afectaría tanto a la cuenca como al acuífero Itata bajo la incorporación de nuevas extracciones en la zona de estudio.

Desde el punto de vista hidrológico, el acuífero Itata Bajo presenta un comportamiento próximo al régimen natural, con gran influencia del río Itata en prácticamente toda la extensión del acuífero.

El sistema presenta unas entradas de 2.311 l/s en invierno, cuyo componente principal es la recarga lateral de cuencas aportantes.

De los 2.311 l/s de entrada, casi todo vuelve al sistema superficial a través de afloramientos, y tan solo 133 l/s salen del sistema en forma subterránea hacia el mar.

La explotación del acuífero en términos de importancia es baja, ya que apenas suponen merma al sistema, no obstante, este factor es recomendable que sea controlado en todo momento debido al posible crecimiento de la demanda hídrica.

Desde el punto de visto de derechos constituidos y en trámite, los escenarios simulados reflejan los siguientes límites a tener en cuenta:

- Afección al sistema superficial: En este caso los derechos constituidos así como los derechos en trámite no ponen en riesgo una afección al sistema superficial.
- Afección a más del 5% de la demanda: teniendo en cuenta la disposición y caudales de derechos constituidos, el coeficiente de explotación de captaciones con derechos constituidos que se podría dar como máximo sería del 18%, lo que supone una demanda global (acuífero y cuencas) de unos 284 l/s. No obstante, se podría dar una explotación mucho mayor redistribuyendo las captaciones por otras zonas del acuífero o separando una de otras.
- Afección a más del 5% de las captaciones: al igual que para la afección del 5% de la demanda, atendiendo a la distribución y caudales de derechos otorgados, la explotación máxima que se podría dar para no afectar a más del 5% de las captaciones sería del 15% respecto al caudal de derechos otorgados.

No obstante, en términos de balance hídrico global, el sistema posee unos recursos muy superiores a los demandados realmente.

12.2. RECOMENDACIONES

De forma complementaria al estudio y para un mejor aprovechamiento de los trabajos realizados, se recomienda la calibración del modelo en régimen transiente ya que de esta forma los escenarios modelados tendrán una fiabilidad mucho mayor a la que se puede obtener tras la calibración en régimen

estacionario, y dentro de esta simulación sería conveniente estudiar cómo se podrían redistribuir las captaciones para obtener una mejor planificación futura del aprovechamiento del acuífero sin que suponga afección a la demanda, ni al sistema superficial.

Se recomienda también realizar una campaña de aforos con más puntos de medida que las realizadas, ya que se observan diferencias de caudal entre puntos difícilmente asignables a pérdidas o ganancias del río.

Se propone también la realización de un aforo químico complementario al anterior para darle fiabilidad a los resultados obtenidos, además de que resulta más apropiado para cauces de grandes dimensiones y heterogéneos como es este caso.

Resulta también de interés hacer una campaña geofísica complementaria en los afluentes del río Itata (Lonquén y Coelemu), así como incrementar la densidad de puntos tomados en todo el acuífero detrítico, para mejorar en el conocimiento de la geometría acuífera del mismo.

Asimismo, para el mejor ajuste y fiabilidad del modelo se recomienda la obtención de una topografía a escala 1:5.000 y una campaña de medición topográfica de precisión en los puntos de nivel observados.