



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

**LEVANTAMIENTO  
HIDROGEOLÓGICO EN CUENCAS  
PLUVIALES COSTERAS EN LA  
REGIÓN DEL LIBERTADOR  
GENERAL BERNARDO O'HIGGINS Y  
REGIÓN DEL BÍO-BÍO**

**INFORME FINAL**

**REALIZADO POR:  
AQUALOGY MEDIOAMBIENTE CHILE S.A.  
S.I.T. N° 318**

**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

Expertos en Modelación Matemática

Alberto Barrera García

Hidrogeólogo

Juan Carlos Sirvent Artiaga

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

<b>0. RESUMEN.....</b>	<b>17</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>19</b>
1.1. OBJETIVOS Y ALCANCE .....	20
1.2. ESTRUCTURA DEL INFORME FINAL .....	22
<b>2. LOS ACUÍFEROS PRINCIPALES DE LAS NUEVE CUENCAS COSTERAS.....</b>	<b>23</b>
<b>3. EL ESTUDIO REALIZADO.....</b>	<b>25</b>
<b>4. ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>27</b>
4.1. CUENCA COSTERA RAPEL-ESTERO NILAHUE (VI REGIÓN) .....	29
4.2. CUENCAS PLUVIALES COSTERAS DE LA VIII REGIÓN .....	31
<b>5. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....</b>	<b>33</b>
5.1. ANTECEDENTES VI REGIÓN .....	33
5.2. ANTECEDENTES VIII REGIÓN.....	35
<b>6. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL.....</b>	<b>39</b>
6.1. MODELO DE GENERACIÓN DE CAUDALES .....	39
6.1.1. ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN.....	41
6.1.2. ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	42
6.1.3. ESTIMACIÓN DE LA PERCOLACIÓN PROFUNDA .....	43
6.1.4. CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA TOTAL.....	43
6.1.5. CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL .....	43
6.1.6. CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA .....	44
6.1.7. OPERACIÓN DEL MODELO .....	46
6.2. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA .....	46
6.2.1. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA CUENCAS VI REGIÓN ...	47
6.2.1.1. RED DE DRENAJE .....	47
6.2.1.2. DEFINICIÓN DE CUENCAS .....	50
6.2.1.3. PLUVIOMETRÍA .....	51
6.2.1.4. FLUVIOMETRÍA.....	56
6.2.1.5. RÉGIMEN HIDROLÓGICO .....	60
6.2.2. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA CUENCAS VIII REGIÓN ..	61
6.2.2.1. RED DE DRENAJE .....	61
6.2.2.2. DEFINICIÓN DE CUENCAS .....	63
6.2.2.3. PLUVIOMETRÍA .....	64
6.2.2.4. FLUVIOMETRÍA.....	67
6.2.2.5. RÉGIMEN HIDROLÓGICO CUENCAS VIII REGIÓN.....	71
<b>7. RECONOCIMIENTO DE TERRENO.....</b>	<b>73</b>
7.1. CUENCAS COSTERAS DE LA VI REGIÓN (ENTRE R. RAPEL Y E. NILAHUE).....	73
7.1.1. CATASTRO DE CAPTACIONES .....	73
7.1.1.1. IDENTIFICACIÓN PUNTOS CATASTRADOS .....	74
7.1.1.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	75

---

7.1.2.	PIEZOMETRÍA Y CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS .....	75
7.1.3.	CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA.....	76
7.1.4.	USOS Y DEMANDAS.....	78
7.1.5.	CAMPAÑA DE AFOROS .....	80
7.2.	CUENCAS COSTERAS VIII REGIÓN (ENTRE ITATA Y BIOBÍO) .....	83
7.2.1.	CATASTRO DE CAPTACIONES .....	83
7.2.1.1.	IDENTIFICACIÓN PUNTOS CATASTRADOS .....	83
7.2.1.2.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	84
7.2.2.	PIEZOMETRÍA Y CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS .....	85
7.2.3.	CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA.....	86
7.2.4.	USOS Y DEMANDAS.....	87
7.2.5.	CAMPAÑA DE AFOROS .....	89
7.3.	ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA .....	91
7.3.1.	INTRODUCCIÓN .....	91
7.3.2.	ELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA .....	91
7.3.3.	METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN.....	92
7.3.4.	CAMPAÑA DE TERRENO.....	95
7.3.4.1.	CUENCA COSTERA ENTRE RÍO RAPEL Y ESTERO NILAHUE (ACUÍFERO NILAHUE) .....	96
7.3.4.2.	CUENCA COSTERA ENTRE RÍO ITATA Y RÍO BÍO-BÍO (ACUÍFERO DE TALCAHUANO).....	99
7.3.5.	PROCESADO E INVERSIÓN DE DATOS .....	101
7.3.6.	RESULTADOS.....	102
7.3.6.1.	CUENCA COSTERA ENTRE RÍO RAPEL Y ESTERO NILAHUE .	103
7.3.6.2.	CUENCA COSTERA ENTRE ITATA Y BÍO-BÍO .....	110
<b>8.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELO CONCEPTUAL .....</b>	<b>117</b>
8.1.	GEOLOGÍA Y FORMACIONES PERMEABLES.....	117
8.1.1.	MARCO GEOLÓGICO GENERAL.....	117
8.1.2.	ESTRATIGRAFÍA.....	118
8.1.2.1.	CUENCAS COSTERAS DE LA VI REGIÓN .....	118
8.1.2.2.	CUENCAS COSTERAS DE LA VIII REGIÓN .....	121
8.1.3.	COLUMNAS DE SONDEOS EXISTENTES .....	125
8.1.3.1.	CUENCA COSTERA ENTRE RÍO RAPEL Y ESTERO NILAHUE .	125
8.1.3.2.	CUENCA RÍO ITATA Y RÍO BÍO-BÍO.....	131
8.1.4.	FORMACIONES PERMEABLES .....	132
8.2.	CUENCA COSTERA ENTRE RÍO RAPEL Y ESTERO NILAHUE (CÓDIGO DGA 061).....	133
8.2.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	133
8.2.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS.....	133
8.2.3.	LÍMITES DEL SISTEMA .....	139
8.2.4.	CAPTACIONES .....	139
8.2.5.	PIEZOMETRÍA .....	139

---

8.2.6.	PARÁMETROS ELÁSTICOS .....	141
8.2.7.	BALANCE HÍDRICO .....	142
8.2.7.1.	ENTRADAS .....	143
8.2.7.2.	SALIDAS .....	155
8.2.8.	CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA .....	158
8.3.	CUENCA COSTERA ENTRE RÍO ITATA Y BÍO-BÍO (CÓDIGO DGA 082) 161	
8.3.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	161
8.3.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS .....	162
8.3.3.	LÍMITES DEL SISTEMA .....	165
8.3.4.	CAPTACIONES .....	165
8.3.5.	PIEZOMETRÍA .....	166
8.3.6.	PARÁMETROS ELÁSTICOS .....	167
8.3.7.	BALANCE HÍDRICO .....	167
8.3.7.1.	ENTRADAS .....	168
8.3.7.2.	Entradas por infiltración desde cauces.....	174
8.3.7.3.	Resumen de entradas .....	174
8.3.8.	BALANCE.....	175
8.3.9.	CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA .....	176
8.4.	CUENCA COSTERA ENTRE LÍMITE REGIONAL NORTE Y RÍO ITATA (CÓDIGO DGA 080).....	179
8.4.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	179
8.4.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS .....	181
8.4.3.	LIMITES DEL SISTEMA .....	181
8.4.4.	CAPTACIONES .....	182
8.4.5.	PIEZOMETRÍA .....	182
8.4.6.	ESQUEMA DE FLUJO .....	182
8.4.7.	PARAMETROS ELASTICOS .....	183
8.4.8.	BALANCE.....	184
8.4.9.	CARACTERIZACION HIDROQUIMICA .....	185
8.5.	CUENCA COSTERA ENTRE RÍO BIO-BÍO Y CARAMPANGUE (CÓDIGO DGA 084).....	185
8.5.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	186
8.5.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS .....	188
8.5.3.	LIMITES DEL SISTEMA .....	189
8.5.4.	CAPTACIONES .....	189
8.5.5.	PIEZOMETRÍA .....	190
8.5.6.	ESQUEMA DE FLUJO .....	190
8.5.7.	PARAMETROS ELASTICOS .....	191
8.5.8.	BALANCE.....	192
8.5.9.	CARACTERIZACION HIDROQUIMICA .....	193
8.6.	CUENCA COSTERA RIO CARAMPANGUE (CÓDIGO DGA 085) .....	193
8.6.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	193

---

8.6.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS .....	196
8.6.3.	LÍMITES DEL SISTEMA .....	196
8.6.4.	CAPTACIONES .....	197
8.6.5.	PIEZOMETRÍA .....	197
8.6.6.	ESQUEMA DE FLUJO .....	197
8.6.7.	PARAMETROS ELASTICOS .....	198
8.6.8.	BALANCE.....	198
8.6.9.	CARACTERIZACION HIDROQUIMICA .....	199
8.7.	CUENCA COSTERA CARAMPANGUE-LEBU (CÓDIGO DGA 086) ...	200
8.7.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	200
8.7.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS .....	203
8.7.3.	LIMITES DEL SISTEMA .....	203
8.7.4.	CAPTACIONES .....	203
8.7.5.	PIEZOMETRÍA .....	204
8.7.6.	ESQUEMA DE FLUJO .....	204
8.7.7.	PARAMETROS ELASTICOS .....	205
8.7.8.	BALANCE.....	206
8.7.9.	CARACTERIZACION HIDROQUIMICA .....	207
8.8.	CUENCA COSTERA RÍO LEBU (CÓDIGO DGA 087).....	207
8.8.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	208
8.8.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS.....	211
8.8.3.	LÍMITES DEL SISTEMA .....	212
8.8.4.	CAPTACIONES .....	212
8.8.5.	PIEZOMETRÍA .....	212
8.8.6.	ESQUEMA DE FLUJO .....	213
8.8.7.	PARAMETROS ELASTICOS .....	214
8.8.8.	BALANCE HÍDRICO .....	214
8.8.9.	CARACTERIZACION HIDROQUIMICA .....	215
8.9.	CUENCA COSTERA RÍO LEBU Y PAICAVÍ (CÓDIGO DGA 088) ....	215
8.9.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	216
8.9.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS.....	218
8.9.3.	LIMITES DEL SISTEMA .....	219
8.9.4.	CAPTACIONES .....	219
8.9.5.	PIEZOMETRÍA .....	220
8.9.6.	ESQUEMA DE FLUJO .....	221
8.9.7.	PARAMETROS ELASTICOS .....	222
8.9.8.	BALANCE HÍDRICO .....	222
8.9.9.	CARACTERIZACION HIDROQUIMICA .....	223
8.10.	CUENCA COSTERA ENTRE RÍO PAICAVÍ Y LÍMITE REGIONAL SUR (CÓDIGO DGA 089).....	224
8.10.1.	FORMACIONES PERMEABLES .....	224
8.10.2.	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS .....	226
8.10.3.	CAPTACIONES.....	226

8.10.4.	PIEZOMETRÍA .....	228
8.10.5.	ESQUEMA DE FLUJO .....	229
8.10.6.	PARAMETROS ELASTICOS.....	230
8.10.7.	BALANCE HÍDRICO .....	230
8.10.8.	CARACTERIZACION HIDROQUIMICA .....	232
<b>9.</b>	<b>MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE NILAHUE (VI REGIÓN)</b>	
	<b>233</b>	
9.1.	DISCRETIZACIÓN Y MALLADO DEL MODELO .....	233
9.2.	GEOMETRÍA DEL MODELO .....	234
9.3.	PARÁMETROS ELÁSTICOS.....	237
9.4.	CONDICIONES DE CONTORNO .....	239
9.4.1.	BORDES.....	239
9.4.2.	RIOS .....	240
9.4.3.	RECARGA .....	241
9.4.4.	EXTRACCIONES POR BOMBEO .....	241
9.5.	PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	241
9.6.	EJECUCIÓN DEL MODELO .....	242
9.7.	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	243
9.8.	RESULTADOS OBTENIDOS .....	244
9.8.1.	ESCENARIO 1. SITUACIÓN ACTUAL .....	244
9.8.1.1.	Niveles calculados .....	244
9.8.1.2.	Balace hídrico.....	245
9.8.2.	ESCENARIO 2. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON DERECHOS OTORGADOS.....	246
9.8.2.1.	DESCRIPCIÓN Y SUPUESTOS .....	246
9.8.2.2.	Resultados obtenidos .....	248
9.8.3.	ESCENARIO 3. REGIMEN NATURAL .....	250
9.8.3.1.	DESCRIPCIÓN Y SUPUESTOS .....	250
9.8.3.2.	RESULTADOS.....	250
9.8.4.	ESCENARIO 4. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON CATASTRO REALIZADO .....	251
9.8.4.1.	DESCRIPCIÓN Y SUPUESTOS .....	251
9.8.4.2.	RESULTADOS.....	252
<b>10.</b>	<b>MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE TALCAHUANO (VIII REGIÓN).....</b>	<b>254</b>
10.1.	DISCRETIZACIÓN Y MALLADO DEL MODELO .....	254
10.2.	GEOMETRÍA DEL MODELO .....	255
10.3.	PARÁMETROS ELÁSTICOS.....	257
10.4.	CONDICIONES DE CONTORNO .....	258
10.4.1.	BORDES .....	258
10.4.2.	RÍOS.....	259
10.4.3.	RECARGA .....	260
10.4.4.	EXTRACCIONES POR BOMBEO.....	261

---

10.5. PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	261
10.6. EJECUCIÓN DEL MODELO .....	262
10.7. CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	262
10.8. RESULTADOS OBTENIDOS .....	263
10.8.1. ESCENARIO 1. SITUACIÓN ACTUAL .....	263
10.8.1.1. NIVELES CALCULADOS .....	263
10.8.1.2. BALANCE HÍDRICO .....	264
10.8.2. ESCENARIO 2. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON INCREMENTO DE LA DEMANDA .....	265
10.8.2.1. DESCRIPCIÓN Y SUPUESTOS .....	265
10.8.2.2. RESULTADOS OBTENIDOS .....	267
10.8.3. ESCENARIO 3. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON INCREMENTO DE LA DEMANDA, Y CREACIÓN DE UNA NUEVA ZONA INDUSTRIAL .....	268
10.8.3.1. DESCRIPCIÓN Y SUPUESTOS .....	268
10.8.3.2. Resultados obtenidos .....	269
10.8.4. ESCENARIO 4. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON INCREMENTO DE LA DEMANDA, CREACIÓN DE UNA NUEVA ZONA INDUSTRIAL Y OTRA ZONA URBANA .....	270
10.8.4.1. DESCRIPCIÓN Y SUPUESTOS .....	270
10.8.4.2. Resultados obtenidos .....	271
<b>11. PROPUESTA DE RED DE MONITOREO DE PIEZOMETRÍA Y CALIDAD.....</b>	<b>274</b>
11.1. ACUÍFERO NILAHUE.....	274
11.2. ACUÍFERO DE TALCAHUANO .....	275
11.3. CUENCAS COSTERAS VIII REGIÓN.....	277
<b>12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>279</b>

ANEXO 1. INTERPRETACIÓN DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

ANEXO 2. REPORTAJE FOTOGRÁFICO GEOFÍSICA

ANEXO 3. FICHAS DE CAPTACIONES

ANEXO 4. RESULTADOS DE LABORATORIO

ANEXO 5. AFOROS

ANEXO 6. TABLAS DE DETALLE

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca Costera Rapel-Estero Nilahue (VI Región) y acuífero de Nilahue.....	28
Figura 2. Cuencas Costeras VIII Región y acuífero de Talcahuano .....	29
Figura 3. Cuenca Costera Rapel-Estero Nilahue (VI Región) .....	30
Figura 4. Cuencas Costeras VIII Región .....	32
Figura 5. Esquema Conceptual del MPL.....	41
Figura 6. Cuencas Costeras entre Rapel y Nilahue.....	50
Figura 7. Ubicación de estaciones meteorológicas cuencas costeras VI Región.....	52
Figura 8. Qm E. Nilahue en Santa Teresa vs Pp Nilahue en Barahona .....	57
Figura 9. Evaporaciones totales mensuales promedio VII Región .....	58
Figura 10. Menú programa MPL .....	59
Figura 11. Autocorrelograma caudales cuencas costeras Rapel-Nilahue.....	60
Figura 12. Principales hoyas hidrográficas Costeras VIII Región .....	64
Figura 13. Ubicación de estaciones meteorológicas cuencas costeras VIII Región.....	66
Figura 14. Ubicación de estaciones fluviométricas: Cuencas costeras VIII Región.....	69
Figura 15. Ajuste de caudales cuenca patrón (código 082) .....	70
Figura 16. Caudal observado vs calculado en cuenca patrón (código 082) .	70
Figura 17. Autocorrelograma caudales cuencas costeras VIII Región .....	71
Figura 18. Puntos de agua catastrados en la cuenca costera entre R. Rapel y E. Nilahue (acuífero de Nilahue) .....	74
Figura 19. Cotas de nivel freático medidas durante la campaña de terreno entre agosto y septiembre de 2013. Cuenca costera entre R. Rapel y E. Nilahue (acuífero de Nilahue). .....	76
Figura 20. Parámetros de calidad medidos durante la campaña de terreno. Cuenca costera entre R. Rapel y E. Nilahue (acuífero de Nilahue). .....	78
Figura 21. Volumen de explotación catastrado en la cuenca costera entre R. Rapel y E. Nilahue (acuífero de Nilahue) .....	79
Figura 22. Aforos realizados en el Estero Nilahue .....	80
Figura 23. Relación río-acuífero en el acuífero Nilahue.....	82
Figura 24. Puntos de agua catastrados en la cuenca costera entre Itata y Biobío .....	84
Figura 25. Cotas de nivel freático medidas durante la campaña de terreno en agosto de 2013. Cuenca costera entre R. Itata y R. Biobío.....	85
Figura 26. Parámetros de calidad medidos durante la campaña de terreno en agosto de 2013. Cuenca costera entre R. Itata y R. Biobío.....	87
Figura 27. Volumen de explotación catastrado en la cuenca costera entre R. Itata y R. Biobío .....	88
Figura 28. Localización de puntos aforados .....	89

---

Figura 29. Distribución de cuadripolos para un dispositivo simétrico de prospección geoelectrica.....	92
Figura 30. Relación de la resistividad aparente con el posicionamiento del cuadripolo y los valores obtenidos de intensidad I y diferencia de potencial V. ....	93
Figura 31. Inversión de sondeo eléctrico vertical SEV. ....	93
Figura 32. Equipo geoelectrico Syscal R1 Plus SW72 (Iris Instruments). ...	95
Figura 33. Ubicación de los SEV realizados. Cuenca entre Rapel y Nilahue	98
Figura 34. Ubicación de los SEV realizados. Cuenca entre Itata y Bío-Bío	101
Figura 35. Profundidad del basamento según resultados de la geofísica en el acuífero de Nilahue .....	109
Figura 36. Profundidad del basamento según resultados de la geofísica en el acuífero de Talcahuano.....	116
Figura 37. Dominios morfoestructurales de la zona central de Chile. Modificado de Sernageomin (2000). ....	117
Figura 38. Geología de las cuencas costeras de la VI Región. Modificado de Sernageomin (2000). ....	120
Figura 39. Geología de las cuencas costeras de la VIII Región. Modificado de Sernageomin (2000). ....	124
Figura 40. Situación de columnas de sondeos existentes .....	125
Figura 41. Registros litológicos margen izquierda del río Bío-Bío cerca de desembocadura .....	132
Figura 42. Situación general de los perfiles hidrogeológicos realizados....	134
Figura 43. Perfil 1-1' del acuífero Nilahue.....	135
Figura 44. Perfil 5-5' del acuífero Nilahue.....	135
Figura 45. Perfil 9-9' del acuífero Nilahue.....	136
Figura 46. Perfil 14-14' del acuífero Nilahue .....	136
Figura 47. Perfil 6-6' del acuífero Nilahue.....	137
Figura 48. Perfil 12-12' del acuífero Nilahue .....	137
Figura 49. Mapa de profundidad del basamento. Acuífero Nilahue .....	138
Figura 50. Mapa de isopiezas y sentido de flujo del acuífero Nilahue.....	140
Figura 51. División en subcuencas para el balance hídrico de la Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue .....	144
Figura 52. Clasificación de usos del suelo. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue Elaboración propia a partir de información facilitada por la CNR.	147
Figura 53. Clasificación de pendientes. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue.....	148
Figura 54. Clasificación en grupos de suelo. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue.....	149
Figura 55. Clasificación del umbral de escorrentía. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue .....	150
Figura 56. Isopiezas. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue .....	156

---

Figura 57. Diagrama de Piper en muestras de agua subterránea. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue .....	159
Figura 58. Diagrama de Piper en muestras de agua superficial. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue .....	160
Figura 59. Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue.....	161
Figura 60. Situación general de los perfiles hidrogeológicos realizados. Acuífero Talcahuano.....	163
Figura 61. Perfil 1-1'. Acuífero Talcahuano .....	163
Figura 62. Perfil 4-4'. Acuífero Talcahuano .....	164
Figura 63. Perfil 5-5'. Acuífero Talcahuano .....	164
Figura 64. Perfil 10-10'. Acuífero Talcahuano.....	165
Figura 65. Mapa de isopiezas y sentido de flujo del acuífero de Talcahuano .....	166
Figura 66. División en subcuencas para el balance hídrico de la Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío .....	168
Figura 67. Clasificación de usos del suelo. Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío Elaboración propia a partir de información facilitada por la CNR. ....	169
Figura 68. Clasificación de pendientes. Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío .....	170
Figura 69. Clasificación en grupos de suelo. Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío .....	171
Figura 70. Clasificación del umbral de escorrentía.C.C. entre Itata y Bío-Bío .....	172
Figura 71. Conductividad eléctrica. Cuenca Costera entre Itata y Bio-Bío	178
Figura 72. Valores de pH registrados en pozos catastrados. Cuenca Costera entre Itata y Bio-Bío .....	178
Figura 73. Mapa hidrogeológico Cuenca 080. Fuente: Elaboración propia	183
Figura 74. Mapa hidrogeológico Cuenca 084. Fuente: Elaboración propia	191
Figura 75. Mapa hidrogeológico Cuenca 085. Fuente: Elaboración propia	198
Figura 76. Mapa hidrogeológico Cuenca 086. Fuente: Elaboración propia	205
Figura 77. Geología Cuenca Costera Río Lebú.....	211
Figura 78. Mapa hidrogeológico Cuenca 087. Fuente: Elaboración propia	213
Figura 79. Geología Cuenca Costera Río Lebú y Paicaví.....	218
Figura 80. Mapa hidrogeológico Cuenca 088. Fuente: Elaboración propia	221
Figura 81. Captaciones otorgadas en materiales detríticos. Cuenca 089..	227
Figura 82. Captaciones otorgadas en materiales impermeables. Cuenca 089 .....	228
Figura 83. Mapa hidrogeológico Cuenca 089. Fuente: Elaboración propia	229
Figura 84. Variaciones de caudales medios mensuales. Est. Cañete.....	231
Figura 85. Mallado y celdas activas del modelo .....	234
Figura 86. Topografía introducida en el modelo.....	235
Figura 87. Basamento introducido en el modelo.....	236

---

Figura 88. Corte del acuífero N-S con mallado .....	236
Figura 89. Corte W-E del acuífero con mallado. ....	237
Figura 90. Permeabilidad obtenida tras calibración .....	238
Figura 91. Límites de acuífero y subcuencas de alimentación.....	239
Figura 92. Celdas tipo "river" .....	240
Figura 93. Puntos de observación .....	242
Figura 94. Niveles observados frente a calculados. Acuífero Nilahue .....	243
Figura 95. Niveles calculados. Acuífero Nilahue.....	245
Figura 96. Evolución de los niveles en el acuífero según caudales otorgados .....	248
Figura 97. Balance hídrico al final del periodo (50 años) .....	249
Figura 98. Evolución de los niveles en el acuífero según caudales otorgados al 50% .....	249
Figura 99. Balance hídrico al final del periodo (50 años), suponiendo un 5% de los caudales de derechos otorgados.....	250
Figura 100. Coordenadas locales y originales. Acuífero Talcahuano .....	254
Figura 101. Mallado y celdas activas del modelo. Acuífero Talcahuano....	255
Figura 102. Topografía introducida en el modelo.....	256
Figura 103. Basamento introducido en el modelo .....	256
Figura 104. Corte del acuífero N-S con mallado (escala vertical x10).....	257
Figura 105. Corte W-E del acuífero con mallado (escala vertical x10) .....	257
Figura 106. Permeabilidad obtenida tras calibración. Acuífero Talcahuano .....	258
Figura 107. Celdas de nivel constante. Acuífero Talcahuano .....	259
Figura 108. Celdas tipo River. Acuífero Talcahuano .....	260
Figura 109. Puntos de observación. Acuífero de Talcahuano .....	261
Figura 110. Niveles observados frente a calculados. Acuífero de Talcahuano .....	262
Figura 111. Niveles calculados. Acuífero de Talcahuano .....	264
Figura 112. Distribución de captaciones con derechos otorgados.....	267
Figura 113. Evolución del nivel en las captaciones con derechos otorgados, suponiendo una extracción del 5,5 veces el caudal otorgado. ....	268
Figura 114. Distribución de captaciones con derechos otorgados y suposición de nueva zona para suministro industrial .....	269
Figura 115. Evolución del nivel según escenario simulado .....	270
Figura 116. Distribución de captaciones con derechos otorgados y suposición de nueva zona para suministro urbano.....	271
Figura 117. Evolución del nivel según escenario simulado .....	272
Figura 118. Propuesta de red de monitoreo en el acuífero Nilahue .....	275
Figura 119. Propuesta de red de monitoreo en el acuífero Talcahuano....	277

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes VI Región .....	33
Tabla 2. Antecedentes VIII Región .....	35
Tabla 3. Parámetros de Calibración del MPL .....	45
Tabla 4. Propiedades geomorfológicas de las cuencas de Estudio .....	51
Tabla 5. Información General Estaciones Meteorológicas VI Región .....	51
Tabla 6. Datos faltantes de Estaciones Meteorológicas VI Región .....	53
Tabla 7. Estación meteorológica Pichilemu. Precipitaciones totales mensuales (mm) .....	53
Tabla 8. Estación meteorológica Ranguli. Precipitaciones totales mensuales (mm) .....	54
Tabla 9. Estación meteorológica Nilahue Barahona. Precipitación total mensual (mm) .....	55
Tabla 10. Estación fluviométrica Estero Nilahue en Santa Teresa .....	56
Tabla 11. Caudales medios mensuales. Estación fluviométrica Estero Nilahue en Santa Teresa (m <sup>3</sup> /s) .....	57
Tabla 12. Producciones promedio Cuencas Costeras entre Rapel y Nilahue (m <sup>3</sup> /s) .....	59
Tabla 13. Propiedades geomorfológicas de las cuencas de Estudio: VIII Región.....	63
Tabla 14. Información General Estaciones Meteorológicas: Costeras VIII Región.....	65
Tabla 15. Distancias entre estaciones meteorológicas y centro de gravedad de cuencas en zona de estudio .....	67
Tabla 16. Estación fluviométrica en la zona de estudio: Costeras VIII Región .....	67
Tabla 17. Caudales medios mensuales estación Andalién en Penco.....	68
Tabla 18. Producciones promedio Cuencas Costeras VIII Región (m <sup>3</sup> /s) ....	71
Tabla 19. Calidad química. Catastro terreno Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue.....	77
Tabla 20. Resultados de aforos y parámetros de calidad de Octubre.....	81
Tabla 21. Resultados de los aforos realizados en Septiembre.....	81
Tabla 22. Calidad química. Catastro terreno Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío .....	86
Tabla 23. Resultados de los puntos aforados en el río Andalién y en el Estero Nonguén.....	90
Tabla 24. Información sobre los SEVs realizados. Cuenca entre Rapel y Nilahue.....	96
Tabla 25. Información sobre los SEVs realizados. Cuenca entre Itata y Bío-Bío.....	99
Tabla 26. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VIII Región .....	111

Tabla 27. Columnas de sondeos recopiladas durante la campaña de terreno. Cuenca costera entre Rapel y Nilahue.....	126
Tabla 28. Pozo n°507 .....	130
Tabla 29. Pozo n°508 .....	130
Tabla 30. Pozo n°1646 .....	130
Tabla 31. Parámetros elásticos. Lolol (acuífero Nilahue).....	141
Tabla 32. Parámetros elásticos. Cuenca Nilahue .....	141
Tabla 33. Parámetros elásticos por sectores. Acuífero Nilahue .....	141
Tabla 34. Parámetros elásticos. Acuífero Nilahue .....	142
Tabla 35. Estimación del umbral de escorrentía .....	145
Tabla 36. Grupos de suelo .....	146
Tabla 37. Umbral de escorrentía por subcuenca.....	151
Tabla 38. Características de los principales suelos en la zona de estudio. 152	
Tabla 39. Recarga por infiltración directa en acuífero y subcuencas de la Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue .....	152
Tabla 40. Entradas al sistema acuífero de Nilahue.....	154
Tabla 41. Entradas a otras cuencas.....	155
Tabla 42. Salidas subterráneas.....	156
Tabla 43. Balance hídrico de Nilahue .....	157
Tabla 44. Balance hídrico cuencas vertientes al mar.....	158
Tabla 45. Calidad química. Catastro terreno Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue.....	158
Tabla 46. Muestras de agua tomadas para análisis en laboratorio .....	160
Tabla 47. Parámetros elásticos. Cuenca entre Itata y Bío-Bío .....	167
Tabla 48. Umbral de escorrentía por subcuenca.....	172
Tabla 49. Características de los suelos en la zona de estudio.....	173
Tabla 50. Recarga por infiltración directa en acuífero y subcuencas aportantes .....	173
Tabla 51. Recarga por infiltración directa en acuífero y laterales .....	174
Tabla 52. Entradas a otras cuencas.....	175
Tabla 53. Salidas subterráneas.....	175
Tabla 54. Balance hídrico de Talcahuano según modelo realizado.....	176
Tabla 55. Balance hídrico cuencas vertientes al mar.....	176
Tabla 56. Captaciones en cuenca 080.....	182
Tabla 57. Caudal específico promedio.....	184
Tabla 58. Cálculo de recarga para cuencas costeras. Fuente: Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región .....	184
Tabla 59. Balance hídrico cuenca 080.....	184
Tabla 60. Captaciones en cuenca 084.....	190
Tabla 61. Caudal específico promedio.....	192
Tabla 62. Balance hídrico cuenca 084.....	192
Tabla 63. Captaciones cuenca 085 .....	197
Tabla 64. Balance cuenca 085 .....	199

---

Tabla 65.Caudal específico promedio .....	206
Tabla 66.Balance hídrico Cuenca 086 .....	206
Tabla 67. Caudal específico promedio .....	214
Tabla 68. Balance hídrico Cuenca 087 .....	214
Tabla 69. Caudal de extracción total a Agosto de 2008 y Nº de pozos. ...	219
Tabla 70. Caudal específico promedio .....	222
Tabla 71.Características Hidrogeológicas Depósitos no Consolidados Unidad A .....	222
Tabla 72.Balance hídrico. Cuenca 088 .....	223
Tabla 73.Características Hidrogeológicas Depósitos no Consolidados Unidad A .....	225
Tabla 74.Estimación del uso del agua en la cuenca 089 .....	227
Tabla 75.Balance hídrico en la cuenca 089 .....	230
Tabla 76. Balance hídrico modelizado. Acuífero Nilahue .....	245
Tabla 77. Balance hídrico en régimen natural. Acuífero Nilahue .....	251
Tabla 78. Gráfico de balance hídrico en régimen natural. Acuífero Nilahue .....	251
Tabla 79. Niveles en pozos catastrados atendiendo a explotación cuantificada .....	252
Tabla 80. Balance hídrico modelizado. Acuífero Talcahuano .....	264



## **0. RESUMEN**

El presente estudio, desarrollado por Aqualogy Medioambiente Chile S.A., consistió en un levantamiento hidrogeológico que permitió la conceptualización de nueve acuíferos ubicados en cuencas costeras de la VI y VIII Regiones y la posterior modelación matemática de dos de ellos.

El estudio abarcó la definición geométrica de los acuíferos, 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 elaboraron modelos conceptuales para las 9 cuencas costeras consideradas, y modelos numéricos de los acuíferos de Nilahue y Talcahuano en régimen estacionario, que incorporaron las actividades y resultados obtenidos en todo el estudio.

En términos de resultados, para los acuíferos más importantes se tienen las siguientes conclusiones:

### Acuífero Nilahue (VI Región):

- El acuífero de Nilahue, de acuerdo con los derechos constituidos, se considera sobreexplotado ya que la recarga evaluada en el sistema es inferior al caudal otorgado. No obstante, la explotación actual que se hace del mismo le permite estar en equilibrio, aunque con una afección al sistema superficial.
- Según los escenarios simulados en este acuífero los derechos constituidos debieran ser un 50% menores en caudal para que no se produzcan descensos generalizados en el acuífero para un periodo de 50 años.
- Se recomienda revisar el criterio de afección al sistema superficial en el acuífero Nilahue, ya que este resulta muy limitante respecto a los recursos disponibles del acuífero, pudiendo emplearse un límite distinto al 10% del caudal medio anual con 85% de probabilidad de excedencia.

### Acuífero de Talcahuano (VIII Región):

- Respecto al acuífero de Talcahuano, se concluye que aun explotando la totalidad de los derechos constituidos, se tiene un comportamiento similar al de régimen natural, incluso, los caudales de explotación podrían incrementarse en un 550% respecto del total actual, además de poder crear nuevas zonas de explotación de pequeña entidad.
- Asimismo, el acuífero de Talcahuano es de menor entidad que el de Nilahue, además de presentar riesgo de intrusión salina en caso de querer incrementar la demanda en la zona. Motivo por el cual se recomienda realizar un seguimiento de esta variable de forma más o menos continuada.
- Cabe destacar que los escenarios simulados en régimen transiente deben considerarse referenciales puesto que los modelos han sido calibrados en régimen estacionario, lo que hace perder robustez a dicha calibración.
- Se recomienda obtener un registro continuo de los niveles en los acuíferos (medidas mensuales o cada dos meses) en distintos puntos de los acuíferos, para lo cual se ha propuesto una red de medición en cada uno de ellos, además de una cuantificación de las explotaciones a nivel mensual para su posterior calibración en régimen transiente.
- 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 constituir derechos de aprovechamientos seguros y por caudales ciertos y razonables de explotar, además de formular recomendaciones para el aprovechamiento de los recursos hídricos, por lo que se ha abocado al estudio continuo de las fuentes de agua a fin de que sean aprovechadas de manera sustentable.

Por otra parte, como en el norte del país la mayor disponibilidad de agua corresponde a las aguas subterráneas, los estudios de este recurso se centran principalmente en la hidrogeología. Hacia el centro y el sur de nuestro país, en tanto, los estudios sobre recursos hídricos se basan en la hidrología de las aguas superficiales.

Dada esta situación de que no existe una sobrepresión o sobredemanda por recursos hídricos subterráneos en estas zonas, 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 balances generales, confrontando la demanda por este concepto con la recarga estimada. Es decir, las solicitudes de agua subterránea se han resuelto con aproximaciones teóricas de la recarga del acuífero.

Adicionalmente, se tiene que en las cuencas costeras tanto los recursos hídricos superficiales como subterráneos tienen una alta dependencia, en cuanto a su ocurrencia y magnitud, de los períodos de lluvia, dado que por su geomorfología estas cuencas no tienen alturas orográficas que permitan la acumulación de nieve.

Por ello las actividades productivas y de subsistencia de las comunidades son altamente vulnerables a los períodos de sequía, además de generar desarrollos más bien básicos debido a la poca disponibilidad de agua en los períodos de primavera y verano. Adicionalmente, el aumento de la demanda ha ido agotando los derechos superficiales, tornándose cada vez más importante el uso de agua subterránea, que, entre otras cosas, ofrece mayor seguridad en el uso y abastecimiento de agua.

Por lo anterior, la Dirección General de Aguas considera necesario el estudio de los acuíferos costeros, desde el punto de vista de los volúmenes almacenados y disponibles, así como de su funcionamiento hidráulico, a fin de tener un mayor conocimiento de la hidrogeología de las cuencas costeras, para conocer la disponibilidad real de los acuíferos que en ella existen, lo que le permitirá a dicho organismo avanzar en la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas subterránea de manera sustentable.

### **1.1. OBJETIVOS Y ALCANCE**

Como objetivo general se plantea desarrollar un levantamiento hidrogeológico y, a partir de ello, la conceptualización de acuíferos ubicados en cuencas costeras y la consiguiente modelación matemática de dos de ellos. Las cuencas consideradas son:

- Costeras entre el río Rapel y estero Nilahue
- Costeras entre límite norte de la VIII Región y el río Itata
- Costeras entre el río Itata y el río Bío Bío
- Costeras entre el río Bío Bío y el Carampangue
- Cuenca del río Carampangue
- Cuencas costeras entre el río Carampangue y el río Lebu
- Cuenca del río Lebu
- Costeras entre el río Lebu y el río Paicaví
- Costeras entre el río Paicaví y el límite de la VIII Región

La modelación matemática se considera para los acuíferos de las siguientes cuencas:

- Acuífero de Nilahue de la cuenca delimitada por el río Rapel por el norte, y el río Nilahue por el sur, en la VI Región.
- Acuífero de Talcahuano en la cuenca entre el río Itata y el río Bío Bío, en la VIII Región.

Para estas dos cuencas seleccionadas, los objetivos específicos son los siguientes:

- Generación de la geometría de los acuíferos

- Sectorización de acuíferos que representen fuentes o unidades de aprovechamiento común.
- Catastrar y estimar de la demanda agrícola, sanitaria e industrial.
- Estudio de prospección geofísica para determinar la geometría del acuífero.
- Campaña de terreno para identificar y/o verificar las principales zonas de recarga y descarga.
- Estimación del volumen almacenado y de los flujos subterráneos.
- Estimación de recargas de precipitación, ríos y recargas agrícolas al sistema acuífero.
- Desarrollo de una herramienta SIG acorde las necesidades de visualización regional y local.
- Formulación de modelos conceptuales que representen el funcionamiento del acuífero.
- Implementación y calibración de modelos numéricos de aguas subterráneas en régimen permanente, desarrollado en Premiun Visual Modflow.
- Proposición de una red de monitoreo de niveles y de calidad de aguas subterráneas en el acuífero.

Para las siete cuencas restantes, los objetivos son:

- Caracterización de las formaciones acuíferas principales.
- Sectorización de acuíferos que representen fuentes o unidades de aprovechamiento común.
- Estimación de la demanda agrícola, sanitaria, minera e industrial a partir de información de catastros anteriores, estudios, etc.
- Determinación, si es posible con la información disponible, de los volúmenes almacenados en los acuíferos y sus respectivos flujos subterráneos.
- Definición y caracterización de las unidades acuíferas principales.
- Representación y estimación de los flujos de agua subterránea.
- Identificación de las zonas de recarga y descarga.
- Obtención de los parámetros hidrogeológicos del acuífero.
- Determinación de la serie de recarga del acuífero a partir de la modelación integrada, superficial y subterránea, de la cuenca.
- Representación territorial de los resultados del estudio en un SIG.
- Desarrollo de un modelo conceptual del acuífero.

## **1.2. ESTRUCTURA DEL INFORME FINAL**

Este informe final incluye en una primera parte una descripción breve y general de los acuíferos principales en cada una de las nueve cuencas, en cuanto a sus características de almacenamiento y emplazamiento, de manera de dar una idea descriptiva del tipo y condiciones hidrogeológicas de ellos. Posteriormente se les caracteriza hidrogeológicamente, se definen los modelos conceptuales y se formula y desarrolla el modelo matemático para los acuíferos de Nilahue y Talcahuano.

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, prospección geofísica y visita a terreno (Etapa 1) y la caracterización hidrogeológica y modelo conceptual de los acuíferos (Etapa 2), además de la Etapa 3 que concluye con modelos numéricos de los acuíferos de Nilahue y Talcahuano, la definición de tres escenarios bajo los cuales correr ambos modelos y la proposición de una red de monitoreo de niveles y calidad de aguas subterráneas en los acuíferos.

## **2. LOS ACUÍFEROS PRINCIPALES DE LAS NUEVE CUENCAS COSTERAS**

En la Cuenca Costera entre río Rapel y Estero Nilahue (Código DGA 061), en la VI Región, el único acuífero de interés hidrogeológico es el de Nilahue, de tipo detrítico y comportamiento confinado, asociado al estero Nilahue y sometido a cierta explotación para uso agrícola.

En la Cuenca Costera entre Límite Regional Norte de la VIII región y río Itata (Código DGA 080) se distribuye el conjunto de una unidad detrítica a modo de franja costera estrecha, con afloramientos que llegan a estar desconectados unos de otros a lo largo de dicha franja. Su anchura máxima llega a tener 1,9 km. Teniendo en cuenta las características litológicas, el acuífero detrítico puede comportarse como un acuífero monocapa y libre.

En la Cuenca Costera entre Río Itata y Río Biobío (Código DGA 082) el único acuífero de interés hidrogeológico es el de Talcahuano, también detrítico con comportamiento libre, muy ligado a las descargas subterráneas hacia el mar y con relación entre el río Andalién y el río Biobío, con régimen prácticamente natural sin afección por bombeos.

En la Cuenca Costera entre Río Biobío y Carampangue (Código DGA (084) cabe diferenciar dos acuíferos detríticos; al norte los afloramientos aislados de niveles del cuaternario y paleoceno que quedan limitados al oeste por materiales paleozoicos, y, al sur, afloramientos del cuaternario que se extienden hacia la cuenca del río Carampangue. La geometría de ambas unidades corresponde a capas subhorizontales que se acuñan al este sobre los materiales paleozoicos. Este acuífero detrítico puede comportarse como un acuífero monocapa y libre aun cuando en la unidad ubicada al norte los materiales paleocenos pueden disponerse inferiores al cuaternario formando un acuífero multicapa.

En la Cuenca Costera Río Carampangue (Código DGA 085) se diferencia un acuífero detrítico al norte de la misma, con una geometría que corresponde a capas subhorizontales que se acuñan al sur sobre los materiales paleozoicos. De acuerdo con sus características litológicas, el acuífero detrítico puede comportarse como un acuífero monocapa y libre.

En la Cuenca Costera Carampangue-Lebu (Código DGA 086) existe la misma unidad detrítica descrita anteriormente que se distribuye en afloramientos limitados por fallas de direcciones NEE-SSW. No existe un límite propio como acuífero para esta unidad dentro de la cuenca, ya que existe conexión hidráulica con las formaciones adyacentes de la cuenca del río Lebu y río Campangue. Teniendo en cuenta las características litológicas descritas, el acuífero puede comportarse como un acuífero multicapa y libre, aun cuando pueden aparecer tramos semi-confinados y confinados.

En la Cuenca Costera Río Lebu (Código DGA 087) existe la misma unidad detrítica descrita anteriormente que se distribuye en una franja costera entre los límites norte y sur de la cuenca, limitando al este con las formaciones de filitas, pizarras y metaareniscas del Silúrico-Carbonífero y un afloramiento reducido del cretácico. No existe un límite propio como acuífero para esta unidad dentro de la cuenca, ya que se extiende tanto al norte como al sur a cuencas adyacentes. Este acuífero puede comportarse como un acuífero multicapa y libre, aún cuando pueden aparecer tramos semi-confinados y confinados.

En la Cuenca Costera Lebu-Paicaví (Código DGA 088) existe la misma unidad detrítica ya descrita que se distribuye en una franja costera entre los límites norte y sur de la cuenca, limitando al este con las formaciones de filitas, pizarras y metaareniscas del Silúrico-Carbonífero. No existe un límite propio como acuífero para esta Unidad permeable dentro de la cuenca, ya que se extiende tanto al norte como al sur a cuencas adyacentes. De acuerdo con sus características litológicas, puede comportarse como un acuífero multicapa y libre, aún cuando pueden aparecer tramos semi-confinados y confinados.

En la Cuenca Costera entre Río Paicaví y Límite Regional Sur (Código DGA 089) el acuífero se dispone a lo largo de la franja litoral de norte a sur. Al oeste conecta con la línea de costa y al este limita con la formación paleozoica que actúa de base impermeable. Respecto a sus límites norte y sur éstos se consideran abiertos pues la formación se prolonga a cuencas adyacentes. Este acuífero puede comportarse como un acuífero multicapa y libre, pudiendo aparecer tramos semi-confinados y confinados.

### **3. EL ESTUDIO REALIZADO**

El estudio realizado comprende la definición geométrica de los acuíferos, 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.

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 los acuíferos modelizados.

Como producto final se han elaborado modelos conceptuales para las 9 cuencas costeras consideradas y dos modelos numéricos de los acuíferos de Nilahue y Talcahuano en régimen estacionario, que incorpora las actividades y resultados obtenidos en todo el estudio.

No obstante, para una mejor explotación de los modelos y una mayor fiabilidad de los escenarios futuros a modelizar, se recomienda su calibración en régimen transiente.



#### **4. ÁREA DE ESTUDIO**

El Estudio comprende nueve cuencas pluviales costeras, una de ellas en la VI Región y ocho cuencas pluviales en la VIII Región.

##### **VI Región:**

- Costeras entre el río Rapel y estero Nilahue

##### **VIII Región**

- Costeras entre límite norte de la VIII Región y el río Itata
- Costeras entre el río Itata y el río Bío Bío
- Costeras entre el río Bío Bío y el Carampangue
- Cuenca del río Carampangue
- Cuencas costeras entre el río Carampangue y el río Lebu
- Cuenca del río Lebu
- Costeras entre el río Lebu y el río Paicaví
- Costeras entre el río Paicaví y el límite de la VIII Región

En la Figura 1 se detalla la ubicación de la cuenca costera entre río Rapel y estero Nilahue (VI Región) dividida en 5 subcuencas. También se incluye la ubicación del acuífero de Nilahue.

En la Figura 2 se muestra la situación geográfica de las cuencas costeras de la VIII Región y el acuífero de Talcahuano.

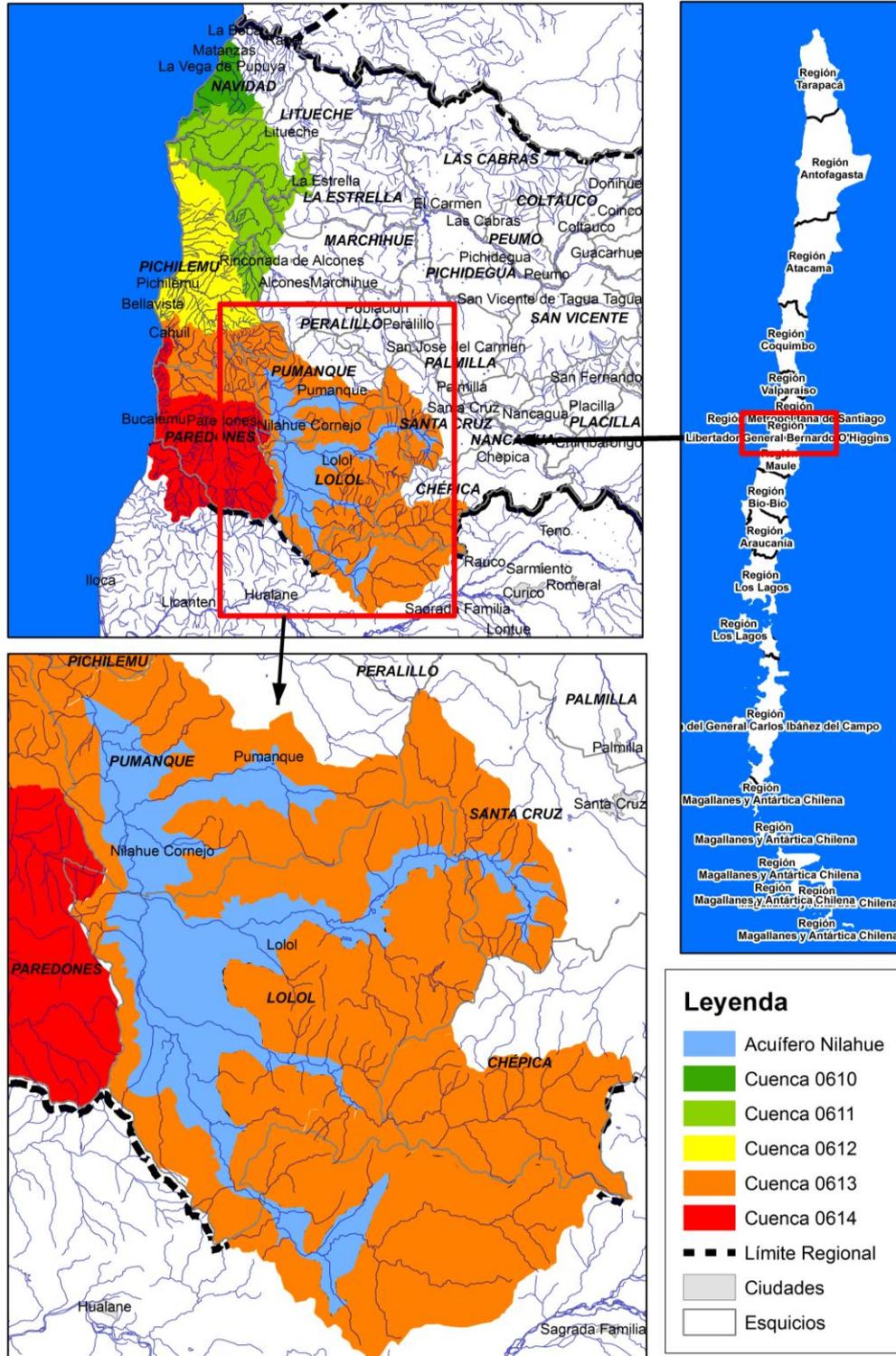


Figura 1. Cuenca Costera Rapel-Estero Nilahue (VI Región) y acuífero de Nilahue

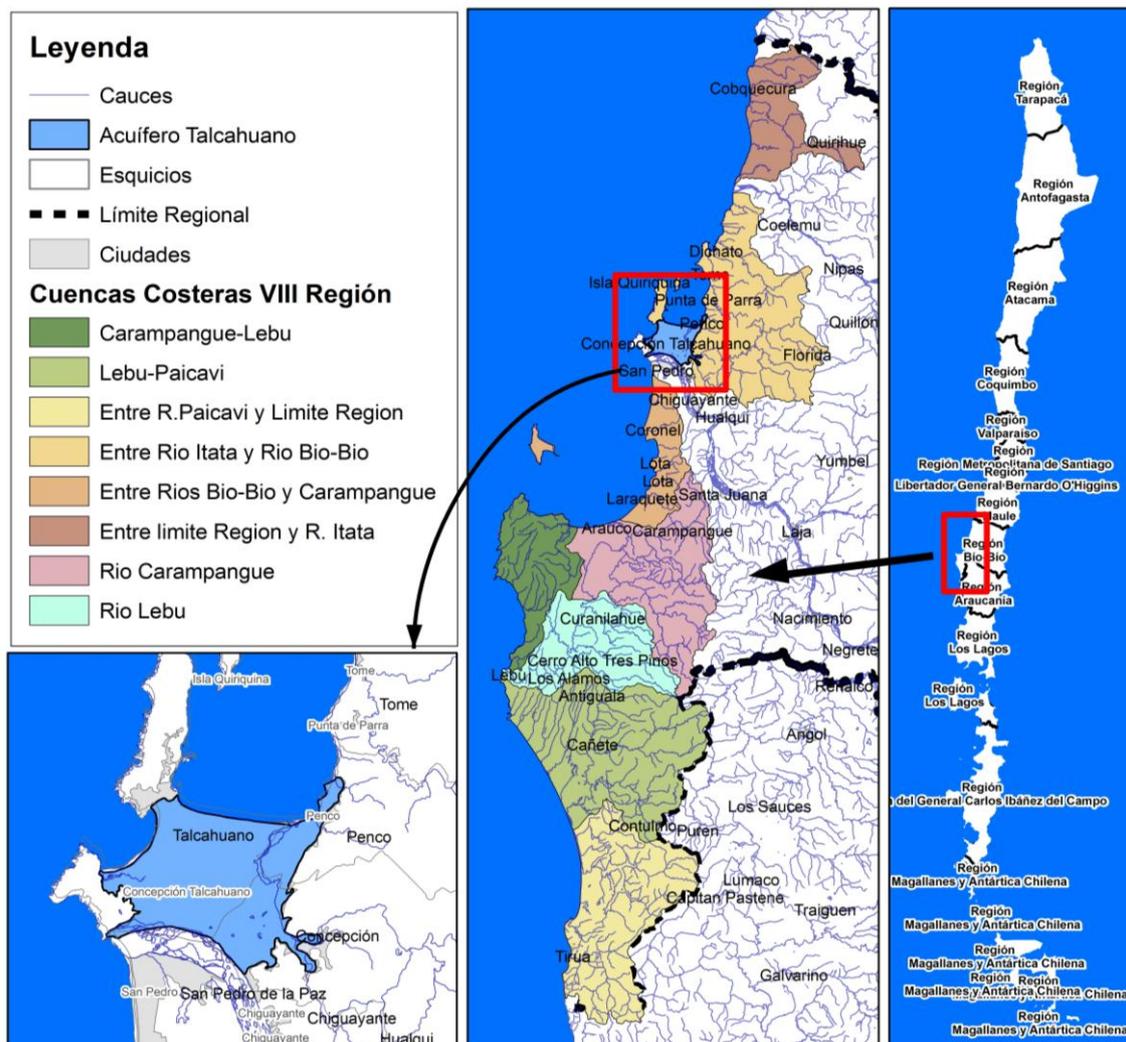


Figura 2. Cuencas Costeras VIII Región y acuífero de Talcahuano

#### 4.1. CUENCA COSTERA RAPEL-ESTERO NILAHUE (VI REGIÓN)

La cuenca costera de origen pluvial denominada Cuenca Costera Rapel-Estero Nilahue (Código DGA 061) en la VI Región, se encuentra entre la franja del litoral costero y el borde oriental de la Cordillera de la Costa (ver Figura 3). Ésta se divide en cinco subcuencas que han sido denominadas de norte a sur como sigue (de acuerdo con la clasificación DGA):

- Cuenca Costera entre Río Rapel y Estero Topocalma (Código DGA: 610)
- Cuenca Costera Estero Topocalma (Código DGA: 611)
- Cuenca Costera entre Estero Topocalma y Estero Nilahue (Código DGA: 0612)
- Cuenca Costera Estero Nilahue (Código DGA: 0613)

- Cuenca Costera entre Estero Nilahue y límite regional (Código DGA: 0614).

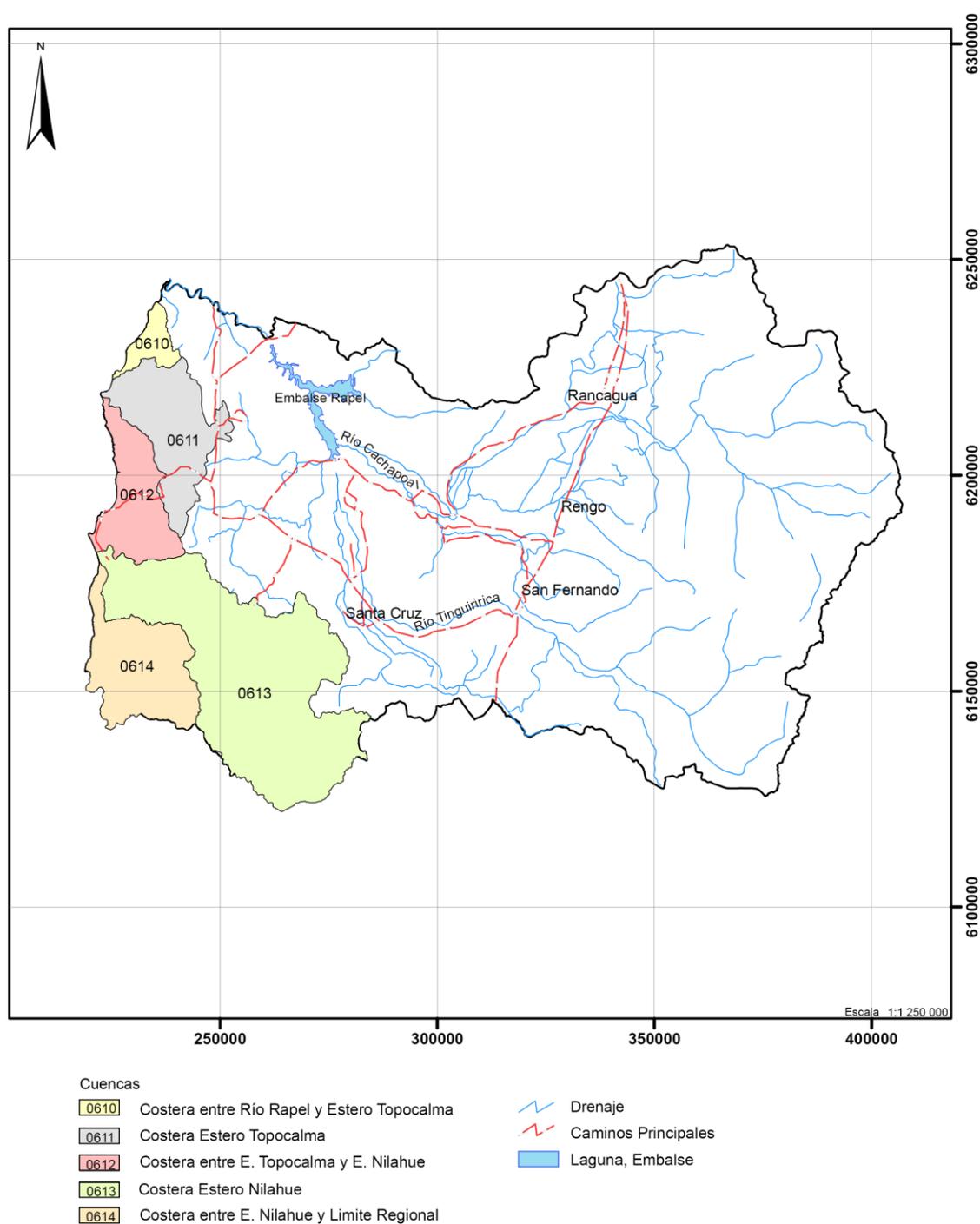


Figura 3. Cuenca Costera Rapel-Estero Nilahue (VI Región)

## **4.2. CUENCAS PLUVIALES COSTERAS DE LA VIII REGIÓN**

Las cuencas costeras de origen pluvial en la VIII Región se encuentran entre la franja del litoral costero y el borde oriental de la Cordillera de la Costa. Estas cuencas son ocho y han sido denominadas de norte a sur como sigue:

- Cuenca Costera entre Límite Regional Norte y Río Itata (Código DGA 080)
- Cuenca Costera entre Río Itata y Río Biobío (Código DGA 082)
- Cuenca Costera entre Río Biobío y Carampangue (Código DGA 084)
- Cuenca Costera Río Carampangue (Código DGA 085)
- Cuenca Costera Carampangue-Lebu (Código DGA 086)
- Cuenca Costera Río Lebu (Código DGA 087)
- Cuenca Costera Lebu-Paicaví (Código DGA 088)
- Cuenca Costera entre Río Paicaví y Límite Regional Sur (Código DGA 089).

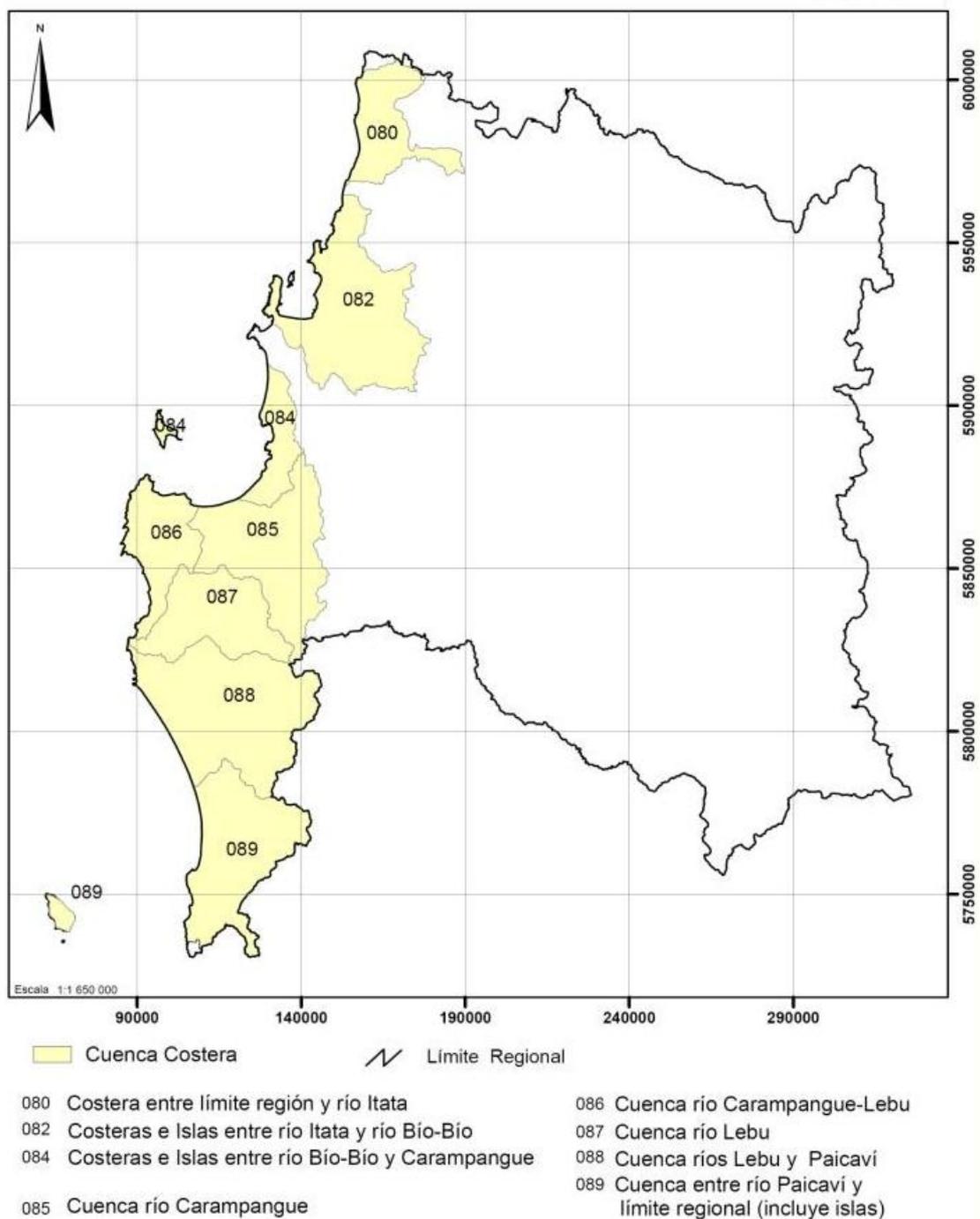


Figura 4. Cuencas Costeras VIII Región

## 5. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Para la realización de este trabajo se han revisado diversos estudios, los que contienen antecedentes con respecto a la geología, geofísica, hidrología, meteorología, hidrogeología e hidrogeoquímica del sector.

A continuación se describen los antecedentes recopilados y el tratamiento de datos que se ha dado a esta información para realizar el presente estudio.

### 5.1. ANTECEDENTES VI REGIÓN

Tabla 1. Antecedentes VI Región

Nº	Estudio	Organismo	Año	Contenido
1	Derechos otorgados de aguas superficiales y subterráneas. DGA (2013).	DGA	2013	Se cuenta con una base de datos tomada del Banco Nacional de Información de la Dirección General de Aguas, de los derechos otorgados de aguas subterráneas (art. 4º y 6º) y de aguas superficiales, para el período 1990-2013.
2	Información hidrológica, referida a caudales, aforos puntuales, precipitaciones, niveles freáticos, etc.	DGA	2013	Información hidrológica en toda la región, de tal forma de identificar la red de comportamiento homogénea, y además, caracterizar la condición de borde de entrada oriente a los acuíferos que se estudian
3	Estudio Hidrológico e Hidrogeológico en Cuencas Costeras de la VI Región	Ingeorec para Essbio	2010	Evalúa la hidrología e hidrogeología de las cuencas costeras de la VI Región, efectuando un balance entre oferta y demanda en cada sistema definido. Aporta en antecedentes geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos
4	Evaluación de los Recursos Hídricos subterráneos del Acuífero Nilahue	Informe Técnico S.D.T N°246 (DGA, 2007)	2007	El estudio busca determinar de forma aproximada la recarga del acuífero del estero Nilahue y compararla con la demanda de recursos subterráneos vigente a Diciembre de 2005
5	Diagnóstico de Recursos Hídricos en Secano Interior y Costero VI a VIII Región	AC Ingenieros Consultores para CNR	2003	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 espacio y la propuesta de obras para su mejor aprovechamiento

Tabla 1. Antecedentes VI Región

Nº	Estudio	Organismo	Año	Contenido
6	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la VI Región	Informe Técnico S.D.T Nº 160 (DGA, 2003)	2003	Determina valores medios del caudal de extracción sustentable de aguas subterráneas por sectores acuíferos en toda la VI Región, los que fueron contrastados con la explotación previsible en los acuíferos. Las formaciones acuíferas fueron descritas en base a las cuencas hidrológicas más importantes de las zonas estudiadas, quedando algunos sectores sin información
7	Estudio Hidrogeológico en Ciudades y Pueblos de la VI Región	GCF Ingenieros Consultores	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 VI Región. Para este trabajo se consideró el estudio realizado para el pueblo de Lolol
	Nuevas Fuentes para el Sistema de Agua Potable de Pichilemu	GCF Ingenieros Consultores	2000	Debido a los problemas de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Pichilemu en los periodos de mayor demanda, es decir, durante el verano, el estudio describe y propone alternativas de fuentes para dar solución a la problemática. El estudio propone como primera alternativa la construcción de pozos profundos en el sector de Nilahue-Barahona, el que cuenta características hidrogeológicas suficientes para garantizar el abastecimiento. La otra alternativa propuesta consiste en la de utilizar los recursos superficiales (Embalse San Marcos).

Tabla 1. Antecedentes VI Región

Nº	Estudio	Organismo	Año	Contenido
8	Diagnóstico del Potencial Hídrico de Acuíferos Costeros, provincia de Cardenal Caro, VI VI Región	SITAC para DGA	1998	Disponer del conocimiento necesario de algunos sistemas de acuíferos costeros y determinar en ellos el potencial hídrico susceptible de explotar en forma sostenible en el tiempo. Los sectores considerados para este estudio son la Hoya del río Rapel, Hoya del estero Topocalma y Hoya del estero Nilahue. El estudio entrega una caracterización hidrogeológica, hidrológica, análisis químico, derechos de agua, catastro de pozos de cada sistema subterráneo de las cuencas consideradas y la implementación de un modelo de simulación de cada sistema subterráneo
9	Carta Hidrogeológica de la Hoja Rancagua	Sernageomin	1990	Escala 1.250.000 con las principales unidades hidrogeológicas. Catastro de pozos de los últimos 60 años, con datos de niveles de agua, profundidad de pozos, uso del pozo, química del agua, entre otros. Este catastro incluye un total de 420 pozos

## 5.2. ANTECEDENTES VIII REGIÓN

Tabla 2. Antecedentes VIII Región

Nº	Estudio	Organismo	Año	Contenido
1	Derechos otorgados de aguas superficiales y subterráneas. DGA (2013).	DGA	2013	Se cuenta con una base de datos tomada del Banco Nacional de Información de la Dirección General de Aguas, de los derechos otorgados de aguas subterráneas (art. 4º y 6º) y de aguas superficiales, para el período 1990-2013.
2	Información hidrológica, referida a caudales, aforos puntuales, precipitaciones, niveles	DGA	2013	Información hidrológica en toda la región, de tal forma de identificar la red de comportamiento homogénea, y además, caracterizar la condición de borde

Tabla 2. Antecedentes VIII Región

Nº	Estudio	Organismo	Año	Contenido
	freáticos, etc.			de entrada oriente a los acuíferos que se estudian
3	Estudio hidrológico cuencas Bío Bío e Itata, Balance hidrológico nacional: cuenca del río 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 particular, se efectuó una amplia campaña de geofísica (perfiles gravimétricos)
4	Estudio de disponibilidad de agua cuenca río Itata: sector intermedio y bajo	DGA VIII R	1994	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
5	Diagnóstico de Recursos Hídricos en Secano Interior y Costero VI a VIII Región	AC Ingenieros Consultores para CNR	2003	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 espacio y la propuesta de obras para su mejor aprovechamiento
6	Geología de la Hoja Arauco-Lebu-Chillán	Sernageomin	1981	Descripción de las unidades geológica presentes entre los 37° y 38°30' latitud sur y al oeste de los 73°15', correspondiente a la hoja Arauco-Lebu y la parte norte de la Hoja Puerto Saavedra a escala 1:250.000.
7	Estudio Hidrogeológico Escuadrón-Coronel	AC Ingenieros Consultores para CNR	1992	Antecedentes acerca de la hidrogeología del sector y define formaciones acuíferas. Realiza un muestreo químico de captaciones y realiza un análisis del efecto de intrusión salina
8	Estudio Hidrogeológico Regional área San Carlos-Concepción	Memoria de Título De Buen	1993	Memoria de título del autor, en este trabajo se describe la hidrogeología del sector San Carlos-Concepción. Entrega información acerca de la geología del área, hidrogeología y describe una serie de columnas estratigráficas

Tabla 2. Antecedentes VIII Región

Nº	Estudio	Organismo	Año	Contenido
9	Estudios Hidrológicos de las Fuentes de Agua en Diversas Comunas de la VIII Región	GFC Ingenieros Consultores para Essbio	2001	Entrega 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
10	Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos de la Región del Biobío	Sernageomin	2004	Resultados y criterios metodológicos desarrollados en la elaboración del Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos a escala 1:250.000
11	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 realiza un análisis de los principales afluentes al río Itata, en los que evalúa la química de esta agua
12	Estudio Hidrológico e Hidrogeológico	Conic-BF Ingenieros Civiles Consultores para Essbio	2005	Información acerca de la hidrología e hidrogeología de los sistemas Arauco-Ramadillas-Carapangue, Chillán, Coronel, Los Alamos-Cerro Alto-Tres Pinos, Lota y Tomé. El objetivo del trabajo es definir caudales seguros, permanentes y continuos factibles de extraer desde las fuentes críticas en los sistemas mencionados
13	Estudio Geológico e Hidrogeológico de la VIII Región	Ingeorec para DGA	2008	Determinar 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.



## 6. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

### 6.1. MODELO DE GENERACIÓN DE CAUDALES

Se utilizará un modelo de generación sintética de caudales mediante la herramienta MPL, que corresponde a un modelo hidrológico de generación que simula el ciclo de escorrentía de una cuenca pluvial aplicando la ecuación de continuidad sobre un elemento de área y/o volumen de control en la cuenca.

Este modelo, que se ilustra en la Figura 5, considera que existen dos elementos de embalse de agua:

- Un volumen de almacenamiento cercano a la superficie del suelo, cuya magnitud representa la capacidad media de retención de agua en la cuenca y desde el cual se extrae agua para satisfacer la demanda evapotranspirativa.
- Un volumen subterráneo que retiene el agua que percola y que, al vaciarse en forma lenta, contribuye al escurrimiento subsuperficial y subterráneo. Este almacenamiento es el que produce la escorrentía en los períodos de estiaje.

El modelo usa la ecuación de continuidad aplicada sobre un área unitaria en la zona no saturada del suelo:

$$I - O = \frac{dH}{dt} \quad (3)$$

donde:

I: flujo de entrada al volumen de control e igual a la tasa de infiltración desde la superficie

O: flujo de salida al volumen de control e igual a la evapotranspiración más la percolación profunda.

dH/dt: variación en el tiempo de la lámina de agua H almacenada en forma de humedad del suelo.

La lámina de agua almacenada en el suelo en un instante dado, se puede expresar como:

$$H = s \cdot n \cdot D \quad (4)$$

donde:

D: profundidad total del suelo

n : porosidad del suelo; cociente entre el volumen de poros  $V_p$  y el volumen total  $V_t$ .

s : grado de saturación del suelo; cociente entre el volumen de líquido  $V_l$  y el volumen de poros  $V_p$ .

En igual forma la humedad almacenada en el suelo se puede expresar como:

$$H = s \cdot H_{\max} \quad (5)$$

donde:

$H_{\max}$  : Lámina de agua correspondiente al estado de saturación y es uno de los parámetros del modelo.

De este modo, la relación (3) puede expresarse sin dimensiones de la forma:

$$\frac{1}{H_{\max}}(I - O) = \frac{ds}{dt} \quad (6)$$

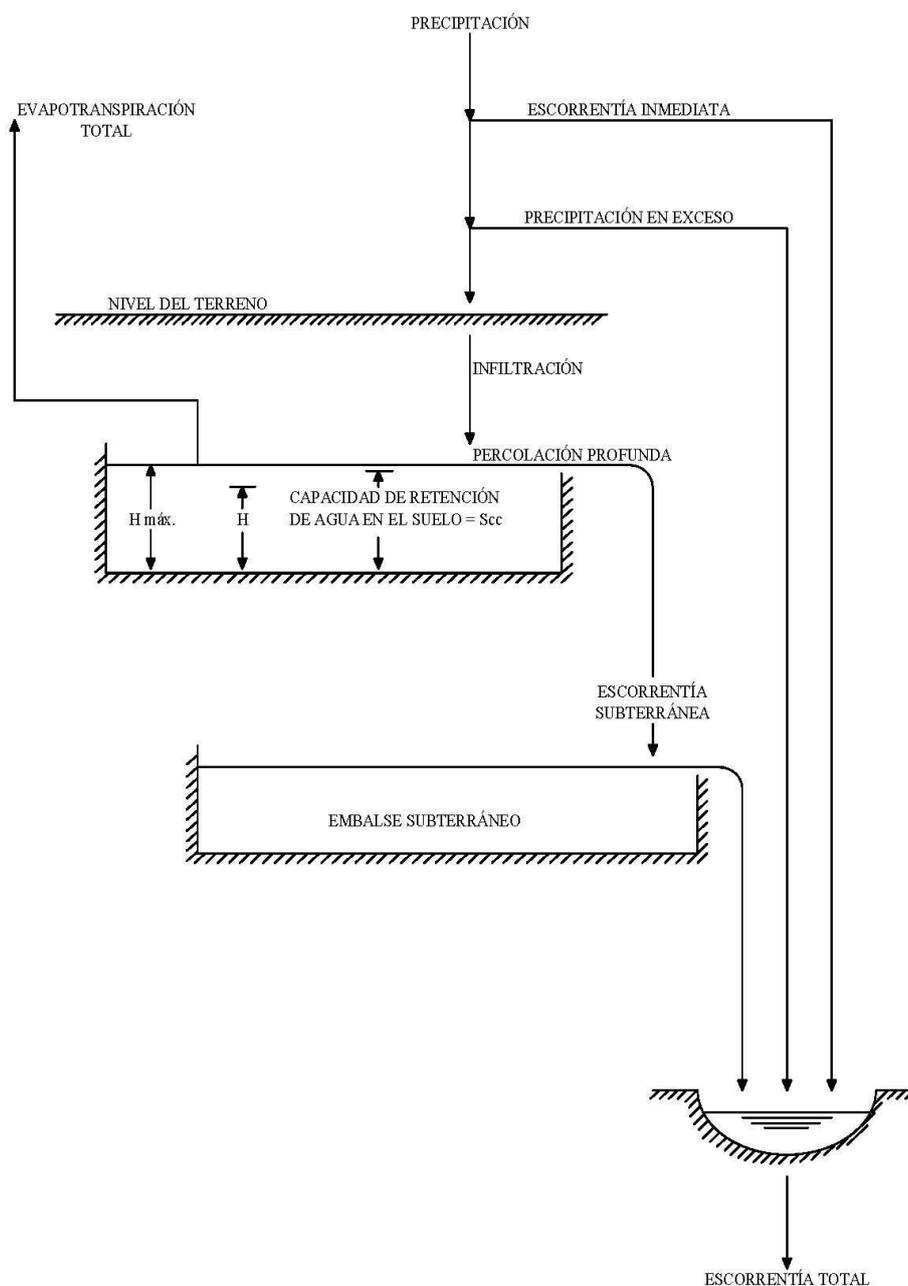


Figura 5. Esquema Conceptual del MPL

A continuación se describe la forma en que se estiman las distintas componentes que integran el proceso modelado:

### 6.1.1. ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN

La tasa de infiltración  $I$  queda dada por la expresión:

$$I = \begin{cases} T_p & T_p < f \\ f & T_p > f \end{cases} \quad (7)$$

$f$  : Capacidad de infiltración del suelo. Se supone que varía en forma lineal con el grado de saturación de acuerdo a la relación:

$$f = FC \div ALFA(1 - s)[mm / dia] \quad (8)$$

con ALFA y FC (la capacidad de infiltración del suelo saturado) como parámetros del modelo.

$Tp$ : Intensidad media diaria de las precipitaciones, supuesta constante dentro del mes y evaluada como:

$$Tp = \frac{P}{Días Mes} [mm / dia] \quad (9)$$

donde:

P: Precipitación mensual

Días Mes: Número de días del mes adoptando el valor de 30 para todos los meses.

ALFA y FC son parámetros del modelo que deben ser calibrados. En cambio P es dato de entrada al modelo.

### 6.1.2. ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración ET se estima a partir del grado de saturación del suelo, para lo cual se supone una tasa de evapotranspiración igual a la potencial para humedades mayores a SCRIT y una tasa de evapotranspiración decreciente en forma lineal hasta anularse, para una humedad equivalente al punto de marchitez permanente SMIN.

$$ET = \begin{cases} 0 & S < SMIN \\ ETP \cdot \frac{s - SMIN}{SCRIT - SMIN} & SMIN < s < SCRIT \\ ETP & SCRIT < s \end{cases} \quad \text{Por lo tanto:} \quad (10)$$

donde SMIN y SCRIT son parámetros de calibración del modelo y ETP es dato de entrada.

### 6.1.3. ESTIMACIÓN DE LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

Para evaluar la percolación profunda PP se supone que ésta ocurre sólo para humedades mayores a un nivel umbral equivalente a la capacidad de campo SCC, y que aumenta en relación cúbica con la humedad, hasta alcanzar en estado de saturación en equilibrio con la tasa de infiltración FC.

$$PP = \begin{cases} 0 & s < SCC \\ FC \cdot \left[ \frac{s - SCC}{1 - SCC} \right]^3 & s > SCC \end{cases} \quad (11)$$

### 6.1.4. CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA TOTAL

La escorrentía mensual  $E_{MES}$  se calcula como la suma de las escorrentías sintetizadas diarias  $E_{DÍA}$ :

$$E_{MES} = \sum_1^{DiasMes} E_{DIA} [mm / dia] \quad (12)$$

La escorrentía diaria se calcula como la suma de la escorrentía superficial media diaria  $E_{SUP}$  más la escorrentía subterránea  $E_{SUB}$ :

$$E_{DIA} = E_{SUP} + E_{SUB} [mm / dia] \quad (13)$$

### 6.1.5. CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

La escorrentía superficial diaria  $E_{SUP}$  se estima igual a la precipitación en exceso más la precipitación inmediata:

$$E_{SUP} = P_{INMEDIATA} + E_{EXCESO} [mm / dia] \quad (14)$$

La precipitación diaria en exceso  $P_{EXCESO}$  corresponde a la diferencia entre la intensidad media diaria de la precipitación y la infiltración total en el día.

La precipitación inmediata  $P_{INMEDIATA}$  corresponde a una parte de la precipitación total que se manifiesta rápidamente como escorrentía durante la lluvia:

$$P_{INMEDIATA} = P_{MIN} \cdot T_p \text{ [mm / dia]} \quad (15)$$

donde  $P_{MIN}$  es un parámetro de calibración del modelo.

### 6.1.6. CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA

Para evaluar la escorrentía subterránea se supone que el embalse subterráneo recibe una recarga constante durante el día, igual a la percolación profunda  $PP$ , y que descarga un flujo  $EZ$  (escorrentía subterránea) proporcional al volumen embalsado en él.

Aplicando la ecuación de continuidad se tiene:

$$PP - EZ = \frac{dV}{dT} \quad (16)$$

Si se tiene que:

$$EZ = \frac{V}{k} \quad (17)$$

la ecuación anterior se modifica a:

$$PP - EZ = kdEZ/dT \quad (18)$$

Separando variables e integrando, la escorrentía subterránea instantánea está dada por:

$$EZ(t) = PP \div (EZ_0 - PP)e^{\frac{1}{k}} \text{ [mm]} \quad (19)$$

donde:

$EZ_0$  : Escorrentía subterránea al inicio del día

k: Constante de tiempo

La escorrentía subterránea al final del día (t=1) e inicial del día siguiente  $EZ_f$ , vale: d

$$EZ_f = PP \div (EZ_0 - PP)e^{\frac{1}{k}} [mm] \quad (20)$$

La escorrentía subterránea media diaria es:

$$E_{SUB} = \int_0^1 EZ(t) dt \quad (21)$$

y luego de integrar se llega a:

$$E_{SUB} = PP \div k (EZ_0 - PP) (1 - e^{-\frac{1}{k}}) \quad (22)$$

De acuerdo con lo expuesto en la tabla siguiente, se resumen los parámetros que deben ser ajustados en el proceso de calibración para el modelo pluvial.

Tabla 3. Parámetros de Calibración del MPL

Parámetro	Descripción
A	Coeficiente que multiplica el dato lluvia para obtener la precipitación media sobre la cuenca.
B	Coeficiente que multiplica el dato evaporación para obtener la evapotranspiración potencial media sobre la cuenca.
FC	Tasa de infiltración correspondiente a suelo saturado (s=1) (mm/día)
ALFA	Variación de la tasa de infiltración por unidad de variación del grado de humedad
Smin	Grado de humedad correspondiente al punto de marchitez permanente

Tabla 3. Parámetros de Calibración del MPL

Parámetro	Descripción
Scrit	Grado de humedad crítico bajo el cual se restringe la evapotranspiración
Sc	Grado de humedad correspondiente a la capacidad de campo
Hmáx	Máxima lámina de agua contenida en el suelo saturado (mm)
K	Constante de tiempo del embalse subterráneo (días)
Pmín	Porcentaje de la lluvia que se manifiesta como escorrentía superficial inmediata
Si	Grado de saturación inicial
EZi	Escorrentía subterránea inicial

### 6.1.7. OPERACIÓN DEL MODELO

Se utiliza una cuenca patrón que disponga de control fluviométrico y de precipitaciones. Una vez calibrados los parámetros de la cuenca patrón, éstos se utilizan como representativos de todas las otras cuencas del modelo.

## 6.2. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

Este capítulo busca caracterizar el escurrimiento de las cuencas que conforman el sistema que se estudia. Esta caracterización se efectúa con métodos directos cuando se dispone de registros fluviométricos, o mediante metodología indirecta en caso de cuencas que no dispongan de control de caudales.

Para la consecución del objetivo planteado, se desarrollan las actividades siguientes:

- Descripción de la red de drenaje
- Definición de cuencas
- Pluviometría
- Red Fluviométrica
- Tratamiento de registros fluviométricos
- Generación de caudales sintéticos
- Caracterización del Régimen Hidrológico

## **6.2.1. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA CUENCAS VI REGIÓN**

### **6.2.1.1. RED DE DRENAJE**

En la VI Región existe un gran sistema hidrográfico principal, que corresponde a la cuenca del río Rapel, con sus afluentes Cachapoal y Tinguiririca, además de una zona costera que está formada por las hoyas de los esteros Tocopalma y Nilahue.

Se debe señalar la existencia de sectores inmediatamente adyacentes a la costa, comprendidos entre el litoral y las divisorias de agua de las cuencas de los esteros antes mencionados y el río Rapel, en los cuales la red de drenaje constituye esteros y quebradas de muy corto desarrollo, que alcanzan el mar en forma individual y que, en estricto rigor, cada uno de ellos conforma una pequeña cuenca. En estas pequeñas cuencas el régimen de escorrentía que caracteriza a estos esteros y pequeñas quebradas es esencialmente pluvial, por lo que su escurrimiento se encuentra estrechamente asociado a la distribución estacional de las lluvias.

A continuación se presenta una caracterización general de las cuencas antes mencionadas:

#### **6.2.1.1.1. CUENCA DEL RÍO RAPEL**

La cuenca del río Rapel, que se extiende de cordillera a mar, se encuentra ubicada aproximadamente entre los 34° y 35° de latitud sur y entre los 70° y 72° de longitud oeste. La zona baja de la cuenca queda comprendida entre su desembocadura y la desembocadura de los ríos Cachapoal y Tinguiririca en el embalse Rapel.

Los escurrimientos existentes en la zona baja son en su mayor parte afluentes al embalse Rapel y aportados principalmente por los esteros Las Cadenas y Alhué, los que sumados a los afluentes de la zona intermedia, a través de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, constituyen los afluentes totales al embalse Rapel.

El régimen natural del río Rapel es pluvionival alterado, es decir, en el período pluvial (Abril-Septiembre) se tiene régimen pluvial con crecidas violentas debido a precipitaciones líquidas caídas en la precordillera y zona

intermedia de la cuenca, y en el período (Octubre-Marzo) se tiene régimen nival con una onda de deshielo estacional generada por el deshielo del manto de nieve y aporte de los glaciares de la alta cordillera, onda de deshielo que llega al embalse Rapel amortiguada, o desapareciendo en algunos casos debido al uso consuntivo del agua con fines de riego en el valle central y algunos valles laterales.

La descripción de la zona intermedia incluye las cuencas de los ríos Cachapoal y Tinguiririca. Esta zona, que está comprendida entre la zona alta y el embalse Rapel, incluye la mayor parte de la zona cultivada y regada en la cuenca del río Rapel.

#### **6.2.1.1.2. CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL**

Si bien el régimen hidrológico de la zona intermedia es netamente pluvial, el de los ríos que nacen en la alta cordillera, como el Cachapoal, es de régimen pluvionival, donde el agua proveniente del deshielo se utiliza en riego por lo que la onda estacional de deshielo se amortigua e incluso, en algunos años secos, la onda de deshielo no se aprecia a la salida de la zona.

#### **6.2.1.1.3. CUENCA DEL RÍO TINGUIRIRICA**

Al igual que lo señalado en el caso anterior, la zona intermedia tiene un régimen netamente pluvial, sin embargo, el régimen de los ríos que nacen en la alta cordillera, como el Tinguiririca, es de régimen pluvionival, donde el agua proveniente del deshielo se utiliza en riego por lo que la onda estacional de deshielo se amortigua e incluso en algunos años secos, la onda de deshielo no se aprecia a la salida de la zona.

El sistema hidrográfico de carácter pluvial, correspondiente a la Cuenca Costera Rapel-Ñilhue, la que abarca un área aproximada de 3400 km<sup>2</sup>, se encuentra caracterizada por una red de drenaje ramificada, siendo los principales esteros el Topocalma y el Ñilhue, los que definen sub-cuencas hidrográficas. Otras sub-cuencas de menor importancia se presentan en los sectores adyacentes a la costa. A continuación se presenta una caracterización general de las subcuencas costeras (Figura 2).

#### **6.2.1.1.4. CUENCA DEL ESTERO TOCOPALMA**

La hoya del estero Tocopalma o Quebrada Honda es una cuenca costera ubicada inmediatamente al sur de la cuenca del río Rapel. El área de mayor interés de esta cuenca comprende entre el estero El Ganso por el sur y el estero Valle Hidango por el norte. El estero El Ganso es un tributario de la ribera norte del estero Tocopalma, a unos 25 km. aguas arriba de su desembocadura al mar. El estero Valle Hidango también es un tributario norte a unos pocos kilómetros de su desembocadura al mar. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **6.2.1.1.5. CUENCA DEL ESTERO NILAHUE**

La hoya del estero Nilahue drena parte de la zona costera entre la localidad de Cahuil por el norte y el estero Paredones por el sur. Posee una red de drenaje muy ramificada de acuerdo con la tectónica local, que ha fraccionado el macizo costero en ese sector. El estero Nilahue que tiene su nacimiento a unos 60 km al sur de Pichilemu, tiene una dirección sur a norte casi en la totalidad de su recorrido y desemboca en la localidad de Cahuil, ubicada unos 10 km. al sur de Pichilemu. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **6.2.1.1.6. OTRAS CUENCAS**

En los sectores inmediatamente adyacentes a la costa, comprendidos entre el litoral y las divisorias de aguas de las cuencas de los esteros antes mencionados y el río Rapel, existen pequeñas cuencas. Estas cuencas costeras corresponden a los siguientes sistemas:

- Costeras entre río Rapel y estero Topocalma (estero Pupuya)
- Costeras entre estero Topocalma y estero Nilahue (Pichilemu)
- Costeras entre estero Nilahue y Límite Regional (estero Paredones)

En estas cuencas la red de drenaje está constituida por esteros y quebradas de corto desarrollo, y que alcanzan el mar en forma individual. Estas cuencas costeras tienen un régimen de escorrentía esencialmente pluvial, por lo que el escurrimiento de las aguas está estrechamente asociado a la distribución de las lluvias.

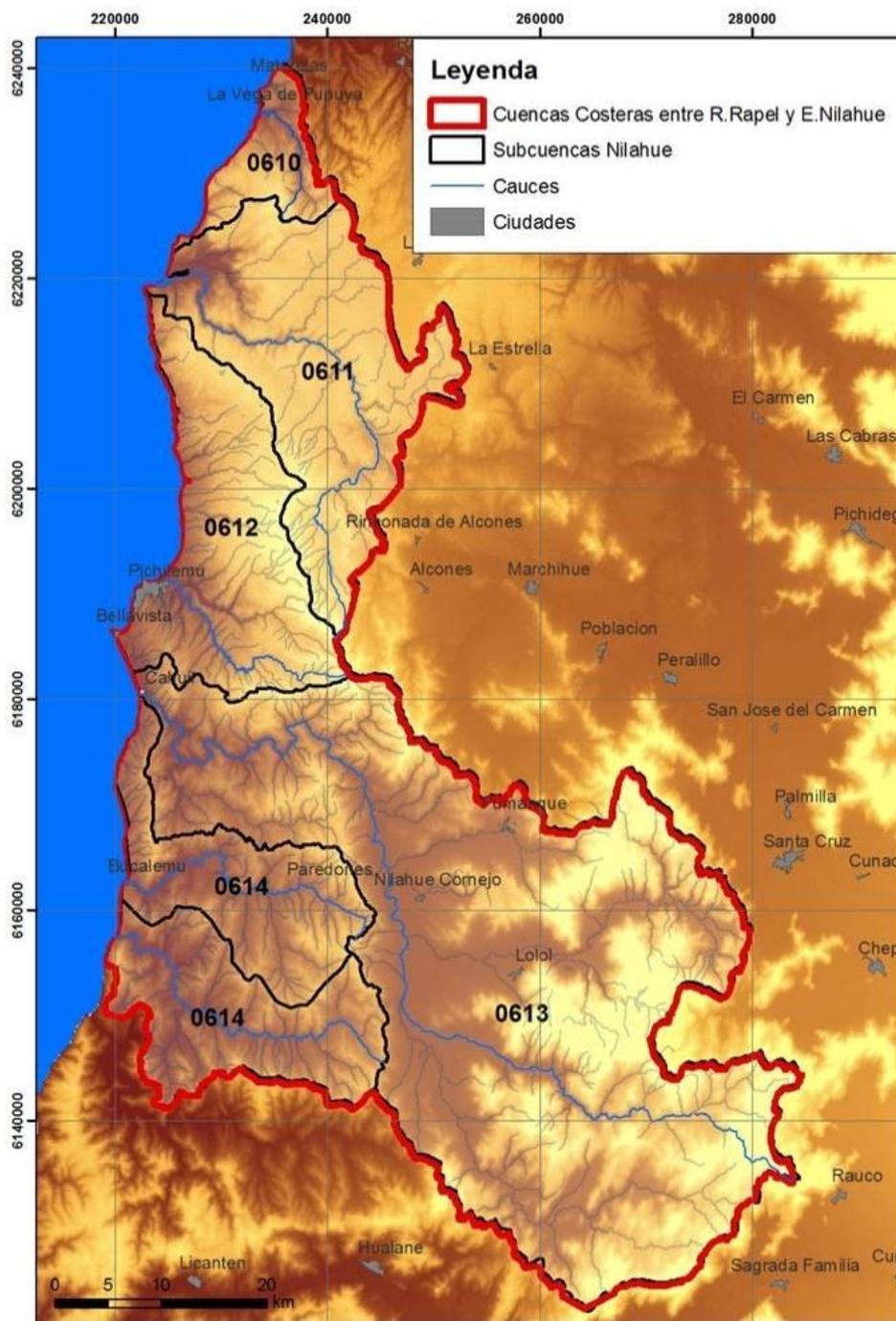


Figura 6. Cuencas Costeras entre Rapel y Nihue

### 6.2.1.2. DEFINICIÓN DE CUENCAS

En la Figura 6 ya se presentaron todas las cuencas principales de interés en este estudio, y en la Tabla 4 se detallan las principales propiedades geomorfológicas de cada una de ellas.

Tabla 4. Propiedades geomorfológicas de las cuencas de Estudio

Código	Nombre	Área (km <sup>2</sup> )	Centroide x	Centroide y	Long. Cauce principal (km)
610	Estero Pupuya	107	234.577	6.230.910	16,2
611	Estero Topocalma	544	238.944	6.211.120	65,1
612	Pichilemu	412	230.600	6.194.820	29,9
613	Estero Nilahue	1.778	256.794	6.154.100	118,0
614 N	Paredones Norte	569	231.912	6.162.150	36,2
614 S	Paredones Sur	569	231.597	6.150.070	83,3

### 6.2.1.3. PLUVIOMETRÍA

En la Tabla 5 se presentan las principales características de las estaciones meteorológicas en el área de estudio. Los registros de cada estación son de carácter público y se solicitaron a la Dirección General de Aguas (DGA).

Tabla 5. Información General Estaciones Meteorológicas VI Región

Nº	Código	Nombre	Norte	Este	Cota	Inicio	Fin	Subcuenca
1	06120001-0	Pichilemu	6190747	223547	5	30/06/80	a la fecha	Costeras entre Topocalma y Nilahue
3	06132002-4	Nilahue Barahona	6170326	246120	90	31/12/68	a la fecha	Estero Nilahue
7	06130002-3	Ranguili	6137981	248534	120	30/04/81	a la fecha	Estero Nilahue

De acuerdo a la extensión de la estadística presentada en la Tabla 6, el período base de análisis que se utiliza en este estudio se define entre el 30 de abril de 1981 a la fecha.

En la Figura 7 se presentan estas estaciones meteorológicas situadas en la zona costera del estudio.

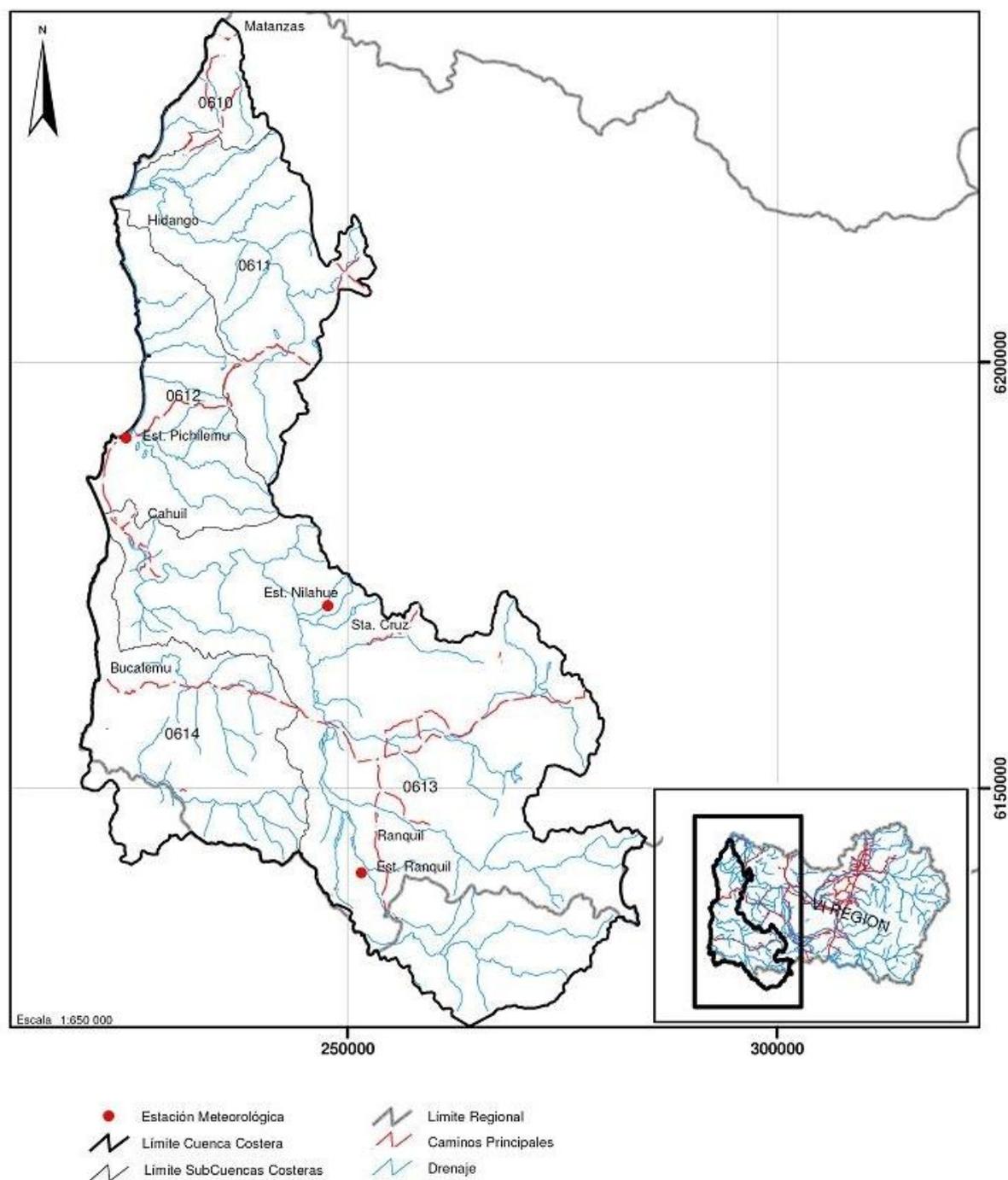


Figura 7. Ubicación de estaciones meteorológicas cuencas costeras VI  
 Región

En la tabla siguiente tabla se presenta la información faltante en cada una de las tres estaciones meteorológicas.

Tabla 6. Datos faltantes de Estaciones Meteorológicas VI Región

Estación	Extensión	Total c/registros	Total s/registros
PICHILEMU	388	387	1
RANGUILI	385	381	4
NILAHUE BARAHONA	384	382	2

El número de datos faltantes es ínfimo. El relleno se efectúa mediante interpolaciones directas. Así, en las tablas 12, 13 y 14, se presenta la estadística rellena de las tres estaciones pluviométricas emplazadas en la zona de estudio. En la planilla denominada *Pp\_mensual\_CosterasVI.XLS* se encuentra todo el proceso de la estadística de precipitaciones.

Tabla 7. Estación meteorológica Pichilemu. Precipitaciones totales mensuales (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	2	1	5	48	218,5	32	31,5	76,5	38	4	0	0
1982	0	0	8,5	0	222,1	305,5	140	61,5	129,5	42	0	0
1983	6	1,5	0	4	70	118,5	152	74	35	1,5	0	2,5
1984	0	4	2,5	12	194,5	129,5	250	136,5	58	34,5	0	0
1985	2	0	6,7	11	73,9	39	129,2	4,8	41,6	39,9	11,7	0
1986	0	0	12,1	61,4	237,2	163,2	28,9	74,8	6,1	8,8	40,9	0,3
1987	0	0	32,9	23,5	126,7	55,4	319,4	124,4	36,8	35,2	11,1	0
1988	2	2,4	19,1	3,1	20,9	109,5	98,5	139,5	15	1,4	10,6	0
1989	0	0	0	0	38,1	50	127,2	80,5	19,7	17,8	0	9,4
1990	0	0	52,3	17,5	15,8	11,4	75,3	19,8	58,8	26,3	5,2	9,5
1991	4,1	0	0	33,2	121,2	107,9	131	14,8	31	21,4	8	25,8
1992	0	0,6	5,5	40,5	257,9	244,5	14,1	75,7	44,6	3	2	0
1993	0	0	0	101,7	111,3	81,3	48,9	22,5	8,6	28,9	8,5	5,1
1994	0	0	0	35	22,5	77,3	71,3	22	21,5	19	0	7,7
1995	0	9	0	80,2	3	110,5	137,5	65,8	12	29,5	0	0
1996	0	0	1,5	30,5	25,5	93	195,5	118,1	0	7,3	10	31
1997	0	0	0	17	75,5	257,5	75,3	61,5	80,7	113	20	2,5
1998	0	0	0	13,5	68,5	45,5	0	2	34,7	0	0	0
1999	3,3	8,2	8,6	8	61	88,5	49	85,5	109	1	4,3	0
2000	0	25,5	0	1	13,1	451	8,5	10,5	108,2	1	1,5	0
2001	6	0	0	42	107,2	18,5	323	130,5	44,5	1,5	1,5	1
2002	0	23,5	66	41	194,5	82,3	116,5	243	66,5	18,5	3,5	3
2003	6,5	0	0	2,5	30,6	103,7	89,9	33	36	15,5	57	2
2004	0	0	9,5	26,5	39,5	62,5	146	74	38	9,5	29,5	4
2005	0	0	26	3	179,3	154,8	78,5	162,5	26,5	7,7	26,8	0
2006	0	0	0	11	24,7	108	162,5	94,2	20	56,5	0	0
2007	2	17	0	2,5	7,2	37,2	76,5	38	4	0	0	0
2008	0	0	3,5	10	160,5	79	100,5	104	25	1	0	0
2009	0	0	0	0	27,7	90	42,5	93,8	47,5	13	4,6	0
2010	0	0	0	0	36,5	133	124,5	30	22,5	23	14	0

Tabla 7. Estación meteorológica Pichilemu. Precipitaciones totales mensuales (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	23	0	13,5	46,5	0	119	79,5	103	15	0	9	0
2012	0	2,5	0	0	91,5	172	3,5	93	3	50	5,5	52,1
2013	0	0	1	0								

X Dato rellenado

Tabla 8. Estación meteorológica Ranguli. Precipitaciones totales mensuales (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981					214,5	48	70,5	80	47	19	0	0
1982	0	0	1	9	224	368	230	92	165	63	3	0
1983	11	3	0	11	85	142	155	133	50	4	0	0
1984	0	5	1	39	238,7	156,3	316,8	127,2	88,8	95	1	0,2
1985	1	0	8	29,3	129,4	64,8	147,6	1	32,9	54,4	15,4	0
1986	4	2,2	21,2	109,6	329,8	294,9	51	122,9	12,7	14,6	79,5	0
1987	0	0	38,7	7,5	91,5	56,4	397,7	136,3	60,7	48,5	0	0
1988	0	0	29,4	2,6	15,9	165,8	108,2	166,7	39,3	3,4	4,3	0
1989	1	0,5	0,2	0	24,6	103,5	169	109,8	15,3	16,5	0	25,2
1990	0,2	0,5	101	26,5	22,5	19,8	69,7	21,4	113,3	25,8	7,3	0,3
1991	6,5	0	0,3	45,5	204,7	180	189,5	33,3	44	42,8	2,3	34,5
1992	0	1	30,5	68,5	468,5	327,9	31	117,7	42,2	2,6	1,2	0
1993	4,5	0	0	86,3	160,8	131,8	90,9	41,7	9,9	29,5	15,7	8
1994	0	0	0	69	71,8	127,5	146,5	12,6	55,3	18,4	0,8	3
1995	0	0	0	127	11	141,1	237	93,4	15,5	23	0	0
1996	0	0	0,8	45,4	23,5	79,5	72,5	97,5	7,5	9,5	6,3	15,3
1997	0	1	0	47,5	140,5	326,5	72,5	104	124,9	136	29	28
1998	0	0	0	40,7	56,6	22,5	4,5	7	74	0	0	0
1999	0	6	3	18,5	74,5	179,5	58	125	211,3	7,5	0	0
2000	0	31,5	0	2	18,2	502,9	15,8	14	191,7	13	4,5	0
2001	9	0	0	40,2	178,5	41,2	352,2	170	25	1,8	7	0
2002	0	17,5	116,7	15,8	220,4	146,5	146	328,2	71,5	42,7	3	4
2003	21	0	0	4	99,5	124,9	74,5	36,2	49,5	27,5	65,5	5
2004	0	0	19,5	53	21,5	78,5	195,5	63	75,5	34,1	16	15
2005	0	0	18	1,8	195	278,5	84,5	207	47	12,5	48	1,5
2006	0,2	1,2	0	14	39	318,5	198,5	129,5	12,5	62,5	0,5	11
2007	5	28	2,2	7,7	18,5	100	97	77	9	0	0	0
2008	0	0	4,5	42,9	270,5	158,6	135,5	163	28,3	0,5	0	0
2009	0	0	0	0	51,8	184	88	120,6	89,5	17	22,5	0
2010	0,2	0	0	0	86,5	158,2	92,5	37	32	26,9	13	15,5

Tabla 8. Estación meteorológica Ranguli. Precipitaciones totales mensuales (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	11,5	1	14	53,9	5,4	121	84,7	138,8	17	1,5	11,5	0
2012	0	1	0	0	136	100,8	12	73	2,3	66,5	8	0
2013	0	6,5	0	0								

X Dato rellenado

Tabla 9. Estación meteorológica Nilahue Barahona. Precipitación total mensual (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981				53	234,5	46,5	40	60,5	26	5,5	0	0
1982	0	0	24,5	6	230,5	317	169	76	130	38	1,5	0
1983	2	0	0	11	77	126	163	92	31	4	0	0
1984	0	2	0	11	168,7	121,5	251	133,5	68,2	39	3,5	0
1985	1	0	14,5	6,5	87	52	136	2,5	50	32,5	4,5	0
1986	0	0	11,5	62,5	225	148	18,1	83,2	1	9,5	49,5	0
1987	0	0	42,5	14	73,5	36,5	287,1	100,8	37,5	20	0	0
1988	0	0	24,5	2,5	4,5	126	95,5	124,5	30,5	2	1	0
1989	0	0	0	0	33	52	141	88,5	11,5	8	0	10,5
1990	1,5	0	58,5	17	15,5	13,5	75,5	25	69,6	25	9	7
1991	6,5	0	0	34,5	138,5	143	176	24	32,5	27,5	1	43
1992	0	0	12	47,5	309	253	24	104,5	38	0	2	0
1993	0	0	0	87,5	134,9	107	63,5	28,5	3	18,5	14,5	4,2
1994	0	0	0	53,5	49,5	76	106,5	16	32	26,5	0	0
1995	0	0	0	73,5	0	100	126	70	14	25	0	0
1996	0	0	0	39	26,5	79	127	128	3	1,5	5,5	12
1997	0	0	0	27	87	374	127	125,5	77	127,1	32,5	4
1998	0	0	0	15,5	40	49,5	2	0	41,5	0	0	0
1999	0	5,5	2,8	26,5	65,5	104,5	45	84,5	156	9,5	1	0
2000	0	37,6	0	0	12	465	5	9,5	207	3	0	0
2001	2,5	0	0	49,5	136	23,5	291	152,5	19	2	0	0
2002	0	15	53	23	179	101	120	300	73	17	0	1
2003	14,5	0	0	10,5	102,5	98,7	88,5	29	43,5	23,5	51	2,5
2004	0	0	23,5	29	53	74	148,5	82	46	13	12	5
2005	0	0	25,5	7,5	212	204	64,5	182	29	13	24,5	0
2006	0	0	0	7	25	175,5	201	89	16	53	0	0
2007	0	37	0	0	20	73	101	78	4	0	0	0
2008	0	0	6,5	33	161,5	100	126	72,1	22	0	0	0
2009	0	0	0	0	33,5	142,5	67	106,5	81	16	6	0
2010	0	0	0	0	60,5	131	95,5	14	21	27,5	0	0
2011	10	0	10	54	7	120	78,5	120,5	17,5	0	5	0
2012	0	0	0	0	116	111,8	9	95	9	92	6	47,5
2013	0	0	0	0								

X Dato rellenado

Otras series de precipitaciones se generarán sintéticamente, como combinación lineal de las distancias entre estas estaciones y el punto de interés.

$$P_{Xi} = \frac{(d_{X1} \cdot P_{1i} + d_{X2} \cdot P_{2i} + d_{X3} \cdot P_{3i})}{d_{X1} + d_{X2} + d_{X3}} \quad (1)$$

donde:

- $P_{Xi}$ : Precipitación en un punto X cualquiera de la zona de estudio en el mes i
- $P_{1i}$ : Precipitación en la estación Pichilemu en el mes i
- $P_{2i}$ : Precipitación en la estación Ranguili en el mes i
- $P_{3i}$ : Precipitación en la estación Nilahue en Barahona en el mes i
- $d_{X1}$ : Distancia desde punto X a la estación Pichilemu
- $d_{X2}$ : Distancia desde punto X a la estación Ranguili
- $d_{X3}$ : Distancia desde punto X a la estación Nilahue en Barahona

#### 6.2.1.4. FLUVIOMETRÍA

La información fluviométrica para las cuencas costeras de origen pluvial de la Sexta Región, se encuentra restringida a sólo una estación de monitoreo correspondiente a la Estación Estero Nilahue en Santa Teresa. Ésta estación está vigente y cuenta con registro de caudales mensuales desde Diciembre 1984. En el caso de todas las otras cuencas identificadas, se utiliza un modelo lluvia esorrentía para generar sintéticamente las series de caudales.

- **Caudales controlados**

Tabla 10. Estación fluviométrica Estero Nilahue en Santa Teresa

Nº	Código	Nombre	Norte	Este	Cota	Inicio	Fin
1	06132001-6	Estero Nilahue en Santa Teresa	6170703	243705	50	1/1/85	a la fecha

Para rellenar la estadística de esta estación, se efectuó una correlación entre esa serie de caudales versus las precipitaciones en la estación meteorológica Nilahue en Barahona.

Tanto los caudales como las precipitaciones deben normalizarse para garantizar la independencia temporal, y hacer factible la aplicación de la correlación. La relación utilizada es la de Box-Cox:

$$\frac{Q_i^\lambda}{\lambda} \quad (2)$$

El parámetro  $\lambda$  se estima haciendo la asimetría nula de la serie transformada.

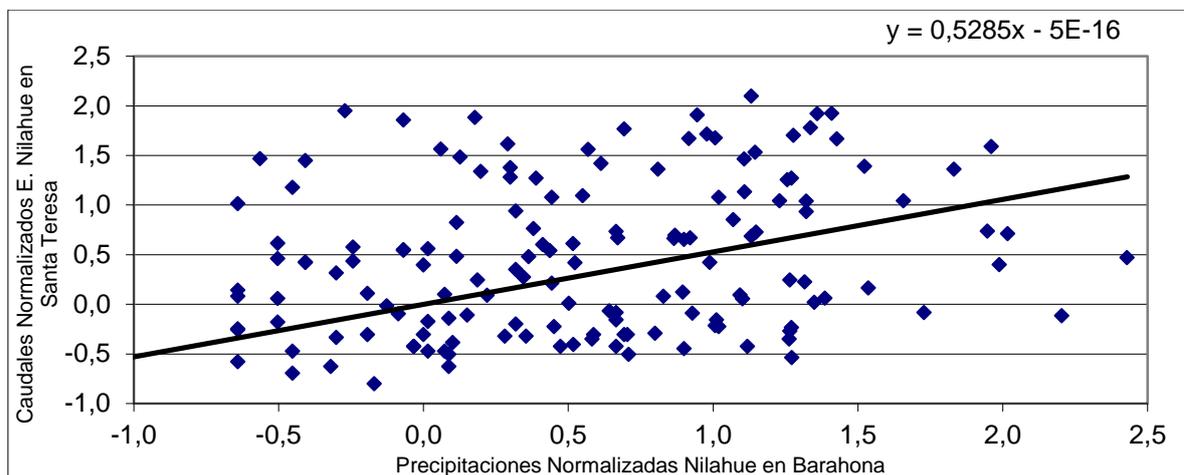


Figura 8. Qm E. Nilahue en Santa Teresa vs Pp Nilahue en Barahona

Tabla 11. Caudales medios mensuales. Estación fluviométrica Estero Nilahue en Santa Teresa (m<sup>3</sup>/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1985	0,04	0,01	0,03	0,88	59,65	138,26	14,33	31,58	5,34	1,28	1,82	0,08
1986	0,12	0,09	0,16	0,17	0,42	0,74	130,64	68,51	13,37	3,72	0,42	0,58
1987	0,03	0,03	0,13	0,07	0,08	0,61	6,49	38,16	4,53	0,82	0,25	0,1
1988	0,06	0,03	0	0,07	0,14	0,19	8,84	23,87	4,42	0,73	0,2	0,14
1989	0	0	0	0,08	0,23	0,16	0,63	0,23	2,35	0,55	0,04	0,09
1990	0	0	0	0	8,17	47,03	76,79	11,12	5,24	2,04	0,4	0,01
1991	0,16	0,06	0,07	0,09	73,07	108,67	32,40	25,44	15,72	3,06	0,8	0,16
1992	0,03	0,02	0,07	0,45	6	30,41	31,48	5,62	2,52	0,77	0,28	0,15
1993	0,00	0,00	0,07	0,31	1,34	6,32	40,56	6,92	2,59	1,43	0,33	0,03
1994	0	0,00	0,00	0,06	0,31	5,37	44,1	39,81	3,68	1,58	0,27	0,03
1995	0	0	0	5,10	0,12	0,72	1,42	5,74	0,85	0,26	0,02	0,02
1996	0	0	0	0	0	8,9	126,5	53,47	42,82	38,51	2,65	0
1997	0,19	0,13	0,15	0,15	0,24	0,37	0,22	0,13	0,41	0,04	0,00	0,29
1998	0,00	0,00	0,00	3,10	16,30	2,99	2,87	7,03	68,27	2,41	0,92	0,17
1999	0,01	4,10	0,00	0,00	0,80	116,68	42,12	3,27	54,45	3,58	0,87	0,17
2000	0,14	0,13	0,07	0,07	3,57	2,78	98,96	82,98	13,39	2,31	0,52	0,15
2001	0,06	0,06	0,28	0,13	9,7	49,9	47,63	167,39	26,39	4,36	0,95	0,1
2002	0,18	0,11	0,16	0,15	1,08	17,95	14,41	2,37	0,93	0,38	0,26	0,21
2003	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,83	15,74	24,79	1,81	0,44	0,24	0,06
2004	0,06	0,04	1,04	1,25	2,98	76,96	44,02	85,17	35,26	0,65	1,01	0,07
2005	0,06	0,05	0,02	0,05	0,13	30,95	86,91	50,12	5,57	4	1,31	0,12
2006	0,01	0,01	0,11	0,16	0,05	0,27	2,22	7,89	1,17	0,27	0,11	0,21

Tabla 11. Caudales medios mensuales. Estación fluviométrica Estero Nilahue en Santa Teresa (m<sup>3</sup>/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2007	0,12	0,12	0,12	0,11	9,34	35,54	26,91	61,22	10,25	2,33	1,45	0,12
2008	0,12	0,13	0,12	0,12	0,16	2,36	10,85	22,95	27,55	1,05	0,39	0,66
2009	0,02	0,02	0,02	0,02	22,62	14,77	12,32	2,11	3,35	0,76	0,05	0,28
2010	0,02	0,02	0,02	0,02	0,09	0,39	3,63	13,48	4,38	0,21	0,39	0,02
2011	0,11	0,13	0,1	0,1	0,37	8,09	3,73	6,47	0,99	0,95	0,41	0,14
2012	0,08	0,02	0,02	0,02	4,90	4,71	0,49	3,95	0,49	3,82	0,37	0,2

X Dato rellenado

Como se ya se señaló, se utilizó la generación sintética de caudales, en donde, en este caso y para los caudales, se utiliza la estación Nilahue en Santa Teresa. Como entrada de precipitaciones se considera la serie generada en el centro de gravedad de la cuenca Nilahue.

Respecto a las entradas por concepto de evaporación, se dispuso de estadística registrada en la VII Región en estaciones de baja cota (ver Figura 9). En la planilla *EvaporacionesVIIRegion.XLS*, se presentan los antecedentes disponibles de estaciones de la Dirección General de Aguas.

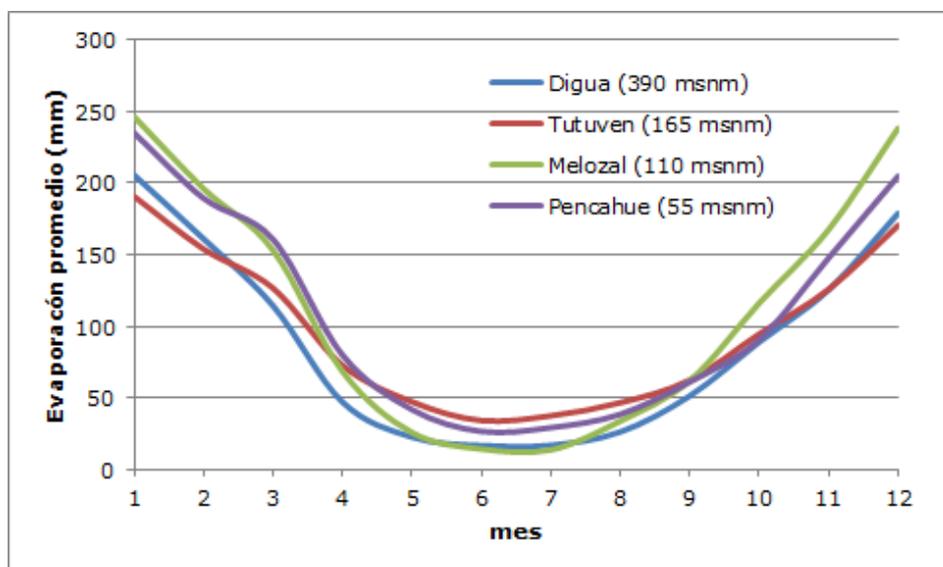


Figura 9. Evaporaciones totales mensuales promedio VII Región

Como datos de entrada de evaporaciones se considera la serie temporal continua. Se descartan las estaciones Digua y Pencahue, por corresponder a ambientes de vegetación frondosa, muy diferenciada de las zonas que aquí se estudian. De las restantes estaciones, se selecciona la envolvente de mayor nivel de evaporación, que resulta ser la estación Tutuven.

Se destaca que lo que se rescata de esta estación de evaporación seleccionada, es su estructura (variación en el tiempo), como influye en la cuenca patrón, lo determina el parámetro respectivo de ponderación, que se obtiene del proceso de calibración.

En la Figura 10 se presenta el menú del modelo MPL, donde se precisan las celdas donde se encuentran los parámetros a ajustar, los rangos mínimos y máximos de estos parámetros. Además, se sitúa la celda donde se encuentra definida la función objetivo, que confronta los caudales medidos con los simulados. Por último, se deben ingresar las consignas para el optimizador, realizado en base a un algoritmo genético.

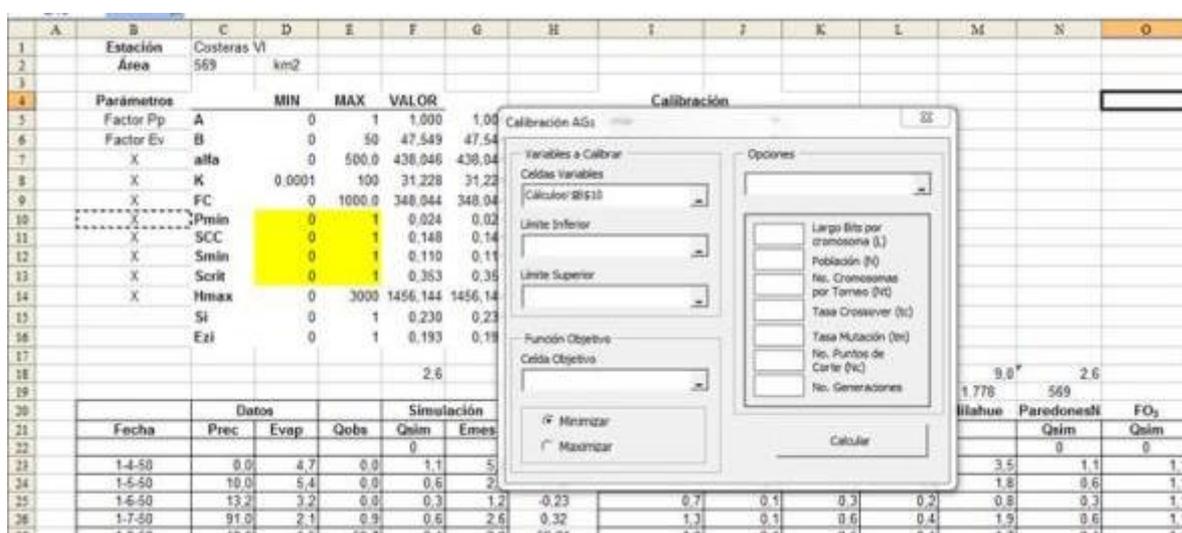


Figura 10. Menú programa MPL

En la Tabla 1 del Anexo 6 se presentan las series de caudales medios mensuales generados por medio del modelo de lluvia escorrentía MPL.

En la Tabla 12, se presentan las producciones promedio de las cuencas costeras delimitadas entre Rapel y Nilahue.

Tabla 12. Producciones promedio Cuencas Costeras entre Rapel y Nilahue (m<sup>3</sup>/s)

Cuenca	Patrón	Pupuya	Topocalma	Pichilemu	Nilahue	ParedonesN	ParedonesS
Área (km <sup>2</sup> )	1.390	107	544	412	1.778	569	569
Qmedio (m <sup>3</sup> /s)	6,1	0,5	2,7	2,1	8,9	2,6	2,6

### 6.2.1.5. RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Disponiendo de la estadística (generada sintéticamente) de enero 1985 a marzo 2013, se construyen los respectivos autocorrelogramas, los cuales se incluyen en la Tabla 2 del Anexo 6.

En la Figura 11, se presenta el gráfico del autocorrelograma de una de las series de caudales medios mensuales (todas las otras series de caudales presentan la misma estructura). Se observa claramente el ciclo de 12 meses.

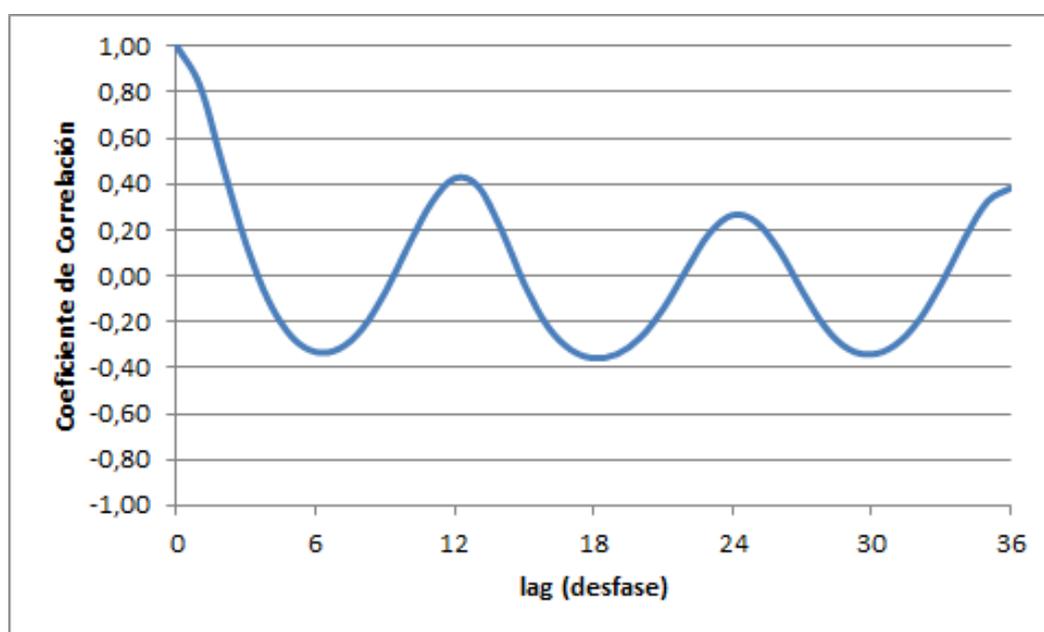


Figura 11. Autocorrelograma caudales cuencas costeras Rapel-Ñilahué

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 representada la regulación que presenta la cuenca es de tres (3) meses. Por lo tanto, el acuífero asociado a esta cuenca hidrográfica, presentará una regulación superior a tres (3) meses, por el efecto de almacenamiento del acuífero.

## **6.2.2. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA CUENCAS VIII REGIÓN**

### **6.2.2.1. RED DE DRENAJE**

La VIII región se caracteriza por un sistema hidrográfico principal de carácter mixto, correspondiente a la Cuenca del Río Itata y Cuenca del Río Biobío. El sistema hidrográfico de carácter pluvial correspondiente a las Cuencas Costeras, que comprende un área aproximada total de 8300 km<sup>2</sup>. Estas cuencas se caracterizan por presentar una red de drenaje principalmente ramificada. Los principales ríos corresponden al Cobquecura, Talicu, Rafael, Andalién, Cabrera, Caramávida, Carampangue y Tirúa, los que definen las principales hoyas hidrográficas (Figura 12).

#### **6.2.2.1.1. CUENCA COSTERA ENTRE LÍMITE NORTE DE LA REGIÓN Y EL RÍO ITATA**

Ubicada al norte de la cuenca del río Itata con una extensión aproximada de 620 km<sup>2</sup>. En el área existen una serie de ríos y esteros (Cobquecura, Careo, Talicu Mella) los que desembocan, casi en su mayoría al mar. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **6.2.2.1.2. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

Esta cuenca drena gran parte de la zona costera entre las comunas de Tomé y la parte norte de Talcahuano, con una extensión aproximada de 1500 km<sup>2</sup>. La red de drenaje se presenta ramificada y sus ríos principales son el Colcura, Pichilo, Las Animas y Quiapo. Esta cuenca presenta un régimen pluvial.

#### **6.2.2.1.3. CUENCA COSTERA ENTRE EL RÍO BIOBÍO Y CARAMPANGUE**

El área aproximada de la cuenca es de 370 km<sup>2</sup>. El drenaje de la cuenca se presenta en general orientado al oeste, los cursos principales de agua corresponden a los ríos Manco, Colcura y Chivilingo, los que drenan el sector costero de las comunas Coronel, Lota y la parte norte de la comuna de Arauco. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **6.2.2.1.4. CUENCA DEL RÍO CARAMPANGUE**

La cuenca tiene un área aproximada de 1270 km<sup>2</sup> caracterizada por una serie de ríos como el Cabrera, Cifuentes y Las Ánimas, los que confluyen hacia el río Carampangue, el que le entrega el nombre a la cuenca. Drena, en gran parte a la comuna de Arauco. El régimen que presenta la cuenca es de tipo pluvial.

#### **6.2.2.1.5. CUENCA COSTERA ENTRE EL RÍO CARAMPANGUE Y LEBU**

Presenta un área aproximada de 650 km<sup>2</sup>. La red de drenaje presenta direcciones preferenciales aproximadas norte y sur, las que representan la geomorfología del sector. Los principales esteros que drenan la parte sur de la provincia de Arauco corresponden a los Esteros Llico, Huilingo y Quidico. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **6.2.2.1.6. CUENCA RÍO LEBU**

Cubre un área aproximada de 860 km<sup>2</sup>. El río principal corresponde al río Lebu, el que le otorga el nombre a la cuenca. Los afluentes al río principal son los ríos Trongol, Curanilahue y Curihuillin. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **6.2.2.1.7. CUENCA COSTERA ENTRE EL RÍO LEBU Y PAICAVÍ**

Abarca un área aproximada de 630 km<sup>2</sup>, incluyendo parte de las comunas de Lebu, Los Álamos y Cañete. Presenta una red de drenaje paralela en el sector costero, donde se ubican en esa disposición una serie de esteros como el Curaco, Quinahue, Yeneco, entre otros. Aguas arriba, la red de drenaje se presenta dendrítica, definida por los ríos Cayucupil, Conhueco, Caramávida, Tucapel y Calebu. En el sector sur, en el límite con la cuenca costera entre el río Paicaví y límite regional sur, la confluencia de los esteros Provoque, Calebu, Peral y Buchoco generan el Lago Lanalhue. El régimen que presenta la cuenca corresponde a pluvial.

### 6.2.2.1.8. CUENCA COSTERA ENTRE EL RÍO PAICAVÍ Y LÍMITE REGIONAL SUR

Esta cuenca abarca un área aproximada de 1350 km<sup>2</sup>, drenando la comuna de Tirúa, en la provincia de Arauco.

La red de drenaje se presenta dendrítica, generando lagunas como la Lleu Lleu, formada por la confluencia de los ríos Mahuilque, Huilingo y los esteros Coihueco y Medihueco. En el sector sur el principal río es el Tirúa. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

### 6.2.2.2. DEFINICIÓN DE CUENCAS

En la Figura 12 se presentan todas las cuencas principales de interés en este estudio, y en la Tabla 13 se detallan las principales propiedades geomorfológicas de cada una de ellas.

Tabla 13. Propiedades geomorfológicas de las cuencas de Estudio: VIII Región

Cód. cuenca	Nombre	Área (km <sup>2</sup> )	Centroide X	Centroide Y	Long. Cauce princ. (Km)
80	Costeras entre límite norte Región y R. Itata	616	167.046	5.985.860	61
82	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Bio-Bio	1.499	156.225	5.928.290	83
82	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Bio-Bio (Isla)	4	136.898	5.938.970	-
84	Costeras e Islas entre Ríos Bio-Bio y Carampangue	364	132.537	5.888.660	12
84	Costeras e Islas entre Ríos Bio-Bio y Carampangue (Isla)	31	97.973	5.892.600	
85	Río Carampangue	1.262	131.082	5.855.340	88
86	Costeras Carampangue-Lebu	624	97.019	5.857.820	30
87	Río Lebu	858	113.513	5.834.760	90
88	Costeras Lebu-Paicavi	1.696	118.201	5.806.620	99
89	Costeras e Islas entre R.Paicavi y Límite Región	1.339	120.237	5.760.000	61
89	Costeras e Islas entre R.Paicavi y Límite Región (Isla)	52	70.639	5.741.820	-

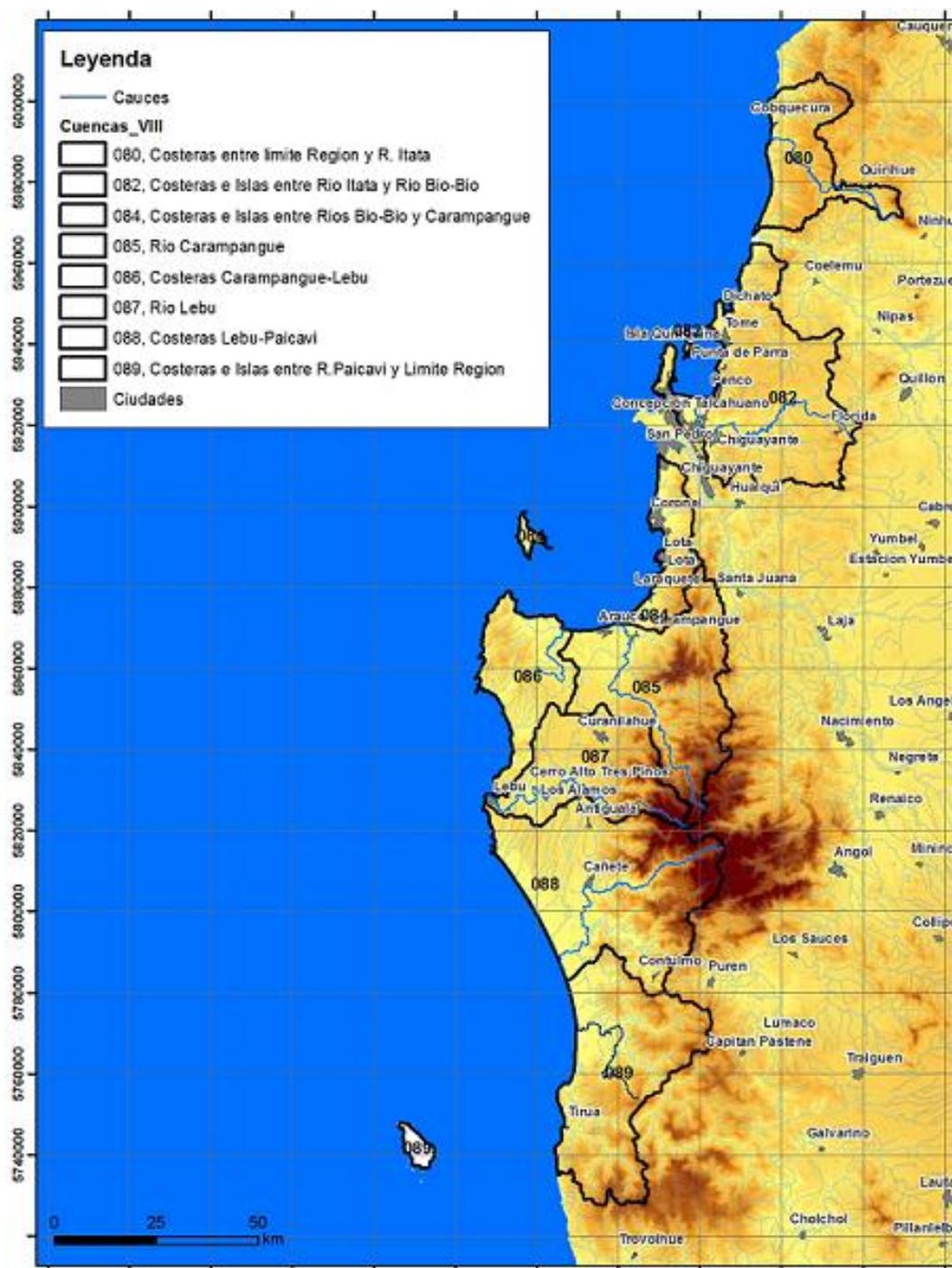


Figura 12. Principales hoyas hidrográficas Costeras VIII Región

### 6.2.2.3. PLUVIOMETRÍA

En la Tabla 14 se presentan las principales características de las estaciones meteorológicas en el área de estudio. Los registros de cada estación son de carácter público y se solicitaron a la Dirección General de Aguas (DGA).

Tabla 14. Información General Estaciones Meteorológicas: Costeras VIII  
Región

Código	Nombre	Norte	Este	Cota	Inicio	Fin
08210002-4	Dichato	5.948.118	147.759	5	31-may-80	A la fecha
08394001-8	Río Biobío Desembocadura	5.915.011	135.339	5	31-mar-01	A la fecha
08520000-3	Carampangue	5.866.827	123.017	5	31-dic-00	A la fecha
08930000-2	Tirúa	5.756.830	107.253	5	31-dic-00	A la fecha
08394006-9	Cerro Verde	5.917.409	136.503	10	30-nov-89	dic-95
08410001-3	Concepción DGA	5.914.745	133.463	15	31-dic-95	A la fecha
08210003-2	Estero Bellavista en Tome	5.937.891	146.908	20	31-mar-09	A la fecha
08220008-8	Estero Nonguen Frente U. Biobío	5.917.539	141.762	20	28-feb-09	A la fecha
08393002-0	Estero Hualqui en Desembocadura	5.899.429	148.944	25	31-mar-09	A la fecha
08822008-0	Contulmo	5.784.133	128.504	25	30-jun-87	A la fecha
08141002-K	Coelemu	5.955.634	168.275	30	30-sep-61	A la fecha
08410002-1	Concepción Edif. MOP	5.917.433	139.978	30	30-jun-00	abr-06
08220006-1	Andalién	5.916.754	149.643	40	31-dic-00	A la fecha
08821005-0	Cañete	5.807.095	113.090	50	30-nov-61	A la fecha

La mayor parte de las estaciones pluviométricas presentadas en la Tabla 14 son de emplazamiento reciente. Se seleccionan aquellas que al menos disponen de veinte (20) años de registros, así las estaciones seleccionadas son cuatro: Dichato, Contulmo, Coelemu y Cañete.

En la Figura 13 se presentan estas estaciones meteorológicas situadas en la zona costera del estudio.

El año inicial de análisis es 1987. A partir de ese período se presenta la estadística de cada estación, rellenando datos faltantes según corresponda. Las tablas con la estadística de cada estación se incluyen en el Anexo 6 (Tablas 3 a 6).

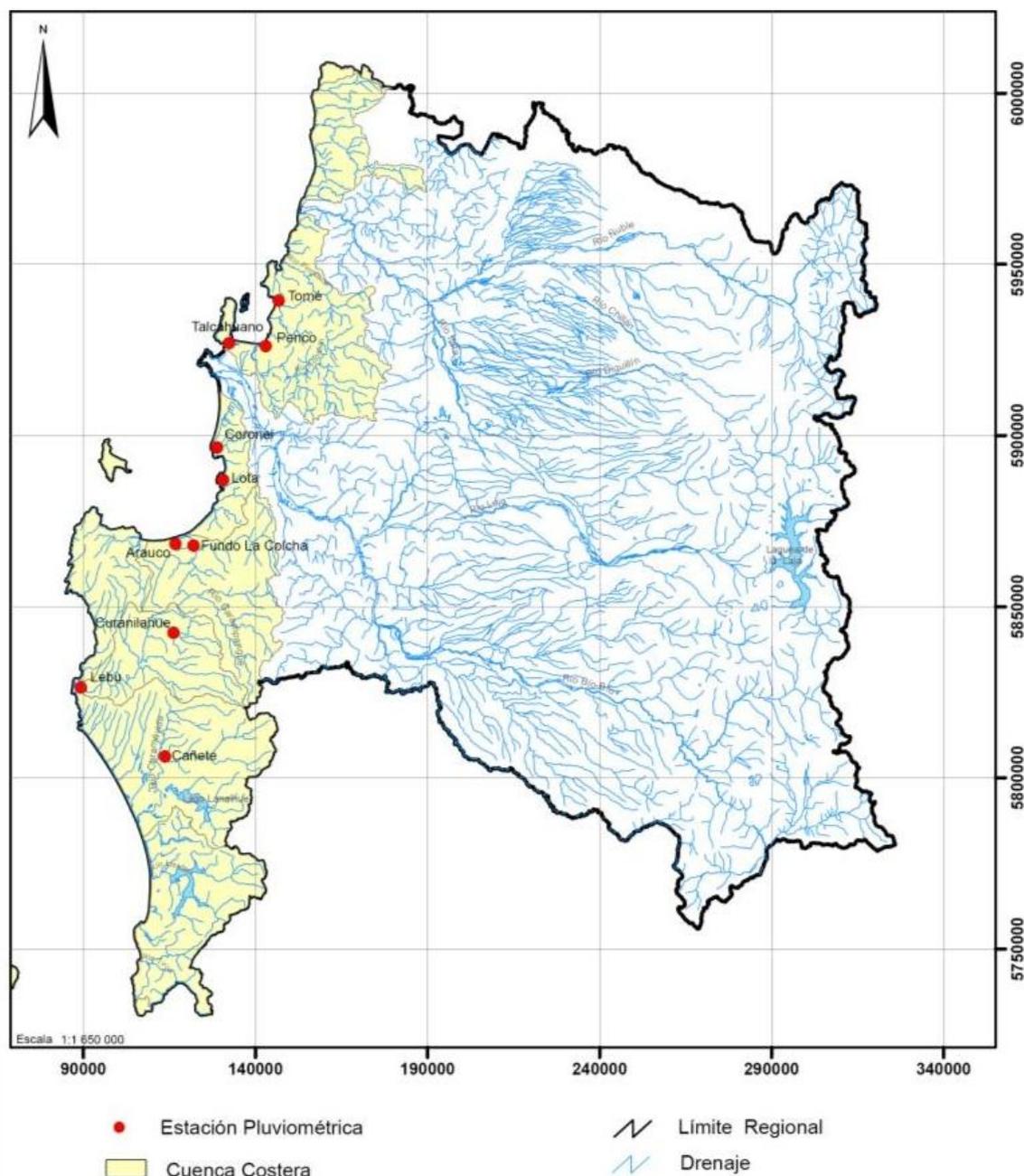


Figura 13. Ubicación de estaciones meteorológicas cuencas costeras VIII Región

Otras series de precipitaciones se generarán sintéticamente, como combinación lineal de las distancias entre estas estaciones y el punto de interés.

Tabla 15. Distancias entre estaciones meteorológicas y centro de gravedad de cuencas en zona de estudio

Cuenca	D I S T A N C I A (m)				F A C T O R E S (%)			
	Dichato	Contulmo	Coelemu	Cañete	Dichato	Contulmo	Coelemu	Cañete
80	42.385	205.376	30.251	186.730	9%	44%	7%	40%
82	21.560	146.798	29.881	128.642	7%	45%	9%	39%
82	14.200	155.064	35.528	134.007	4%	46%	10%	40%
84	61.376	104.605	75.913	83.851	19%	32%	23%	26%
84	74.571	112.682	94.423	86.831	20%	31%	26%	24%
85	94.265	71.254	106.968	51.491	29%	22%	33%	16%
86	103.577	80.132	121.017	53.210	29%	22%	34%	15%
87	118.418	52.800	132.700	27.668	36%	16%	40%	8%
88	144.552	24.735	157.202	5.133	44%	7%	47%	2%
89	190.121	25.510	201.446	47.634	41%	5%	43%	10%
89	220.242	71.685	235.052	77.865	36%	12%	39%	13%

#### 6.2.2.4. FLUVIOMETRÍA

El interés de evaluar la esorrentía superficial, en el contexto de este estudio, es establecer los niveles de caudales de descarga asociados a las cuencas costeras, que confrontados con las precipitaciones respectivas, permita efectuar balances a un gran nivel de segregación, y con ello establecer la condición de borde de recarga del acuífero a un alto nivel de precisión.

De igual modo que en la evaluación de las cuencas costeras de la VI Región, se utiliza un modelo lluvia esorrentía, aplicado a una cuenca patrón (con precipitaciones y caudales disponibles), cuyos parámetros se hacen extensibles al resto de las cuencas. Así, al conocer el área de cada cuenca y la serie de precipitaciones generada en el centro de gravedad de la hoya, se genera sintéticamente la serie de caudales de descarga de la cuenca.

La cuenca patrón seleccionada es la de código 082, cuya estación de fluviométrica de calibración es la estación Andalién en Penco.

Tabla 16. Estación fluviométrica en la zona de estudio: Costeras VIII Región

Código	Nombre	Norte	Este	Cota	Inicio	Fin
08220001-0	Rio Andalien Camino a Penco	5918858	140805	7	1/11/60	A la fecha

Tabla 17. Caudales medios mensuales estación Andalién en Penco

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1987	1.69	1.51	1.99	2.63	6.08	8.84	42	37.63	17.29	10.5	5.55	2.63
1988	2.23	1.91	2.08	2.49	4.8	13.4	28.32	37.66	17.38	8.52	3.13	2.98
1989	1.35	1.35	1.35	1.34	1.35	16.87	24.91	25.08	9.37	5.53	3.02	4.1
1990	1.4	1.56	3.39	4.12	6.94	8.56	13.14	19.02	19	6.81	3.76	1.65
1991	1.45	1.2	1.57	3.56	20.94	19.28	34.04	11.98	10.82	6.15	3.21	3.97
1992	1.59	1.53	2.05	3.09	43.33	49.48	23.34	22.33	23.08	13.38	8.55	7.27
1993	4	2.29	2.42	6	22.32	53.71	44.3	22.9	16.08	10.94	5.6	4.92
1994	5.14	2.44	1.41	3.47	7.63	23.06	29.68	11.18	21.56	10.8	4.91	4.43
1995	2.25	1.67	2.12	4.67	5.4	19.63	39.81	29.34	12.87	9.52	4.8	2.56
1996	1.66	1.07	1.16	3.75	4.78	8.58	9.23	7.11	4.98	3.04	1.54	0.8
1997	0.6	0.76	0.82	9.86	18.63	55.39	24.64	19.99	15.98	16.72	10.75	5.21
1998	3.62	3.49	3.67	4.39	8.52	10.33	7.58	8.24	5.89	2.73	1.47	0.45
1999	0.52	0.69	0.99	0.96	4.56	13.63	14.57	14.65	26.48	5.5	3.3	2.21
2000	1.44	1.86	1.84	3.6	4.34	35.66	20.29	23.83	27.23	13.66	9.38	7.04
2001	6.7	5.95	23.74	41.54	59.33	31.61	43.91	38.14	23.01	19.24	16.52	12.35
2002	9.88	16.13	6.65	11.04	19.53	21.36	18.61	18.69	20.85	25.02	22.64	20.26
2003	17.88	15.49	13.11	10.73	8.35	22.05	14.44	10.93	12.6	10.76	8.35	5.97
2004					6.38	25.04	30.34	22.48	15.15	13.24	8.04	4.32
2005	2.83	2.3	2.32	2.35	16.87	40.73	37.32	32.5	20.07	11.93	9.02	8.74
2006	4.95	3.32	2.92	6.18	6.31	34.97	51.33	35.61	19.14	14.43	8.36	7.13
2007	5.18	4.64	3.75	5.5	5.53	6.73	22.61	20.69	12.88	6.78	3.38	2.21
2008	1.5	1.35	1.62	2.55	27.69	14.56	27.59	39.8	36.69	33.59	30.48	27.37
2009	24.26	21.16	18.05	3.49	6.54	20.97	20.74	28.88	13.45	7	4.82	2.87
2010	2.59	3.05	4.75	4.81	5.73	26.16	20.78	12.58	5.63	3.21	8.74	9.92
2011	8.59	5.74	3.7	5.9	4.74	15.02	16.37	21.2	13.46	5.96	4.57	3.17
2012	1.78	1.79	1.74	1.64	3.75	8.59	4.65	6.46	3.55	2.98	2.56	2.59
2013	2.09	2.03										

X Dato rellenado

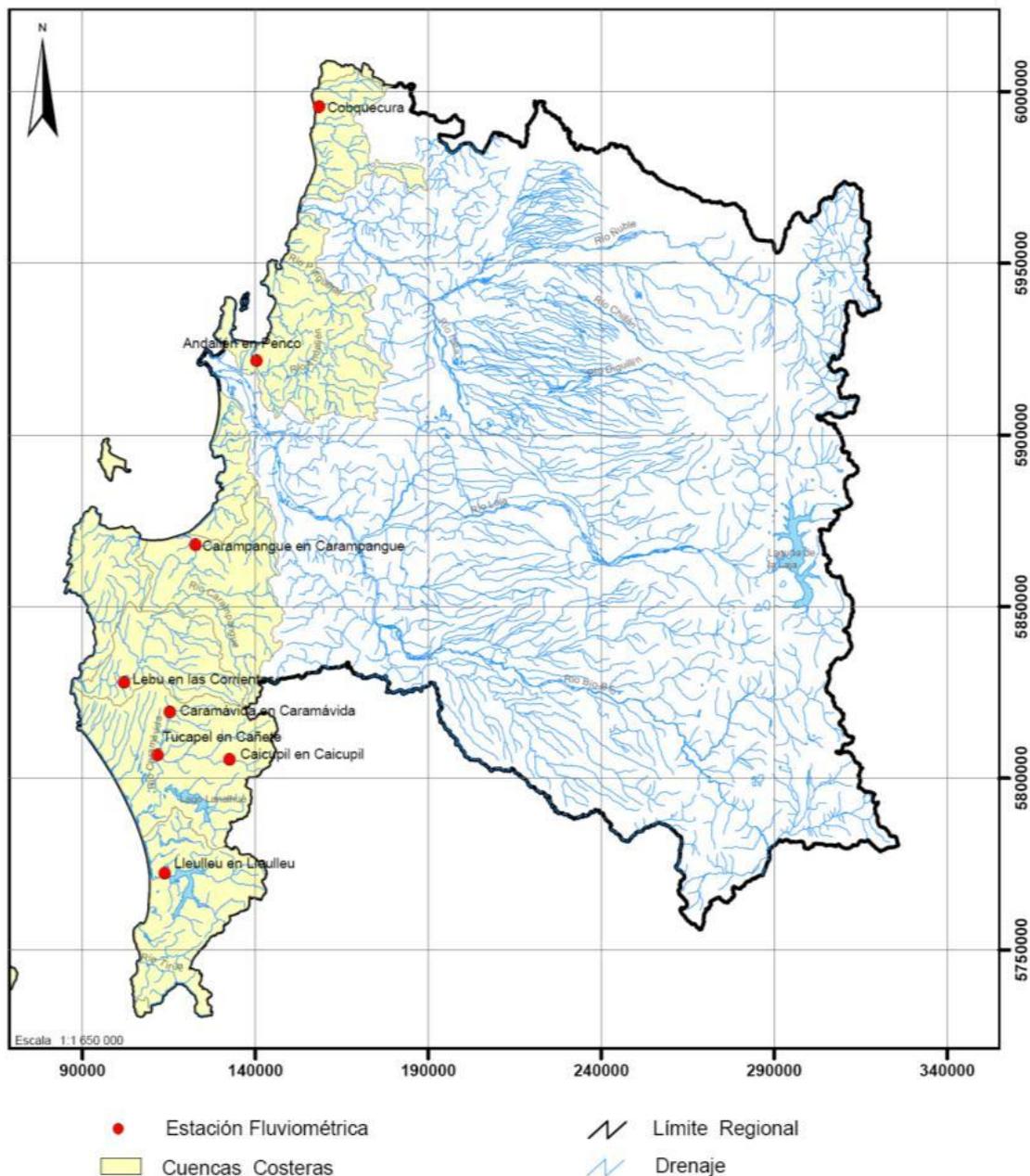


Figura 14. Ubicación de estaciones fluviométricas: Cuencas costeras VIII Región

Disponiendo de la información rellena tanto de caudales como de precipitaciones, se procede a la generación sintética de caudales, mediante el modelo MPL, los que se presentan en la En la Tabla 7 del Anexo 6.

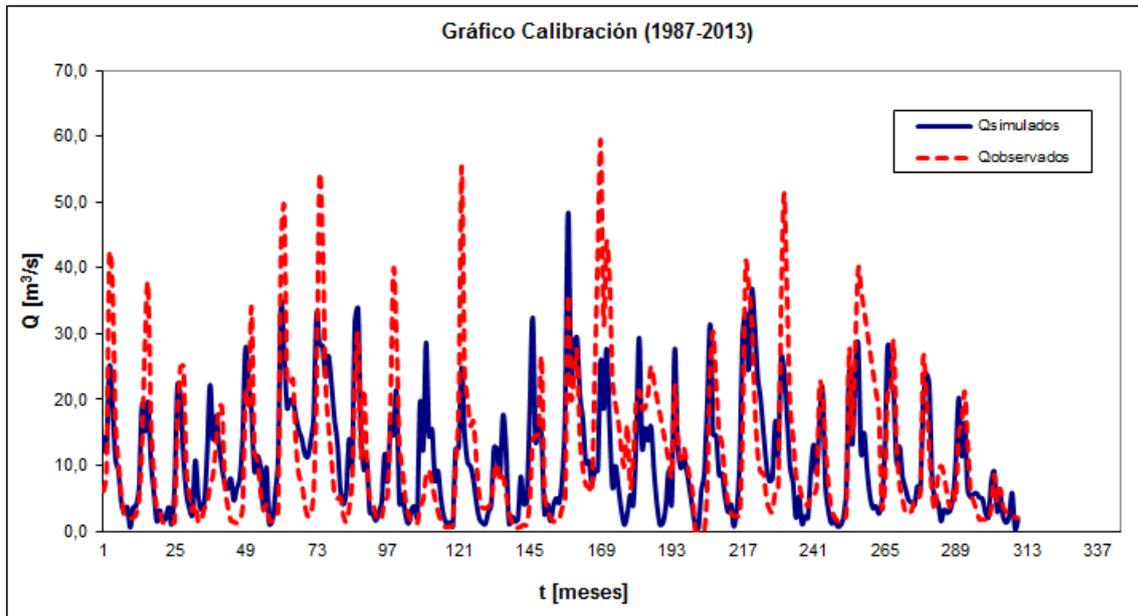


Figura 15. Ajuste de caudales cuenca patrón (código 082)

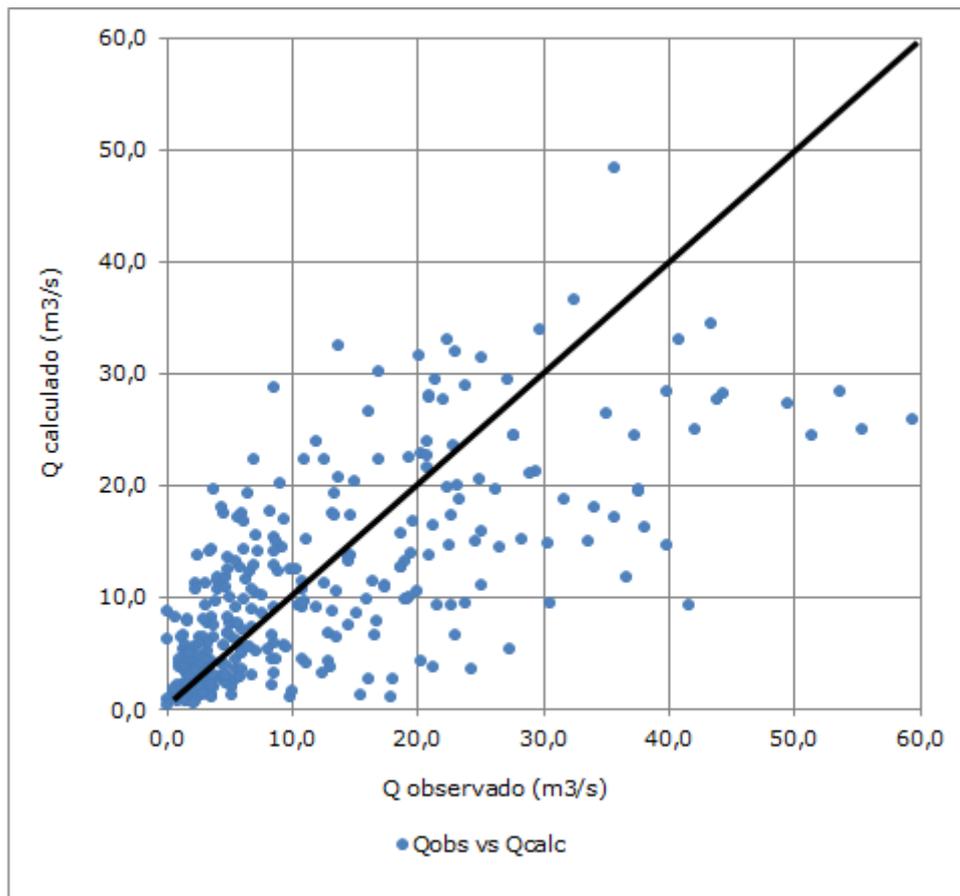


Figura 16. Caudal observado vs calculado en cuenca patrón (código 082)

En la Tabla 18, se presentan las producciones promedio de las cuencas costeras de la Octava Región.

Tabla 18. Producciones promedio Cuencas Costeras VIII Región (m<sup>3</sup>/s)

Código Cuenca	80	82	82-2	84	84-2	85	86	87	88	89	89-2
Área (km <sup>2</sup> )	616	1499	4	364	31	1262	624	858	1696	1339	52
Qm (m <sup>3</sup> /s)	4.5	10.9	0.0	2.2	0.2	6.9	3.4	4.4	8.1	6.5	0.3

### 6.2.2.5. RÉGIMEN HIDROLÓGICO CUENCAS VIII REGIÓN

Disponiendo de la estadística (generada sintéticamente) de mayo de 1987 a febrero de 2013, se construyen los respectivos autocorrelogramas (ver Tabla 8 del Anexo 6).

En la Figura 17, se presenta el gráfico del autocorrelograma de dos series de caudales medios mensuales (todas las otras series de caudales presentan la misma estructura). Se observa claramente el ciclo de 12 meses.

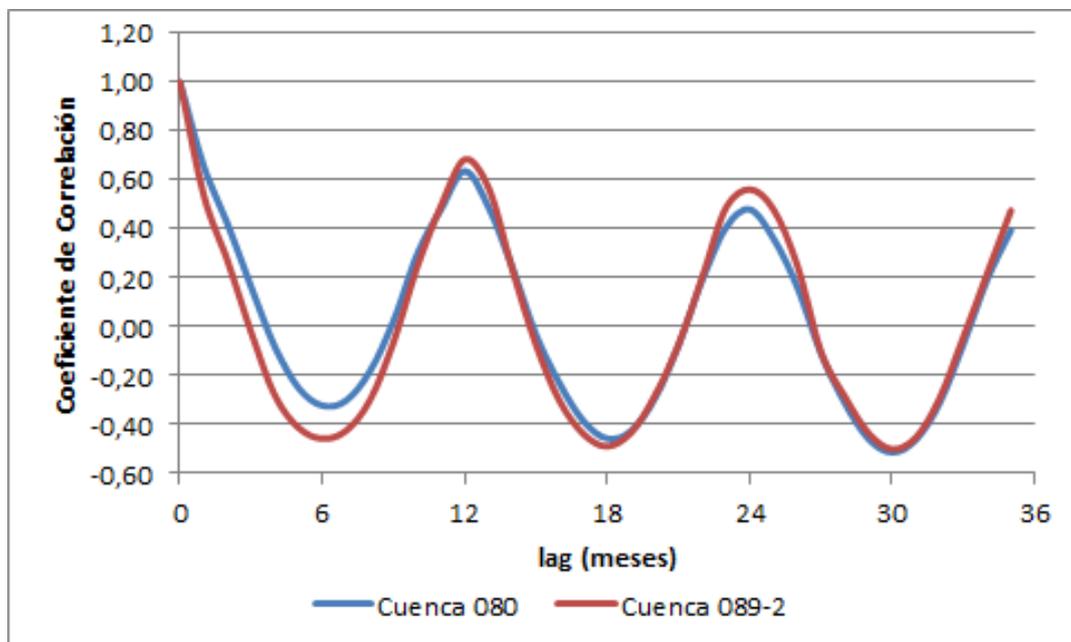


Figura 17. Autocorrelograma caudales cuencas costeras VIII Región

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 las series representadas la regulación que

presentan las cuencas es de tres (3) meses. Por lo tanto, los acuíferos asociados a estas cuencas hidrográficas, presentarán una regulación superior a tres (3) meses, por el efecto de almacenamiento del acuífero.

## **7. RECONOCIMIENTO DE TERRENO**

A los efectos de aclarar y mejorar en el conocimiento de los procesos hidrológicos que dan lugar en el acuífero, permitiendo obtener un modelo conceptual más adecuado a la realidad, además de obtener una correcta estimación de los usos y demandas, así como para definir las equipotenciales piezométricas del acuífero, se ha realizado una campaña exhaustiva de terreno conformada por un catastro de las captaciones subterráneas existentes en la zona de estudio (sondajes, punteras, etc.), en la cual se tomaron medidas de piezometría y calidad. Por otro lado se realizó una campaña de prospección geofísica en los acuíferos de Nilahue y Talcahuano, así como unos aforos en los principales cursos fluviales de dichos acuíferos (estero Nilahue y río Andalién).

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

### **7.1. CUENCAS COSTERAS DE LA VI REGIÓN (ENTRE R. RAPEL Y E. NILAHUE)**

#### **7.1.1. CATASTRO DE CAPTACIONES**

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 para su análisis en laboratorio.

En esta cuenca se catastraron 197 puntos de agua 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, explotación y uso del agua.

Se tomaron 164 medidas del nivel estático y 26 registros de calidad.

Se prestó especial atención al acuífero del estero Nilahue, ya que es el acuífero de mayor entidad de la cuenca costera en estudio, y donde se concentra la principal demanda hídrica y las explotaciones.

Las captaciones catastradas fueron de mayor entidad que las del catastro anterior, siendo el caudal de bombeo medio de unos 11,65 l/s, con pozos de hasta 50 y 70 l/s de bombeo.

El volumen de explotación encuestado total asciende a 21.940.065 m<sup>3</sup>/año, equivalentes a 671,28 l/s. No obstante, debido a las encuestas realizadas, se estima que el volumen de explotación puede ser de en torno a un 15% más, lo que situaría el volumen anual de explotación en 25,23 hm<sup>3</sup>/año (771,97 l/s).

### 7.1.1.1. IDENTIFICACIÓN PUNTOS CATASTRADOS

En la Tabla 9 del Anexo 6 se incluyen los datos básicos identificativos de los puntos catastrados en la cuenca costera de la VI Región, los cuales se grafían en la figura siguiente.

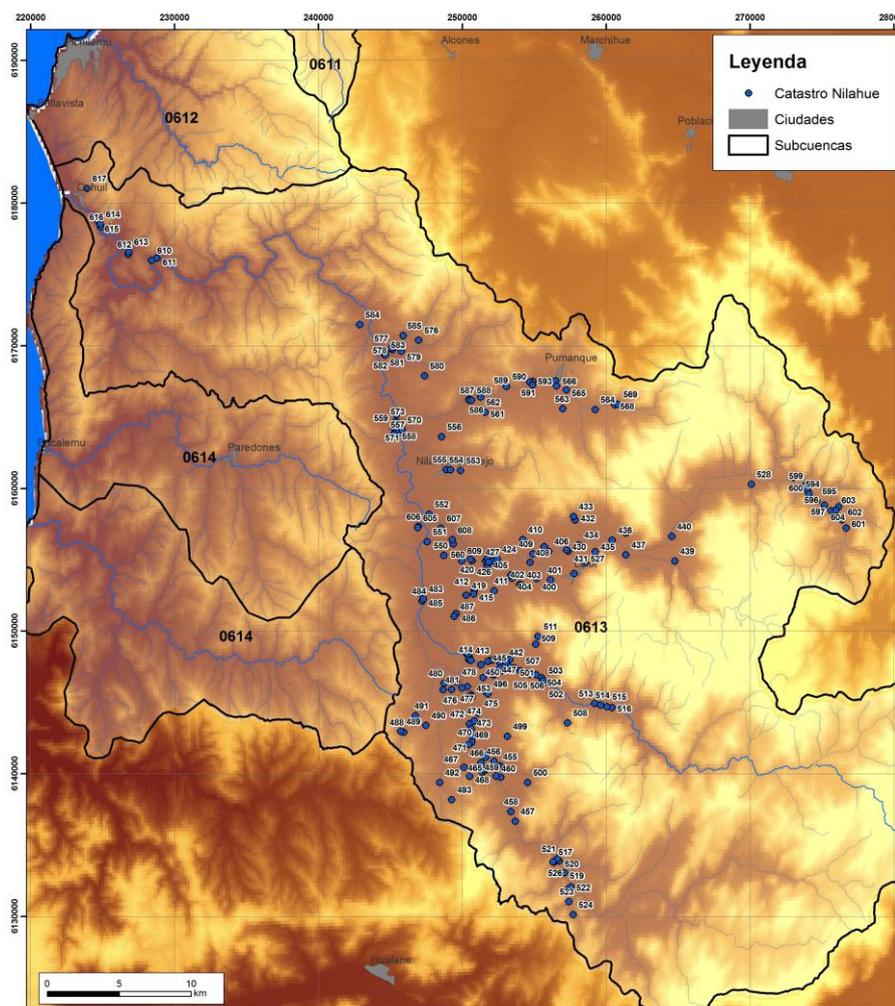


Figura 18. Puntos de agua catastrados en la cuenca costera entre R. Rapel y E. Nilahue (acuífero de Nilahue)

### **7.1.1.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

En la Tabla 10 del Anexo 6 se incluyen las características técnicas de los puntos de agua catastrados, tales como tipo de punto, profundidad de perforación, profundidad de habilitación, diámetros, potencia y tipo de bomba, etc.

### **7.1.2. PIEZOMETRÍA Y CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS**

En la Tabla 11 del Anexo 6 se incluyen las características hidráulicas y los registros de nivel piezométrico en estático y en dinámico tomados durante la campaña de terreno realizada entre el 21 de agosto y el 13 de septiembre de 2013.

En la Figura 19 se muestra la distribución geográfica de las medidas de nivel piezométrico en estático tomadas durante la campaña de terreno.

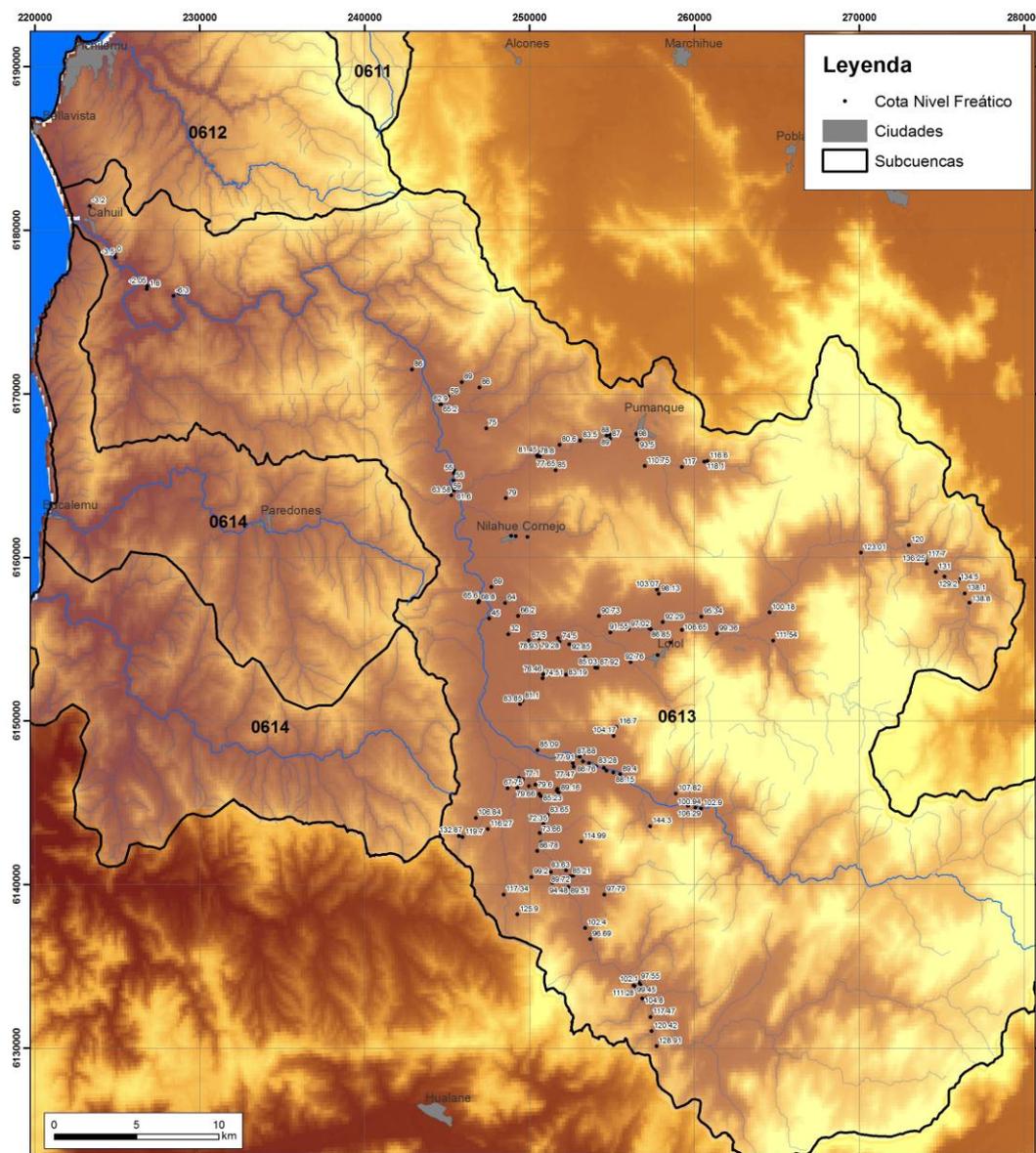


Figura 19. Cotas de nivel freático medidas durante la campaña de terreno entre agosto y septiembre de 2013. Cuenca costera entre R. Rapel y E. Nilahue (acuífero de Nilahue).

### 7.1.3. CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA

Durante la campaña de terreno se registraron "in-situ" la conductividad, pH y temperatura del agua en 23 puntos distintos. De forma complementaria, se tomaron 5 muestras de agua subterránea y otras 5 de agua superficial para su análisis de elementos mayoritarios en laboratorio (resultados en Anexo 1).

Tabla 19. Calidad química. Catastro terreno Cuenca Costera entre Rapel y  
Nilahue

Nº Pozo	Conduct. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Fecha registro
435	178	8,78	17,7	26-ago-13
454	359	8,46	20	27-ago-13
466	460		17,7	28-ago-13
490	399	8,44	12,4	02-sep-13
492	113	8,21	12,5	03-sep-13
497	177	7,84	20,07	03-sep-13
498	153	7,06	17,02	03-sep-13
500	312	7,48	17,3	03-sep-13
507	149	7,6	17	04-sep-13
510	269	7,58	18,3	04-sep-13
514	446	7,73	18	04-sep-13
582	342	8,1	14,9	05-sep-13
584	580	8,3	16,8	05-sep-13
585	433	8,05	20,9	05-sep-13
589	355	7,6	16,6	05-sep-13
590	650	7,51	15,5	05-sep-13
595	307	8,6	17,8	09-sep-13
605	593	7,8	19,6	09-sep-13
608	404	7,8	17,7	09-sep-13
612	1754	8,2	17	10-sep-13
614	201	8,4	16,9	10-sep-13
616	867	8,18	18,2	10-sep-13
617	524	8,4	17,2	10-sep-13

En la Figura 20 se encuentran los puntos de agua en los cuales se han tomado los parámetros de calidad "in-situ" así como los resultados obtenidos.

En el apartado de caracterización hidroquímica (8.2.8) se incluyen gráficas de Piper y Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas.

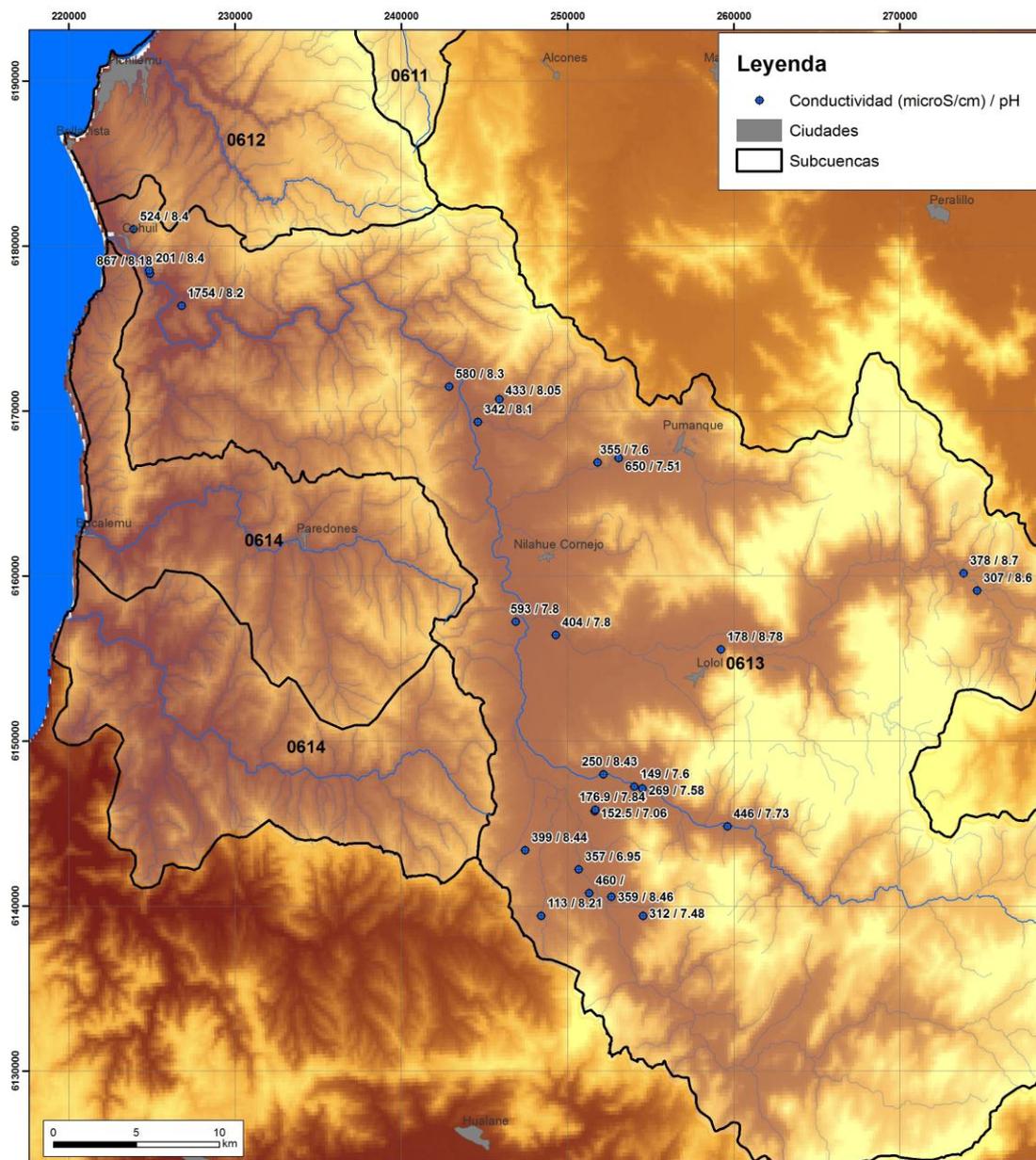


Figura 20. Parámetros de calidad medidos durante la campaña de terreno. Cuenca costera entre R. Rapel y E. Nihahue (acuífero de Nihahue).

#### 7.1.4. USOS Y DEMANDAS

El principal uso del agua en la zona de estudio es el regadío, concretamente para viñedos, y en menor proporción pero también importante para los frutales. Otros usos son para abastecimiento y ganado.

Se incluye en la Tabla 12 del Anexo 6 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 y los volúmenes de explotación anuales. El estado de las captaciones puede ser en Uso (U), Abandonado (FU) o Reserva (RS). Los tipos de uso son: Abastecimiento (A), Riego (R) y Ganado (G).

En la Figura 27 se han representado las captaciones catastradas cuya simbología es proporcional al volumen de explotación anual.

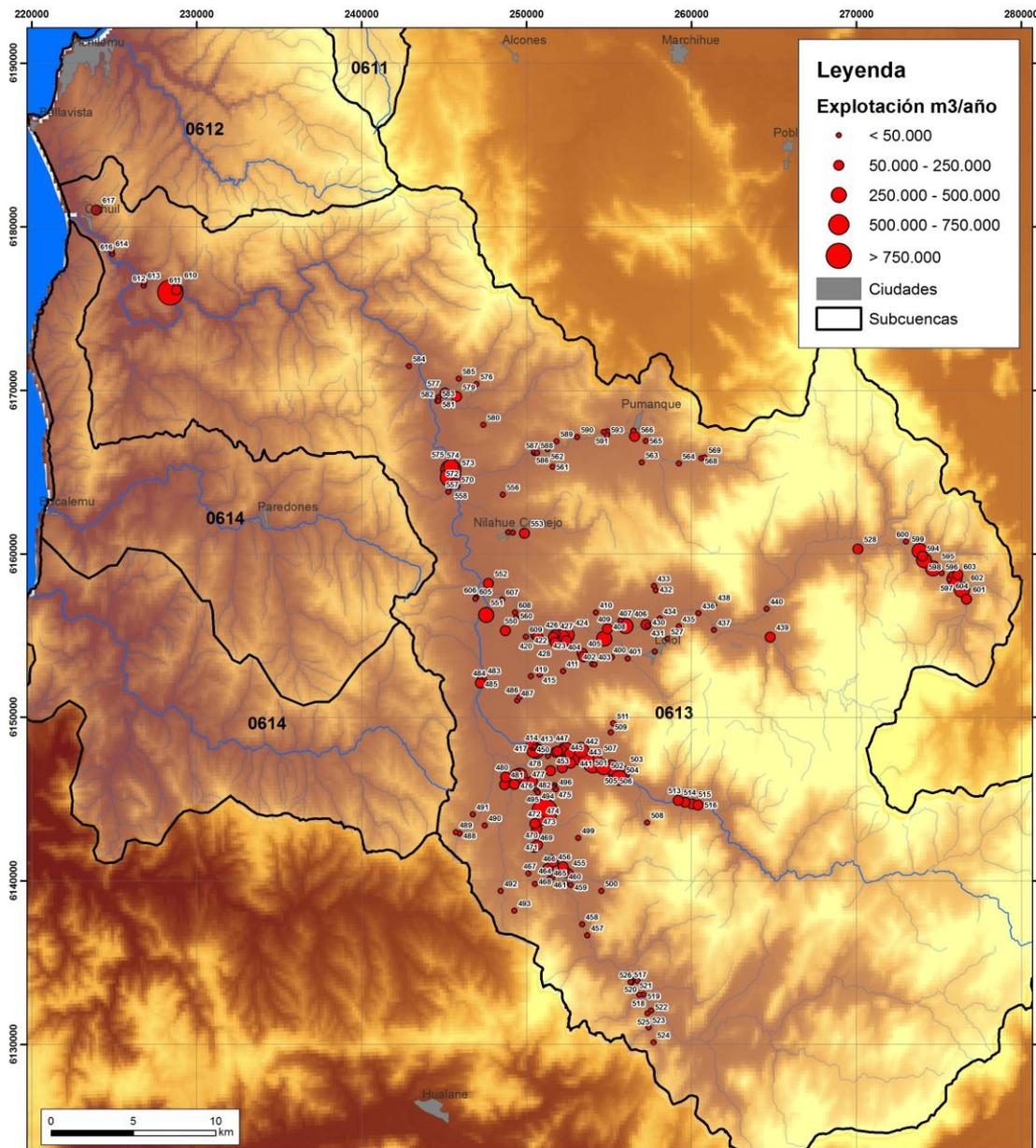


Figura 21. Volumen de explotación catastrado en la cuenca costera entre R. Rapel y E. Nilahue (acuífero de Nilahue)

### 7.1.5. CAMPAÑA DE AFOROS

Se ha realizado una campaña de aforos y calidad del agua del estero Nilahue, en la cual se tomaron 6 puntos en septiembre y otros 6 en octubre.

Los resultados y localización de los puntos aforados se incluyen a continuación:

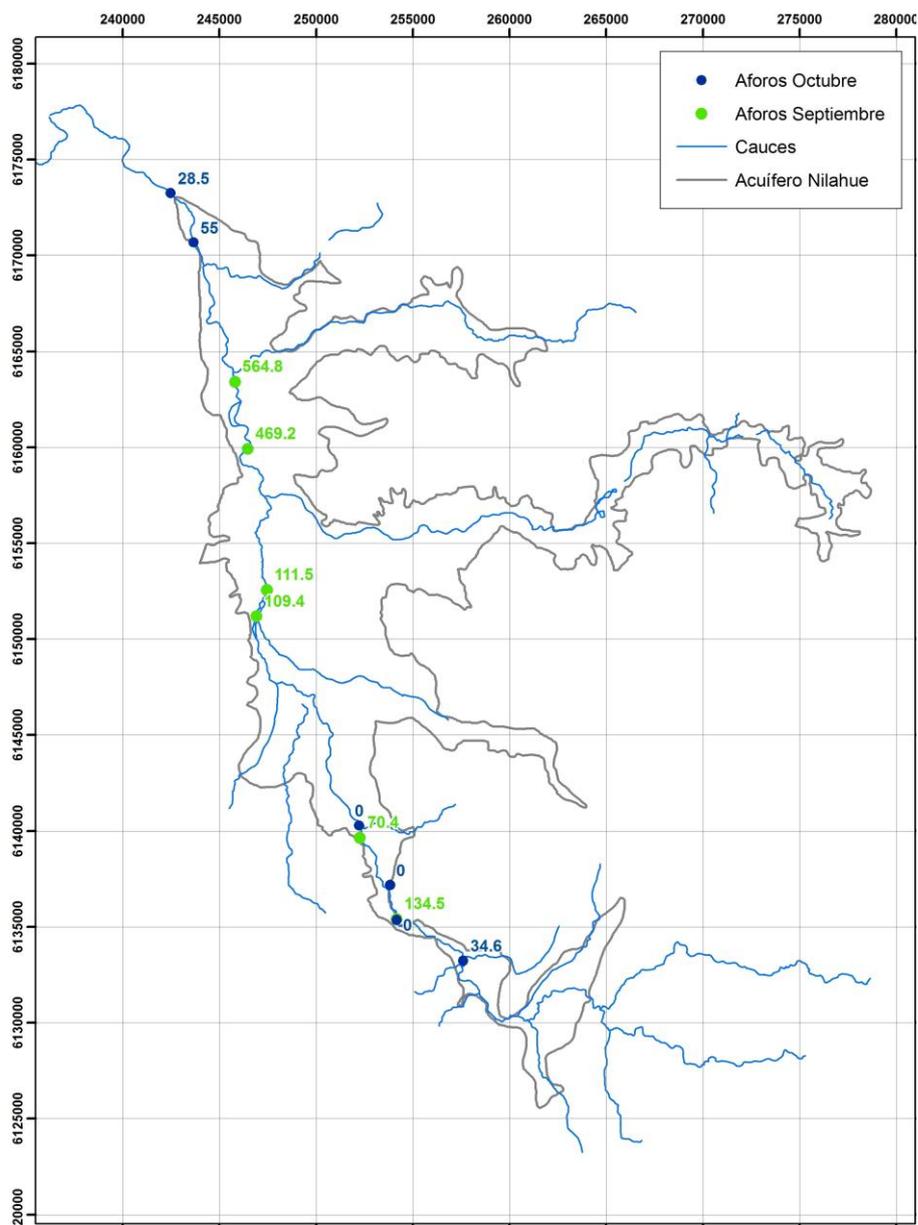


Figura 22. Aforos realizados en el Estero Nilahue

Tabla 20. Resultados de aforos y parámetros de calidad de Octubre

Código Punto	Q (l/s)	Conductividad (μS/cm)	pH	Temp (°C)	Fecha	X	Y
1	34,6	243	7,9	23	23-10-2013	257611	6133240
3	0	-	-	-	23-10-2013	253809	6137180
5	0	-	-	-	23-10-2013	252224	6140290
10	55	280	7,48	19	23-10-2013	243656	6170690
11	28,5	210	16,4	7,8	23-10-2013	242476	6173260
22	0	-	-	-	23-10-2013	254167	6135370

Tabla 21. Resultados de los aforos realizados en Septiembre

Código Punto	Q (l/s)	Conductividad (μS/cm)	pH	Temp.	Fecha	X	Y
2	134,6	235	7,14	17,3	12-09-2013	254168	6135410
4	70,4	305	7,04	15,7	12-09-2013	252255	6139650
6	109,4	223	7,25	16,4	12-09-2013	246919	6151180
7	111,6	238	7,44	16,1	12-09-2013	247444	6152570
8	469,2	297	7,55	15,8	12-09-2013	246463	6159920
9	564,9	302	7,28	16,7	12-09-2013	245797	6163420

Cabe destacar que los valores nulos obtenidos (puntos 3, 5 y 22 con caudal 0 l/s) corresponden a zonas del cauce seco, sin caudal de flujo ni agua embalsada.

En la Figura 23 se muestra la relación entre el estero Nilahue y el acuífero, obtenida a partir de la interpretación de los aforos realizados. Cabe destacar que a pesar de haber realizado los aforos en días distintos, la relación estero-acuífero se ha establecido comparando aforos de la misma fecha, y comprobando la existencia o no de aportes en afluentes. No obstante, entre los puntos 9 y 10 no ha sido posible establecer dicha relación a partir de los datos de aforo por no haber medida en el mismo día.

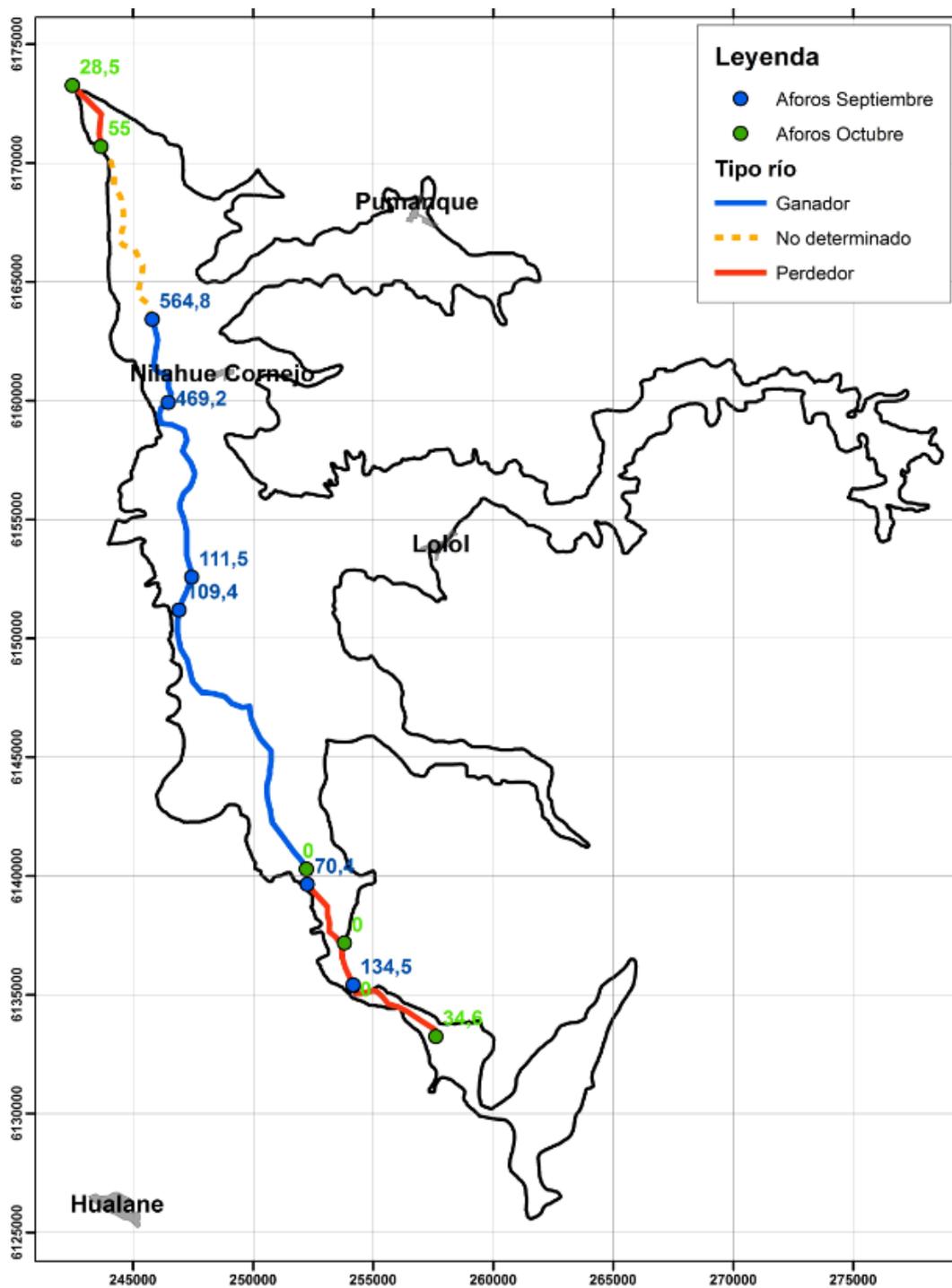


Figura 23. Relación río-acuífero en el acuífero Nilahue

## **7.2. CUENCAS COSTERAS VIII REGIÓN (ENTRE ITATA Y BIOBÍO)**

### **7.2.1. CATASTRO DE CAPTACIONES**

En la VIII Región el reconocimiento de terreno fue realizado en la cuenca costera entre río Itata y río Biobío, donde se catastraron 53 puntos de agua 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.

Se tomaron 43 medidas del nivel estático y 15 registros de calidad.

Se prestó especial atención al acuífero detrítico ubicado entre las bahías de Concepción (norte) y de San Vicente (oeste) y el río Biobío, puesto que es el acuífero de mayor entidad de la cuenca costera en estudio (acuífero de Talcahuano).

Las captaciones catastradas son en general de pequeña entidad, donde el mayor caudal de explotación registrado es de 30 l/s, y el caudal medio de 2,28 l/s. La mayor parte de los puntos no superan los 2 l/s de caudal de bombeo.

Respecto a las profundidades de perforación, todas las captaciones se encuentran por debajo de los 25 m de profundidad, excepto una que alcanza los 60 m.

El volumen de explotación encuestado total asciende a 790.000 m<sup>3</sup>/año, equivalentes a 25,05 l/s.

#### **7.2.1.1. IDENTIFICACIÓN PUNTOS CATASTRADOS**

Se incluyen en la Tabla 13 del Anexo 6 los datos básicos identificativos de los puntos catastrados en la cuenca costera de la VIII Región. Las coordenadas están tomadas en UTM WGS84, huso 18S.

En la Figura 24 se observa la distribución geográfica de los puntos catastrados.

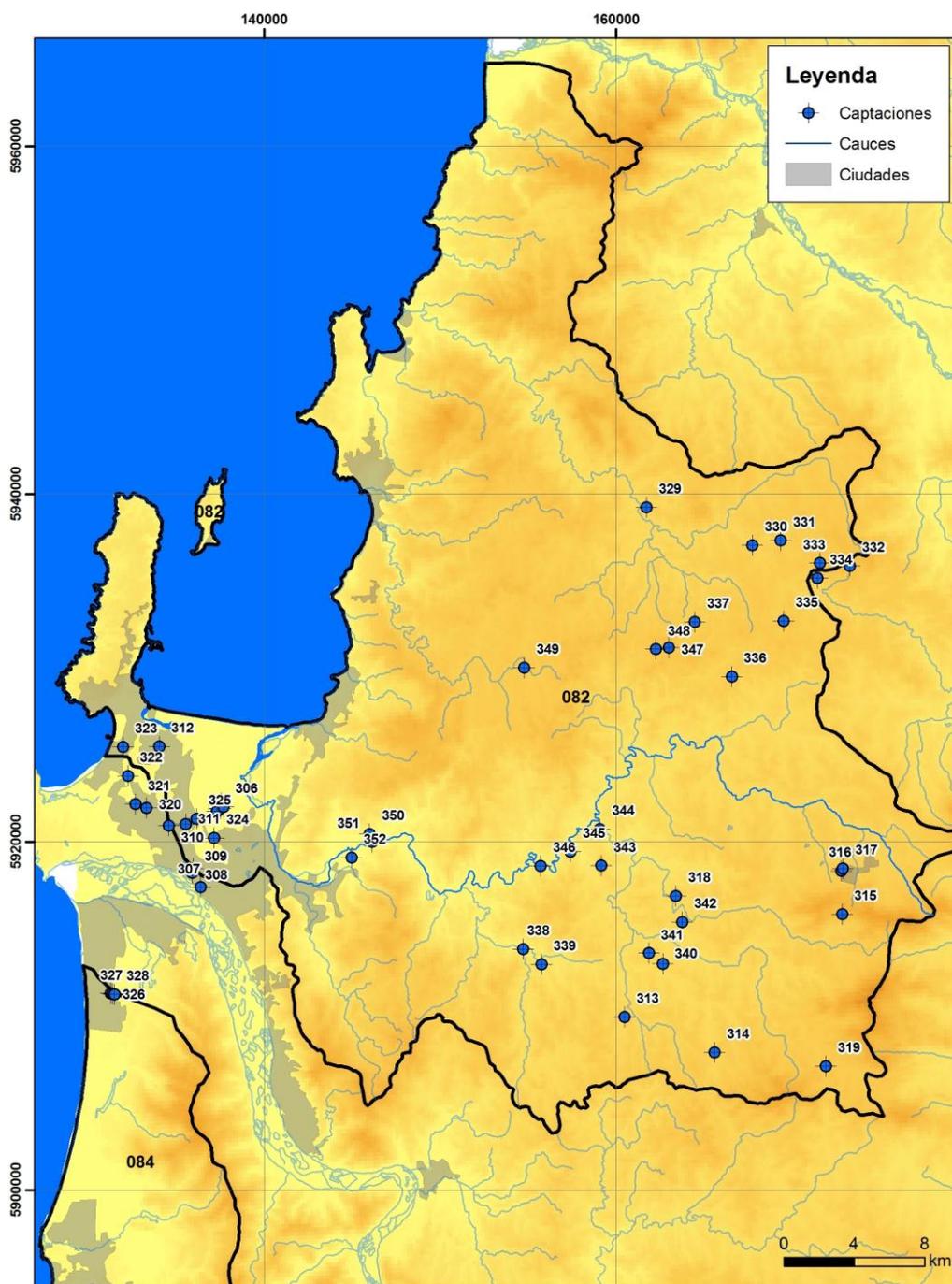


Figura 24. Puntos de agua catastrados en la cuenca costera entre Itata y Biobío

### 7.2.1.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Se incluyen, en la Tabla 14 del Anexo 6, las características técnicas de los puntos de agua catastrados, tales como tipo de punto, profundidad de perforación, profundidad de habilitación, diámetros, potencia y tipo de bomba, etc.

## 7.2.2. PIEZOMETRÍA Y CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Se incluyen, en la Tabla 15 del Anexo 6, los registros de nivel piezométrico en estático y en dinámico tomados durante la campaña de terreno realizada entre el 13 y el 21 de agosto de 2013. Adicionalmente, se encuentran los caudales de bombeo y el caudal específico calculado en base a la información obtenida en terreno.

En la Figura 25 se han representado las cotas de nivel piezométrico estático medidos durante la campaña de terreno.

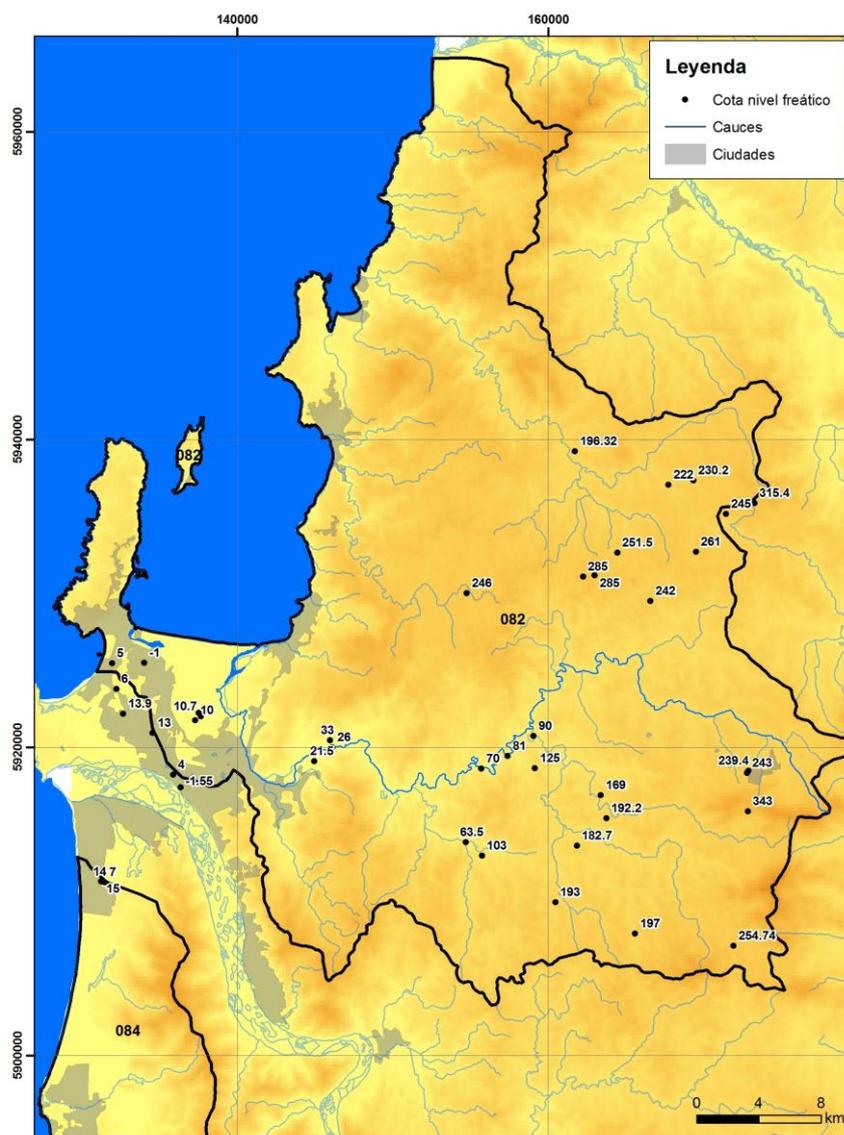


Figura 25. Cotas de nivel freático medidas durante la campaña de terreno en agosto de 2013. Cuenca costera entre R. Itata y R. Biobío

### 7.2.3. CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA

Durante la campaña de terreno se registraron "in-situ" la conductividad, pH y temperatura del agua en 16 puntos distintos, no alcanzando a tomar los 20 requeridos por imposibilidad de tomar muestras de agua en muchos de los puntos visitados, además de que existen pocos puntos de agua en esta cuenca.

Tabla 22. Calidad química. Catastro terreno Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío

Nº Pozo	Cond. (µS/cm)	pH	Temp. (°C)	Fecha visita
301	478	7,3	15,5	13-ago-13
307	511	7,3	14,9	14-ago-13
310	352	7,6	14,5	14-ago-13
312	612	7,32	17,4	14-ago-13
314	88,8	7,2	16,8	15-ago-13
318	146,8	7,02	13,7	15-ago-13
327	178	8,5	11,9	16-ago-13
333	115	8,17	19,2	17-ago-13
334	59	7,1		17-ago-13
336	100	7,5	16,8	17-ago-13
337	77,3	7,15	15,2	19-ago-13
338	171	6,83	16,3	19-ago-13
339	302	6,94	18,7	19-ago-13
342	144,5	6,53	17,5	19-ago-13
950	>20000	7,9	10,5	20-ago-13
951	>20000	7,8	10,3	20-ago-13

En la Figura 26 se han representado los puntos de agua con la información obtenida "in-situ" respecto a la calidad química del agua.

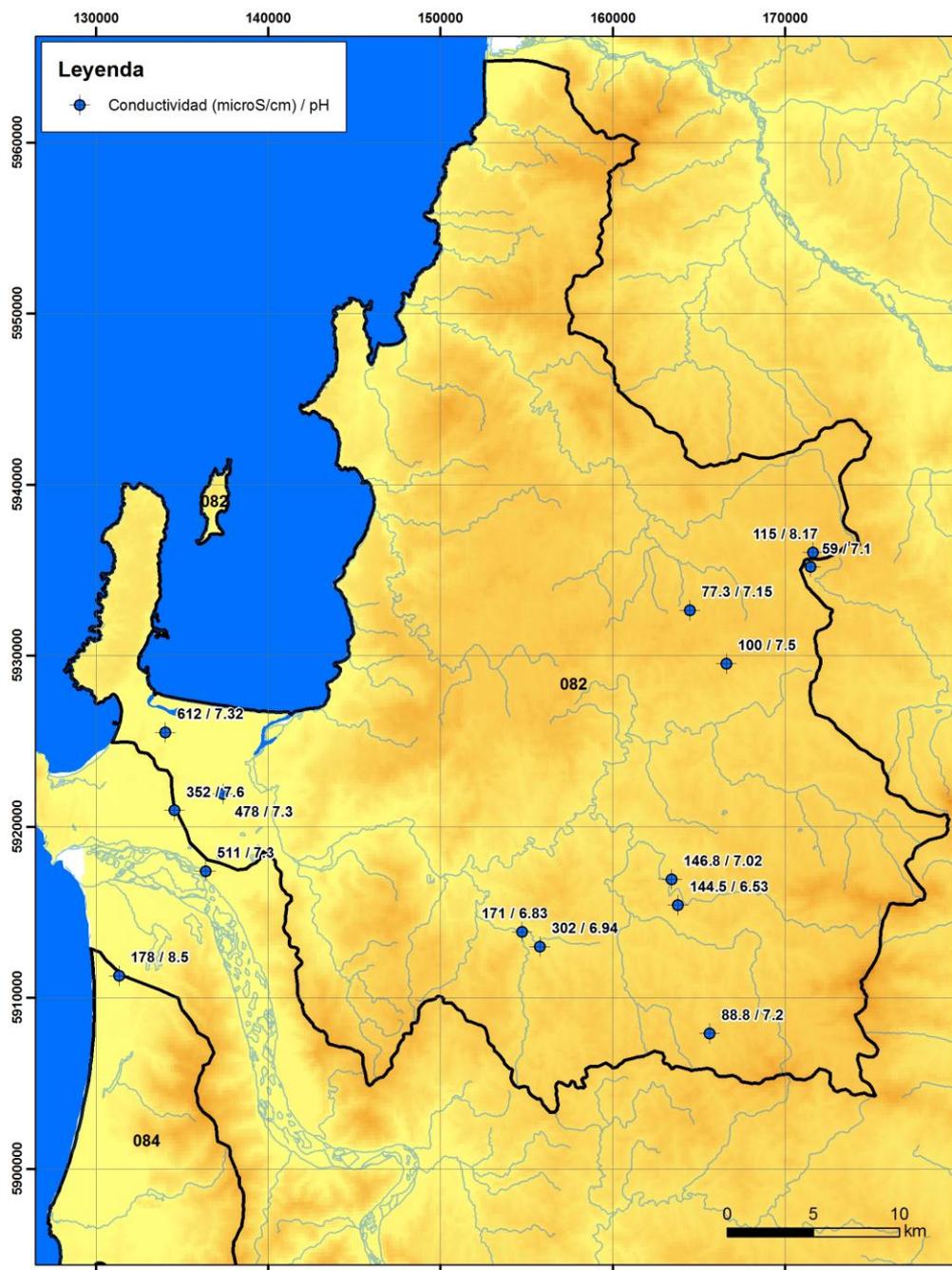


Figura 26. Parámetros de calidad medidos durante la campaña de terreno en agosto de 2013. Cuenca costera entre R. Itata y R. Biobío

#### 7.2.4. USOS Y DEMANDAS

En esta cuenca el uso del agua principal es para abastecimiento e industrial, el uso para regadío está limitado a pequeñas zonas de cultivos o pequeños huertos.

Se incluye en la Tabla 16 del Anexo 6 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 y los volúmenes de explotación anuales. El estado de las captaciones puede ser en Uso (U), Abandonado (FU) o Reserva (RS). Los tipos de uso son: Abastecimiento (A), Riego (R), Ganado (G) y Doméstico (D). En la Figura 27 se presentan los puntos de agua catastrados cuyo símbolo es proporcional al volumen de explotación anual.

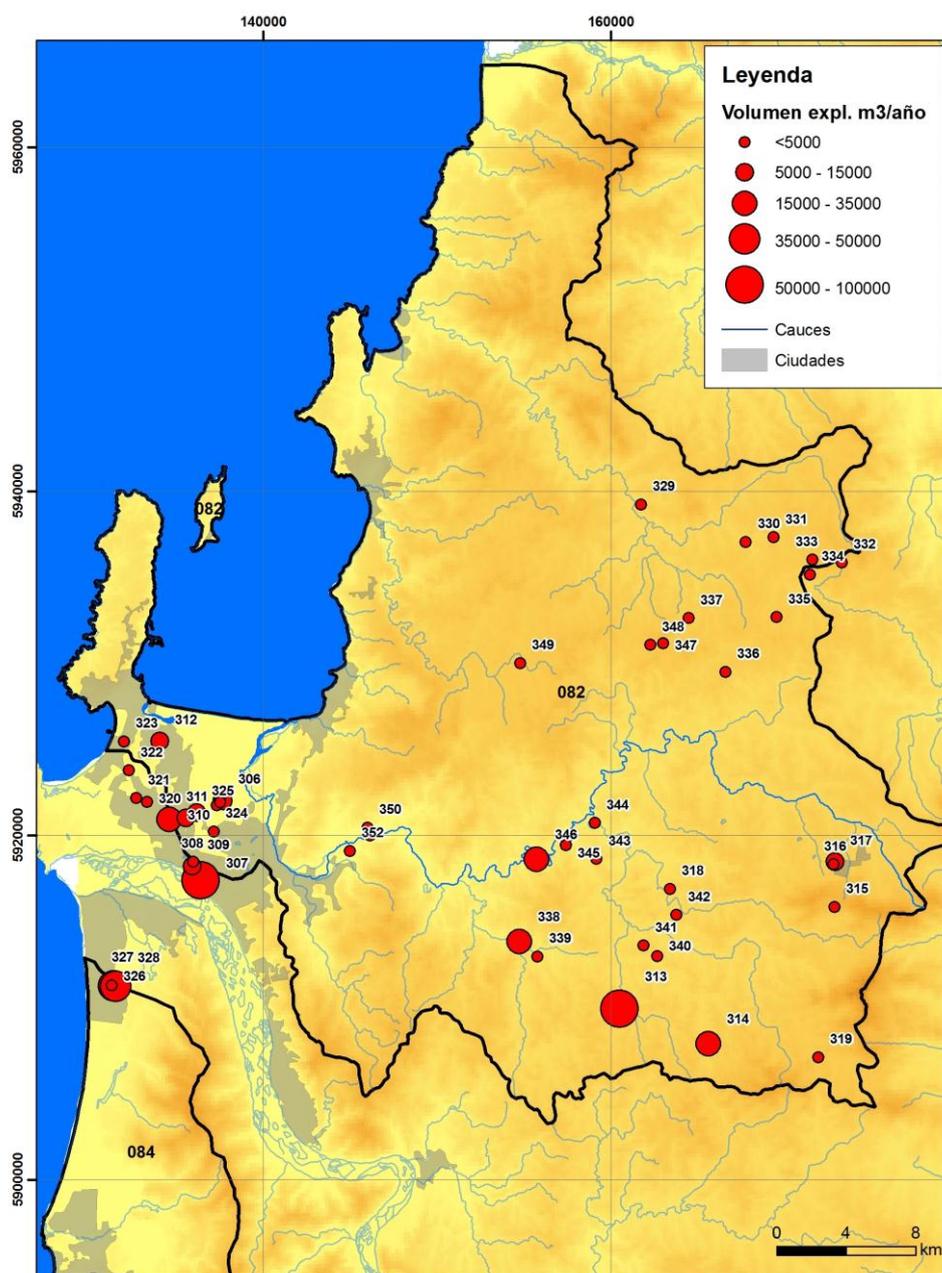


Figura 27. Volumen de explotación catastrado en la cuenca costera entre R. Itata y R. Biobío

## 7.2.5. CAMPAÑA DE AFOROS

Se ha realizado una campaña de aforos y calidad del agua en el río Andalién conformado con 10 puntos de medida, con valores de caudal en el río Andalién comprendidos entre los 3,39 m<sup>3</sup>/s justo aguas abajo de la confluencia con el Estero Nonguén, hasta valores de 1,63 m<sup>3</sup>/s e incluso caudal próximo a cero (no detectado por el molinete hidráulico).

Los puntos aforados, así como los valores de caudal obtenidos se incluyen a continuación:

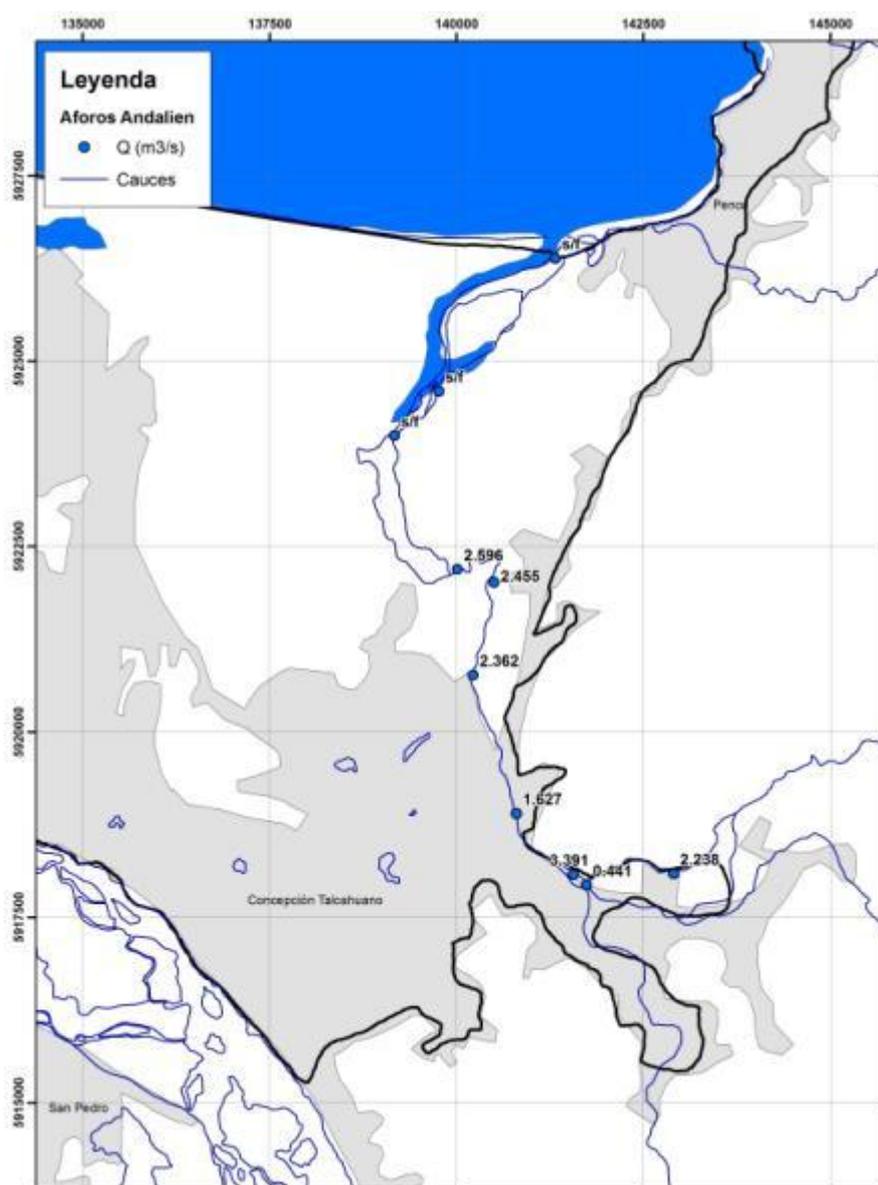


Figura 28. Localización de puntos aforados

Tabla 23. Resultados de los puntos aforados en el río Andalién y en el Estero Nonguén

Punto	Río	Coordenadas				Aforo				Calidad de Aguas		
		Original		Terreno		Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Sección (m)	Hora	Fecha	pH	T (°C)	CE (mS/cm)
		Este	Norte	Este	Norte							
1	Andalién	676883	5923747	676803	5923782	3,391	34,0	13:35	27-10-2013	8,01	21,8	0,13
2	Andalién	676057	5924680	676093	5924652	1,627	5,7	12:15	27-10-2013	10,98	18,3	0,12
3	Nonguen	676967	5923590	676965	5923631	0,441	5,0	13:15	27-10-2013	7,60	20,4	0,13
4	Andalién	675635	5926593	675634	5926548	2,362	11,0	11:00	27-10-2013	7,45	13,9	0,13
5	Andalién	678156	5923754	678138	5923709	2,238	17,0	14:30	27-10-2013	7,48	19,4	0,09
6	Andalién	676032	5927846	675992	5927778	2,455	18,0	15:35	27-10-2013	7,61	21,2	0,15
7	Andalién	675598	5928013	675510	5927983	2,596	23,5	17:00	27-10-2013	7,04	22,1	0,16
8	Andalién	674806	5929888	674783	5929832	s/f	42,0	17:50	27-10-2013	3,93	17,7	0,43
9	Andalién	675393	5930484	675413	5930396	s/f	110,0	18:35	27-10-2013	8,67	20,5	2,95
10	Andalién	677039	5931967	677083	5932085	s/f	86,0	19:20	27-10-2013	7,66	17,8	>20

s/f: sin flujo

Mencionar que los puntos clasificados como "sin flujo" corresponden a zonas de agua embalsada, con velocidad cercana a cero donde el molinete hidráulico no puede detectar la velocidad de flujo por estar fuera del rango de medida. En estos puntos si se pudo tomar los parámetros de calidad química.

## **7.3. ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA**

### **7.3.1. INTRODUCCIÓN**

Con el objetivo de servir de apoyo para la caracterización geológica y geométrica, que permita una mejor elaboración de los modelos matemáticos de los principales acuíferos de las Cuencas Pluviales Costeras entre el río Rapel y el estero Nilahue (acuífero Nilahue) por un lado, y de la Cuenca Costera entre el río Itata y Biobío (acuífero de Talcahuano) por otro, 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 de los acuíferos en los distintos puntos investigados, además de detectar distintas formaciones geológicas que conforman el relleno sedimentario suprayacente.

### **7.3.2. 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 los acuíferos 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 como el de mejor viabilidad en el proceso ejecutivo.

Puesto que la geología de ambos acuíferos corresponde a un relleno sedimentario no consolidado que descansa sobre un basamento intrusivo, metamórfico y/o volcano-sedimentario, materiales que presentan fuertes contrastes de resistividad eléctrica, hace 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, en el acuífero de Talcahuano, 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 las zonas de estudio, se desestimó debido a las dimensiones de los acuíferos, 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.

### 7.3.3. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

Los sondeos eléctricos verticales SEVs son una técnica geofísica perteneciente al grupo de los métodos eléctricos en corriente continua (geoeléctrica). 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 1.

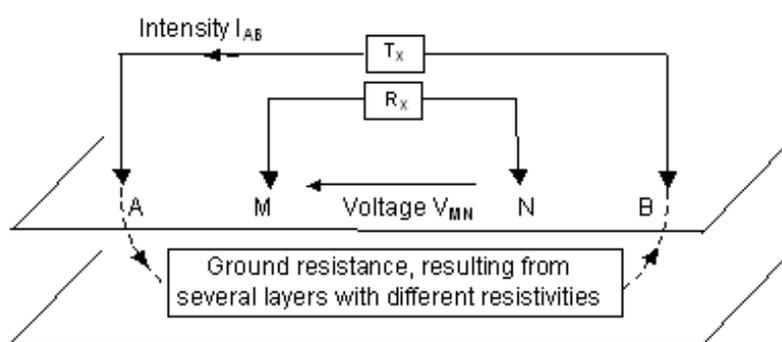


Figura 29. Distribución de cuadrípolos para un dispositivo simétrico de prospección geoelectrica.

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 2).

**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 30. 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 31).

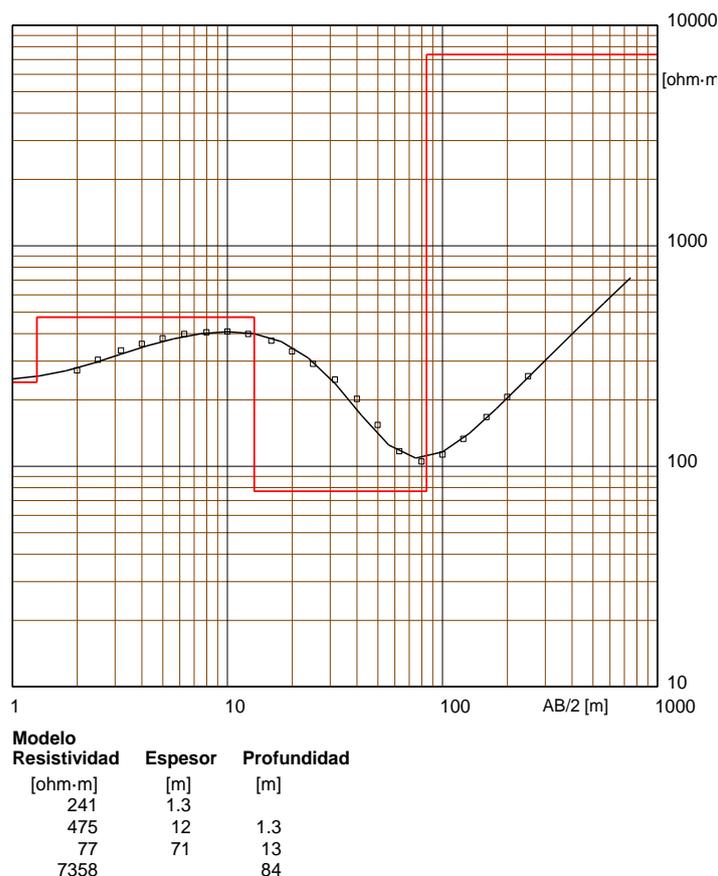


Figura 31. Inversión de sondeo eléctrico vertical SEV.

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 32. Equipo geoelectrico Syscal R1 Plus SW72 (Iris Instruments).

#### 7.3.4. CAMPAÑA DE TERRENO

La realización del trabajo de terreno se ejecutó siguiendo el 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.

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.

### 7.3.4.1. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO RAPEL Y ESTERO NILAHUE (ACUÍFERO NILAHUE)

En este acuífero se realizó un total de 23 sondeos eléctricos verticales (SEVs) con AB comprendidos entre 500 y 1000 metros (en función de la disponibilidad espacial y de la detección o no del basamento).

La ubicación de los mismos sobre fotografía aérea se incluye en el Plano 1 y en la Figura 33 sobre el mapa geológico.

En la Tabla 24 se incluye la ubicación de cada SEV en coordenadas UTM WGS84 uso 18S, la cota, longitud AB y orientación de las alas.

Tabla 24. Información sobre los SEVs realizados. Cuenca entre Rapel y Nilahue

ENSAYO	X UTM	Y UTM	Z (msnm)	LONGITUD AB (m)	ORIENTACIÓN
SEV-1	258196	6157203	98	800	S-N
SEV-2	254383	6154586	94	800	S-N
SEV-3	248128	6161141	92	632	SW-NE
SEV-4	246475	6157336	96	632	S-N
SEV-5	249132	6156924	88	632	SE-NW
SEV-6	245100	6170998	80	632	E-W
SEV-7	247799	6167101	106	500	SSW-NNE
SEV-8	245199	6163694	101	500	ENE-WSW
SEV-9	248309	6163966	94	500	ESE-WNW
SEV-10	253943	6166288	108	632	S-N
SEV-11	256680	6167035	109	632	S-N

Tabla 24. Información sobre los SEVs realizados. Cuenca entre Rapel y Nilahue

ENSAYO	X UTM	Y UTM	Z (msnm)	LONGITUD AB (m)	ORIENTACIÓN
SEV-12	258357	6133617	109	500	ENE-WSW
SEV-13	255360	6135032	107	500	SE-NW
SEV-14	252927	6140937	99	800	SW-NE
SEV-15	248638	6146240	93	800	E-W
SEV-16	247929	6143203	116	1000	SSE-NNW
SEV-17	253231	6147043	98	632	S-N
SEV-18	261370	6144707	112	500	S-N
SEV-19	249744	6149925	101	632	SSW-NNE
SEV-20	248173	6152816	86	632	E-W
SEV-21	251022	6152983	92	632	E-W
SEV-22	264421	6155768	115	800	SW-NE
SEV-23	269250	6160695	129	632	SSE-NNW

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 al acuífero.

El trabajo de terreno se desarrolló de acuerdo con lo previsto. Las medidas recogidas, incluso las más alejadas, fueron de alta calidad debido a las buenas resistencias de contacto y el escaso nivel de ruido eléctrico de la zona. Se lograron amplias longitudes de ala AB, alcanzándose el último ascenso a resistivo (basamento) en la totalidad de los emplazamientos.

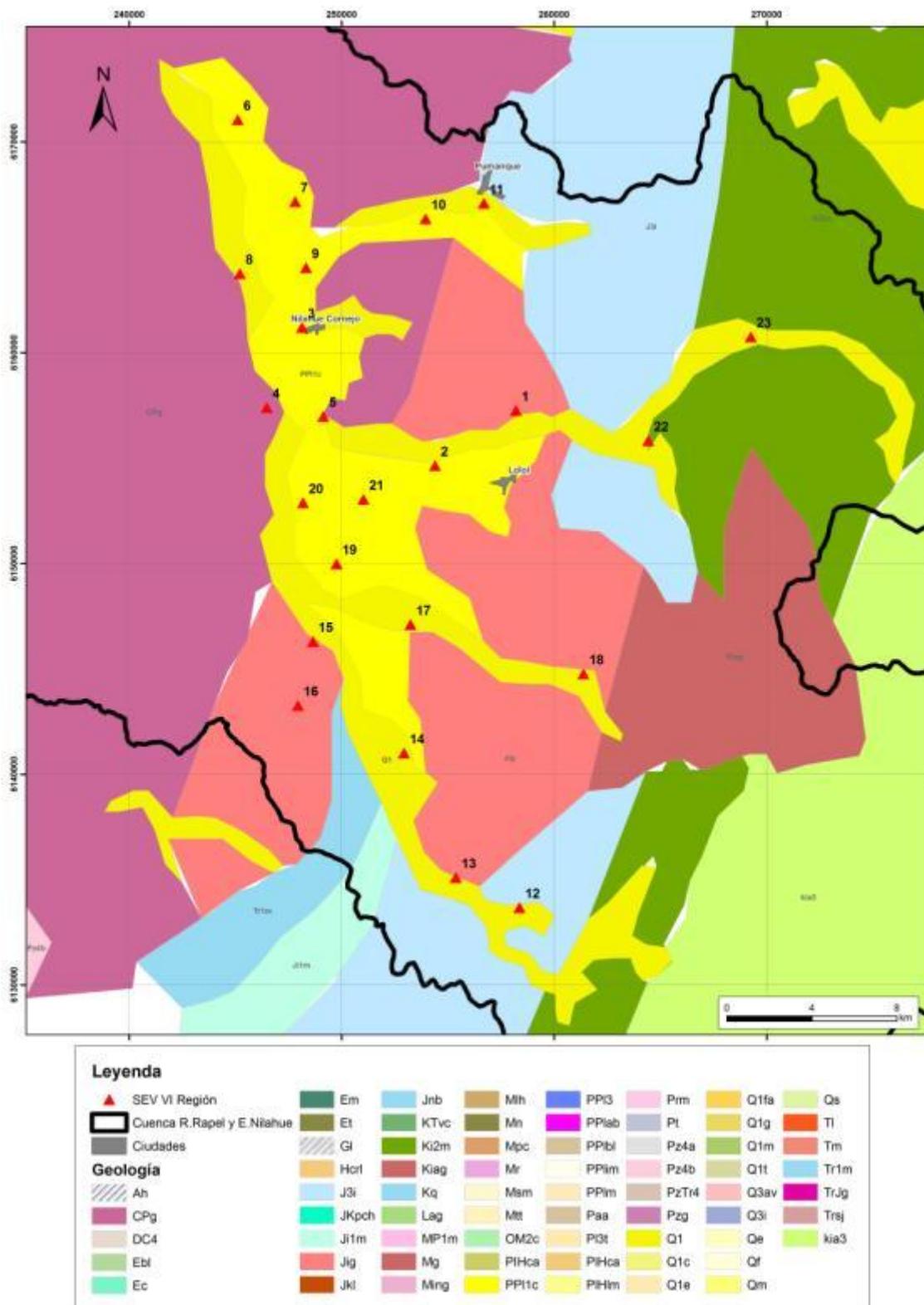


Figura 33. Ubicación de los SEV realizados. Cuenca entre Rapel y Nilahue

### 7.3.4.2. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO ITATA Y RÍO BÍO-BÍO (ACUÍFERO DE TALCAHUANO)

En este acuífero se realizó un total de 22 sondeos eléctricos verticales (SEVs) con AB comprendidos entre 500 y 1000 metros (en función de la disponibilidad espacial, y de la detección o no del basamento).

La ubicación de los sondeos eléctricos se muestra sobre fotografía aérea en el Plano 1, y en la Figura 34 sobre el mapa geológico.

En la Tabla 25 se puede ver la ubicación de cada SEV en coordenadas UTM WGS84 uso 18S, la cota, longitud AB y orientación de las alas.

Tabla 25. Información sobre los SEVs realizados. Cuenca entre Itata y Bío-Bío

ENSAYO	X UTM	Y UTM	Z (msnm)	LONGITUD AB (m)	ORIENTACIÓN
SEV-1	670313	5933165	10,0	500	ESE-WNW
SEV-2	671047	5931546	-2,0	500	S-N
SEV-3	672267	5929148	2,0	632	E-W
SEV-4	674096	5928204	1,0	800	SW-NE
SEV-5	677329	5931441	0,0	800	SW-NE
SEV-6	675833	5930369	0,0	632	SW-NE
SEV-7	675903	5926495	9,0	500	SSW-NNE
SEV-8	672151	5924868	17,0	632	E-W
SEV-9	665807	5927244	1,0	632	SW-NE
SEV-10	666684	5927128	4,0	632	SE-NW
SEV-11	667840	5925834	12,0	800	S-N
SEV-12	671928	5927629	4,0	632	SE-NW
SEV-13	674513	5931538	-1,0	632	SE-NW
SEV-14	672864	5932861	7,0	500	E-W
SEV-15	671244	5932942	3,0	500	E-W
SEV-16	671966	5922604	19,0	500	SE-NW
SEV-17	669827	5924874	11,0	1000	SE-NW
SEV-18	667646	5928575	5,0	800	SE-NW
SEV-19	666357	5929172	3,0	800	SE-NW
SEV-20	665524	5929556	5,0	800	SE-NW
SEV-21	663833	5928646	-6,0	500	E-W
SEV-22	668126	5929341	7,0	500	SSE-NNW

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 al acuífero. No obstante, la presencia del núcleo urbano de Talcahuano impidió realizar un mallado lo más regular posible, teniendo que ubicar las investigaciones en aquellas zonas en las que fue posible.

Las principales dificultades en el desarrollo del trabajo de campo fueron las bajas resistividades producidas por la intrusión marina y el ruido eléctrico presente en zonas de actividad antrópica. La intrusión marina hace disminuir de manera muy importante las resistividades del terreno lo que provoca una caída en la diferencia de potencial por lo que la medida se hace más inestable. Pese a ello las lecturas obtenidas se consideran buenas, principalmente por las excelentes resistencias de contacto obtenidas, en algunos casos, con ayuda de agua salada incorporada a los electrodos de intensidad (A B). Este buen contacto permitió trabajar con altas intensidades de inyección que compensaron las deficiencias producidas por la intrusión y el ruido eléctrico.

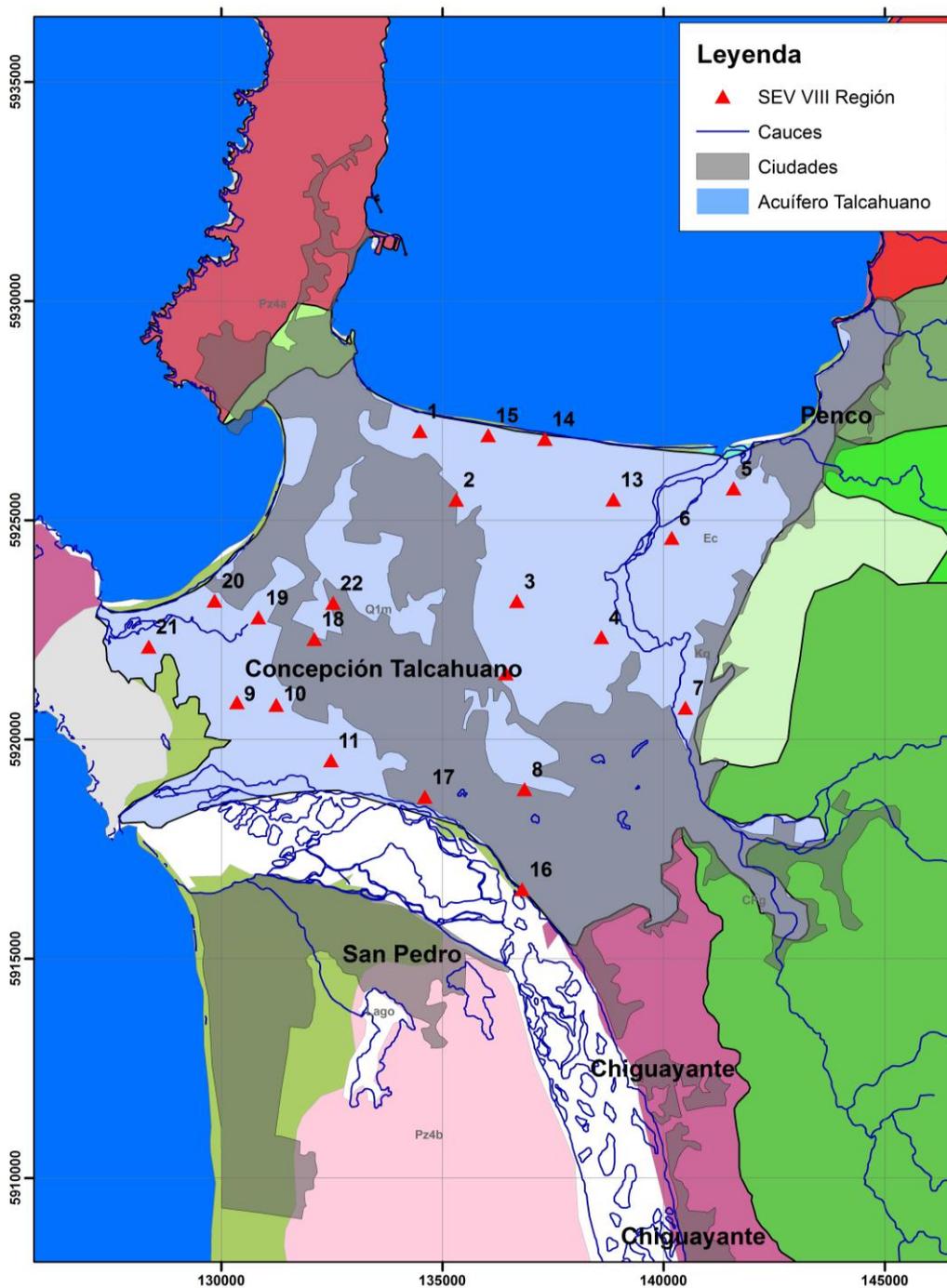


Figura 34. Ubicación de los SEV realizados. Cuenca entre Itata y Bío-Bío

### 7.3.5. 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 mencionó en el apartado anterior, en el acuífero de Talcahuano se presentaron dificultades en la adquisición de datos por el efecto de la intrusión marina y el ruido eléctrico de algunos puntos debidos a la actividad humana, problemas minimizados gracias a las importantes inyecciones de corriente conseguidas. Finalmente, y tras el procesado de datos, se obtuvieron curvas coherentes y de buena calidad que han permitido la obtención de modelos con buenos ajustes.

Para el acuífero de Nilahue no se detectó ningún tipo de anomalías, lo que permitió obtener modelos geoeléctricos con buen ajuste. Los empalmes son coherentes, las curvas abacables, 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.

### **7.3.6. RESULTADOS**

La interpretación geofísica de los SEVs se presenta en el Anexo I 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 plio-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 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.

#### **7.3.6.1. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO RAPEL Y ESTERO NILAHUE**

Se presenta a continuación los resultados obtenidos para los 23 SEVs realizados en esta cuenca. 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.

Las atribuciones geológicas se han realizado atendiendo a la correlación entre resistividades y materiales de la zona. Cabe destacar, que los rellenos sedimentarios corresponden realmente a alternancias de arcillas, limos, arenas y gravas, y que se han clasificado atendiendo al componente mayoritario de los rellenos.

Tabla 25. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VI Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
1	258196	6157203	98	800	0	1,5	1,5	138	Tierra vegetal
					1,5	122	121	31	Detrítico grano fino-medio
					122	166	44	23	Detrítico grano fino
					166			7006	Basamento intrusivo
2	254383	6154586	94	800	0	0,57	0,57	97	Tierra vegetal
					0,57	12	11	14	Detrítico grano fino
					12	183	171	21	Detrítico grano fino
					183			7310	Basamento intrusivo
3	248128	6161141	92	632	0	2,7	2,7	41	Tierra vegetal
					2,7	144	141	20	Detrítico grano fino
					144			6693	Basamento intrusivo
4	246475	6157336	96	632	0	1,6	1,6	135	Tierra vegetal
					1,6	6,9	5,3	45	Detrítico grano medio
					6,9	190	183	57	Detrítico grano medio
					190			9253	Basamento intrusivo
5	249132	6156924	88	632	0	2,7	2,7	22	Detrítico grano fino
					2,7	12	9,4	75	Detrítico grano medio
					12	81	69	9,4	Detrítico grano fino
					81			8743	Basamento intrusivo
6	245100	6170998	80	632	0	0,68	0,68	106	Tierra vegetal
					0,68	9,2	8,5	26	Detrítico grano fino
					9,2	176	167	264	Detrítico grano grueso

Tabla 25. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VI Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\Omega$ m	Atribución geológica
					176			6915	Basamento intrusivo
7	247799	6167101	106	500	0	1,4	1,4	191	Tierra vegetal
					1,4	7,6	6,2	38	Detrítico grano medio
					7,6	78	70	69	Detrítico grano medio-grueso
					78	93	15	98	Detrítico grano grueso
					93			6071	Basamento intrusivo
8	245199	6163694	101	500	0	0,91	0,91	104	Tierra vegetal
					0,91	2,7	1,8	301	Detrítico grano grueso
					2,7	100	97	19	Detrítico grano fino
					100			8582	Basamento intrusivo
9	248309	6163966	94	500	0	2,3	2,3	177	Tierra vegetal
					2,3	40	38	21	Detrítico grano fino
					40	76	36	52	Detrítico grano medio
					76			9879	Basamento intrusivo
10	253943	6166288	108	632	0	0,59	0,59	199	Tierra vegetal
					0,59	2,5	1,9	32	Detrítico grano fino-medio
					2,5	4,2	1,7	43	Detrítico grano medio
					4,2	91	87	26	Detrítico grano fino
					91			2299	Basamento volcánico
11	256680	6167035	109	632	0	1,3	1,3	680	Tierra vegetal
					1,3	80	79	26	Detrítico grano fino

Tabla 25. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VI Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\Omega$ m	Atribución geológica
					80			1226	Basamento volcánico
12	258357	6133617	109	500	0	1,4	1,4	48	Tierra vegetal
					1,4	15	14	13	Detrítico grano fino
					15	35	20	234	Detrítico grano grueso
					35			8915	Basamento intrusivo
13	255360	6135032	107	500	0	4,2	4,2	41	Tierra vegetal
					4,2	32	28	21	Detrítico grano fino
					32	52	20	52	Detrítico grano medio
					52			9188	Basamento intrusivo
14	252927	6140937	99	800	0	1,3	1,3	63	Tierra vegetal
					1,3	36	35	24	Detrítico grano fino
					36	157	121	13	Detrítico grano fino
					157			7508	Basamento intrusivo
15	248638	6146240	93	800	0	0,82	0,82	39	Tierra vegetal
					0,82	3	2,2	8,9	Detrítico grano fino
					3	11	8,3	31	Detrítico grano fino-medio
					11	160	149	11	Detrítico grano fino
					160			8138	Basamento intrusivo
16	247927	6143203	116	1000	0	1,8	1,8	292	Tierra vegetal
					1,8	20	18	57	Detrítico grano medio
					20	116	96	172	Detrítico grano grueso
					116			749	Basamento volcánico

Tabla 25. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VI Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\Omega$ m	Atribución geológica
17	253231	6147043	98	632	0	2,9	2,9	95	Tierra vegetal
					2,9	83	80	13	Detrítico grano fino
					83	110	27	17	Detrítico grano fino
					110			9124	Basamento intrusivo
18	261370	6144707	112	500	0	0,57	0,57	276	Tierra vegetal
					0,57	4,8	4,2	63	Detrítico grano medio
					4,8	16	11	28	Detrítico grano fino
					16	117	101	87	Detrítico grano medio
					117			6542	Basamento intrusivo
19	249744	6149925	101	632	0	1,2	1,2	247	Tierra vegetal
					1,2	13	12	40	Detrítico grano medio
					13	132	119	174	Detrítico grano grueso
					132			9238	Basamento intrusivo
20	248173	6152816	86	632	0	3,4	3,4	28	Detrítico grano fino
					3,4	42	39	18	Detrítico grano fino
					42	135	93	11	Detrítico grano fino
					135			7811	Basamento intrusivo
21	251022	6152983	92	632	0	0,49	0,49	20	Tierra vegetal
					0,49	61	61	11	Detrítico grano fino
					61			7132	Basamento intrusivo
22	264421	6155768	115	800	0	3,1	3,1	11	Tierra vegetal
					3,1	23	20	68	Detrítico grano medio
					23	133	110	19	Detrítico grano fino

Tabla 25. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VI Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. Ωm	Atribución geológica
					133			9841	Basamento intrusivo
23	269250	6160695	129	632	0	1,3	1,3	118	Tierra vegetal
					1,3	9,9	8,6	25	Detrítico grano fino
					9,9	88	78	65	detrítico grano medio
					88			8767	Basamento intrusivo

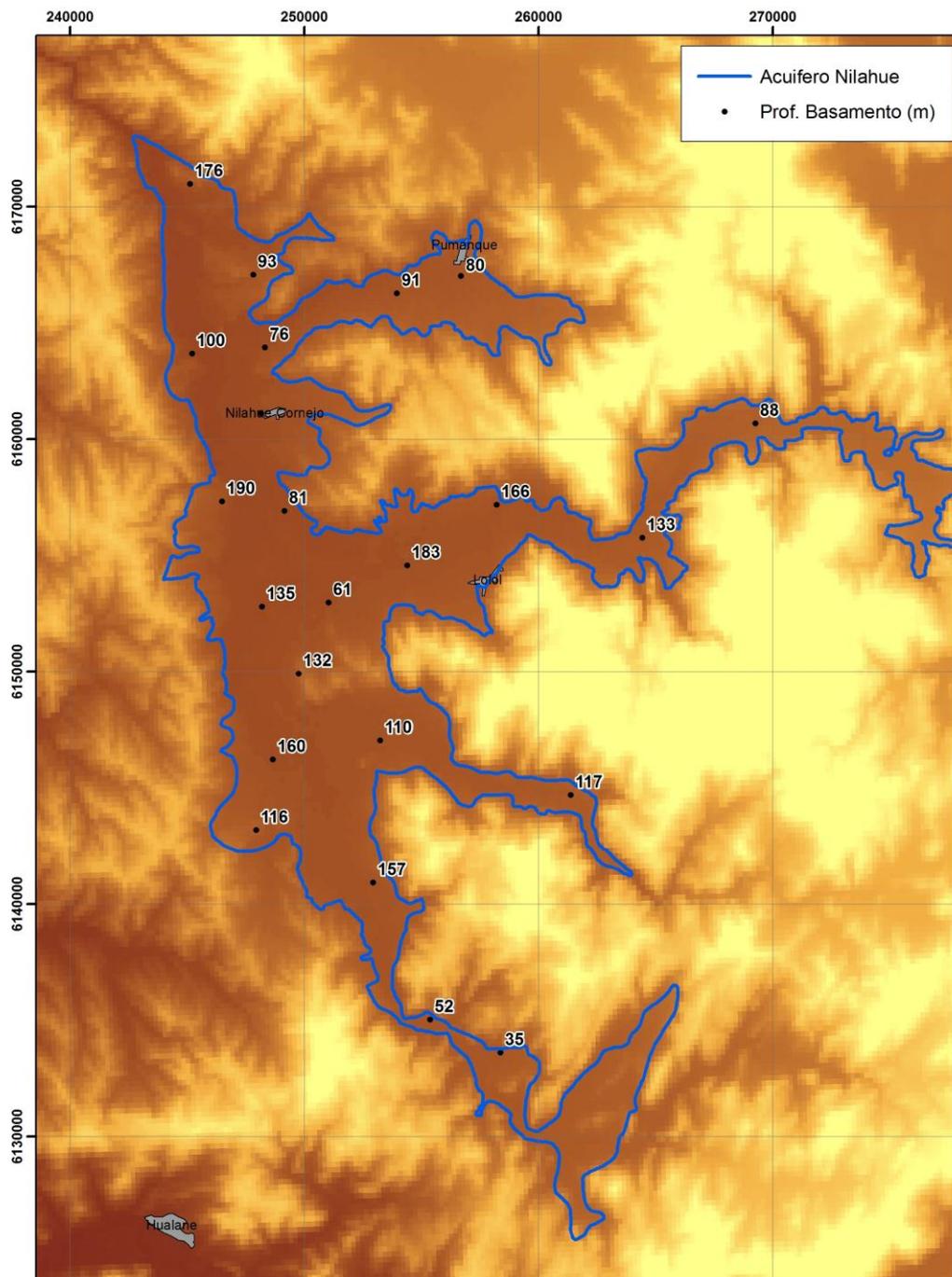


Figura 35. Profundidad del basamento según resultados de la geofísica en el acuífero de Nilahue

### **7.3.6.2. CUENCA COSTERA ENTRE ITATA Y BÍO-BÍO**

Se presenta a continuación los resultados obtenidos para los 22 SEVs realizados en esta cuenca. 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.

Tabla 26. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VIII Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\omega}$ m	Atribución geológica
1	670313	5933165	10	500	0	1,1	1,1	363	Tierra vegetal
					1,1	3,2	2,1	53	Detrítico grano medio
					3,2	43	40	1	Intrusión salina
					43	143	100	2,1	Intrusión salina
					143			6500	Basamento intrusivo
2	671047	5931546	-2	500	0	2,6	2,6	49	Detrítico grano medio
					2,6	8,8	6,2	3,3	Detrítico grano fino
					8,8	40	31	0,48	Intrusión salina
					40			2409	Basamento intrusivo
3	672267	5929148	2	632	0	5,5	5,5	43	Detrítico grano medio
					5,5	14	8,9	68	Detrítico grano medio
					14	120	106	2,9	Detrítico grano fino
					120			9,4	Detrítico grano fino
4	674096	5928209	1	800	0	1	1	663	Detrítico grano grueso
					1	2,3	1,3	112	Detrítico grano grueso saturado
					2,3	6,1	3,8	80	Detrítico grano medio-grueso saturado
					6,1	35	29	40	Detrítico grano medio saturado
					35	251	216	11	Detrítico grano fino saturado
					251			162	Basamento metamórfico
5	677327	5931441	0	800	0	2	2	17	Tierra vegetal
					2	37	35	2,4	Detrítico grano medio intrusión salina
					37			19	Detrítico grano grueso intrusión
6	675833	5930369	0	632	0	8,6	8,6	154	Detrítico grano grueso

Tabla 26. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VIII Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\omega}$ m	Atribución geológica
					8,6			6,1	Detrítico grano grueso con intrusión salina
7	675903	5926495	9	500	0	1,3	1,3	508	Tierra vegetal
					1,3	7,7	6,4	46	Detrítico grano medio saturado
					7,7	15	7,7	175	Detrítico grano grueso saturado
					15	86	71	17	Detrítico grano fino saturado
					86			268	Basamento metamórfico
8	672151	5924868	17	632	0	1,3	1,3	1419	Tierra vegetal
					1,3	11	10	580	Detrítico grano grueso saturado
					11	316	305	57	Detrítico grano medio saturado
					316			208	Basamento metamórfico
9	665807	5927244	1	632	0	0,46	0,46	1896	Tierra vegetal
					0,46	4	3,5	166	Detrítico grano grueso saturado
					4	9,8	5,8	27	Detrítico grano fino saturado
					9,8	36	26	0,84	Detrítico grano fino con intrusión salina
					36	69	33	3,8	Detrítico grano medio con intrusión salina
					69			4500	Basamento intrusivo
10	666684	5927128	4	632	0	0,61	0,61	6558	Tierra vegetal
					0,61	7,4	6,8	86	Detrítico grano grueso saturado
					7,4	13	5,4	105	Detrítico grano grueso saturado
					13	67	54	3,4	Detrítico grano medio con intrusión salina

Tabla 26. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VIII Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\Omega}m$	Atribución geológica
					67			7596	Basamento intrusivo
11	667840	5925834	12	800	0	1,2	1,2	261	Tierra vegetal
					1,2	4,3	3,1	761	Detrítico grano grueso
					4,3	31	27	104	Detrítico grano grueso saturado
					31	133	102	0,96	Detrítico grano fino intrusión salina
					133			9016	Basamento intrusivo
12	671928	5927629	4	632	0	1,7	1,7	1117	Tierra vegetal
					1,7	4,7	3	47	Detrítico grano medio saturado
					4,7	19	14	221	Detrítico grano grueso saturado
					19	78	59	1,8	Detrítico grano fino saturado
					78			9960	Basamento intrusivo
13	674513	5931538	-1	632	0	1,4	1,4	305	Tierra vegetal
					1,4	3,6	2,2	50	Detrítico grano medio saturado
					3,6	12	8,5	1,9	Detrítico grano medio intrusión salina
					12	60	48	0,84	Detrítico grano fino intrusión salina
					60			9661	Basamento intrusivo
14	672864	5932861	7	500	0	0,72	0,72	418	Tierra vegetal
					0,72	6,1	5,4	7,5	Detrítico grano fino saturado
					6,1	96	90	0,84	Detrítico grano fino intrusión salina
					96			8936	Basamento intrusivo
15	671244	5932942	3	500	0	1,7	1,7	319	Tierra vegetal
					1,7	67	65	0,59	Detrítico grano fino intrusión salina
					67			5548	Basamento intrusivo

Tabla 26. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VIII Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\omega}$ m	Atribución geológica
16	671966	5922604	19	500	0	2,4	2,4	435	Tierra vegetal
					2,4	14	12	150	Detrítico grano grueso saturado
					14	70	56	15	Detrítico grano fino saturado
					70			8285	Basamento intrusivo
17	669827	5924874	11	1000	0	2,6	2,6	287	Tierra vegetal
					2,6	5,6	3	86	Detrítico grano medio-grueso saturado
					5,6	15	9,3	463	Detrítico grano grueso saturado
					15	105	90	7,7	Detrítico grano fino saturado
					105			39	Detrítico grano medio saturado
18	667646	5928575	5	800	0	0,59	0,59	386	Tierra vegetal
					0,59	5,1	4,5	56	Detrítico grano medio saturado
					5,1	15	10	104	Detrítico grano grueso saturado
					15	85	70	6,3	Detrítico grano fino saturado
					85			13	Detrítico grano fino saturado
19	666357	5929172	3	800	0	1	1	345	Tierra vegetal
					1	24	23	1,6	
					24			14	
20	665524	5929556	5	800	0	1	1	694	Tierra vegetal
					1	19	18	44	Detrítico grano medio saturado
					19	123	104	2,4	Detrítico grano medio intrusión
					123	144	21	5,7	Detrítico grano grueso intrusión
					144			6765	Basamento intrusivo
21	663833	5928646	-6	500	0	1,2	1,2	145	Tierra vegetal

Tabla 26. Resultados de la campaña geofísica. Cuenca VIII Región

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. $\bar{\omega}_m$	Atribución geológica
					1,2	81	80	1,6	Detrítico medio intrusión salina
					81			6450	Basamento intrusivo
22	668126	5929341	7	500	0	1,1	1,1	728	Tierra vegetal
					1,1	6,2	5,1	70	Detrítico grano grueso saturado
					6,2	25	19	2,9	
					25	82	57	27	
					82			12	

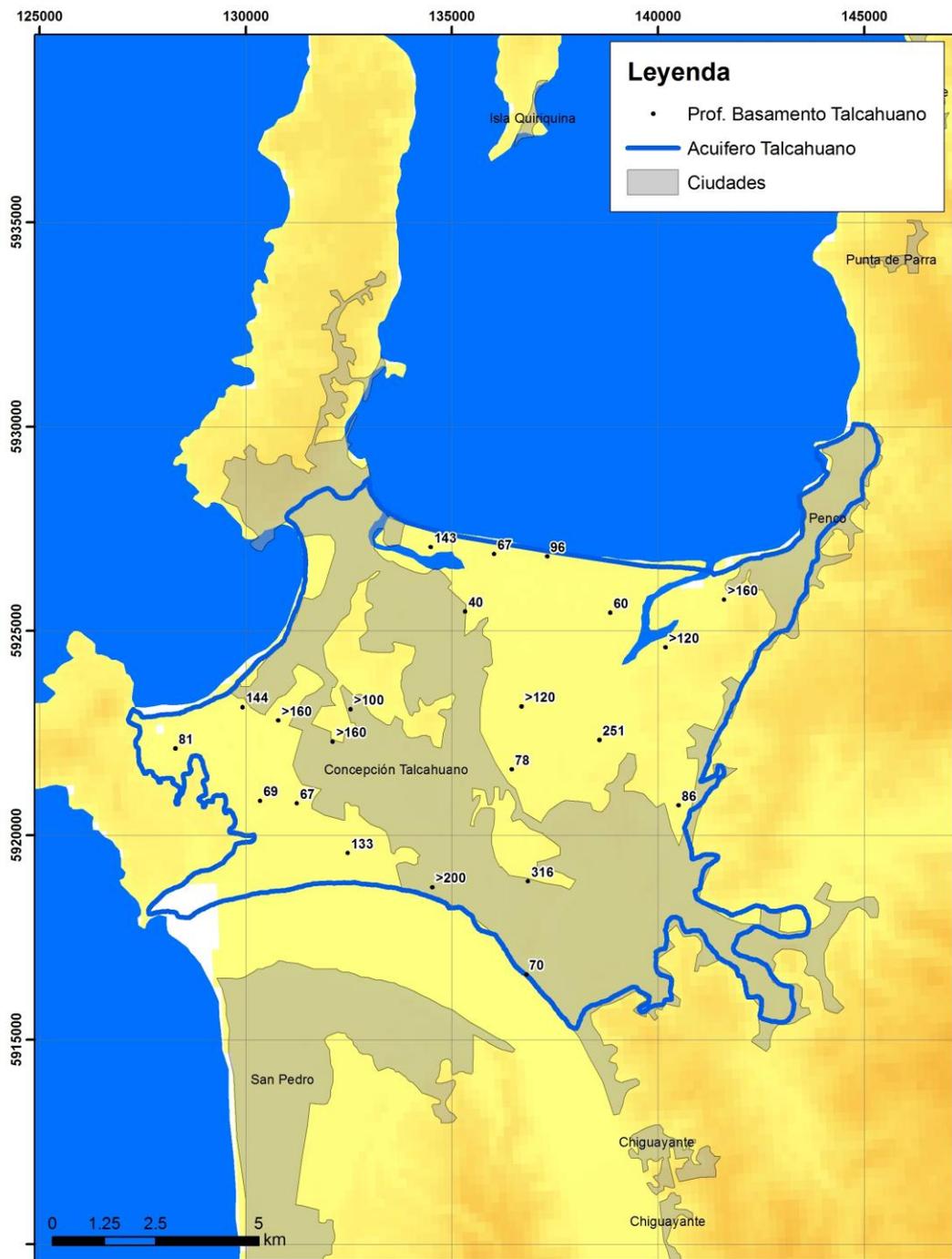


Figura 36. Profundidad del basamento según resultados de la geofísica en el acuífero de Talcahuano

## 8. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELO CONCEPTUAL

### 8.1. GEOLOGÍA Y FORMACIONES PERMEABLES

#### 8.1.1. MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La Región del Bío-Bío y la del Libertador General Bernardo O'Higgins, 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, más desarrollada en la VIII Región, y la Cordillera Principal, dispuestas paralelas entre sí, y alineadas norte-sur.

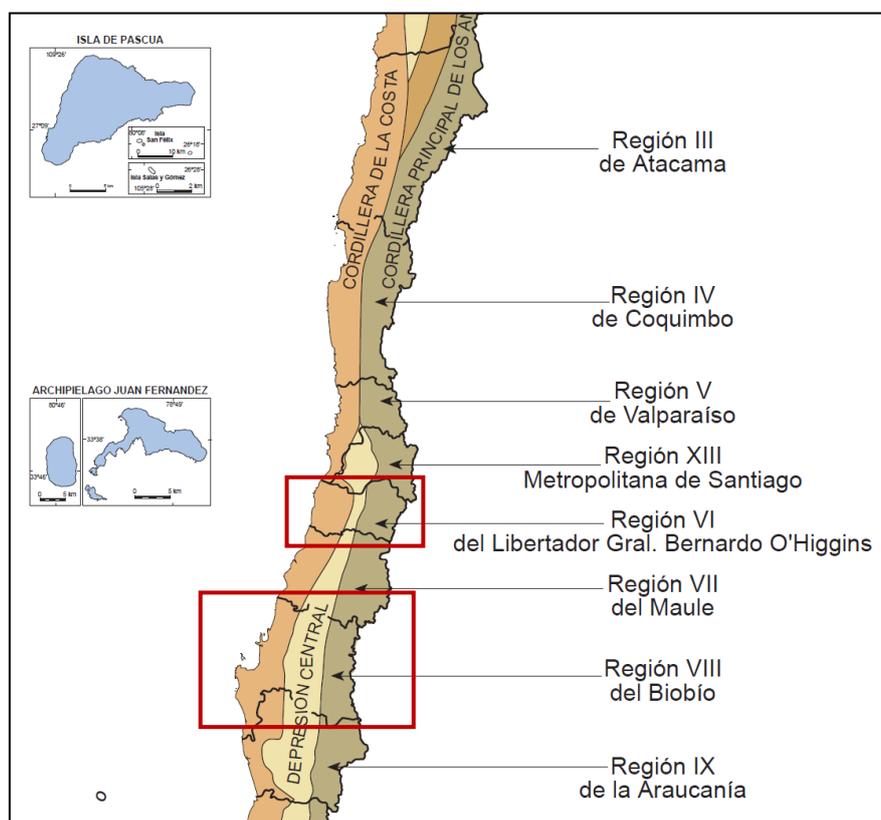


Figura 37. Dominios morfoestructurales de la zona central de Chile.  
Modificado de Sernageomin (2000).

Se reconocen en ambas regiones rocas metamórficas, intrusivas, depósitos volcano-sedimentarios, depósitos sedimentarios consolidados y depósitos no consolidados.

Las rocas metamórficas del área pertenecen al período Silúico-Carbonífero, se ubican en una franja N-S hacia el sector costero de ambas regiones, mayormente representado hacia las cuencas costeras de la zona sur del Bío-Bío, también en la cuenca costera entre el límite de Región y el río Itata, y algo en la zona norte de la cuenca costera de la VI Región.

Las rocas intrusivas del área pertenecen al periodo Carbonífero-Terciario, afloran principalmente en toda la Cordillera de la Costa al norte del río Biobío, y su flanco oriental al sur del mismo río; y en el flanco oeste de la Cordillera de los Andes. En las cuencas costeras de la VI Región también están muy bien representadas, siendo la unidad de mayor extensión de afloramiento en este sector.

Las secuencias estratificadas consolidadas, están compuestas por secuencias volcánicas, secuencias volcánicas-sedimentarias y secuencias sedimentarias. Poseen edades que van desde el Periodo Triásico al Pleistoceno. Afloran en la zona oriental de la cuenca costera entre el río Rapel y el estero Nilahue, y en menor medida en algunos puntos de la cordillera de la costa en las cuencas costeras de la VIII Región.

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

### **8.1.2. ESTRATIGRAFÍA**

#### **8.1.2.1. CUENCAS COSTERAS DE LA VI REGIÓN**

La geología de las cuencas costeras de la VI región se caracteriza por estar compuesta por unidades antiguas, de edad Paleozoico cubierta, en la zona oriental por secuencias volcano-sedimentarias de edad Jurásico-Cretácico, en la zona centro sur por un relleno fluvio-aluvial no consolidado, y pequeños rellenos sedimentarios en la zona noroccidental (Figura 38).

##### **8.1.2.1.1. Depósitos no consolidados**

- Depósitos Aluviales, Coluviales, remoción en masa y fluviales.

Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.

El mayor relleno sedimentario, formado por depósitos fluviales (gravas, arenas, limos y arcillas), se da en la cuenca aluvial del estero Nilahue y afluentes.

La edad de estos depósitos corresponde al periodo Pleistoceno – Holoceno.

#### **8.1.2.1.2. Rocas estratificadas consolidadas**

- Secuencias volcánicas del Jurásico (J3i).

Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.

- Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas del Cretácico inf. (Ki2m).

Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas.

- Secuencias sedimentarias y marinas del Triásico Sup. (Tr1m). Secuencias sedimentarias marinas y transicionales: areniscas, conglomerados, limolitas y calizas.

#### **8.1.2.1.3. Rocas intrusivas**

- Batolito de la Costa. Paleozoico Sp. (CPg)

Cuerpo intrusivo compuesto de granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, conformando el Batolito Costero. En esta cuenca costera es la mayor unidad geológica aflorante. Formado por granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de moscovita

- Cuerpo intrusivo del Jurásico inferior (Jig)

Dioritas, gabros y monzonitas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. Afloran en la zona suroriental de la cuenca de estudio.

#### **8.1.2.1.4. Rocas metamórficas**

- *Basamento Metamórfico*. Paleozoico Superior. (Pz)

Unidad de rocas metamórficas conformada por metareniscas, filitas y, en menor proporción, limonita, cherts, metabasaltos y metaconglomerados del Devónico-Carbonífero. Además, se reconoce una unidad de rocas



### **8.1.2.2. CUENCAS COSTERAS DE LA VIII REGIÓN**

Al igual que la anterior, la geología de las cuencas costeras de la VIII región se caracteriza por estar compuesta por unidades antiguas, de edad Paleozoico cubierta, principalmente en el sector sur, por una serie de formaciones sedimentarias Miocenas de origen principalmente marino. El relleno consta principalmente de depósitos fluviales de los cauces actuales de esteros y ríos y depósitos litorales (Figura 39).

#### **8.1.2.2.1. Depósitos no consolidados**

- Depósitos Aluviales, Coluviales, remoción en masa y fluviales.

Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. Se desarrollan principalmente en la Depresión Central. Depósitos fluviales conformados por gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación. La edad de estos depósitos corresponde al periodo Pleistoceno – Holoceno.

- Depósitos Litorales.

Depósitos semiconsolidados, marinos litorales o fluviales estuarinas compuesto de coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrizados emergidos. Se observan en el borde litoral, al suroeste del área de estudio. La edad de estos depósitos corresponde al Pleistoceno.

#### **8.1.2.2.2. Rocas estratificadas consolidadas**

- Formación Quiriquina. (Ks1m)

Esta formación, definida por Hoffner et al., (1957), aflora principalmente en la Isla Quiriquina, Región del Bío-Bío.

Consiste en secuencias sedimentarias marinas de plataforma, litorales o transicionales, formadas por arenisca, conglomerado, lutita, caliza y sucesiones turbidíticas. Existen afloramientos en Concepción, y Curanilahue.

### **8.1.2.2.3. Formación Curanilahue (PE1)**

Definida por Muñoz-Cristi (1946 y 1956). Corresponde a la unidad basal de la serie marino-continental lignitífera denominada Piso de Concepción por Bruggen (1934) y posteriormente subdividida por Tavera (1942) y Muñoz-Cristi (1946).

Los afloramientos del área de estudio se distribuyen en forma discontinua en las bahías de Concepción y Coliumo, principalmente en las localidades de Talcahuano, Cosmito, Cerro Verde, Lirquén y Dichato.

Chotín (1969 *In* Gajardo, 1979) describe la litología compuesta por una alternancia de arcosa gruesa, arcosa fina, arcilla y capas de lignito. Los sedimentos arenosos y arcillosos alcanzan un espesor máximo de 50 a 70 m.

### **8.1.2.2.4. Formación Ranquil (M1m)**

Definida por Tavera (1942) en los alrededores de Lebu. Constituida por bancos de conglomerado fino arenoso, color gris claro, tobáceo, que se alternan con bancos de arenisca verde arcillosa, fosilífera, grano fino y grueso. Frecuentes diques delgados de arenisca poco consolidada la cortan en varias direcciones. Hacia la parte superior los sedimentos se afinan apareciendo bancos de arenisca fina, limonita y lutita tobácea, con niveles fosilíferos (Cecioni, 1968).

### **8.1.2.2.5. Formación Trihueco (Ec)**

Definida por Muñoz Cristo y constituida por bancos de arenisca de grano grueso a finamente conglomerádico con intercalaciones de lutita carbonosa y mantos de carbón.

Al sur de Llico se han medido 1100 m de espesor, sin base expuesta, constituidos principalmente por potentes bancos de arenisca arcillosa, compacta y en parte finamente conglomerádica. Los bancos arenosos se alternan con limonita, bancos delgados de lutita parda y guías y mantos de carbón.

En el sector costero de Rumana se han medido potencias de 800 m., sin techo expuesto, llegando a los 1000 m. de potencia en el sector de Caleta Piures y Punta Salicura, sin techo expuesto (Cecioni, 1968).

Tavera (In Cecioni, 1968) le asigna a la unidad una edad Terciaria Inferior, Eoceno a Paleoceno, en base a determinaciones paleontológicas.

#### **8.1.2.2.6. Rocas intrusivas**

- *Batolito de la Costa*. Paleozoico Sp. (CPg)

Cuerpo intrusivo compuesto de granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, conformando el Batolito Costero. En la región, abarca toda la Cordillera de la Costa al norte del Río Bío-bío, y su flanco oriental, al sur del mismo río. Data una edad Carbónico-Pérmico. Además se reconoce un conjunto de rocas intrusivas compuesta por dioritas, monzodioritas, granodioritas y monzogranitos, que se presentan en pequeños afloramientos en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa, al norte de la localidad de Hualqui. Se les asigna una edad cretácica.

#### **8.1.2.2.7. Rocas metamórficas**

- *Basamento Metamórfico*. Paleozoico Superior. (Pz)

Unidad de rocas metamórficas conformada por metareniscas, filitas y, en menor proporción, limonita, cherts, metabasaltos y metaconglomerados del Devónico-Carbonífero. Además se reconoce una unidad de rocas metamórficas compuesta por pizarras, filitas y metareniscas, correspondientes a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico. En el área de estudio se observan en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa. Donde se les asigna una edad carbónica. Por último se tiene un conjunto de rocas formado por metapelitas, metacherts, metabasitas, gneises, esquistos y rocas ultramáficas, de edad Devónico - Triásico. Se observan en la Cordillera de la Costa, al sur del Lago Lanalhue.

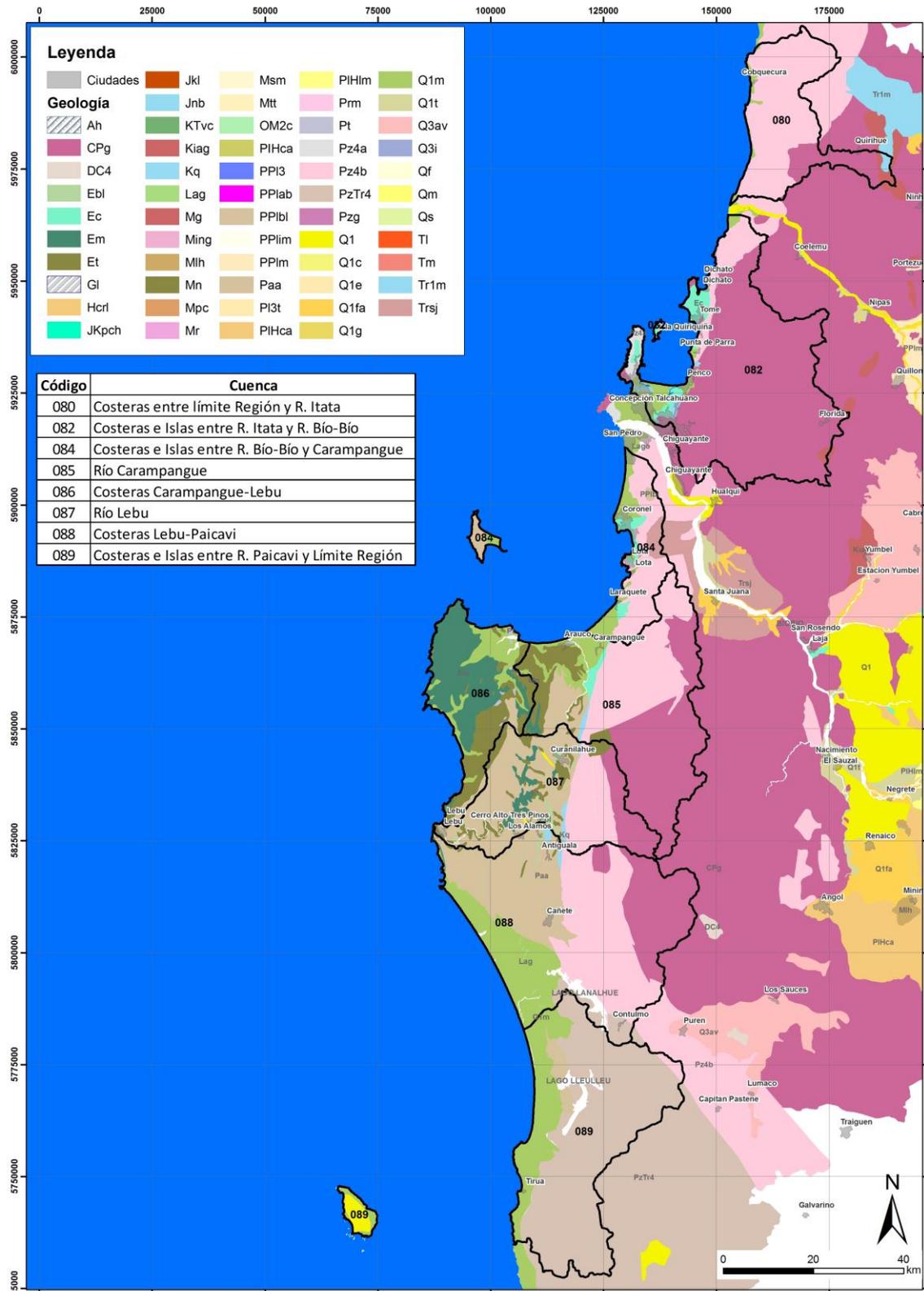


Figura 39. Geología de las cuencas costeras de la VIII Región. Modificado de Sernageomin (2000).

### 8.1.3. COLUMNAS DE SONDEOS EXISTENTES

#### 8.1.3.1. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO RAPEL Y ESTERO NILAHUE

Durante los trabajos de terreno se obtuvieron cuatro columnas litológicas de sondeos ubicados en el relleno sedimentario del estero Nilahue, correspondiente al acuífero Nilahue.

De las cuatro columnas obtenidas (ver Figura 40) dos alcanzan claramente el basamento rocoso a 112 y 118 m de profundidad. Las otras dos alcanzan los 77 y 79 m de profundidad, a la cual según el registro los materiales perforados son duros, por lo que se podría tratar también del basamento. Los materiales registrados son los característicos de un relleno sedimentario fluvio aluvial no consolidado, conformado por alternancia entre gravas, bolones, arenas, arcillas y limos.

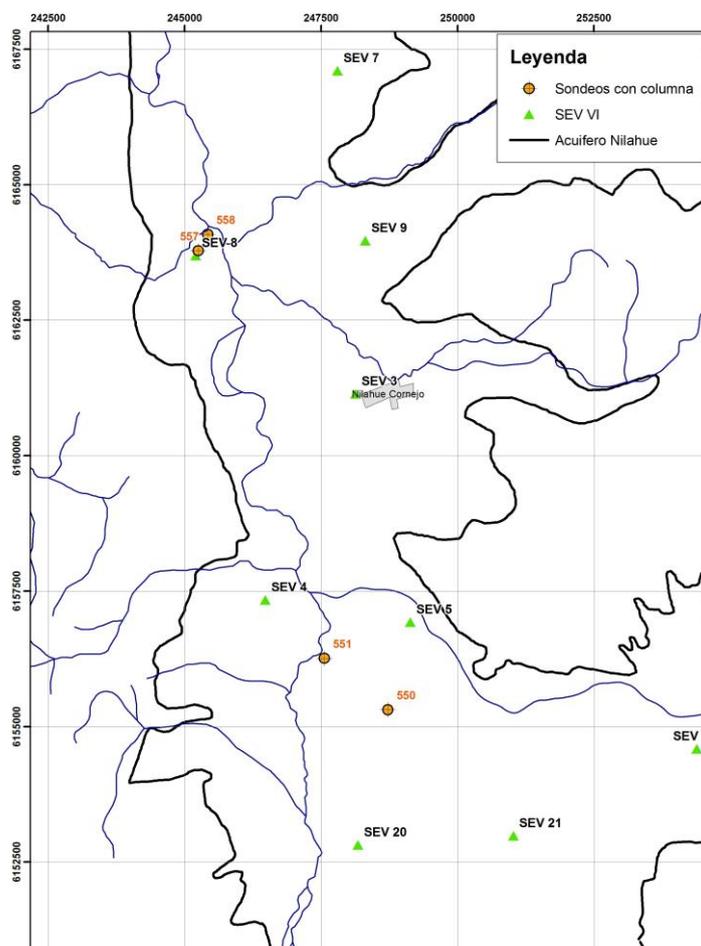


Figura 40. Situación de columnas de sondeos existentes

Tabla 27. Columnas de sondeos recopiladas durante la campaña de terreno. Cuenca costera entre Rapel y Nilahue

Cod. Sondeo	UTM WGS84 19S		Cota (mmsm)	Litología	Prof. (m)		Espesor (m)
	X	Y			Inicial	Final	
550	248722	6155310	36	Tierra vegetal	0,0	7,0	7,0
				Limo, arcilla, ceniza	7,0	10,2	3,2
				Arena fina y media	10,2	11,8	1,6
				Arcilla, limo compacto	11,8	14,3	2,5
				Ripio fino, gravas, poca arcilla	14,3	17,1	2,8
				Arcilla, limo gris semi-orgánico	17,1	38,8	21,7
				Ripio, grava, poca arena fina	38,8	41,2	2,4
				Arcilla, limo semi-compacto	41,2	43,4	2,2
				Arena, grava, ripio (oxidado)	43,4	45,9	2,5
				Limo, arcilla gris semi-compacta	45,9	79,5	33,6
				Arena fina, media y gruesa, grava	79,5	82,4	2,9
				Limo gris arcilloso compacto	82,4	86,1	3,7
				Grava, gravilla, arena fina y media, poca arcilla	86,1	88,8	2,7
				Maicillo, arena gruesa, cuarzo	88,8	92,5	3,7
Maicillo rocoso blanco gris, cuarzo (semi-blando)	92,5	108,0	15,5				
Maicillo rocoso blanco rojizo (dureza	108,0	112,0	4,0				

Tabla 27. Columnas de sondeos recopiladas durante la campaña de terreno. Cuenca costera entre Rapel y Nilahue

Cod. Sondeo	UTM WGS84 19S		Cota (mmsm)	Litología	Prof. (m)		Espesor (m)
	X	Y			Inicial	Final	
				en aumento)			
				Maicillo, roca (dura)	112,0	112,5	0,5
551	247555	6156259	50	Arcilla y arena	0,0	12,0	12,0
				Arena media y limo	12,0	18,0	6,0
				Arcillas diferentes colores	18,0	30,0	12,0
				Arena y gravilla	30,0	32,0	2,0
				Arcillas diferentes colores	32,0	50,0	18,0
				Arena y gravilla	50,0	52,0	2,0
				Arcillas diferentes colores	52,0	80,0	28,0
				Arena	80,0	82,0	2,0
				Arcilla	82,0	92,0	10,0
				Arena media a fina	92,0	98,0	6,0
				Arcilla	98,0	104,0	6,0
				Arena media a fina	104,0	110,0	6,0
				Arcilla	110,0	118,0	8,0
				Roca	118,0	120,0	2,0
557	245247	6163785	82	Limo, tierra vegetal	0,0	2,5	2,5
				Arena media, gruesa y fina	2,5	9,2	6,7

Tabla 27. Columnas de sondeos recopiladas durante la campaña de terreno. Cuenca costera entre Rapel y Nilahue

Cod. Sondeo	UTM WGS84 19S		Cota (mmsm)	Litología	Prof. (m)		Espesor (m)
	X	Y			Inicial	Final	
				Arcilla	9,2	10,1	0,9
				Limo, arcilla	10,1	20,5	10,4
				Arena fina y media	20,5	22,3	1,8
				Limo arcilloso, compacto	22,3	27,5	5,2
				Arena fina, media y gruesa	27,5	30,6	3,1
				Limo, arcilla	30,6	31,3	0,7
				Arena gruesa, gravilla	31,3	31,9	0,6
				Limo, arcilla	31,9	33,0	1,1
				Arena media, gruesa y fina	33,0	37,2	4,2
				Arcilla, limo compacto	37,2	46,4	9,2
				Arena fina	46,4	47,5	1,1
				Arcilla limo	47,5	48,2	0,7
				Grava, ripio, arena, arcilla	48,2	53,1	4,9
				Arena, gravilla, grava, arcilla	53,1	73,8	20,7
				Ripio, arena arcilla compacta	73,8	76,6	2,8
				Bolones ripio conglomerado	76,6	77,0	0,4
558	245420	6164083	78	Tierra vegetal	0,0	0,6	0,6
				Limo, arcilla	0,6	4,1	3,5

Tabla 27. Columnas de sondeos recopiladas durante la campaña de terreno. Cuenca costera entre Rapel y Nilahue

Cod. Sondeo	UTM WGS84 19S		Cota (mns)	Litología	Prof. (m)		Espesor (m)
	X	Y			Inicial	Final	
				Arena, gravilla, ripio	4,1	7,8	3,7
				Limo compacto	7,8	32,5	24,7
				Arena media, grava, gravilla	32,5	38,1	5,6
				Limo compacto, arcilla	38,1	47,5	9,4
				Arena media y gruesa, maicillo	47,5	59,0	11,5
				Arcilla	59,0	62,3	3,3
				Arena fina, media y gruesa, grava, bolones hasta 4''	62,3	70,8	8,5
				Limo, arcilla	70,8	72,5	1,7
				Maicillo rocoso, aumentando dureza	72,5	79,0	6,5

Por otro lado, aunque sin conocer la ubicación exacta, de la información bibliográfica obtenida (Estudio Hidrogeológico en Ciudades y Pueblos de la VI Región, realizado por GCF Ingenieros Consultores en 2001) se han obtenido columnas de sondeos de pozos ubicados en Lolol. En ninguno de los casos se llega al basamento, pero confirma que los espesores del acuífero en esta zona son superiores a 60 – 80 metros:

Tabla 28. Pozo n°507

Prof. (m)	Descripción
0 a 2	Tierra vegetal.
2 a 5	Arcilla, conglomerado ripioso duro.
5 a 18	Ripio grueso, arena y gravilla.
18 a 30	Ripio, arena fina y arcilla, limo.
30 a 34	Arcilla, arena gruesa, gravilla.
34 a 40	Ripio, arena, gravilla.
40 a 47	Ripio, arena, grava.
47 a 50	Ripio, arcilla, arena fina.
50 a 51	Arcilla, ripio fino.
51 a 57	Ripio, grava, arena.
57 a 60	Arcilla y grava.

Tabla 29. Pozo n°508

Prof. (m)	Descripción
0 a 2	Tierra vegetal.
2 a 8	Arena gruesa con arcilla y limo.
8 a 15	Arena gruesa con grava, arcilla y limo.
15 a 22	Grava, arena con arcilla.
22 a 26	Bolones sobre 6", grava gruesa, arena.
26 a 33	Grava, bolones.
33 a 60	Bolones, grava gruesa, arena.

Tabla 30. Pozo n°1646

Prof. (m)	Descripción
0,0 a 1,0	Tierra vegetal.
1,0 a 5,2	Limo y arcilla.
5,2 a 7,4	Arena gruesa, media y fina, poca grava.
7,4 a 11,6	Arcilla.

Tabla 30. Pozo n°1646

Prof. (m)	Descripción
11,6 a 15,1	Grava, arena gruesa, gravilla.
15,1 a 16,3	Arcilla, arena.
16,3 a 18,6	Grava, arena gruesa, gravilla.
18,6 a 22,7	Arcilla.
22,7 a 24,5	Arena gruesa, media y fina, poca gravilla.
24,5 a 25,5	Arcilla.
25,5 a 34,9	Gravas, bolones, arena gruesa y media.
34,9 a 41,1	Arcilla.
41,1 a 48,4	Grava, bolones 3" a 9", arena gruesa y media.
48,4 a 51,8	Grava, bolones 3" a 9", arena gruesa y media, poca arcilla.
51,8 a 53,3	Arcilla, arena gruesa.
53,3 a 56,0	Grava, bolones 3" a 9", arena gruesa y media, poca arcilla.
56,0 a 57,1	Arcilla, gravilla, arena gruesa.
57,1 a 69,0	Grava, bolones 3" a 9", arena gruesa, media y fina.
69,0 a 80,0	Arcilla gris.

### 8.1.3.2. CUENCA RÍO ITATA Y RÍO BÍO-BÍO

En el acuífero de Talcahuano (cuenca entre Itata y Biobío), apenas hay sondajes de explotación. No obstante se han recopilado algunos, concretamente del acuífero que se encuentra en la margen izquierda del río Biobío (fuera de la cuenca de estudio), cuyas características geológicas son similares a las del acuífero de Talcahuano cuyas profundidades están en torno a los 10 metros y que sirven para confirmar que se trata de un acuífero detrítico (limos y arenas).



que se exponen pueden actuar como acuíferos superficiales de poco espesor y bajo rendimiento hidráulico.

- **Depósitos de baja permeabilidad:** depósitos cuaternarios de tamaño de grano fino, como pueden ser arcillas y limos de origen fluvio-glacial, aluvial o coluvial.
- **Depósitos de alta permeabilidad:** Esta formación constituye los acuíferos principales, 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.

## **8.2. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO RAPEL Y ESTERO NILAHUE (CÓDIGO DGA 061)**

La cuenca costera de origen pluvial denominada Cuenca Costera Rapel-Estero Nilahue en la VI Región, se encuentra entre la franja del litoral costero y el borde oriental de la Cordillera de la Costa (ver Figura 3).

### **8.2.1. FORMACIONES PERMEABLES**

En esta cuenca las formaciones permeables corresponden con los depósitos cuaternarios ligados a los valles de los afluentes del Estero Nilahue fundamentalmente, así como de los depósitos ligados al mencionado Estero.

El resto de la cuenca, a grandes rasgos, afloran materiales impermeables o muy poco permeables que no constituyen ninguna formación de especial interés hidrogeológico.

### **8.2.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS**

La geometría del acuífero Nilahue (único acuífero de interés hidrogeológico en la cuenca), ha sido elaborada a partir de la información hidrogeológica existente, de la campaña de terreno llevada a cabo y de la campaña de prospección geofísica descrita en apartados anteriores.

Para definir la geometría del acuífero se han elaborado 17 perfiles hidrogeológicos. Se incluye a continuación una figura con el trazado en

planta de los perfiles realizados y, posteriormente, una serie de figuras con los más representativos del sistema:

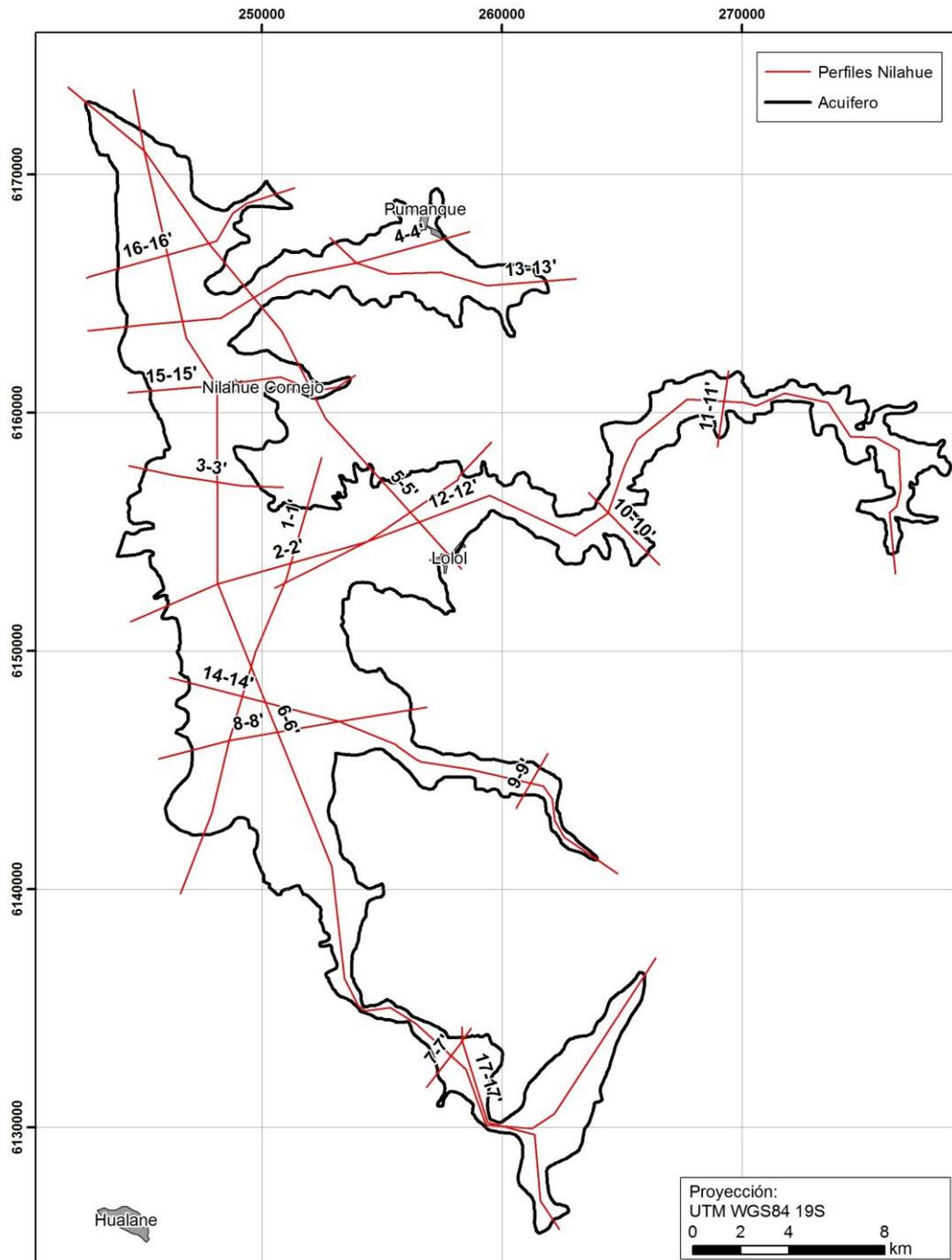
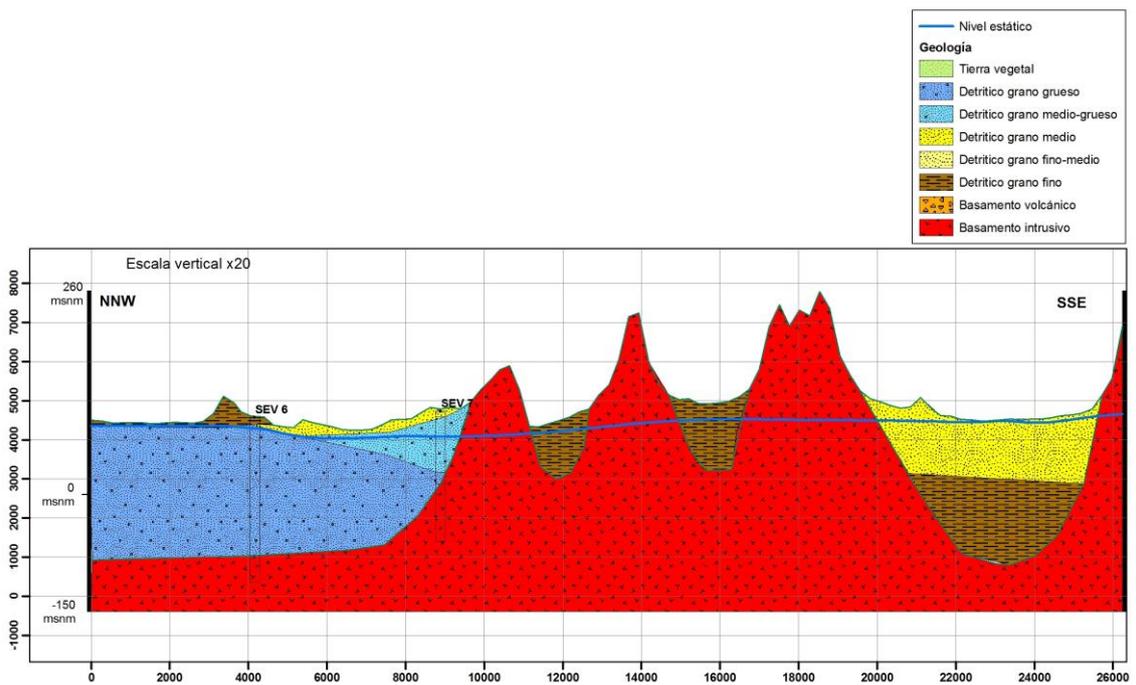
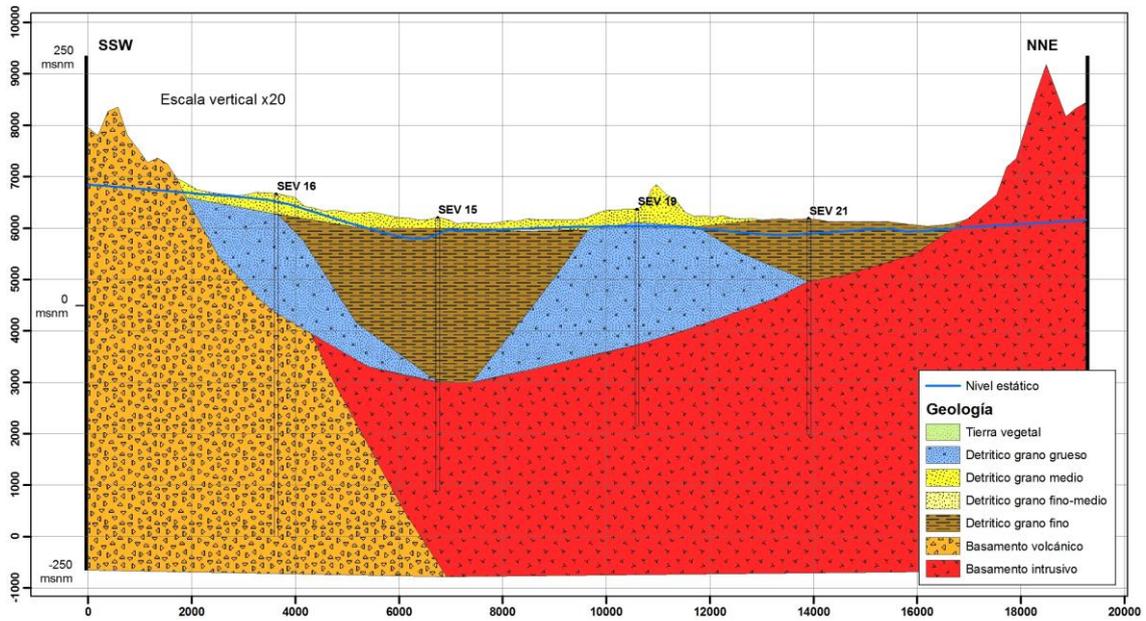


Figura 42. Situación general de los perfiles hidrogeológicos realizados



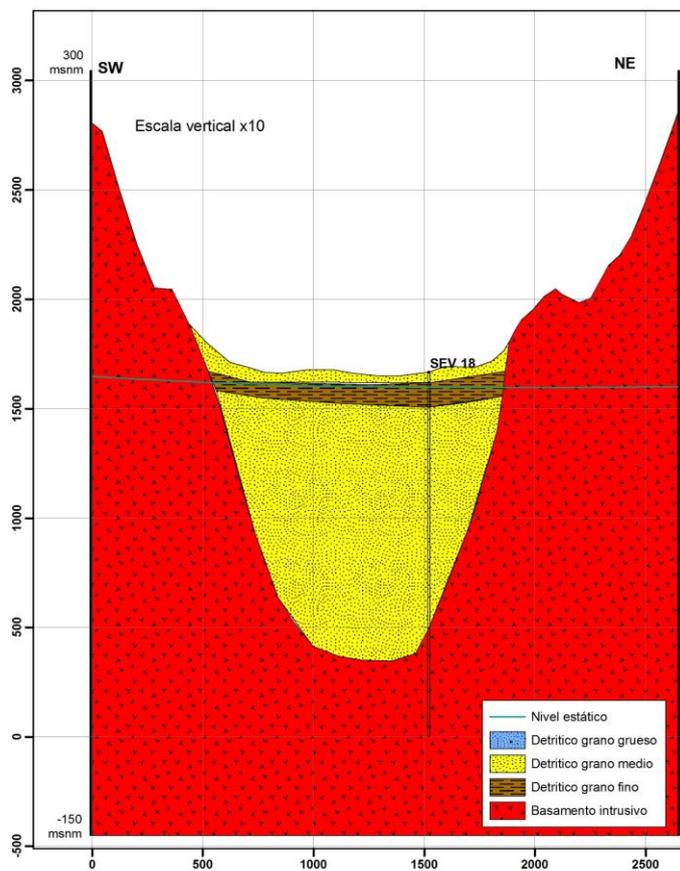


Figura 45. Perfil 9-9' del acuífero Nilahue

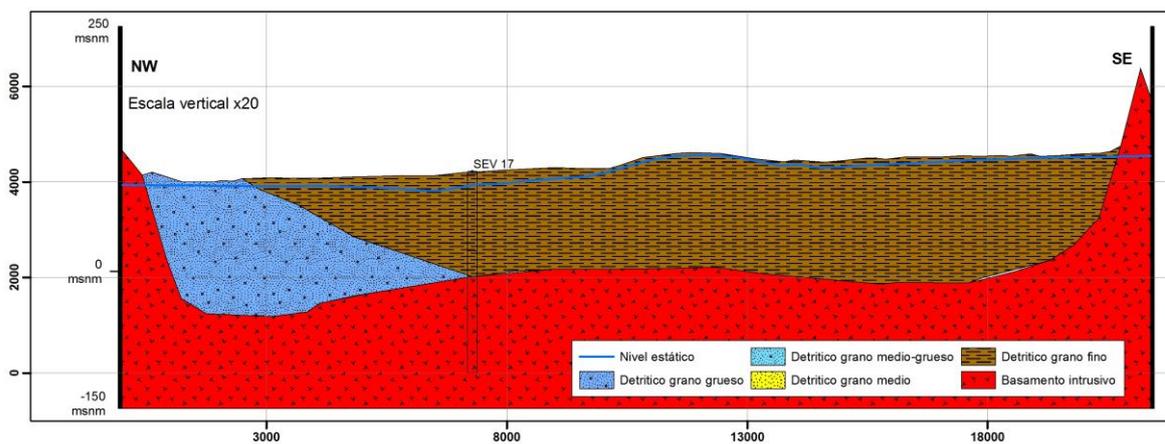


Figura 46. Perfil 14-14' del acuífero Nilahue

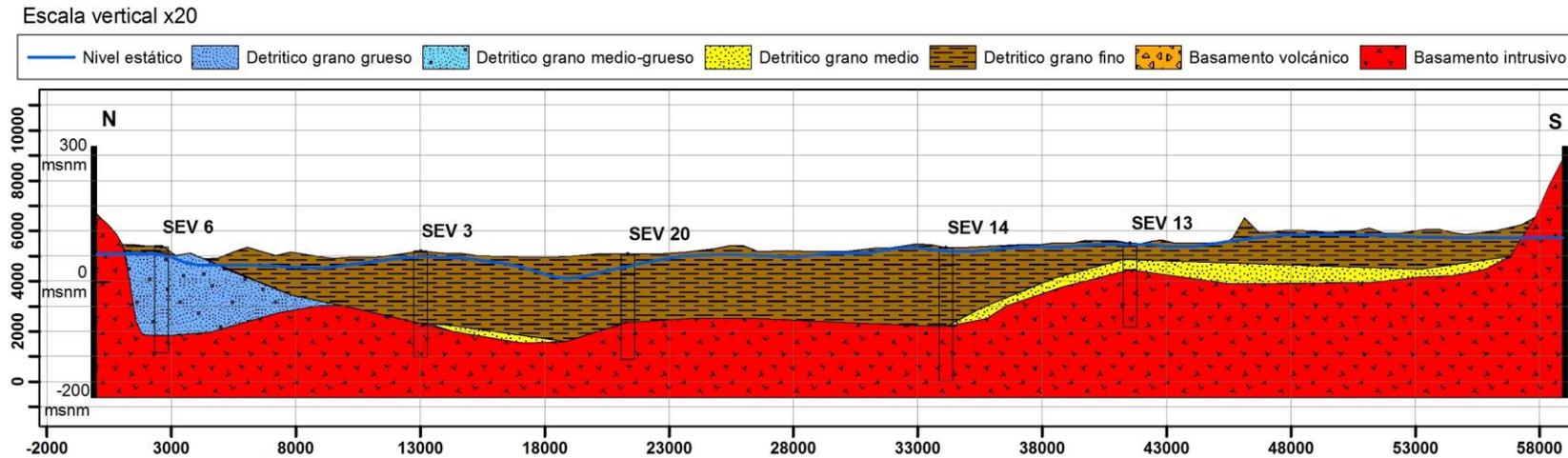


Figura 47. Perfil 6-6' del acuífero Nilahue

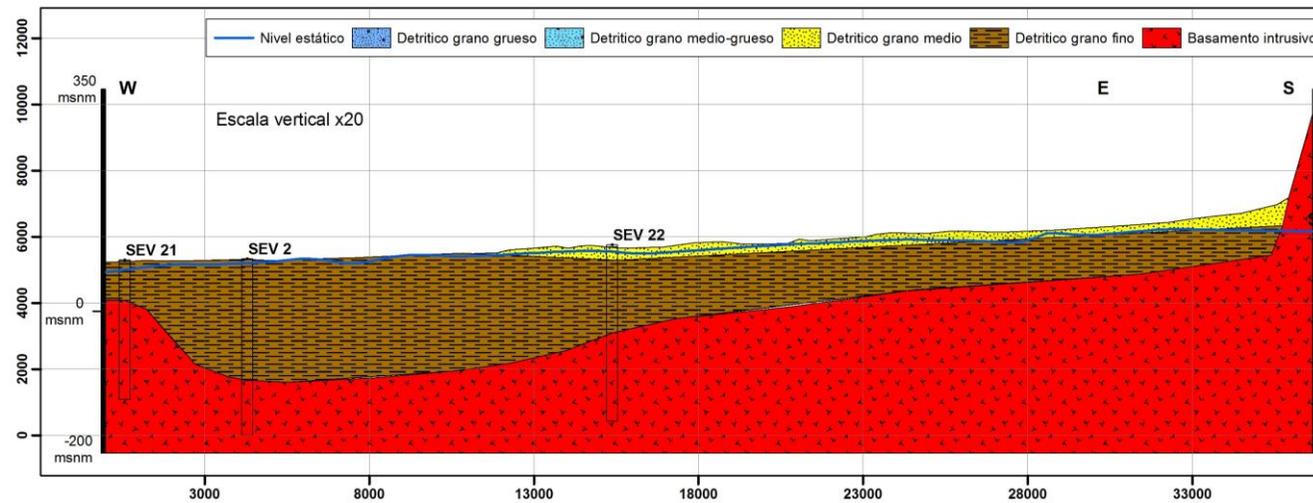


Figura 48. Perfil 12-12' del acuífero Nilahue

A partir de los perfiles elaborados, se ha realizado un mapa de profundidad del basamento:

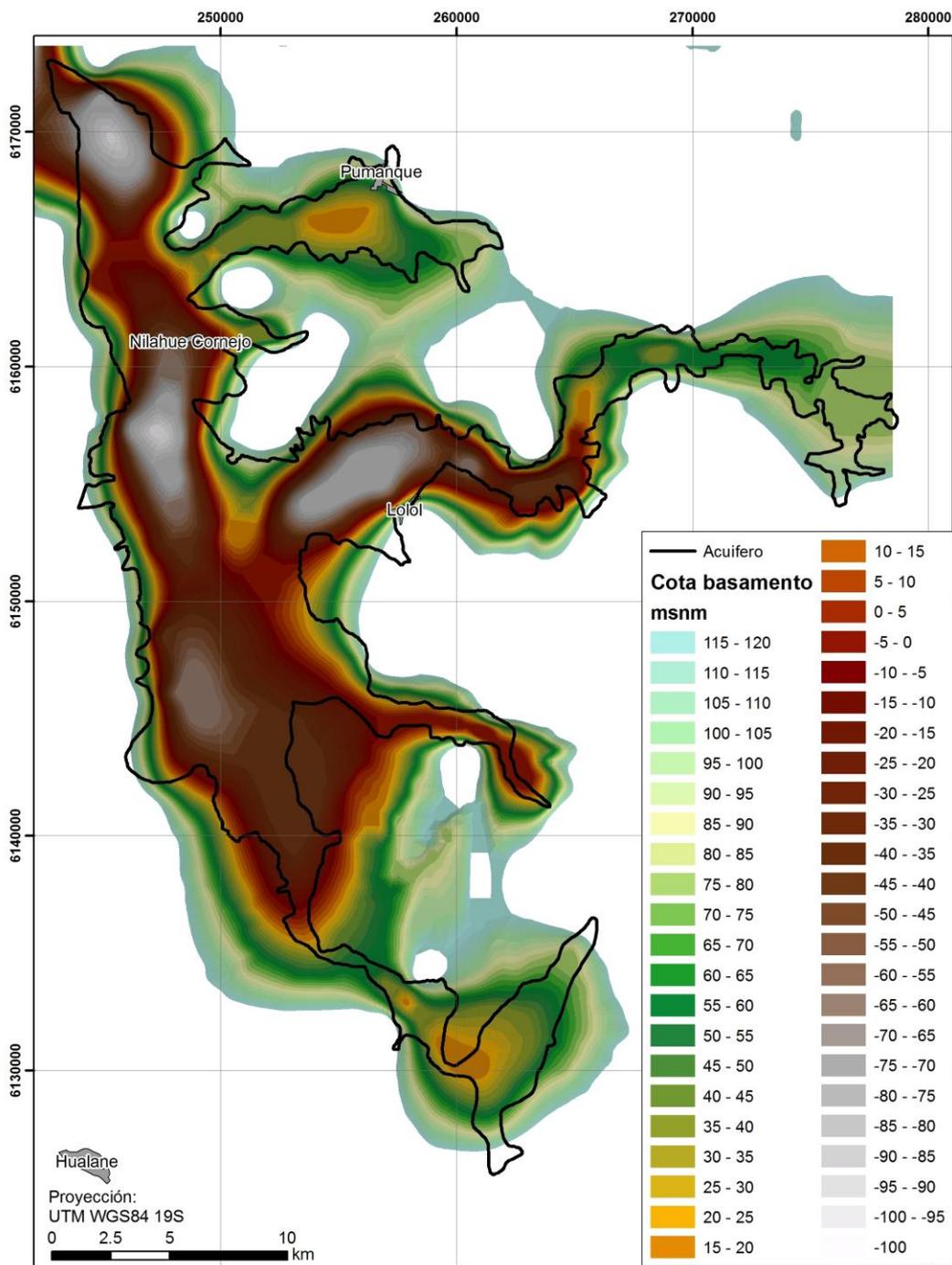


Figura 49. Mapa de profundidad del basamento. Acuífero Nilahue

### **8.2.3. LÍMITES DEL SISTEMA**

El acuífero Nilahue se encuentra limitado prácticamente por todo el perímetro por el contacto entre formaciones permeables y el basamento impermeable intrusivo y volcánico. No obstante, la parte norte del mismo se encuentra abierto por el aluvial del estero Nilahue, el cual queda fuertemente encajado por el relieve montañoso, quedando una pequeña sección acuífera que llega hasta la desembocadura del mismo río en las inmediaciones de Pichilemu.

Asimismo, el acuífero presenta entradas laterales de forma subsuperficial desde los afluentes y quebradas existentes.

### **8.2.4. CAPTACIONES**

En este acuífero hay una fuerte explotación subterránea, motivada por la demanda hídrica para agricultura existente en el área.

Tal y como se menciona en apartados anteriores, el volumen de explotación encuestado total asciende a 21.940.065 m<sup>3</sup>/año, equivalentes a 671,28 l/s. No obstante, debido a las encuestas realizadas, se estima que el volumen de explotación puede ser de en torno a un 15% más, lo que situaría el volumen anual de explotación en 25,23 hm<sup>3</sup>/año (771,97 l/s).

Las características y distribución de las captaciones se encuentran definidas en el apartado 7 del presente informe.

### **8.2.5. PIEZOMETRÍA**

En el presente estudio se llevó a cabo una campaña de piezometría a partir de la cual se ha definido la superficie piezométrica del acuífero y el sentido de flujo subterráneo.

En la figura siguiente se presenta un plano de isopiezas y de sentido de flujo, en el cual se puede observar que la dirección preferente de flujo es de sur a norte en el valle central (estero Nilahue), y de oeste a este en los afluentes.

Asimismo, existen conos de depresión indicativos de la afección antrópica producida por bombes en el acuífero, donde se producen alteraciones del sentido natural de flujo.

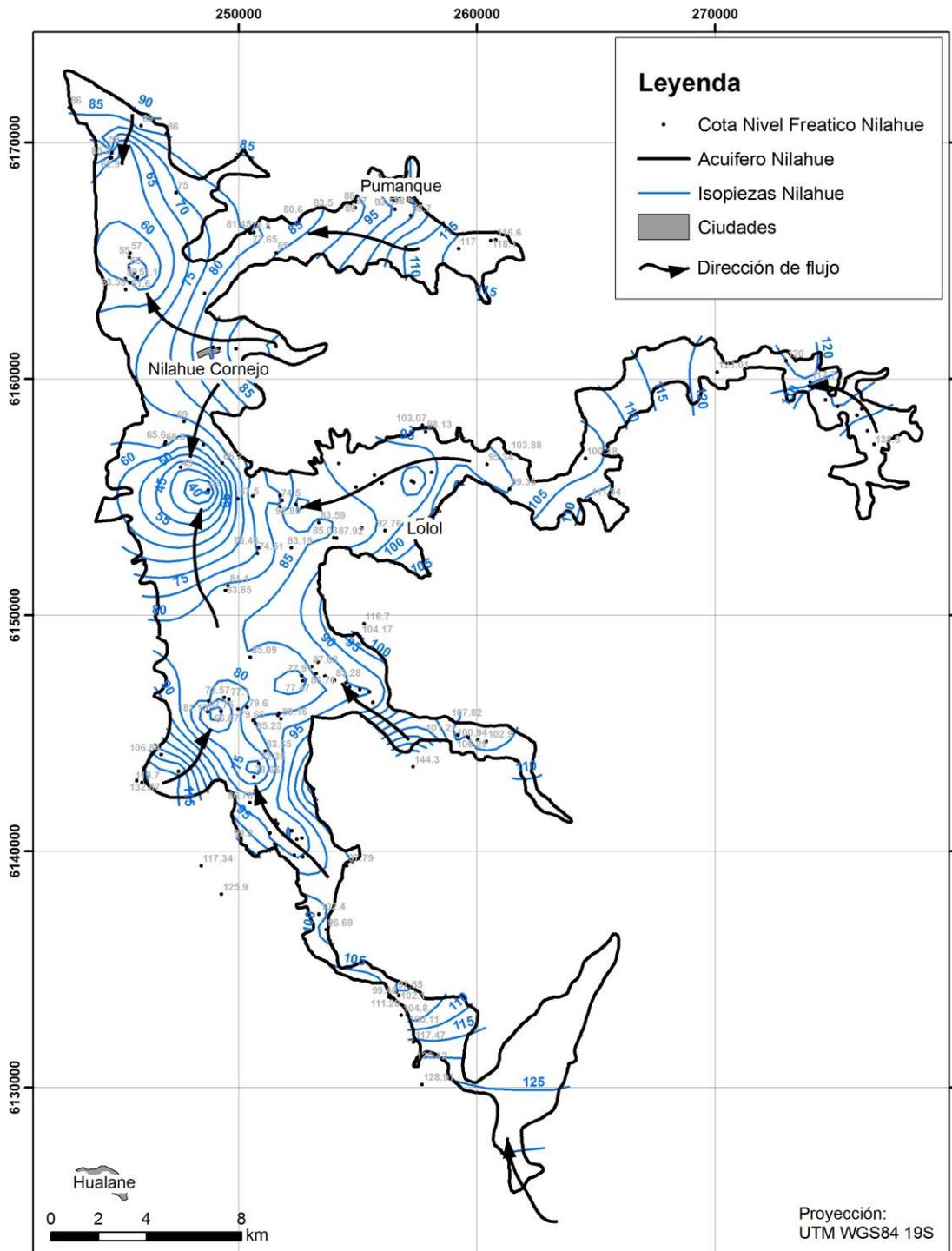


Figura 50. Mapa de isopiezas y sentido de flujo del acuífero Nilahue

## 8.2.6. PARÁMETROS ELÁSTICOS

En el "Estudio Hidrogeológico en Ciudades y Pueblos de la VI Región", realizado por GCF Ingenieros Consultores en 2001, se ofrecen los siguientes parámetros elásticos, obtenidos a partir de pruebas de gasto variable:

Tabla 31. Parámetros elásticos. Lolol (acuífero Nilahue).

Pozo	T (m <sup>2</sup> /d)	k (m/d)
507	41,56	0,78
508	84,93	1,61
1646	38,71	1,04

En el estudio denominado "Diagnóstico Potencial Hídrico Acuíferos Costeros Provincia Cardenal Caro, Sexta Región", se realizó un modelo numérico del acuífero Nilahue y se obtuvieron una serie de parámetros elásticos que se incluyen a continuación:

Tabla 32. Parámetros elásticos. Cuenca Nilahue

Pozo	Comuna	Cuenca	Sector	T (m <sup>2</sup> /d)	k (m/d)
201	Lolol	Nilahue	Est. Lolol	13,6	3,9
156	Lolol	Nilahue	Ranguili	12,5	3,3
126	Paredones	Nilahue	El Potrero	30,7	17,5
417	Lolol	Nilahue	Ranguil	46,8	0,8
552	Lolol	Nilahue	Est. Quiahue	170	2,4

Tabla 33. Parámetros elásticos por sectores. Acuífero Nilahue

Cuenca	Sector	k (m/d)	S (%)
Nilahue	Junta Quillayes-Nilahue	40	10
Nilahue	La Palmilla	60	15
Nilahue	Pumanque	3	3
Nilahue	La Palma	60	10
Nilahue	La Palma	5	5
Nilahue	Portezuelo	65	12
Nilahue	Portezuelo	8	5
Nilahue	E. Quiahue	55	10
Nilahue	E. Quiahue	3	3

El informe presentado por el Departamento de Estudios y Planificación, revisó 64 pruebas de bombeo, de las cuales solamente 21 presentaban pruebas de gasto constante. Las constantes hidrodinámicas que obtuvieron de dicho análisis (utilizando el programa comercial AQUIFER TEST) son las que se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 34. Parámetros elásticos. Acuífero Nilahue

Pozo	Espesor	Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)	Permeabilidad (m/d)
P1 30	30	233	7,8
P4 74	74	11	0,2
P22_1 70	70	56	0,8
P22_2 36	36	59	1,6
P28 120	1206	1604	1,3
P29 6	6	17	2,9
P31_1 117	117	87	0,7
P31_2 118	118	224	1,9
P31_3 132	132	75	0,6
P31_4 121	121	96	0,8
P32_8 100	100	47	0,5
P34 92	92	54	0,6
P37 34	34	106	3,1
P44_N 47	47	1714	36,5
P44_1 45	45	16	0,4
P44_2 74	74	10	0,1
P47 85	85	138	1,6
P48 90	90	122	1,4
P54 71	71,5	39	0,5
P56 60	60	104	1,7

### 8.2.7. BALANCE HÍDRICO

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

- Entradas
  - Infiltración por precipitación directa en el acuífero.

- Entradas laterales por escorrentía subsuperficial (infiltración en cuencas aportantes).
- Infiltración directa desde el estero Nilahue.
- Salidas
  - Bombeos.
  - Subterráneas hacia el aluvial del estero Nilahue
  - Afloramientos al sistema superficial

### **8.2.7.1. ENTRADAS**

#### **8.2.7.1.1. 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.

La cuenca costera entre río Rapel y estero Nilahue se ha dividido en 31 subcuencas aportantes al acuífero Nilahue, y en 6 subcuencas vertientes al mar, sin tener en cuenta el acuífero en sentido estricto (ver Figura 51).

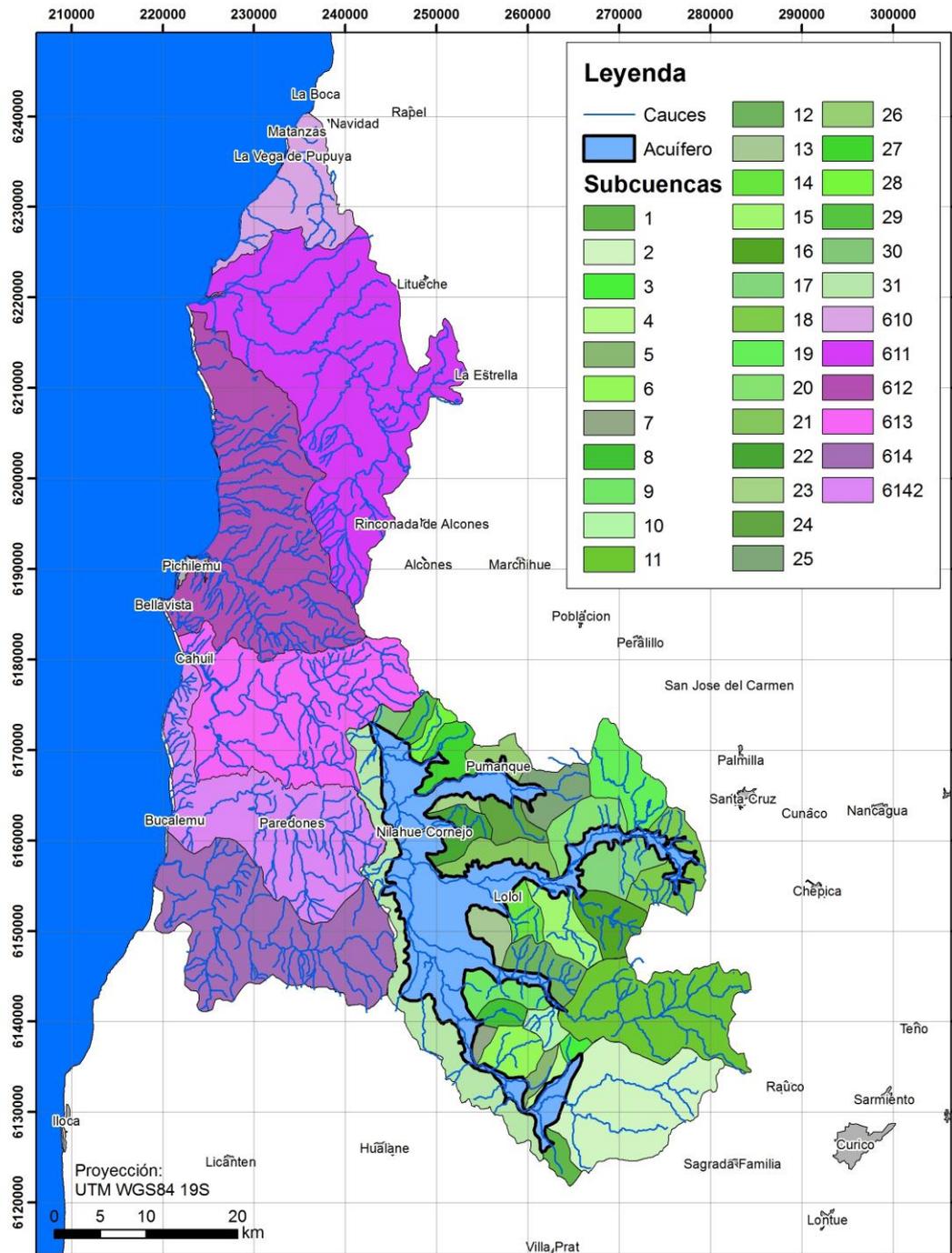


Figura 51. División en subcuencas para el balance hídrico de la Cuenca Costera entre Rapel y Nihue

- 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 (Soil Conservation Service), 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 35. 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, bajo, monte,...)	----	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

Tabla 35. Estimación del umbral de escorrentía

Uso de la tierra	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Cereales de invierno		N	25	16	11	8
	< 3	R / N	28	19	14	11
	> 3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	< 3	R / N	34	21	14	12

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 ( $P_0 \sim 0$ ) y de los distintos tipos de suelo, atribuyendo a cada uno el valor correspondiente de  $P_0$  según la tabla.

Al estimar el valor de  $P_0$  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 ( $P_0$ ) (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 36. 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	Arcillosa	Pobre a muy

Tabla 36. Grupos de suelo

Grupo	Infiltración	Potencia	Textura	Drenaje
		(litosuelo horizontes arcilla)	u de	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:

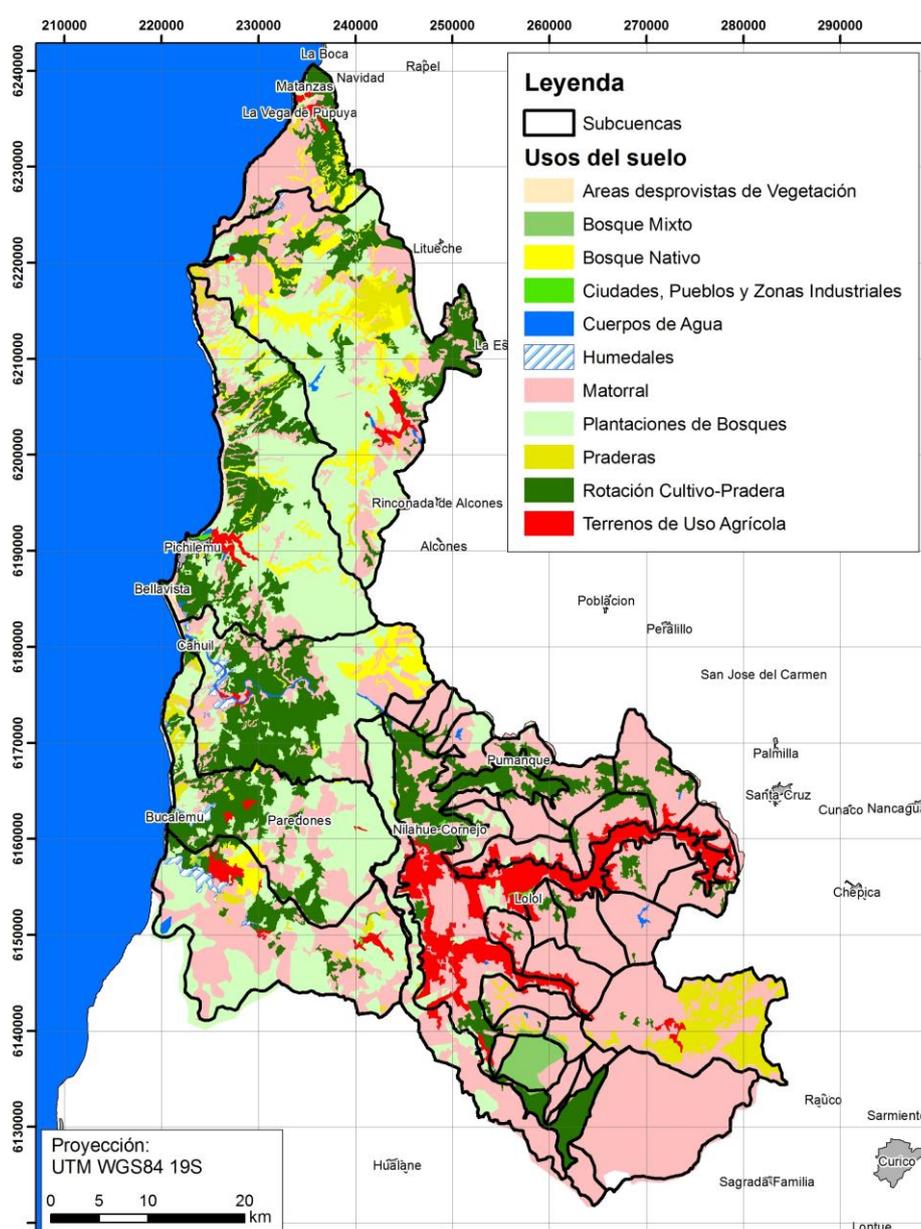


Figura 52. Clasificación de usos del suelo. Cuenca Costera entre Rapel y Nihue Elaboración propia a partir de información facilitada por la CNR.

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

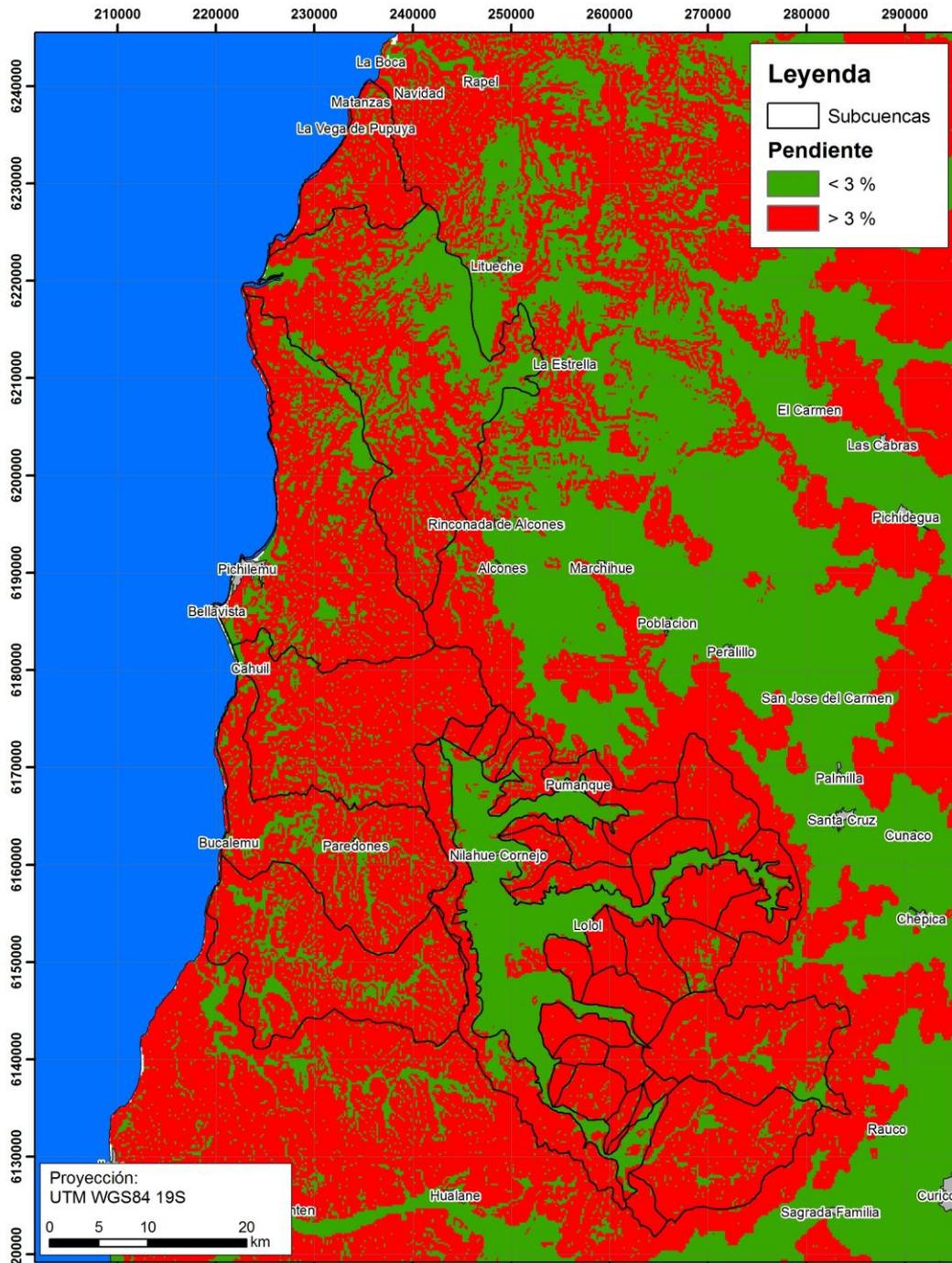


Figura 53. Clasificación de pendientes. Cuenca Costera entre Rapel y Nihue

La permeabilidad del terreno se ha establecido en función de la categoría de drenaje asignada a tipo de suelo, siendo A el suelo con mayor facilidad de drenaje y D el con mayor dificultad de drenaje:

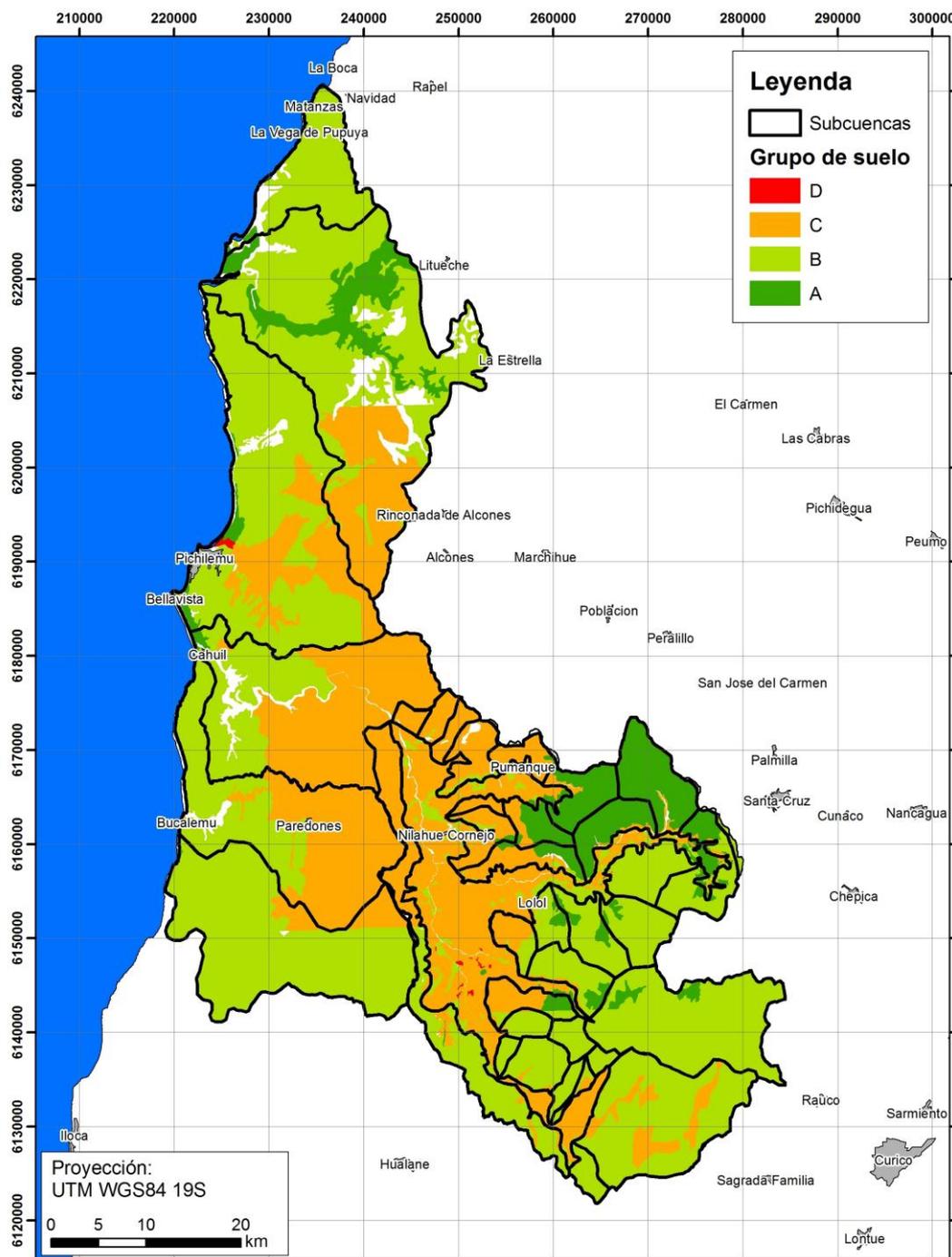


Figura 54. Clasificación en grupos de suelo. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue

Intersectando las tres zonificaciones del terreno, y teniendo en cuenta los valores proporcionados por la Tabla 35, se obtiene la siguiente zonificación del umbral de escorrentía ( $P_o$ ):

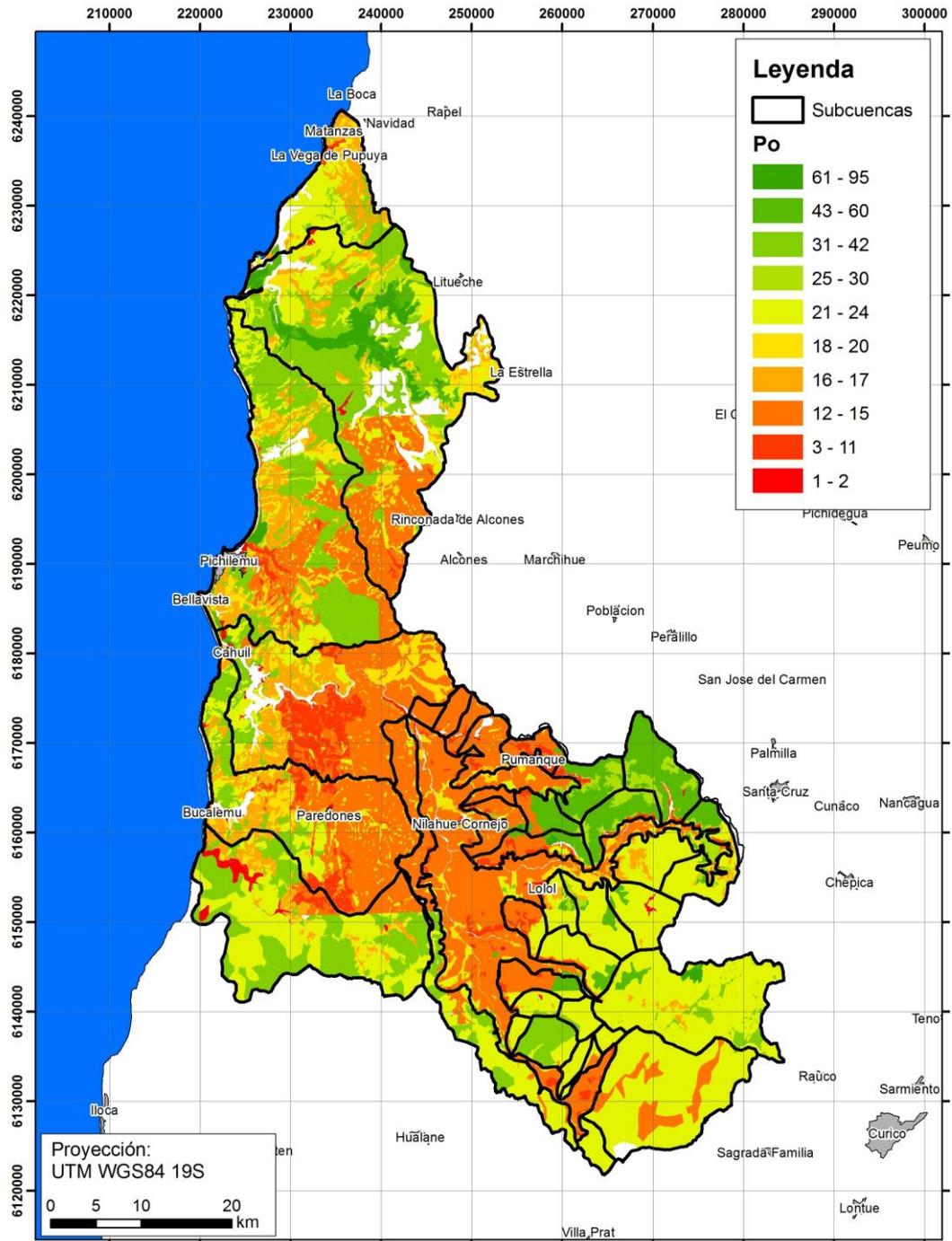


Figura 55. Clasificación del umbral de escorrentía. Cuenca Costera entre Rapel y Nihue

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

Tabla 37. Umbral de escorrentía por subcuenca

Zona	Po (mm)	Zona	Po (mm)
Acuífero	15,69	Cuenca 19	51,55
Cuenca 1	23,73	Cuenca 20	47,01
Cuenca 2	22,20	Cuenca 21	28,75
Cuenca 3	23,44	Cuenca 22	17,44
Cuenca 4	20,94	Cuenca 23	14,39
Cuenca 5	23,31	Cuenca 24	43,59
Cuenca 6	31,36	Cuenca 25	47,70
Cuenca 7	23,56	Cuenca 26	15,77
Cuenca 8	23,64	Cuenca 27	14,60
Cuenca 9	23,62	Cuenca 28	13,90
Cuenca 10	25,03	Cuenca 29	13,93
Cuenca 11	26,53	Cuenca 30	13,75
Cuenca 12	28,48	Cuenca 31	22,03
Cuenca 13	15,76	Cuenca 610	22,95
Cuenca 14	25,93	Cuenca 611	32,05
Cuenca 15	27,37	Cuenca 612	25,43
Cuenca 16	25,71	Cuenca 613	17,33
Cuenca 17	22,56	Cuenca 614	26,02
Cuenca 18	30,59	Cuenca 614,2	19,05

- 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 el "Estudio Agrológico VI Región", del CIREN, el cual ofrece valores de Capacidad de Campo (humedad retenida a 33 kPa) y de Punto de Marchitez Permanente (humedad retenida a 1500 kPa) para los distintos suelos de la zona de estudio:

Tabla 38. Características de los principales suelos en la zona de estudio

ASOCIACION PIUCHEN (PIU)					Medio
Prof, (m)	0,1	0,36	0,6	0,9	
CC (%)	23	17	18	25	0,2075
PMP (%)	8	9	9	15	0,1025
Prof radicular (m)					0,6

SERIE NILAHUE (NIL)					Medio	
Prof, (m)	0,1	0,22	0,28	0,45	0,82	
CC (%)	24	24	19	23	26	0,232
PMP (%)	10	10	8	8	10	0,092
Prof radicular (m)						0,6

SERIE BARAHONA BAR)					Medio	
Prof, (m)	0,16	0,21	0,41	0,46	0,82	
CC (%)	23	19	16	12	25	0,19
PMP (%)	14	9	7	5	14	0,098
Prof radicular (m)						0,5

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 39. Recarga por infiltración directa en acuífero y subcuencas de la Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue

Zona	Área permeable (km <sup>2</sup> )	Recarga mm/año	Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Recarga (l/s)
Acuífero	331,04	14,963	4,953	157,07
Cuenca 1	13,26	61,582	0,817	25,89
Cuenca 2	166,09	54,667	9,079	287,91
Cuenca 3	6,55	60,412	0,396	12,55
Cuenca 4	6,09	47,092	0,287	9,09
Cuenca 5	9,76	59,882	0,584	18,53
Cuenca 6	29,48	89,124	2,627	83,32

Tabla 39. Recarga por infiltración directa en acuífero y subcuencas de la  
Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue

Zona	Área permeable (km <sup>2</sup> )	Recarga mm/año	Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Recarga (l/s)
Cuenca 7	6,74	60,878	0,410	13,01
Cuenca 8	13,27	61,231	0,813	25,77
Cuenca 9	27,39	61,148	1,675	53,11
Cuenca 10	14,35	66,757	0,958	30,37
Cuenca 11	167,45	72,767	12,185	386,38
Cuenca 12	31,94	80,496	2,571	81,53
Cuenca 13	21,85	15,571	0,340	10,79
Cuenca 14	19,54	70,395	1,376	43,62
Cuenca 15	36,68	76,124	2,792	88,54
Cuenca 16	38,32	69,488	2,663	84,44
Cuenca 17	39,29	56,462	2,218	70,34
Cuenca 18	47,59	86,838	4,133	131,04
Cuenca 19	57,34	135,342	7,761	246,09
Cuenca 20	34,46	128,821	4,439	140,77
Cuenca 21	30,79	81,295	2,503	79,38
Cuenca 22	24,06	26,070	0,627	19,89
Cuenca 23	7,08	4,557	0,032	1,02
Cuenca 24	23,14	121,975	2,822	89,50
Cuenca 25	34,81	130,191	4,531	143,69
Cuenca 26	19,34	15,578	0,301	9,55
Cuenca 27	27,49	6,289	0,173	5,48
Cuenca 28	11,97	0,650	0,008	0,25
Cuenca 29	12,44	0,912	0,011	0,36
Cuenca 30	7,83	0,000	0,000	0,00
Cuenca 31	124,39	61,582	7,660	242,91
Cuenca 610	96,66	58,383	5,643	178,95
Cuenca 611	496,48	91,217	45,287	1436,05
Cuenca 612	395,22	68,391	27,030	857,10
Cuenca 613	294,95	25,456	7,508	238,09
Cuenca 614	296,73	70,730	20,988	665,51
Cuenca 614.2	263,93	35,765	9,439	299,32

Puesto que de la cuenca 1 a la 31 vierten al acuífero, las entradas por precipitación directa y laterales en el mismo serían del orden de los 76,79 hm<sup>3</sup>/año, equivalentes a 2.425 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 acuífero de Nilahue (cuencas de la 1 a la 31), ya sea de forma subterránea, subsuperficial o directamente superficial, o vierten al mar (cuencas 610 a 614.2).

#### **8.2.7.1.2. Entradas por infiltración desde cauces**

En este acuífero el cauce de mayor entidad es el estero Nilahue, cuya infiltración al acuífero puede ser un elemento de cierta importancia para la definición del balance hídrico y del modelo numérico. Por este motivo se han realizado aforos diferenciales en distintos puntos del Estero.

Tras los resultados obtenidos se ha concluido que el río es tanto ganador como perdedor, actuando principalmente como río ganador, aunque esta relación varía en función de la cota piezométrica del acuífero, y que puede ser calculada a partir de la modelación numérica.

En el modelo ejecutado se han calculado una infiltración de 250 l/s.

#### **8.2.7.1.3. Resumen de entradas**

Se incluye a continuación un resumen de las entradas al sistema acuífero de Nilahue:

Tabla 40. Entradas al sistema acuífero de Nilahue

Concepto	Q (hm <sup>3</sup> /año)	Q (l/s)
Recarga directa lluvia	4,95	157,07
Laterales	76,79	2435,12
Infiltración Nilahue	7,94	250
Total entradas	89,68	2842

\* Infiltración del Nilahue obtenida de la modelación numérica expuesta posteriormente

Por otro lado, las entradas en las otras cuencas, con vertido al mar, son las siguientes:

Tabla 41. Entradas a otras cuencas

Concepto	Q (hm <sup>3</sup> /año)	Q (l/s)
Cuenca 610	5,64	178,95
Cuenca 611	45,29	1436,05
Cuenca 612	27,03	857,10
Cuenca 613	7,51	238,09
Cuenca 614	20,99	665,51
Cuenca 614.2	9,44	299,32
Total	115,90	3675,03

### 8.2.7.2. SALIDAS

El sistema tiene como salida principal las extracciones por bombes, aunque también posee salidas naturales de forma subterránea.

Las salidas por bombes de aguas subterráneas en el sistema acuífero de Nilahue se han cuantificado en 25,23 hm<sup>3</sup>/año, equivalentes a 800 l/s.

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:

$$Q=A*k*i$$

Donde,

Q= Caudal de salida [L<sup>3</sup>/t)

A= Área de la sección de paso [L<sup>2</sup>]

K= permeabilidad del terreno [L<sup>2</sup>/t]

i= gradiente hidráulico

El gradiente en la zona norte (descarga subterránea) se ha obtenido del trazado de isopiezas del acuífero (0,0061), que en la figura siguiente se observa a escala de cuenca.

La permeabilidad asignada es de 50 m/d, atendiendo a antecedentes recopilados.

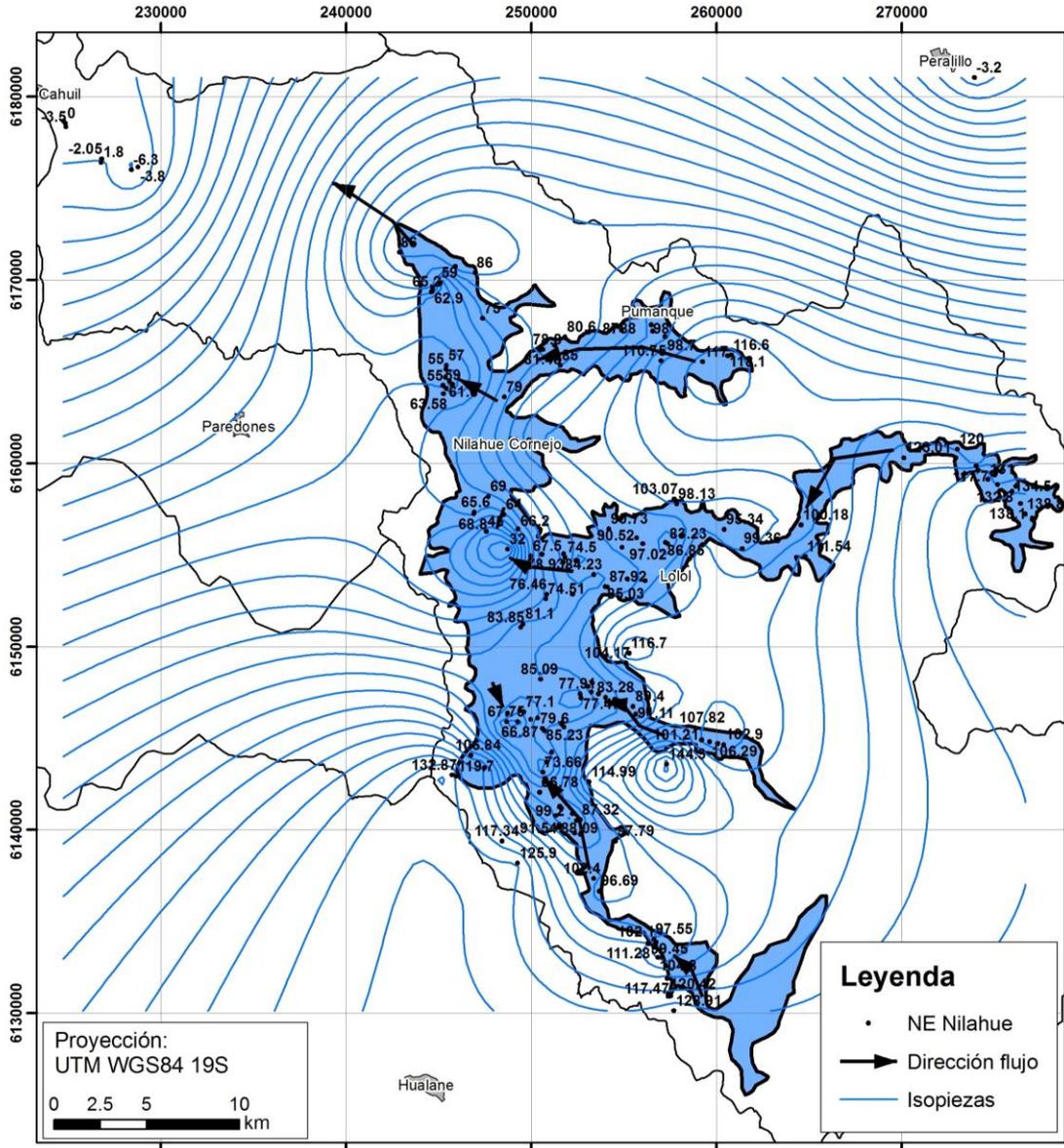


Figura 56. Isopiezías. Cuenca Costera entre Rapel y Nihue

Tabla 42. Salidas subterráneas

Zona de entrada/salida subterránea	Área (m <sup>2</sup> )	Gradiente	K (m/d)	Q (hm <sup>3</sup> /año)	Q (l/s)
Descarga norte	37.500	0,0061	50,00	4,19	132,87

### 8.2.7.3. BALANCE

Se establecen dos tipos de balances hídricos. Uno para el sistema acuífero de Nilahue, en el cual se incluyen los aportes de cuencas vertientes al sistema, y otro para las cuencas vertientes al mar, independientes del acuífero de Nilahue, que pertenecen a la cuenca costera entre Rapel y Nilahue.

El resumen del balance hídrico, a falta de confirmar la relación río-acuífero como se ha especificado anteriormente, se calcula de la siguiente forma:

- Balance hídrico en el acuífero de Nilahue

Tabla 43. Balance hídrico de Nilahue

Entradas			Salidas		
Concepto	Q (hm <sup>3</sup> /año)	Q (l/s)	Concepto	Q (hm <sup>3</sup> /año)	Q (l/s)
Recarga directa lluvia	4,95	157,07	Bombeos	25,23	800
Laterales	76,79	2435,12	Subterráneas	4,19	133
Infiltración Nilahue	7,94	251,87	Afloramientos*	60,20	1.911,06
Total entradas	89,68	2844,06	Total salidas	89,63	2.844,06

\*Los afloramientos se obtienen como resultado de ajustar el balance hídrico, ya que el sistema está condicionado por unas condiciones concretas (bombeos, entradas laterales, infiltración del río, salidas subterráneas) que deben resultar en un balance equilibrado. No obstante, en el modelo numérico realizado posteriormente se ajustan todas las variables

Este balance hídrico ha sido posteriormente modificado una vez realizado el modelo numérico del acuífero, puesto que la ejecución del modelo numérico permite darle un sentido hidrogeológico más fiable al contar con una geometría específica y unos parámetros elásticos concretos.

- Balance hídrico en cuencas vertientes al mar

El balance hídrico de las cuencas vertientes al mar 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 44. Balance hídrico cuencas vertientes al mar

Entradas		
Concepto	Q (hm <sup>3</sup> /año)	Q (l/s)
Cuenca 610	5,64	178,95
Cuenca 611	45,29	1436,05
Cuenca 612	27,03	857,10
Cuenca 613	7,51	238,09
Cuenca 614	20,99	665,51
Cuenca 614.2	9,44	299,32
Total	115,90	3675,03

### 8.2.8. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

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 1.754  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y media de 435  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), la cual incrementa ligeramente hacia la zona de desembocadura (NW).

Tabla 45. Calidad química. Catastro terreno Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue

Nº Pozo	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Fecha registro
435	178	8,78	17,7	26-ago-13
454	359	8,46	20	27-ago-13
466	460		17,7	28-ago-13
490	399	8,44	12,4	02-sep-13
492	113	8,21	12,5	03-sep-13
497	177	7,84	20,07	03-sep-13
498	153	7,06	17,02	03-sep-13
500	312	7,48	17,3	03-sep-13
507	149	7,6	17	04-sep-13
510	269	7,58	18,3	04-sep-13
514	446	7,73	18	04-sep-13
582	342	8,1	14,9	05-sep-13
584	580	8,3	16,8	05-sep-13

N° Pozo	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Fecha registro
585	433	8,05	20,9	05-sep-13
589	355	7,6	16,6	05-sep-13
590	650	7,51	15,5	05-sep-13
595	307	8,6	17,8	09-sep-13
605	593	7,8	19,6	09-sep-13
608	404	7,8	17,7	09-sep-13
612	1.754	8,2	17	10-sep-13
614	201	8,4	16,9	10-sep-13
616	867	8,18	18,2	10-sep-13
617	524	8,4	17,2	10-sep-13

Los diagramas de Piper obtenidos tanto en muestras de agua subterránea como en muestras de agua superficial (ver Figura 57 y Figura 58 ) manifiestan que se tratan de aguas Bicarbonatadas Cálcidas y Magnésicas, tipo Bicarbonatado.

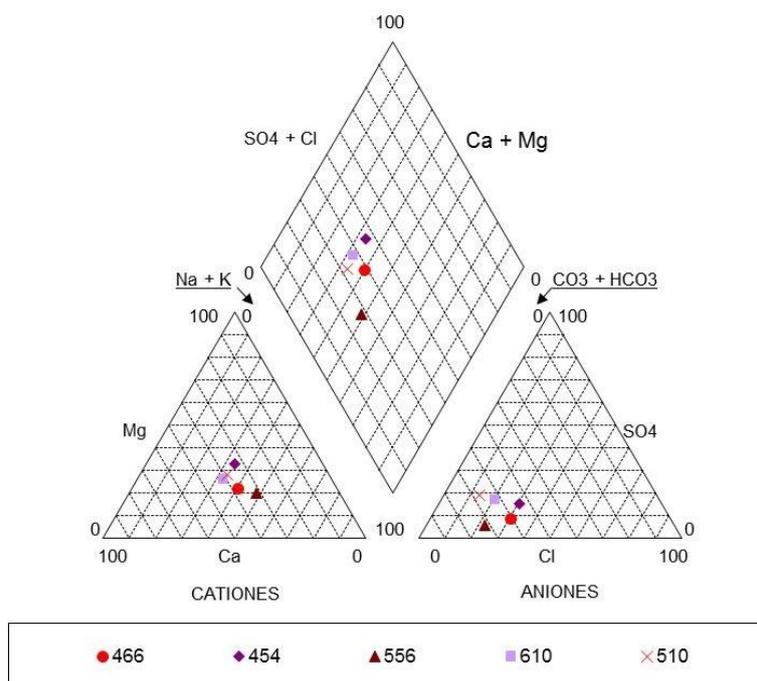


Figura 57. Diagrama de Piper en muestras de agua subterránea. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue

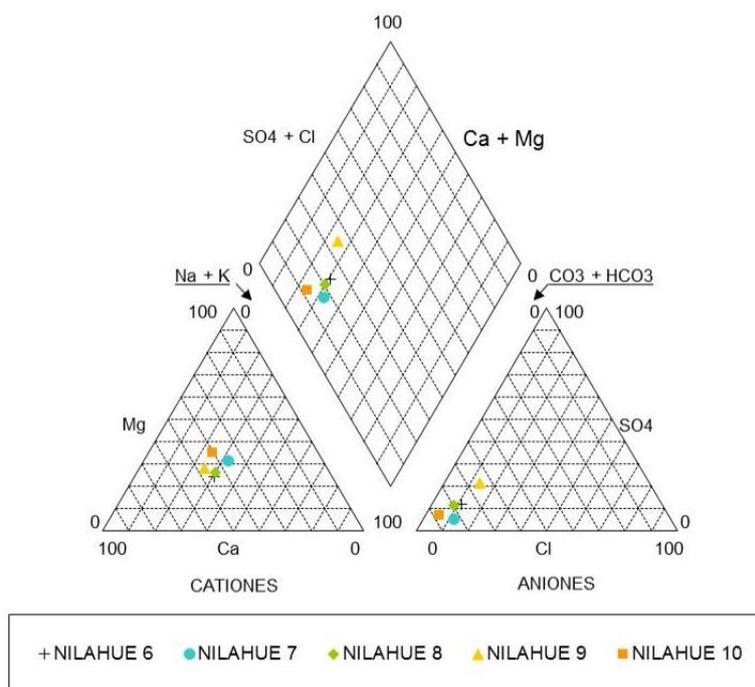


Figura 58. Diagrama de Piper en muestras de agua superficial. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue

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.

Las coordenadas de las muestras de agua tomadas para análisis en laboratorio se incluyen a continuación (proyección UTM WGS84 19S):

Tabla 46. Muestras de agua tomadas para análisis en laboratorio

Punto	X	Y	Cota
466	251304	6140777	97,17
454	252651	6140548	94,07
556	248561	6163613	96,00
610	228401	6175985	-4,00
510	254503	6147130	99,71

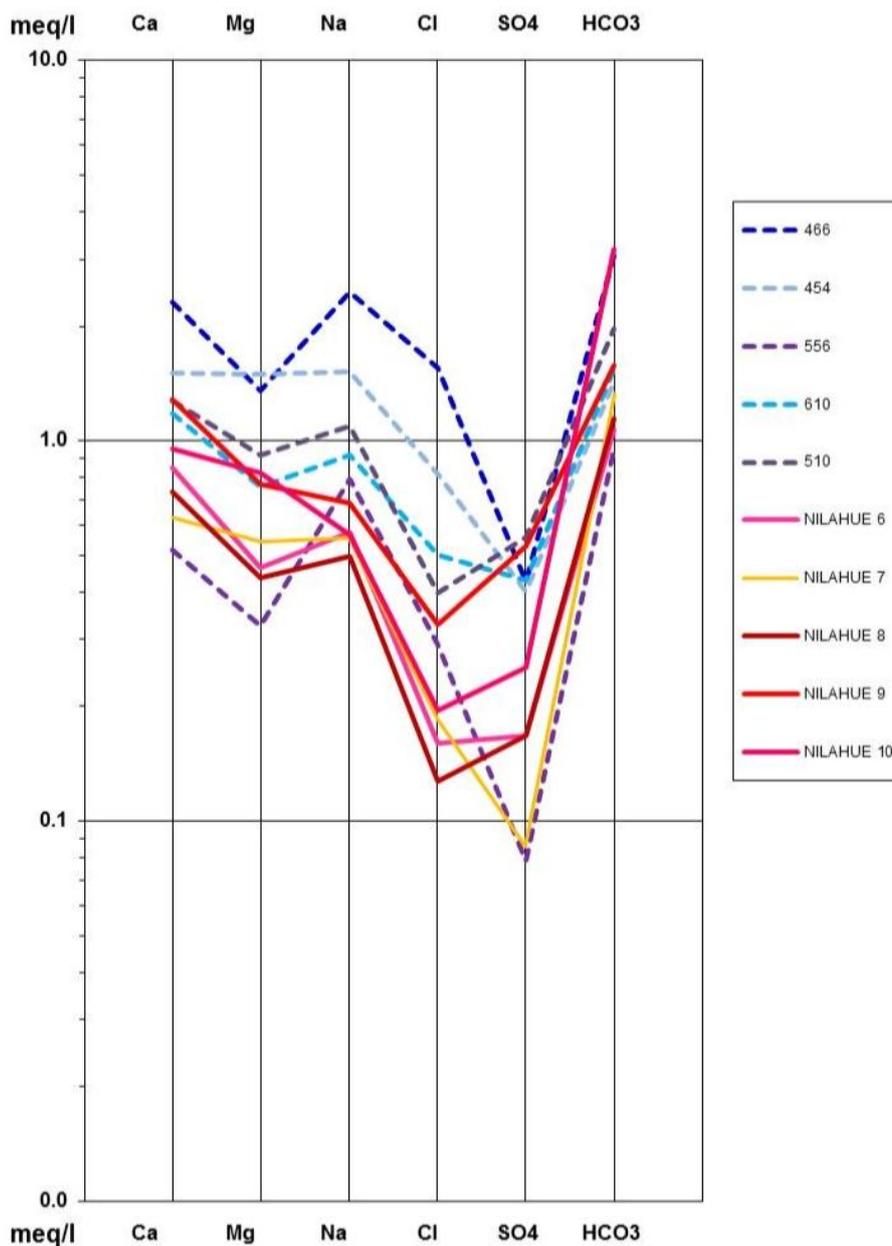


Figura 59. Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Cuenca Costera entre Rapel y Nilahue

### 8.3. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO ITATA Y BÍO-BÍO (CÓDIGO DGA 082)

#### 8.3.1. FORMACIONES PERMEABLES

En esta cuenca las formaciones permeables son de origen sedimentario, que descansan sobre el basamento metamórfico e intrusivo.

Las formaciones permeables corresponden a las siguientes unidades geológicas:

- Depósitos Aluviales, Coluviales, remoción en masa y fluviales.

Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. Se desarrollan principalmente en la Depresión Central. Depósitos fluviales conformados por gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación. La edad de estos depósitos corresponde al periodo Pleistoceno – Holoceno.

- Depósitos Litorales.

Depósitos semiconsolidados, marinos litorales o fluviales estuarinas compuesto de coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos. Se observan en el borde litoral, al suroeste del área de estudio. La edad de estos depósitos corresponde al Pleistoceno.

### **8.3.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS**

La geometría del acuífero de Talcahuano (único acuífero de interés hidrogeológico en la cuenca), ha sido elaborada a partir de la información hidrogeológica existente, de la campaña de terreno llevada a cabo y de la campaña de prospección geofísica descrita en apartados anteriores.

Para definir la geometría del acuífero se han elaborado 11 perfiles hidrogeológicos. Se incluye a continuación una figura con el trazado en planta de los perfiles realizados, y posteriormente una serie de figuras con los más representativos del sistema:

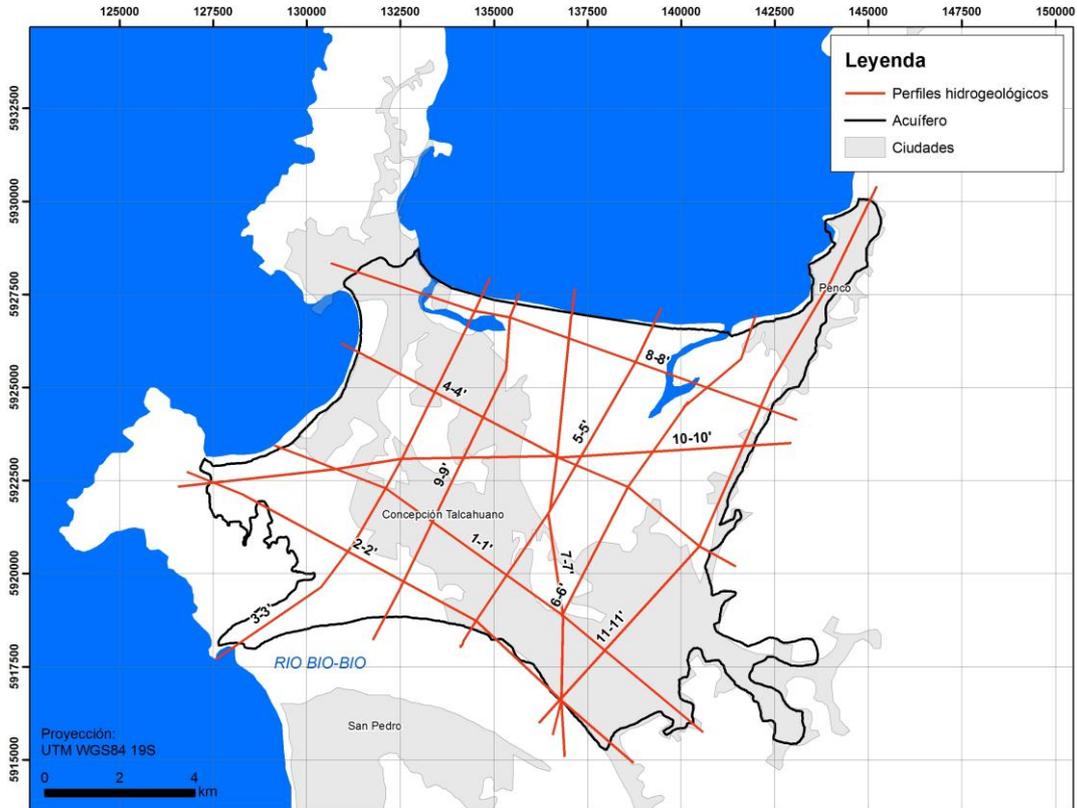


Figura 60. Situación general de los perfiles hidrogeológicos realizados.  
Acuífero Talcahuano

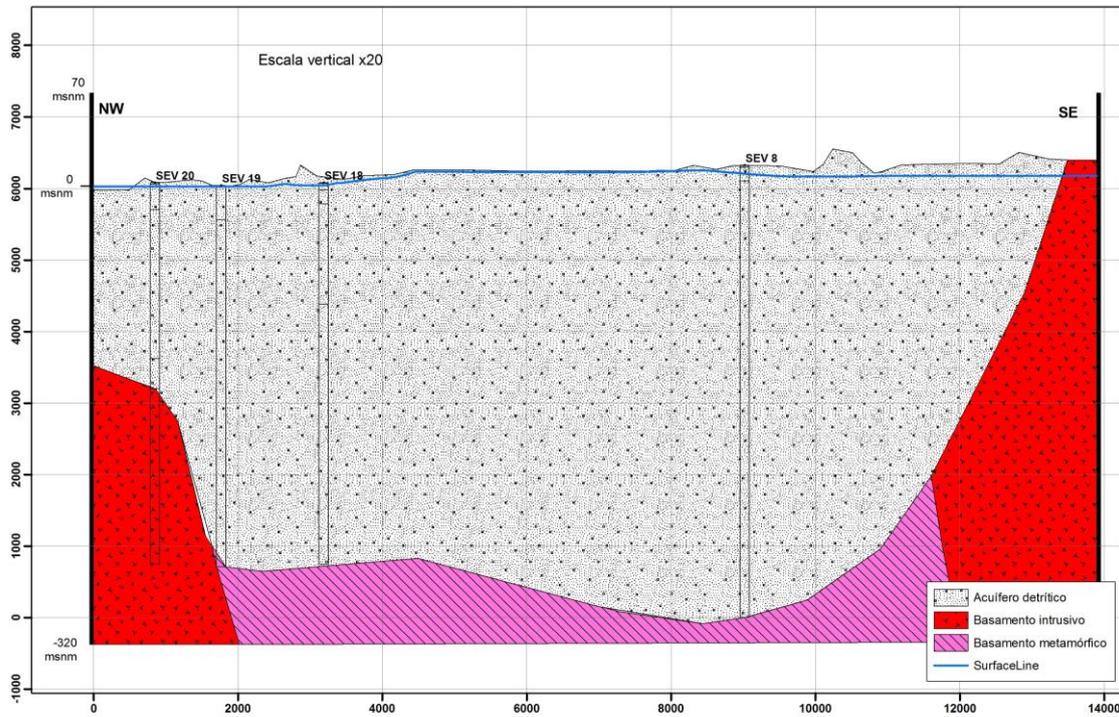


Figura 61. Perfil 1-1'. Acuífero Talcahuano

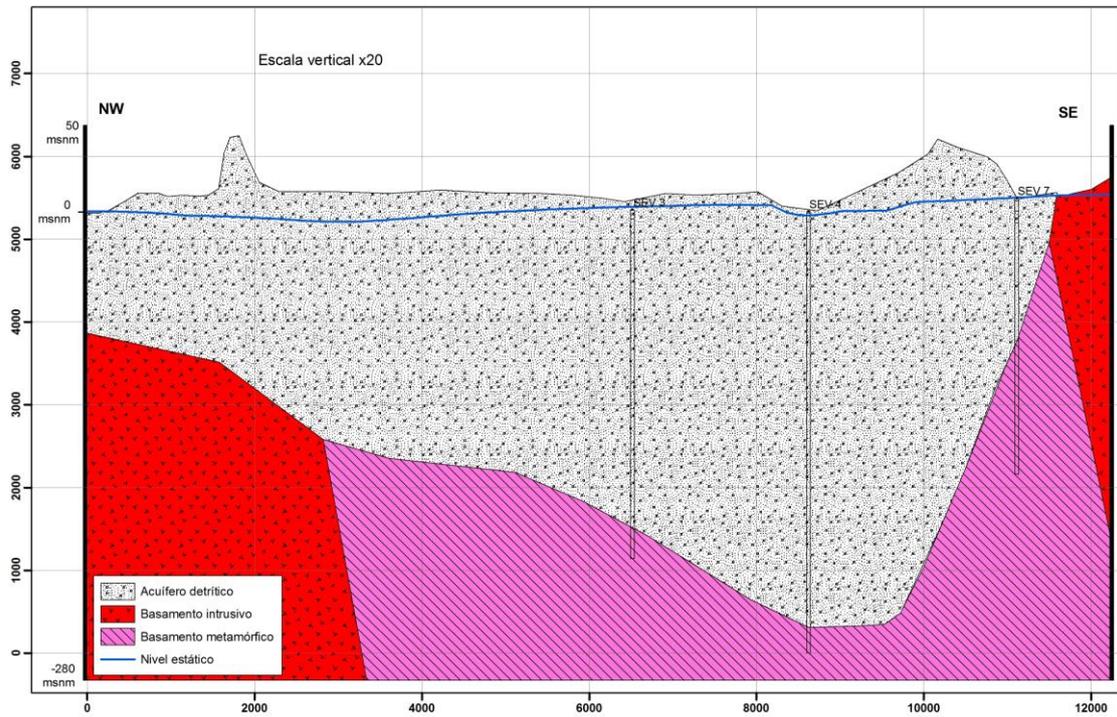


Figura 62. Perfil 4-4'. Acuífero Talcahuano

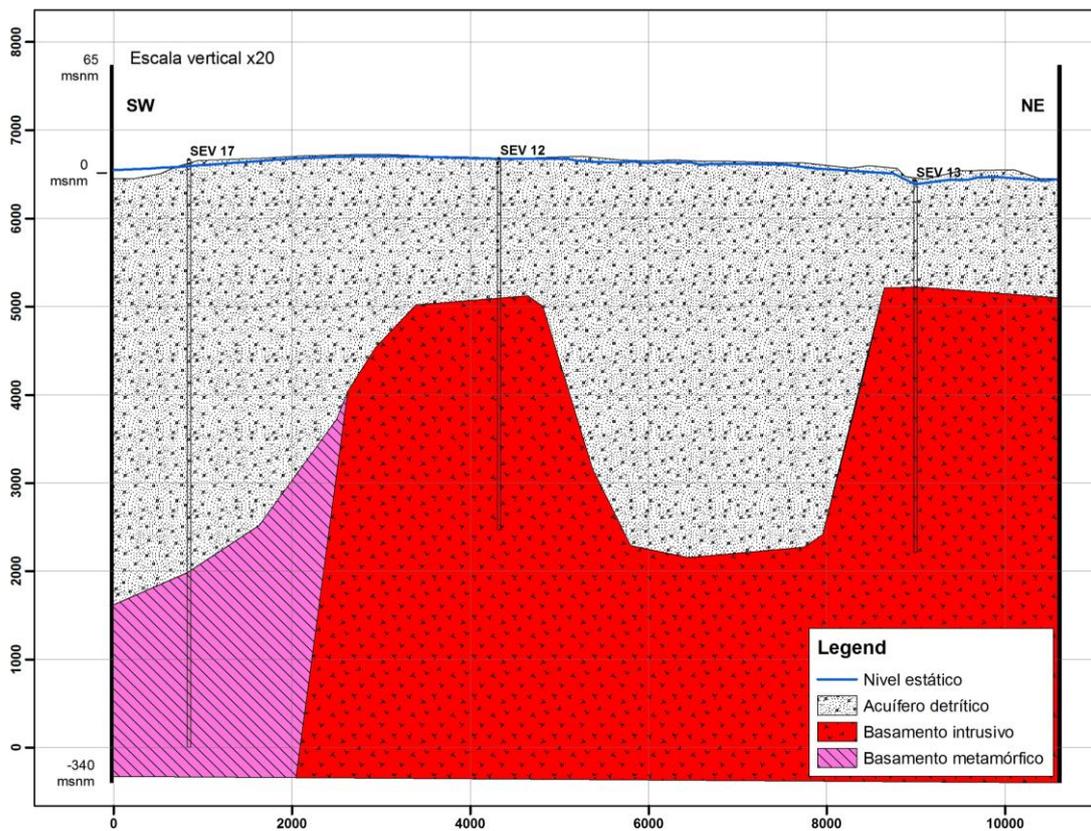


Figura 63. Perfil 5-5'. Acuífero Talcahuano

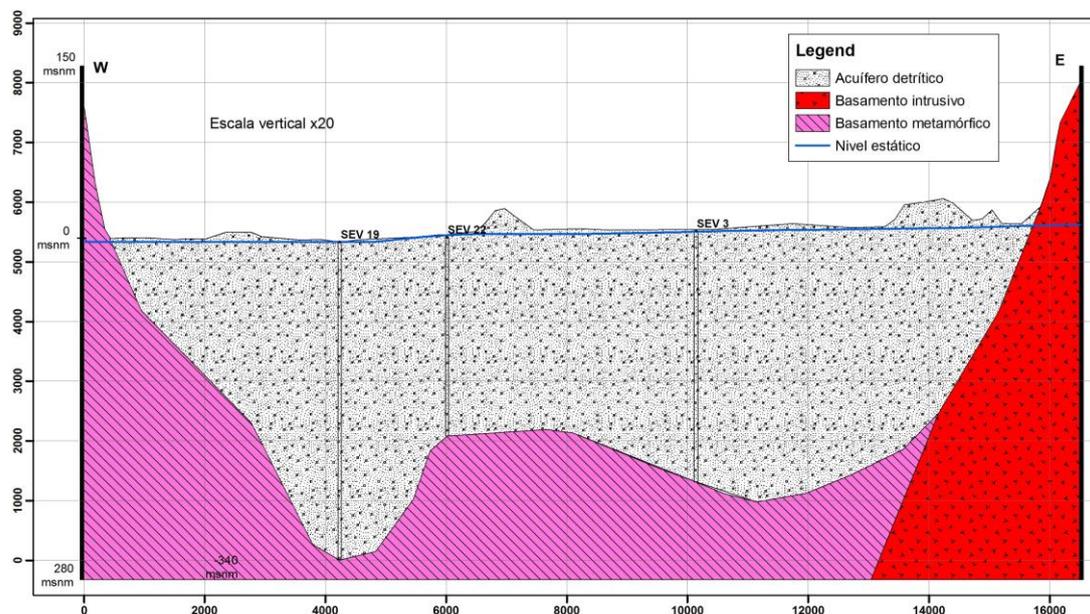


Figura 64. Perfil 10-10'. Acuífero Talcahuano

### 8.3.3. LÍMITES DEL SISTEMA

El acuífero de Talcahuano funciona como un sistema en régimen natural con límites abiertos.

Al Norte, cuyo límite es abierto con la costa, bahía de Talcahuano, el sistema presenta un equilibrio con la interfaz salina en la cual no parece existir flujo subterráneo de agua dulce hacia el mar salvo por el extremo nororiental.

Al oeste, el límite también es abierto, donde si se produce una salida de agua dulce hacia el mar, también en equilibrio con la interfaz salina.

Al sur, el acuífero presenta conexión con el cauce del río Biobío.

Al este, se encuentra limitado por afloramientos del basamento impermeable, con entradas subsuperficiales procedentes de quebradas y esteros.

### 8.3.4. CAPTACIONES

En esta cuenca no hay numerosas captaciones ni son de gran entidad. Según el catastro realizado el volumen de explotación asciende a 790.000 m<sup>3</sup>/año, equivalentes a 25,05 l/s.

Las características y distribución de las captaciones se encuentran definidas en el apartado 7 del presente informe.

### 8.3.5. PIEZOMETRÍA

En el presente estudio se llevó a cabo una campaña de piezometría a partir de la cual se ha definido la superficie piezométrica del acuífero y el sentido de flujo subterráneo.

En la figura siguiente se presenta un plano de isopiezas y de sentido de flujo, en el cual se puede observar que la dirección preferente de flujo es de oeste a este y de norte a sur.

El régimen de funcionamiento es muy similar al régimen natural, ya que no hay fuertes explotaciones en el acuífero.

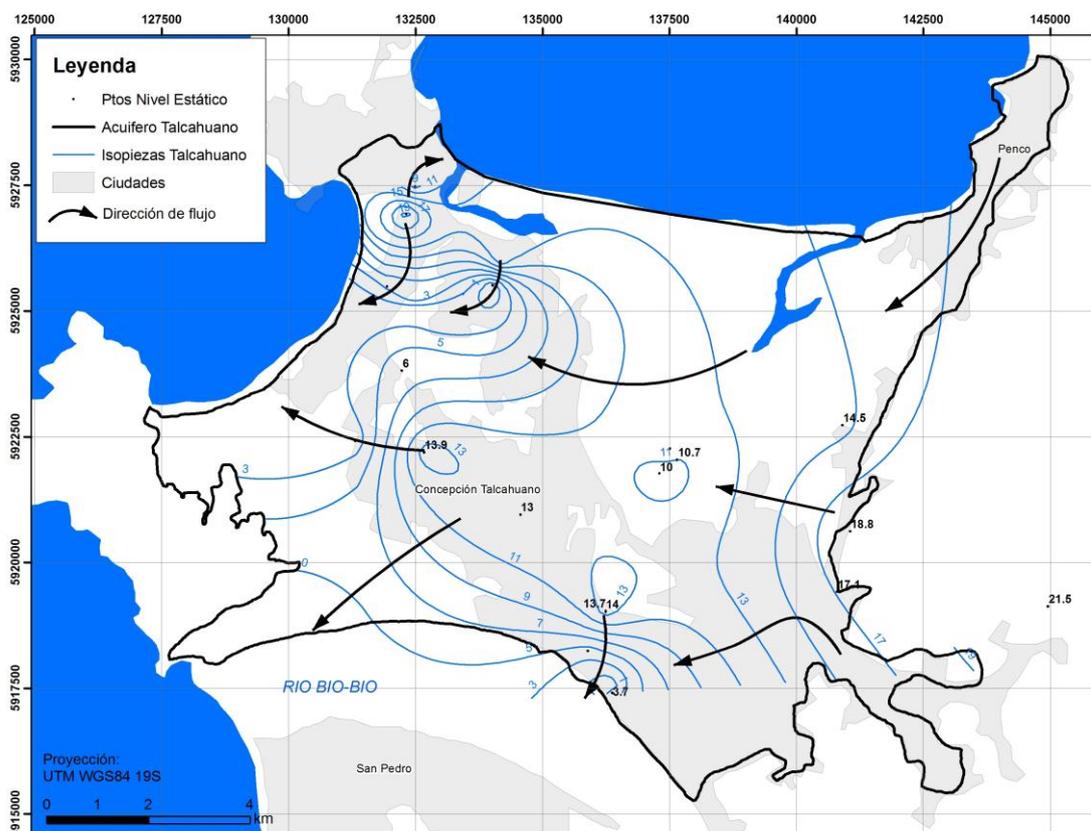


Figura 65. Mapa de isopiezas y sentido de flujo del acuífero de Talcahuano

### 8.3.6. PARÁMETROS ELÁSTICOS

Según datos facilitados por la DGA, en la cuenca costera entre Itata y Biobío se disponen de los siguientes parámetros elásticos:

Tabla 47. Parámetros elásticos. Cuenca entre Itata y Bío-Bío

X UTM	Y UTM	Prof. (m)	Cota (msnm)	Q esp (l/s/m)	T (m <sup>2</sup> /d)	K (m/d)
668349	5933720	21	12	10,00	1800,00	181,82
668141	5933187	15	22	1,45	261,29	62,21
679948	5932505	14	71	0,36	64,80	37,24
669925	5932125	46	17	3,53	635,29	25,33
676440	5928463	40	21	0,43	77,14	6,59
676461	5926344	29	24	0,28	49,61	7,45
676126	5925165	24	21	0,45	80,60	20,05
671563	5925057	32	15	0,16	28,80	8,00
671564	5925073	25	16	6,82	1227,27	99,78
677236	5924084	80,6	73	1,17	210,28	6,28
677270	5924105	30,6	73	0,56	100,00	83,33
676959	5920058	30	74	5,68	1022,73	92,14

### 8.3.7. BALANCE HÍDRICO

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

- Entradas
  - Infiltración por precipitación directa en el acuífero.
  - Entradas laterales por escorrentía subsuperficial (infiltración en cuencas aportantes).
  - Infiltración directa desde el río Andalién.
- Salidas
  - Bombeos.
  - Subterráneas hacia el mar
  - Subterráneas hacia el Bío-Bío
  - Afloramientos al sistema superficial

### 8.3.7.1. ENTRADAS

#### 8.3.7.1.1. 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.

La cuenca costera entre Itata y Bío-Bío se ha dividido en 8 subcuencas, sin tener en cuenta el acuífero en sentido estricto (ver Figura 66). De estas 8 subcuencas, 5 tienen como punto de drenaje el acuífero de Talcahuano (de la 1 a la 5, en verde en la figura mencionada), las otras 3 drenan al mar, por lo que no afectarían al balance hídrico del acuífero de Talcahuano.

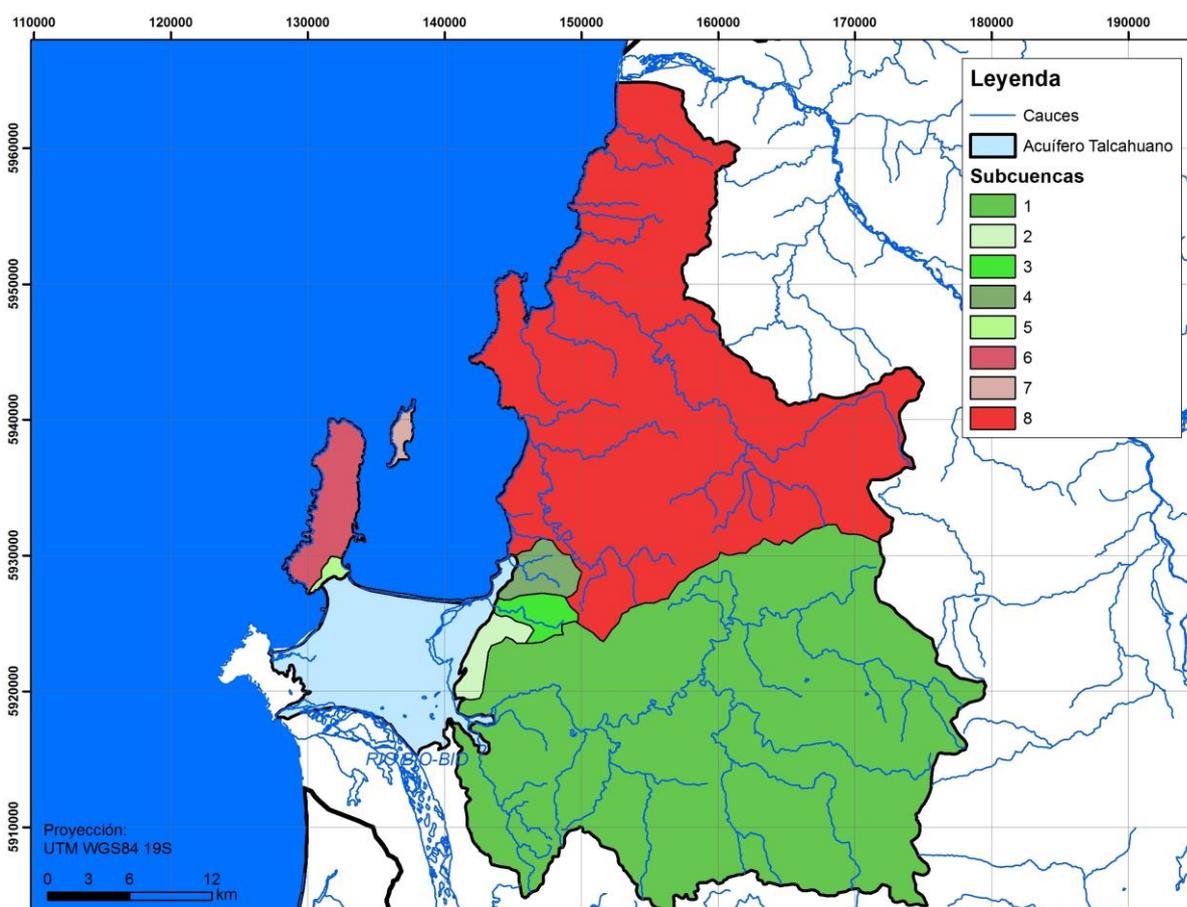


Figura 66. División en subcuencas para el balance hídrico de la Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío

- 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 (Soil Conservation Service), 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 35.

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:

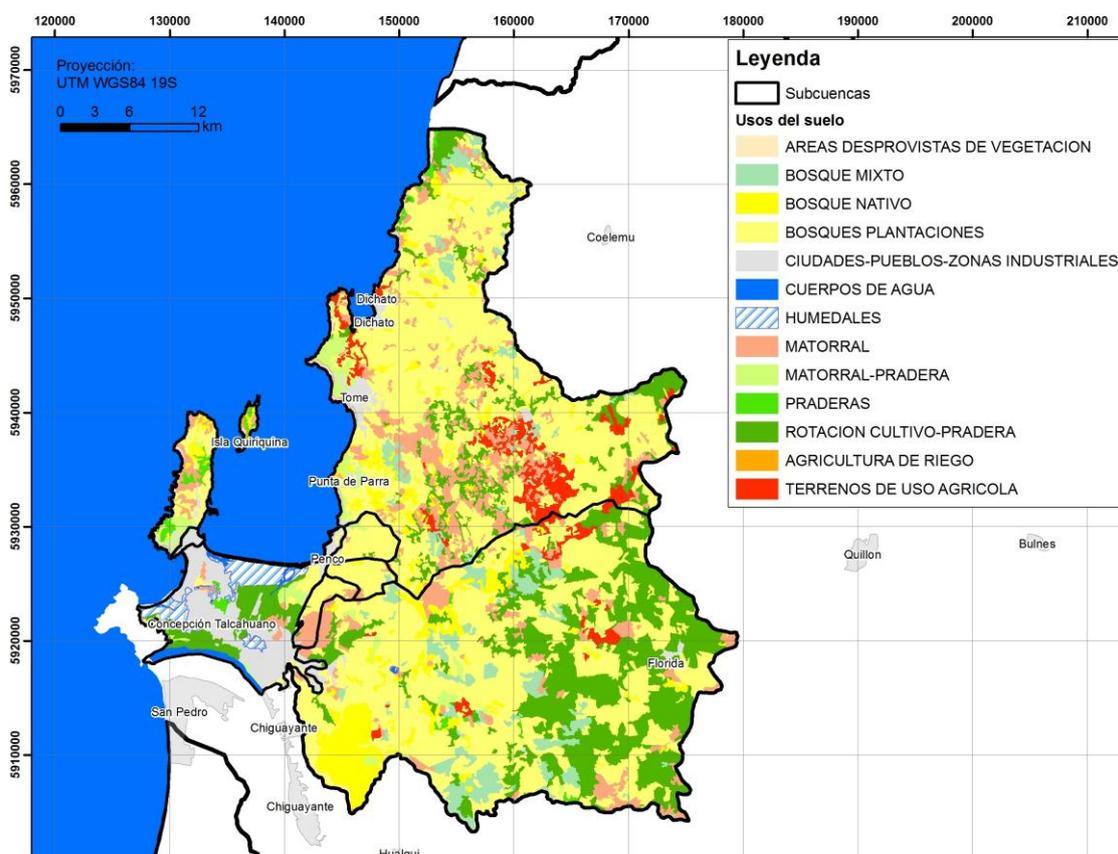


Figura 67. Clasificación de usos del suelo. Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío Elaboración propia a partir de información facilitada por la CNR.

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

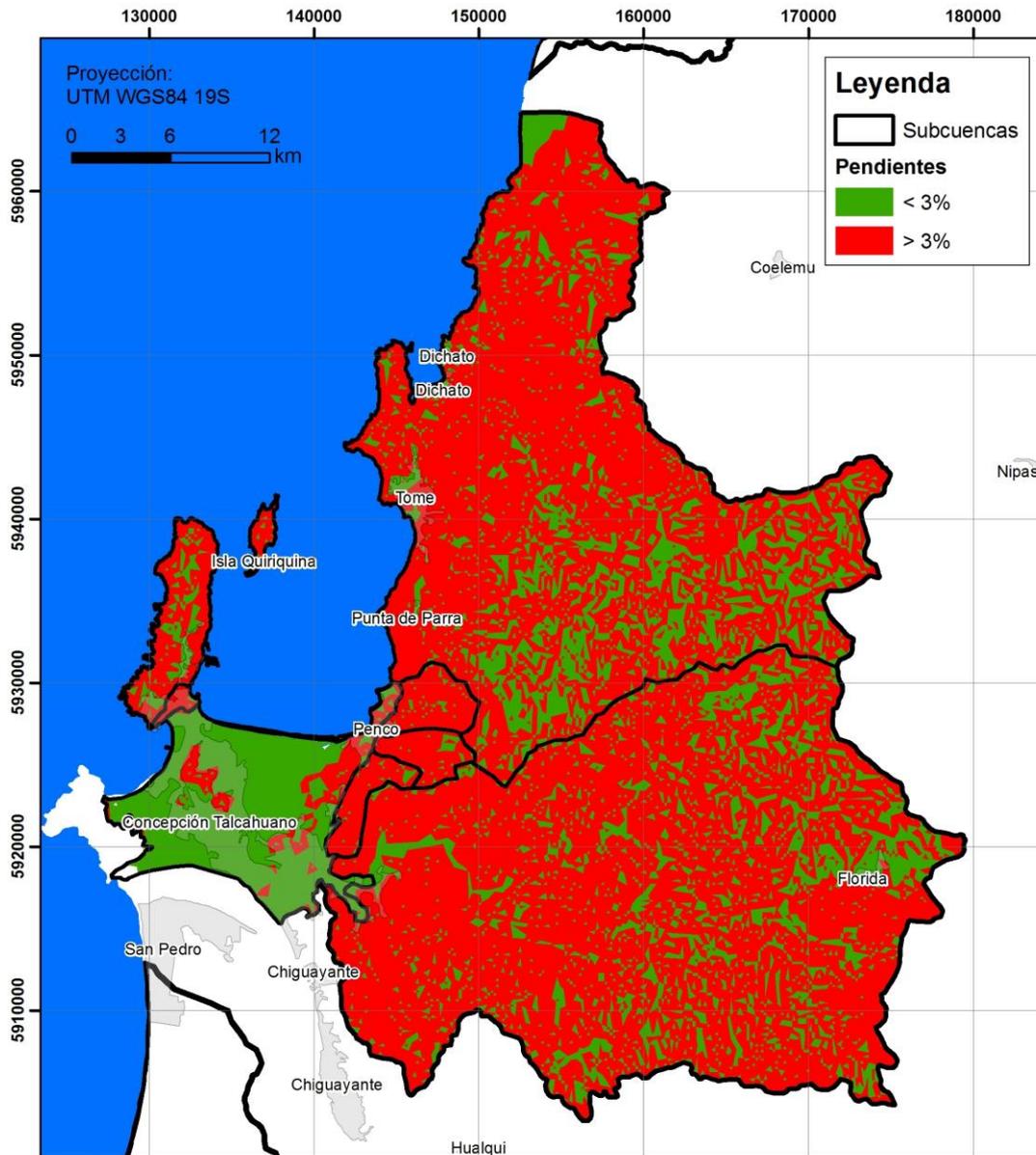


Figura 68. Clasificación de pendientes. Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío

La permeabilidad del terreno se ha establecido en función de la categoría de drenaje asignada a tipo de suelo, siendo A el suelo con mayor facilidad de drenaje y D el con mayor dificultad de drenaje:

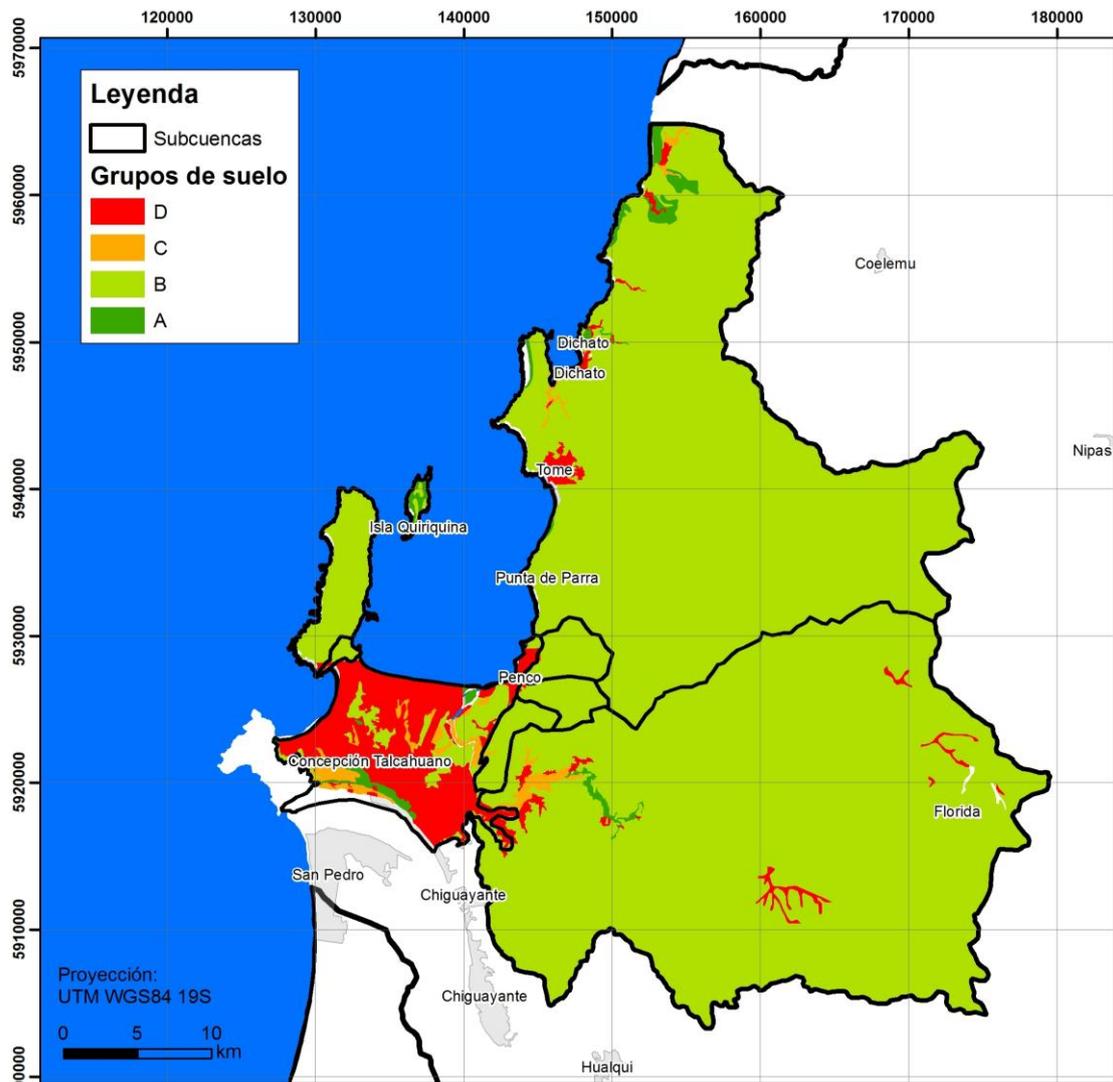


Figura 69. Clasificación en grupos de suelo. Cuenca Costera entre Itata y Bío-Bío

Intersectando las tres zonificaciones del terreno, y teniendo en cuenta los valores proporcionados por la Tabla 35 se obtiene la siguiente zonificación del umbral de escorrentía ( $P_o$ ):

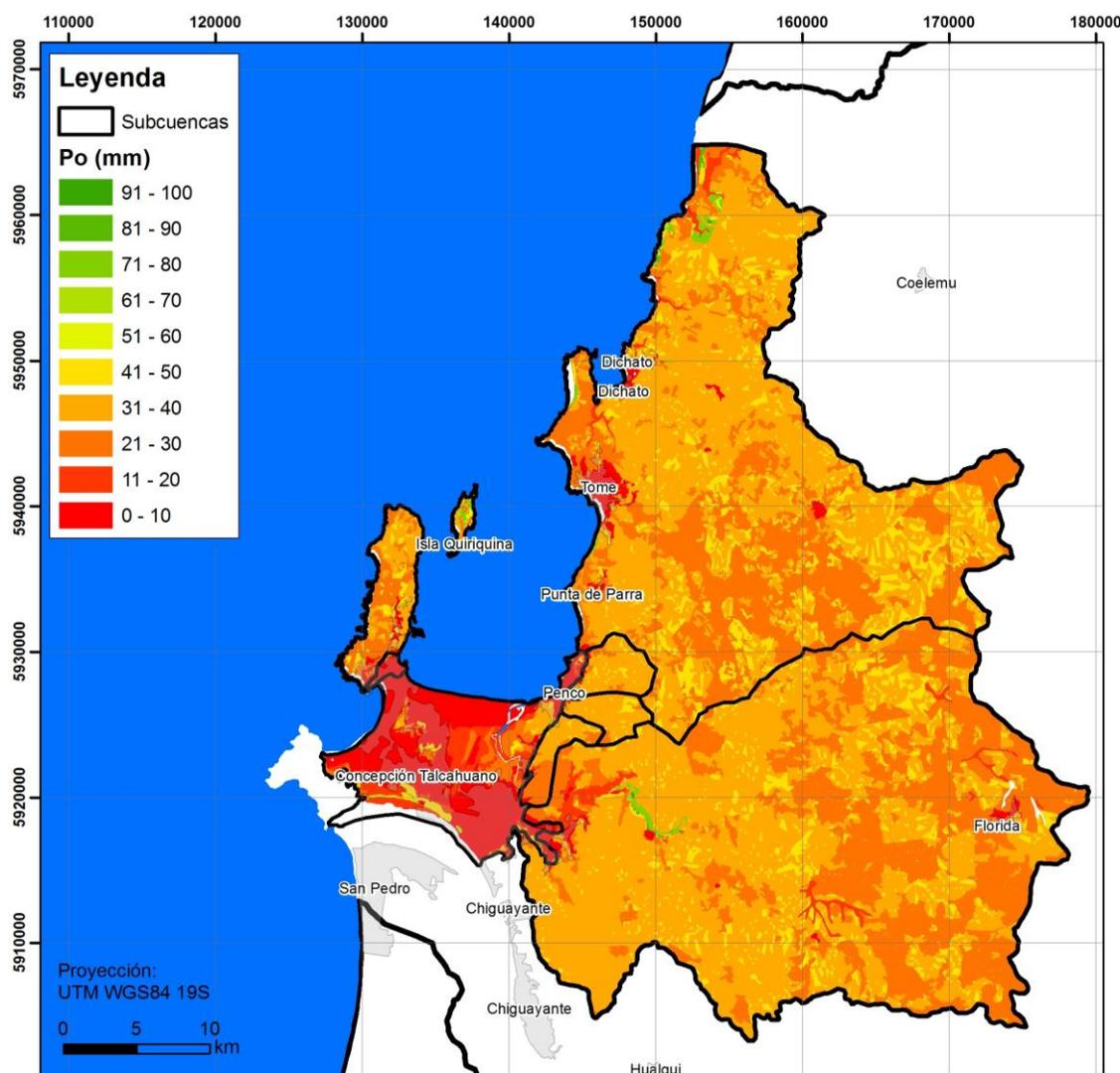


Figura 70. Clasificación del umbral de escorrentía.C.C. entre Itata y Bío-Bío  
 Posteriormente, haciendo una media ponderada a la superficie en cada  
 cuenca se ha obtenido el valor medio del umbral de escorrentía:

Tabla 48. Umbral de escorrentía por subcuenca

Zona	Po (mm)	Zona	Po (mm)
Acuífero Talcahuano	9,10	Cuenca 5	3,95
Cuenca 1	30,82	Cuenca 6	28,61
Cuenca 2	28,18	Cuenca 7	48,12
Cuenca 3	33,45	Cuenca 8	31,64
Cuenca 4	32,31		

- 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 el "Estudio Agrológico VIII Región", del CIREN, 1999, el cual ofrece valores de Capacidad de Campo (humedad retenida a 33 kPa) y de Punto de Marchitez Permanente (humedad retenida a 1500 kPa) para los distintos suelos de la zona de estudio:

Tabla 49. Características de los suelos en la zona de estudio

Tipo Suelo	Serie Constitución	S. Arenales	S. Curanipe
Zona	Cuencas 1,2,3,4 y 8	Acuífero	Cuencas 5,6 y7
Espesor radicular (m)	0,50	0,80	0,50
CC (%)	30,2%	4,08%	30,23%
PMP (%)	20,5%	2,43%	20,45%

El estudio consultado no ofrecía estos datos para el suelo Curanipe, no obstante, debido a su carácter arcilloso, al igual que la serie Constitución, se han asumido los mismos valores que ésta.

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 50. Recarga por infiltración directa en acuífero y subcuencas aportantes

Zona	Área permeable (km <sup>2</sup> )	Po (mm)	Recarga mm/año	Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Recarga (l/s)
Directa precipitación					
Acuífero	115,30	9,10	17,063	1,967	62,38
Cuenca 1	719,88	30,82	6,553	4,718	149,59
Cuenca 2	13,79	28,18	6,553	0,090	2,87
Cuenca 3	13,41	33,45	6,553	0,088	2,79
Cuenca 4	16,94	32,31	6,553	0,111	3,52
Cuenca 5	2,63	3,95	0,291	0,001	0,02
Cuenca 6	32,22	28,61	6,553	0,211	6,70
Cuenca 7	3,21	48,12	6,553	0,021	0,67
Cuenca 8	605,47	31,64	6,553	3,968	125,82
			<b>63,23</b>	<b>11,17</b>	<b>354,35</b>

Puesto que las cuencas 1, 2, 3, 4 y 5 vierten al acuífero, las entradas por precipitación directa y laterales en el mismo serían las siguientes:

Tabla 51. Recarga por infiltración directa en acuífero y laterales

Tipo	Zona	Área permeable (km <sup>2</sup> )	Po (mm)	Recarga mm/año	Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Recarga (l/s)
Precipitación directa	Acuífero	115.3	9.1	17.063	1.967	62.38
	Total precipitación directa				17.063	1.967
Laterales	Cuenca 1	719.88	30.82	6.553	4.718	149.59
	Cuenca 2	13.79	28.18	6.553	0.09	2.87
	Cuenca 3	13.41	33.45	6.553	0.088	2.79
	Cuenca 4	16.94	32.31	6.553	0.111	3.52
	Cuenca 5	2.63	3.95	0.291	0.001	0.02
	Total entradas laterales procedentes de subcuencas				26.503	5.008

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 acuífero de Talcahuano (cuencas de la 1 a la 5), ya sea de forma subterránea, subsuperficial o directamente superficial, o vierten al mar (cuencas 6 a la 8).

### 8.3.7.2. 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 Andalién.

A partir de los aforos realizados y la modelación matemática se obtiene que el río es ganador y perdedor en el mismo orden de magnitud.

### 8.3.7.3. Resumen de entradas

En el apartado de modelación numérica del acuífero de Talcahuano (apartado 0) se presenta el balance del acuífero modelado.

Por otro lado, las entradas en las otras cuencas, con vertido al mar, son las siguientes:

Tabla 52. Entradas a otras cuencas

Zona	Área permeable (km <sup>2</sup> )	Po (mm)	Recarga mm/año	Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Recarga (l/s)
Cuenca 6	32,22	28,61	6,553	0,211	6,7
Cuenca 7	3,21	48,12	6,553	0,021	0,67
Cuenca 8	605,47	31,64	6,553	3,968	125,82
			19,659	4,2	133,19

#### 8.3.7.4. SALIDAS

El sistema tiene como salida principal la descarga hacia el río Bío-Bío y 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 acuífero de Talcahuano se han cuantificado en 250.150 m<sup>3</sup>/año, equivalentes a 8 l/s, no obstante, una merma al sistema en forma de bombeos también suponen las extracciones producidas en las cuencas aportantes, como por ejemplo la del río Andalién, cuyos bombeos se han cuantificado en 381.400 m<sup>3</sup>/año, equivalentes a 12,1 l/s.

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, tal y como se comentó en el apartado 8.2.7.

Tabla 53. Salidas subterráneas

Salidas subterráneas	Área (m <sup>2</sup> )	Gradiente	K (m/d)	Q (l/s)
Descarga hacia el mar (oeste)	770,000	0.0035	25.00	786.36
Descarga hacia Bío-Bío	1,080,000	0.0027	8.00	266.67
Total				1053.02

#### 8.3.8. BALANCE

Se establecen dos tipos de balances hídricos. Uno para el sistema acuífero de Talcahuano, en el cual se incluyen los aportes de cuencas vertientes al sistema, y otro para las cuencas vertientes al mar, independientes del

acuífero de Talcahuano, que pertenecen a la cuenca costera entre Itata y Bío-Bío.

- Balance hídrico en el acuífero de Talcahuano

Tabla 54. Balance hídrico de Talcahuano según modelo realizado

Entradas		Salidas	
Concepto	Q (l/s)	Concepto	Q (l/s)
Recarga directa lluvia	23,87	Bombeos	1,88
Laterales	7,12	Subterráneas al mar	33,22
Infiltración Ríos	39,91	Afloramientos	36,84
Subterráneas (Andalien)	1,03		
<b>Total entradas</b>	<b>71,94</b>	<b>Total salidas</b>	<b>71,94</b>

- Balance hídrico en cuencas vertientes al mar

El balance hídrico de las cuencas vertientes al mar 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 55. Balance hídrico cuencas vertientes al mar

Entradas			Salidas		
Concepto	Q (hm <sup>3</sup> /año)	Q (l/s)	Concepto	Q (hm <sup>3</sup> /año)	Q (l/s)
Cuenca 6	0,21	7	Bombeos	0,008	0,25
Cuenca 7	0,02	1	Salidas mar y afloramientos	4,192	132,93
Cuenca 8	3,97	126			
<b>Total entradas</b>	<b>4,20</b>	<b>133</b>	<b>Total salidas</b>	<b>4,200</b>	<b>133</b>

### 8.3.9. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

La cuenca costera entre Itata y Bío-Bío posee una calidad química marcada por un alto contraste de aguas muy poco mineralizadas hacia partes altas-medias de la cuenca, y la intrusión salina existente en el borde costero norte.

Las conductividades registradas fuera del acuífero de Talcahuano, es decir, en partes altas y medias de la cuenca, varían entre los 60 y 170  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de conductividad eléctrica, salvo un punto, en el cual se han registrado 302  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos valores indican la baja mineralización de las aguas,

directamente relacionada con el bajo tiempo de residencia del agua en las capas subsuperficiales, se podría decir que es agua de tipo superficial.

No obstante, en el acuífero detrítico de Talcahuano los valores registrados son mayores, de entre 350 y 610  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo cual indica una mayor salinidad, directamente relacionado con un mayor tiempo de residencia del agua en la roca, que aun así siguen siendo valores de conductividad eléctrica bajos, es decir, poco mineralizados.

Por el contrario, en los afloramientos de agua ubicados en el borde costero noroeste, y en la desembocadura del río Andalién (borde noreste), las conductividades obtenidas son superiores a los 20  $\text{mS}/\text{cm}$ , típico valor del agua marina, lo cual es reflejo de la intrusión marina tan marcada en el borde norte del acuífero, que es indicativo de no haber salida de agua dulce en este borde acuífero, tal y como la piezometría indica.

Durante la campaña de aforos en río Andalién se tomaron valores de calidad "in-situ" que será incluida en el siguiente informe.

El pH registrado varía entre valores cercanos a 7 y 8.5, siendo los de la zona sur de la cuenca todos cercanos a 7, en la zona noreste varían entre 7,15 y 8,15, y en el acuífero de Talcahuano son todos superiores a 7 sin llegar a superar los 8.

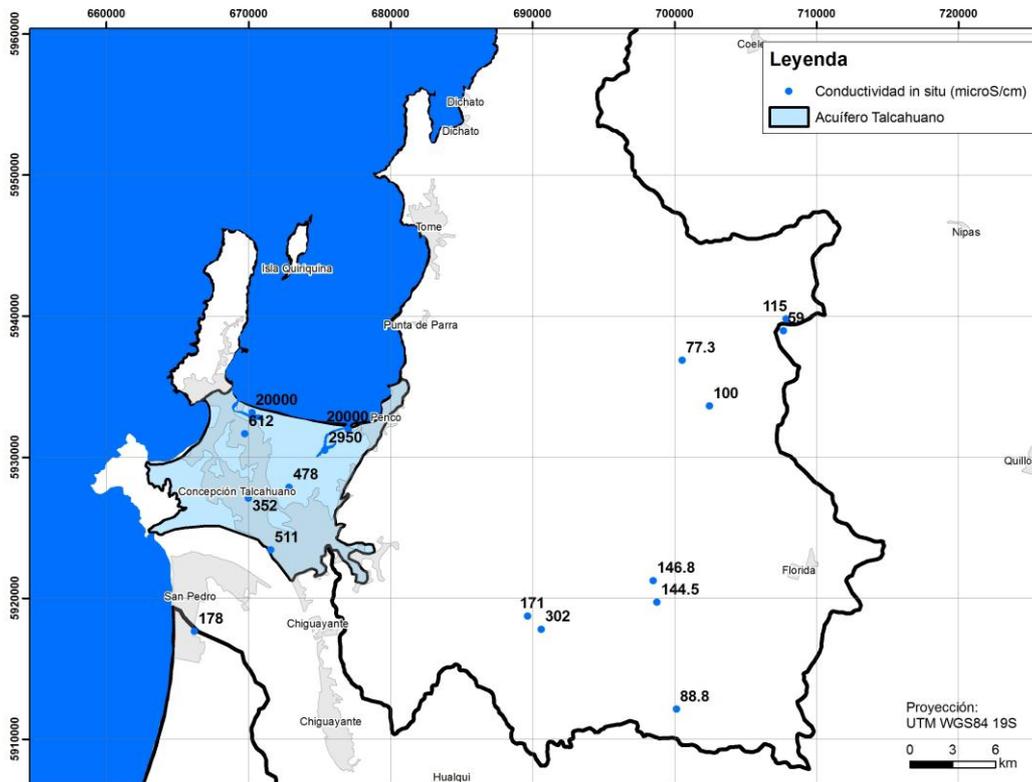


Figura 71. Conductividad eléctrica. Cuenca Costera entre Itata y Bio-Bío

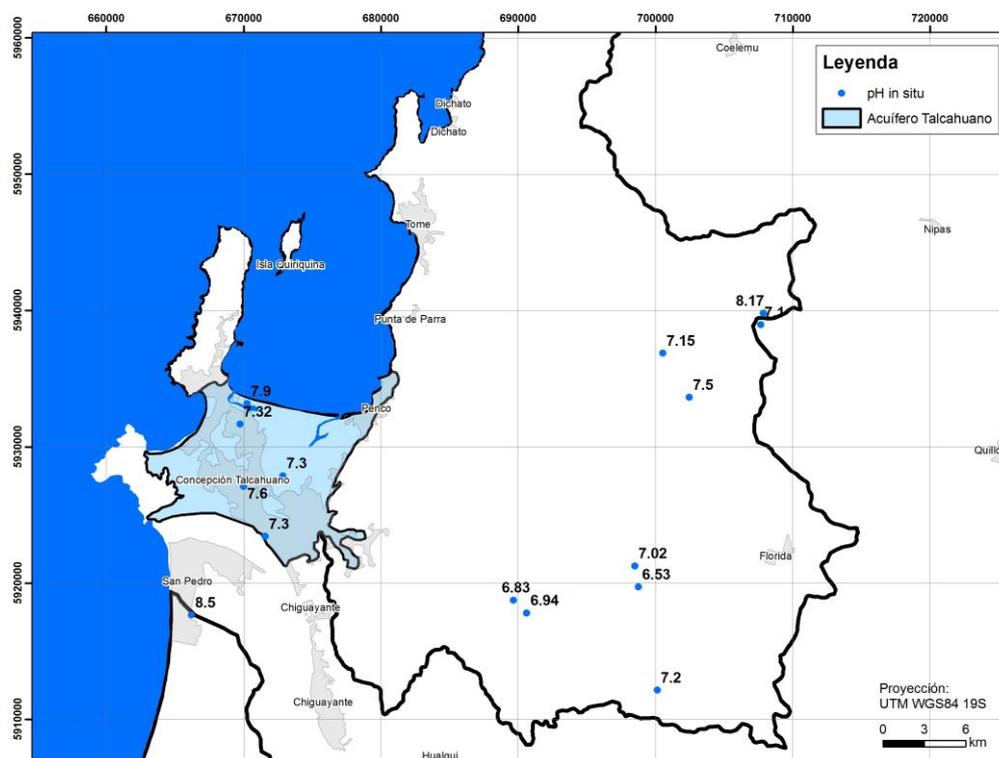


Figura 72. Valores de pH registrados en pozos catastrados. Cuenca Costera entre Itata y Bio-Bío

## **8.4. CUENCA COSTERA ENTRE LÍMITE REGIONAL NORTE Y RÍO ITATA (CÓDIGO DGA 080)**

Ubicada al norte de la cuenca del río Itata con una extensión aproximada de 620 km<sup>2</sup>. En el área existen una serie de ríos y esteros (Cobquecura, Careo, Talicu Mella) los que desembocan, casi en su mayoría, al mar. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

### **8.4.1. FORMACIONES PERMEABLES**

Casi toda la cuenca está ocupada por materiales paleozoicos, a excepción de la una estrecha franja costera y algún afloramiento del triásico y cretácico reducido. Las características de los materiales aflorantes son:

- Qm: depósitos litorales del Plioceno-cuaternario formados por arenas, gravas y depósitos de playas.
- Kiag.- Dioritas y monzonitas
- Tr1m.- triásico formado por areniscas, conglomerados, limolitas y calizas.
- Pz4b.- Pizarras, filitas y metaareniscas
- Cpg.- Granitos y granodioritas

De acuerdo a sus características hidrogeológicas, se ha establecido en estudios previos una clasificación de los materiales agrupándolos en las siguientes unidades.

Unidad A: Permeabilidad Alta a Media en Depósitos no Consolidados

Esta unidad incluye depósitos litorales del cuaternario, dispuestos en forma de terrazas marinas y depósitos de playa, con importante desarrollo en la cuenca costera entre límite regional norte y río Itata, cuenca entre el río Biobío y Carampangue, Cuenca entre el río Lebu y Paicaví y en la cuenca entre el río Paicaví y límite regional sur.

Otro depósito que forma parte de la unidad A corresponde a los depósitos fluviales, aluviales y fluviodeltaicos, de distribución areal mas acotada.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q: Depósitos fluviales, aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cuaternario.
- Qm: Secuencias marinas litorales o fluviales estuarinas.

En el borde litoral, los depósitos de esta unidad forman terrazas marinas de espesor variable, entre 18 y 30 m; compuestos por estratos de arenas con escasa compactación y niveles de dunas.

En general, las terrazas marinas se caracterizan por una granulometría homogénea, compuestas por arenas finas a gruesas con escasos limos, que le confieren una alta permeabilidad y niveles de agua subterránea someros (AC Ingenieros Consultores, 1992).

Unidad D: Permeabilidad Baja a Nula en Rocas Metamórficas e Intrusivas

Esta unidad agrupa a las siguientes rocas (ver mapa geológico)

- Cpg: Rocas Ígneas conformada por granito, granodioritas tonalita, monzodiorita. Edad Carbonífero-cretácico.
- Pz: Rocas Metamórficas formada por pizarras, filitas, metaarenitas, metapelitas, esquistos. Edad Paleozoica.

En las rocas graníticas los intensos procesos de meteorización química han permitido la formación *in situ* de un suelo residual con gradación uniforme del tipo arena gruesa a gravilla, denominado "maicillo". En la región se ha observado que estos suelos, de espesor variable, permiten la infiltración y formación de flujos locales de agua subterránea dirigidos hacia la Depresión Central (González *et al.*, 1999).

Las rocas graníticas, al estar alteradas generan una porosidad que les permite almacenar pequeños volúmenes de agua (porosidad 3-5%).

En general, en las rocas metamórficas los procesos de meteorización tienden a acentuarse en zonas de mayor fracturamiento, que les permite almacenar una cierta cantidad de agua cuyos volúmenes no son atractivos para ser utilizados en forma económica.

De acuerdo a esta clasificación, en esta cuenca se presenta la unidad A formada por los materiales cuaternarios y pliocenos en una estrecha franja costera adosada a los materiales paleozoicos. El resto de la cuenca, a

excepción de las formaciones cretácicas y triásicas que aparecen en afloramientos reducidos, está ocupada por materiales paleozoicos formados por pizarras, filitas y metaareniscas en su parte más occidental, y por granitos y granodioritas en su parte oriental.

#### **8.4.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS**

El conjunto de la unidad detrítica descrita anteriormente se distribuye en una franja costera muy estrecha y en afloramientos que llegan a estar desconectados unos de otros a lo largo de dicha franja. Su anchura máxima llega a tener 1,9 km, siendo el valor medio de 400 m. Por su posición y escasa entidad, cabe considerar que dichos materiales detríticos se disponen sobre un paleorelieve del basamento paleozoico sin la presencia de series inferiores del eoceno o mioceno como ocurre en otras cuencas más al sur.

Como se ha comentado en el capítulo anterior, no se dispone de datos de sondajes y pozos que hayan permitido valorar la distribución de espesores de la formación acuífera con mayor detalle. Su geometría se corresponde con las formaciones cuaternarias y pliocenas que por el este se acuñan perdiendo espesor desde la línea de costa hasta el contacto con el paleozoico alineado en un eje norte-sur.

Teniendo en cuenta las características litológicas, el acuífero detrítico puede comportarse como un acuífero monocapa y libre.

Respecto a los materiales paleozoicos, estos presentan una porosidad secundaria por fisuración y meteorización, siendo muy irregular la distribución de permeabilidades en estas zonas. Sobre estos materiales, y en especial sobre los granitoides, pueden desarrollarse niveles de alteración importantes que den lugar a pequeños mantos de materiales formados por arcosas y con una permeabilidad media.

#### **8.4.3. LIMITES DEL SISTEMA**

La unidad geológica, como se ha mencionado anteriormente, se presenta en varias áreas desconectadas una de otras, siendo tres las principales. La de mayor entidad se ubica al norte, mientras que al sur aparecen las dos

restantes con anchuras en torno a los 400-500 m. Considerándolas como un conjunto dentro de la cuenca sus límites serían

- Al norte con el límite del afloramiento cuaternario mayor
- Al sur con el afloramiento cuaternario aislado.
- Al oeste con la línea de costa
- Al este con el contacto con las formaciones paleozoicas en una lineación aproximada norte-sur.

#### **8.4.4. CAPTACIONES**

En la documentación consultada se han encontrado datos referentes a captaciones de aguas subterráneas en el trabajo "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de cuencas costeras ESSBIO, VII Región", donde se recogen datos del 2008 sobre 20 captaciones que sumaban un caudal total de explotación de 25 l/s. Por las características de los depósitos cuaternarios, ceñidos en su mayoría a la franja costera, se estima que las captaciones en esta cuenca se concentran en la unidad de materiales paleozoicos.

Tabla 56. Captaciones en cuenca 080

Cuenca	Nº de pozos	Caudal Total (l/s)	Extracción
Entre Límite Regional Norte y R. Itata	20		25

#### **8.4.5. PIEZOMETRÍA**

La piezometría en esta cuenca presenta un esquema simple. Se trata de una superficie piezométrica con un gradiente suave hacia la línea de costa donde en las formaciones cuaternarias es casi superficial y los niveles terminan por conectar con la línea base del mar. No se dispone de datos de cotas de nivel que permitan establecer valores concretos.

#### **8.4.6. ESQUEMA DE FLUJO**

De acuerdo a la piezometría estimada, las direcciones de flujo principales se orientan con un gradiente tendido en dirección E-W. No obstante, la red de drenaje de carácter dendrítico puede imponer direcciones con otra orientación de carácter local.

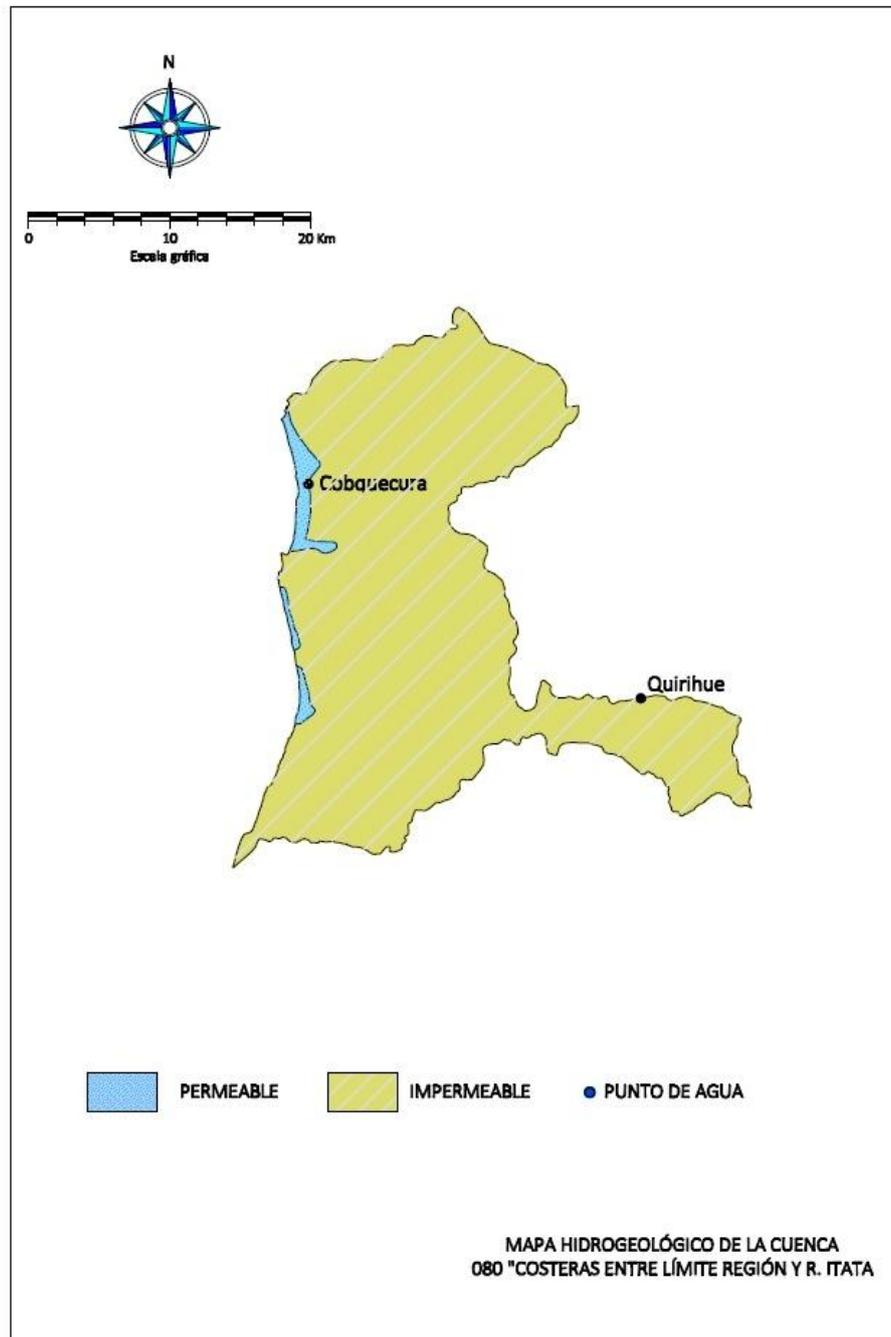


Figura 73. Mapa hidrogeológico Cuenca 080. Fuente: Elaboración propia

#### 8.4.7. PARAMETROS ELÁSTICOS

No se dispone de datos relativos a permeabilidad y transmisividad de las formaciones acuíferas. Respecto a caudales específicos se dispone de datos tomados del "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" donde se estiman caudales específicos de 1,24 l/s/m para la formación D paleozoica.

Tabla 57. Caudal específico promedio

Unidad Hidrogeológica	Caudal Específico Promedio (l/s/m)
A	4,9
B	–
C	1,62
D	1,24

#### 8.4.8. BALANCE

Para los balances se han tomado en cuenta los valores obtenidos por cuenca en el "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" adjuntos.

Tabla 58. Cálculo de recarga para cuencas costeras. Fuente: Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región

Cuenca	Código Cuenca	Área Cuenca (Km <sup>2</sup> )	Precipitación (mm)	EVT (mm)	Escorrentia Total (mm)	10% Infiltr. (mm)	Recarga Cuenca (l/s)
Costera entre Límite Regional Norte y Río Itata	080	616	1000	600	400	40	781
Costera entre Río Itata y Río Biobío	082	1499	1500	600	900	90	4274
Costera entre Río Biobío y Carampangue	084	364	1200	550	650	65	749
Río Carampangue	085	1262	1600	600	1000	100	3999
Entre Río Carampangue y Río Lebu	086	624	1200	550	650	65	1286
Río Lebu	087	858	2000	600	1400	140	3806
Entre Río Lebu y Río Paicaví	088	1696	2000	600	1400	140	7523
Entre Río Paicaví y Límite Regional Sur	089	1340	1800	600	1200	120	5096

Al igual que en las otras cuencas costeras se ha considerado una infiltración del 10% para los materiales detríticos y del 3% para las formaciones paleozoicas. De esta manera se obtienen los siguientes datos:

Tabla 59. Balance hídrico cuenca 080

Cuenca 080	Área km <sup>2</sup>	PP (mm)	ET (mm)	Escorrentía	Infiltración %	Infiltración mm.	Salidas Hm <sup>3</sup> /a	Balance	
Cuenca	616	1.000	600						
Paleozoico				388	3%	12			
Detrítico				360	10%	40			
		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	l/s
Paleozoico	599	599	359	232		7,19	0,78	6,41	203
Detrítico	17	17	10	6		0,68	0,00	0,68	21
<b>TOTALES</b>		<b>616</b>	<b>370</b>	<b>239</b>		<b>7,87</b>	<b>0,78</b>	<b>7,09</b>	<b>225</b>

Para el acuífero detrítico se obtiene unos recursos escasos por infiltración de  $0,68 \text{ hm}^3$ . La mayoría de recursos se concentran en el paleozoico con  $7,19 \text{ hm}^3/\text{año}$  de los cuales se detraían a fecha de 2008  $0,78 \text{ hm}^3$ . Aunque los caudales contenidos en la formación paleozoica drenan lateralmente hacia los materiales detríticos costeros y podrían suponer un recurso a sumar a dicha unidad, en la práctica, dada la morfología de los depósitos detríticos y su cercanía al mar, no resulta viable su explotación. Entre otros aspectos a considerar, hay que tener en cuenta la alta sensibilidad de estas formaciones al riesgo de salinización por intrusión marina.

#### **8.4.9. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA**

No se dispone de datos o referencias previas de analíticas de aguas en esta cuenca. Para otros análisis realizados en las cuencas del sur, se ha obtenido una clasificación de las aguas mayoritariamente bicarbonatadas sódicas en las zonas costeras y medias. El dato pertenece al "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de Cuencas Costeras ESSBIO, VII Región".

El análisis de cationes e iones muestra que éstos se mantienen con bajas variaciones en el área costera, con una tendencia a incrementar, desde Este a Oeste, particularmente en lo que se refiere a la concentración de cloruro, alcalinidad y conductividad. Hacia el interior de las cuencas costeras predominan aguas del tipo bicarbonatadas- cálcicas a sódicas. En este caso, donde existe una predominancia de materiales paleozoicos, cabría asimilar las aguas a estas facies.

Esta cuenca abarca un área aproximada de  $1350 \text{ km}^2$ ., drenando la provincia de Tirúa. La red de drenaje se presenta dendrítica, generando lagunas como la Lleu Lleu, formada por la confluencia de los ríos Mahuilque, Huilingo y los esteros Coihueco y Medihueco. En el sector sur el principal río es el Tirúa. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **8.5. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO BIO-BÍO Y CARAMPANGUE (CÓDIGO DGA 084)**

El área aproximada de la cuenca es de  $370 \text{ km}^2$ . El drenaje de la cuenca se presenta en general orientado al oeste, los cursos principales de agua corresponden a los ríos Manco, Colcura y Chivillinco, los que drenan el

sector costero de las comunas Coronel, Lota y la parte norte de la comuna de Arauco. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

### **8.5.1. FORMACIONES PERMEABLES**

Casi toda la cuenca está ocupada por materiales paleozoicos, a excepción de una franja costera donde aparecen materiales detríticos del cuaternario y paleoceno. Las características de los materiales aflorantes son:

- Qm: depósitos litorales del Plioceno-cuaternario formados por arenas, gravas y depósitos de playas.
- PE1.- Secuencias marinas transicionales formadas por areniscas, limolitas calcáreas y mantos de carbón.
- Pz4b.- Paleozoico formado por pizarras, filitas y metaareniscas

De acuerdo a sus características hidrogeológicas, se ha establecido en estudios previos una clasificación de los materiales agrupándolos en las siguientes unidades.

Unidad A: Permeabilidad Alta a Media en Depósitos no Consolidados

Esta unidad incluye depósitos litorales del cuaternario, dispuestos en forma de terrazas marinas y depósitos de playa, con importante desarrollo en la cuenca costera entre límite regional norte y río Itata, cuenca entre el río Biobío y Carampangue, Cuenca entre el río Lebu y Paicaví y en la cuenca entre el río Paicaví y límite regional sur.

Otro depósito que forma parte de la unidad A corresponde a los depósitos fluviales, aluviales y fluviodeltaicos, de distribución areal mas acotada.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q: Depósitos fluviales, aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cuaternario.
- Qm: Secuencias marinas litorales o fluviales estuarinas.

En el borde litoral, los depósitos de esta unidad forman terrazas marinas de espesor variable, entre 18 y 30 m; compuestos por estratos de arenas con escasa compactación y niveles de dunas.

En general, las terrazas marinas se caracterizan por una granulometría homogénea, compuestas por arenas finas a gruesas con escasos limos, que le confieren una alta permeabilidad y niveles de agua subterránea someros (AC Ingenieros Consultores, 1992).

#### Unidad B: Permeabilidad Media a Baja en Depósitos no Consolidados

Esta unidad se presenta exclusivamente en la Depresión Intermedia, agrupa a depósitos de origen glaciario que presentan granulometría de fina a gruesa. Depósitos de origen volcánico que varían de granulometría fina (cenizas y lapilli) a granulometría gruesa (bloques) y secuencias lávicas con rango de edad Pleistoceno –Holoceno.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q1g: Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glaciolacustres. Cuaternario.
- Q3av: Depósitos piroclásticos y de avalancha asociados a colapso parcial de volcanes. Cuaternario.
- PI3: Secuencia de lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos. Cuaternario.

#### Unidad C: Unidades de Media a Baja Permeabilidad en Depósitos Consolidados

Está constituida principalmente por rocas sedimentarias y secuencias volcánicas expuestas por erosión y/o por tectónica en la Cordillera de la Costa.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico);

- Ec1: Secuencia sedimentaria continental formada por areniscas, lutitas y mantos de carbón. Edad Eoceno.
- M1m: Secuencias marinas formada areniscas y lutitas. Eoceno Neógeno.
- PE1: Secuencias marinas-continentales conformadas por areniscas, limolitas calcáreas y mantos de carbón. Edad Neógeno.

- Ks1m: Secuencias marinas compuesta por lutitas, areniscas y conglomerados. Edad Cretácico.

Unidad D: Permeabilidad Baja a Nula en Rocas Metamórficas e Intrusivas

Esta unidad agrupa a las siguientes rocas (ver mapa geológico)

- Cpg: Rocas Ígneas conformada por granito, granodioritas tonalita, monzodiorita. Edad Carbonífero-cretácico.
- Pz: Rocas Metamórficas formada por pizarras, filitas, metaarenitas, metapelitas, esquistos. Edad Paleozoica.

En las rocas graníticas los intensos procesos de meteorización química han permitido la formación *in situ* de un suelo residual con gradación uniforme del tipo arena gruesa a gravilla, denominado "maicillo". En la región se ha observado que estos suelos, de espesor variable, permiten la infiltración y formación de flujos locales de agua subterránea dirigidos hacia la Depresión Central (González *et al.*, 1999).

Las rocas graníticas, al estar alteradas generan una porosidad que les permite almacenar pequeños volúmenes de agua (porosidad 3-5%).

En general, en las rocas metamórficas los procesos de meteorización tienden a acentuarse en zonas de mayor fracturamiento, que les permite almacenar una cierta cantidad de agua cuyos volúmenes no son atractivos para ser utilizados en forma económica.

De acuerdo a esta clasificación, en esta cuenca se presenta la unidad A formada por los materiales cuaternarios y pliocenos en una estrecha franja costera y los correspondientes a la unidad C representados por la formación PE1. El resto de la cuenca, está ocupada por materiales paleozoicos formados por pizarras, filitas y metaareniscas en su parte más oriental.

### **8.5.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS**

En esta cuenca cabe diferenciar dos acuíferos detríticos; al norte los afloramientos aislados de niveles del cuaternario y paleoceno que quedan limitados al oeste por materiales paleozoicos. Al sur, afloramientos del cuaternario que se extienden hacia la cuenca del río Carampangue. La geometría de ambas unidades corresponde a capas subhorizontales que se

acuñan al este sobre los materiales paleozoicos. Se mencionan espesores para el cuaternario en torno a 30 metros de media si bien pueden ser muy variables.

Teniendo en cuenta las características litológicas, el acuífero detrítico puede comportarse como un acuífero monocapa y libre, si bien en la unidad ubicada al norte, los materiales paleocenos pueden disponerse inferiores al cuaternario formando un acuífero multicapa.

Respecto a los materiales paleozoicos, estos presentan una porosidad secundaria por fisuración y meteorización, siendo muy irregular la distribución de permeabilidades en estas zonas. Sobre estos materiales, y en especial sobre los granitoides, pueden desarrollarse niveles de alteración importantes que den lugar a pequeños mantos de materiales formados por arcosas y con una permeabilidad media.

### **8.5.3. LIMITES DEL SISTEMA**

Como se ha mencionado anteriormente, se presentan dos unidades desconectadas una de otras. Considerándolas como un conjunto dentro de la cuenca sus límites serían

- Al norte con los afloramiento cuaternarios que se prolongan hasta el río Biobío.
- Al sur con los afloramientos cuaternarios de la cuenca del Campangue.
- Al oeste con la línea de costa
- Al este con el contacto con las formaciones paleozoicas en una lineación aproximada norte-sur.

### **8.5.4. CAPTACIONES**

En la documentación consultada se han encontrado datos referentes a captaciones de aguas subterráneas en el trabajo "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de cuencas costeras ESSBIO, VII Región", donde se recogen datos del 2008 sobre 105 captaciones que sumaban un caudal total de explotación de 1877 l/s. Por las características de los depósitos cuaternarios, ceñidos en su mayoría a la franja costera, se estima que las

captaciones en esta cuenca se reparten en la unidad de materiales cuaternarios y paleozoicos.

Tabla 60. Captaciones en cuenca 084

Cuenca	Nº de pozos	Caudal Extracción Total (l/s)
Entre R. Biobío y R. Carampangue	105	1877

### 8.5.5. PIEZOMETRÍA

La piezometría en esta cuenca presenta un esquema simple. Se trata de una superficie piezométrica con un gradiente suave hacia la línea de costa donde en las formaciones cuaternarias es casi superficial y los niveles terminan por conectar con la línea base del mar. Se dispone de datos de cotas de nivel de varios sondeos. Un grupo de ellos, situados en el borde de la formación cuaternario-paleoceno, presenta cotas entre los 13 y 17 m.s.n.m. Tomando estos valores como referencia y la línea base de la costa tendríamos un gradiente del 0,002.

### 8.5.6. ESQUEMA DE FLUJO

De acuerdo a la piezometría estimada, las direcciones de flujo principales se orientan con un gradiente tendido en dirección E-W. No obstante, la red de drenaje de carácter dendrítico puede imponer direcciones con otra orientación de carácter local.

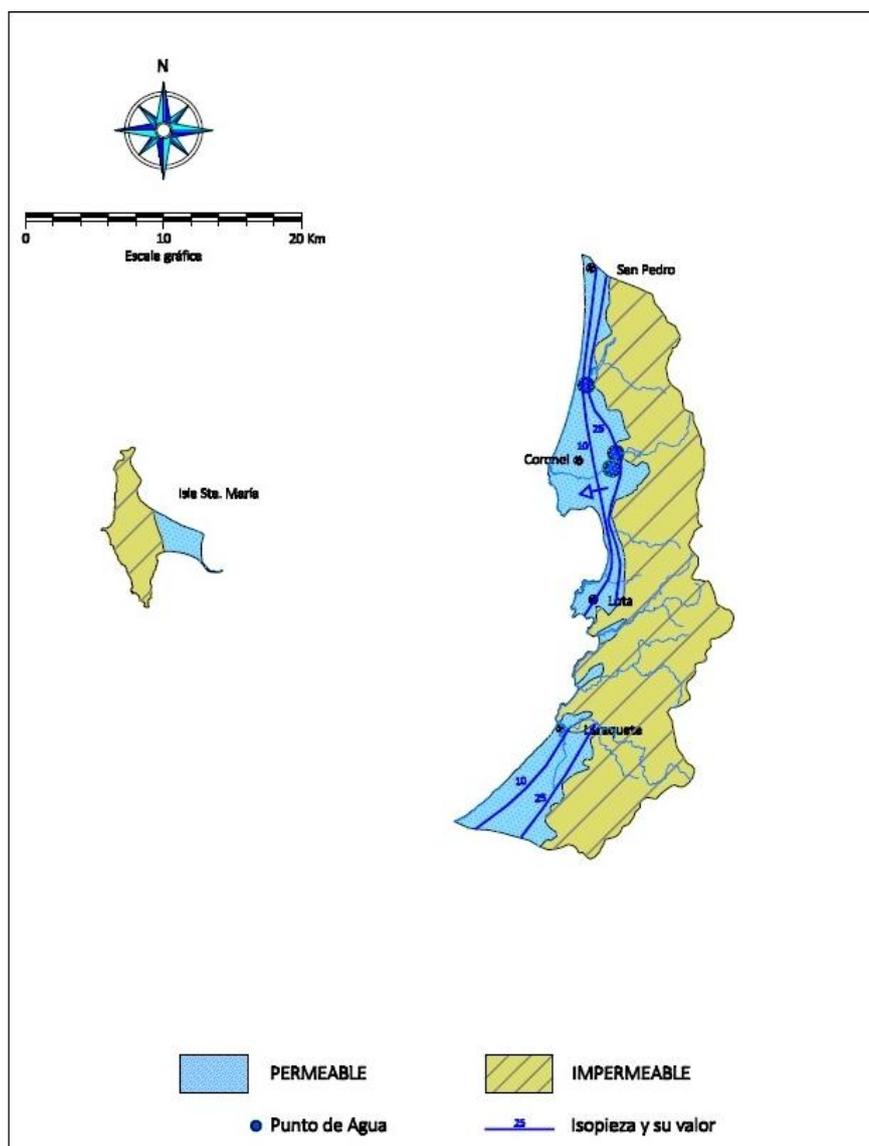


Figura 74. Mapa hidrogeológico Cuenca 084. Fuente: Elaboración propia

### 8.5.7. PARAMETROS ELASTICOS

No se dispone de datos relativos a permeabilidad y transmisividad de las formaciones acuíferas. Respecto a caudales específicos se dispone de datos tomados del "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" donde se estiman caudales específicos para el cuaternario de 4,9 l/s/m y de 1,62 l/s/m para la formación paleocena.

Tabla 61. Caudal específico promedio

Unidad Hidrogeológica	Caudal Específico Promedio (l/s/m)
A	4,9
B	–
C	1,62
D	1,24

### 8.5.8. BALANCE

Para los balances se han tomado en cuenta los valores obtenidos por cuenca en el "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" adjuntos (ver Tabla 58).

Al igual que en las otras cuencas costeras se ha considerado una infiltración del 10% para los materiales detríticos y del 3% para las formaciones paleozoicas. De esta manera se obtienen los siguientes datos:

Tabla 62. Balance hídrico cuenca 084

Cuenca 084	área km <sup>2</sup>	PP (mm)	ET (mm)	Escorrentía	Infiltración %	Infiltración mm.	Salidas Hm <sup>3</sup> /a	Balance	
Cuenca	364	1.000	600						
Paleozoico				388	3%	12			
Detrítico				360	10%	40			
		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	l/s
Paleozoico	248	248	149	96		2,98	39,30	-36,32	-1.152
Detrítico	116	116	70	42		4,64	19,60	-14,96	-474
<b>TOTALES</b>		<b>364</b>	<b>218</b>	<b>138</b>		<b>7,62</b>	<b>58,90</b>	<b>-51,28</b>	<b>-1.626</b>

Para el acuífero detrítico se obtiene unos recursos escasos por infiltración de 4,64 hm<sup>3</sup> y para el paleozoico de 2,98 hm<sup>3</sup>. Como los recursos explotados de acuerdo a los datos existentes son mayores, se ha supuesto como primera aproximación que un tercio son extraídos del acuífero detrítico, y dos tercios del paleozoico. Aun así, con este escenario, ambas unidades presentan una sobreexplotación que suma 1.626 l/s, con lo que no cabe contemplar entradas laterales del paleozoico al detrítico.

Claramente esta cuenca presenta sobreexplotación, y en caso de concentrar las captaciones en la zona costera puede dar lugar a fenómenos de intrusión marina y salinización del acuífero.

### **8.5.9. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA**

No se dispone de datos o referencias previas de analíticas de aguas en esta cuenca. Para otros análisis realizados en las cuencas del sur, se ha obtenido una clasificación de las aguas mayoritariamente bicarbonatadas sódicas en las zonas costeras y medias. El dato pertenece al "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de Cuencas Costeras ESSBIO, VII Región.

El análisis de cationes e iones muestra que éstos se mantienen con bajas variaciones en el área costera, con una tendencia a incrementar, desde Este a Oeste, particularmente en lo que se refiere a la concentración de cloruro, alcalinidad y conductividad. Hacia el interior de las cuencas costeras predominan aguas del tipo bicarbonatadas- cálcicas a sódicas. En este caso, donde existe una predominancia de materiales paleozoicos, cabría asimilar las aguas a estas facies.

### **8.6. CUENCA COSTERA RIO CARAMPANGUE (CÓDIGO DGA 085)**

La cuenca tiene un área aproximada de 1.270 km<sup>2</sup> caracterizada por una serie de ríos como el Cabrera, Cifuentes y Las Ánimas, los que confluyen hacia el río Carampangue, el que le entrega el nombre a la cuenca. Drena, en gran parte a la comuna de Arauco. El régimen que presenta la cuenca es de tipo pluvial.

#### **8.6.1. FORMACIONES PERMEABLES**

Casi toda la cuenca está ocupada por materiales paleozoicos, a excepción de una franja costera donde aparecen materiales detríticos del cuaternario y paleoceno. Las características de los materiales aflorantes son:

- Q1.- Depósitos coluviales, fluviales y en menor medida litorales.
- P1m.- Pérmico de carácter turbidítico
- Ks1m.- areniscas, conglomerados, lutitas y calizas
- Pz4b.- Paleozoico formado por pizarras, filitas y metaareniscas

De acuerdo a sus características hidrogeológicas, se ha establecido en estudios previos una clasificación de los materiales agrupándolos en las siguientes unidades.

#### Unidad A: Permeabilidad Alta a Media en Depósitos no Consolidados

Esta unidad incluye depósitos litorales del cuaternario, dispuestos en forma de terrazas marinas y depósitos de playa, con importante desarrollo en la cuenca costera entre límite regional norte y río Itata, cuenca entre el río Biobío y Carampangue, Cuenca entre el río Lebu y Paicaví y en la cuenca entre el río Paicaví y límite regional sur.

Otro depósito que forma parte de la unidad A corresponde a los depósitos fluviales, aluviales y fluviodeltaicos, de distribución areal mas acotada.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q: Depósitos fluviales, aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cuaternario.
- Qm: Secuencias marinas litorales o fluviales estuarinas.

En el borde litoral, los depósitos de esta unidad forman terrazas marinas de espesor variable, entre 18 y 30 m; compuestos por estratos de arenas con escasa compactación y niveles de dunas.

En general, las terrazas marinas se caracterizan por una granulometría homogénea, compuestas por arenas finas a gruesas con escasos limos, que le confieren una alta permeabilidad y niveles de agua subterránea someros (AC Ingenieros Consultores, 1992).

#### Unidad B: Permeabilidad Media a Baja en Depósitos no Consolidados

Esta unidad se presenta exclusivamente en la Depresión Intermedia, agrupa a depósitos de origen glaciario que presentan granulometría de fina a gruesa. Depósitos de origen volcánico que varían de granulometría fina (cenizas y lapilli) a granulometría gruesa (bloques) y secuencias lávicas con rango de edad Pleistoceno –Holoceno.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q1g: Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glaciolacustres. Cuaternario.

- Q3av: Depósitos piroclásticos y de avalancha asociados a colapso parcial de volcanes. Cuaternario.
- PI3: Secuencia de lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos. Cuaternario.

Unidad C: Unidades de Media a Baja Permeabilidad en Depósitos Consolidados

Está constituida principalmente por rocas sedimentarias y secuencias volcánicas expuestas por erosión y/o por tectónica en la Cordillera de la Costa.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico);

- Ec1: Secuencia sedimentaria continental formada por areniscas, lutitas y mantos de carbón. Edad Eoceno.
- M1m: Secuencias marinas formada areniscas y lutitas. Eoceno Neógeno.
- PE1: Secuencias marinas-continentales conformadas por areniscas, limolitas calcáreas y mantos de carbón. Edad Neógeno.
- Ks1m: Secuencias marinas compuesta por lutitas, areniscas y conglomerados. Edad Cretácico.

Unidad D: Permeabilidad Baja a Nula en Rocas Metamórficas e Intrusivas

Esta unidad agrupa a las siguientes rocas (ver mapa geológico)

- Cpg: Rocas Ígneas conformada por granito, granodioritas tonalita, monzodiorita. Edad Carbonífero-cretácico.
- Pz: Rocas Metamórficas formada por pizarras, filitas, metaarenitas, metapelitas, esquistos. Edad Paleozoica.

En las rocas graníticas los intensos procesos de meteorización química han permitido la formación *in situ* de un suelo residual con gradación uniforme del tipo arena gruesa a gravilla, denominado "maicillo". En la región se ha observado que estos suelos, de espesor variable, permiten la infiltración y formación de flujos locales de agua subterránea dirigidos hacia la Depresión Central (González *et al.*, 1999).

Las rocas graníticas, al estar alteradas generan una porosidad que les permite almacenar pequeños volúmenes de agua (porosidad 3-5%).

En general, en las rocas metamórficas los procesos de meteorización tienden a acentuarse en zonas de mayor fracturamiento, que les permite almacenar una cierta cantidad de agua cuyos volúmenes no son atractivos para ser utilizados en forma económica.

De acuerdo a esta clasificación, en esta cuenca se presenta la unidad A formada por los materiales cuaternarios en una estrecha franja costera y los correspondientes a la unidad D.

### **8.6.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS**

En esta cuenca cabe diferenciar un acuífero detrítico al norte de la misma. La geometría de la unidad corresponde a capas subhorizontales que se acuñan al sur sobre los materiales paleozoicos. Se mencionan espesores para el cuaternario en torno a 30 metros de media si bien pueden ser muy variables.

Teniendo en cuenta las características litológicas, el acuífero detrítico puede comportarse como un acuífero monocapa y libre.

Respecto a los materiales paleozoicos, estos presentan una porosidad secundaria por fisuración y meteorización, siendo muy irregular la distribución de permeabilidades en estas zonas. Sobre estos materiales, y en especial sobre los granitoides, pueden desarrollarse niveles de alteración importantes que den lugar a pequeños mantos de materiales formados por arcosas y con una permeabilidad media.

### **8.6.3. LÍMITES DEL SISTEMA**

Los límites del sistema serían los siguientes:

- Al norte con la línea de costa
- Al sur con los afloramientos pérmico.
- Al oeste con la formación cuaternaria continua paralela a la costa y ya dentro de la cuenca Carampangue-Lebu.
- Al este con el contacto con las formaciones paleozoicas.

#### 8.6.4. CAPTACIONES

En la documentación consultada se han encontrado datos referentes a captaciones de aguas subterráneas en el trabajo "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de cuencas costeras ESSBIO, VII Región", donde se recogen datos del 2008 sobre 7 captaciones que sumaban un caudal total de explotación de 22 l/s.

Tabla 63. Captaciones cuenca 085

Cuenca	Nº de pozos	Caudal Extracción Total (l/s)
Río Capampangue	7	22

#### 8.6.5. PIEZOMETRÍA

La piezometría en la unidad detrítica presenta un esquema simple. Se trata de una superficie piezométrica con un gradiente suave hacia la línea de costa donde en las formaciones cuaternarias es casi superficial y los niveles terminan por conectar con la línea base del mar. No se dispone de datos de cotas de nivel de sondeos. A escala de cuenca cabe considerar dos niveles base de referencia, la línea de costa, y el río Carampangue. Este discurre sobre materiales paleozoicos en su mayor tramo, y para la infiltración reducida que se produce en estos materiales, la cota de base ha de ser la del río. Su cauce oscila entre los 600 m.s.n.m y la desembocadura en la costa.

#### 8.6.6. ESQUEMA DE FLUJO

De acuerdo a la piezometría estimada, las direcciones de flujo principales en el acuífero detrítico se orientan con un gradiente tendido en dirección S-N. La red de drenaje de carácter dendrítico del Campangue puede imponer direcciones E-W en los niveles del basamento paleozoico.

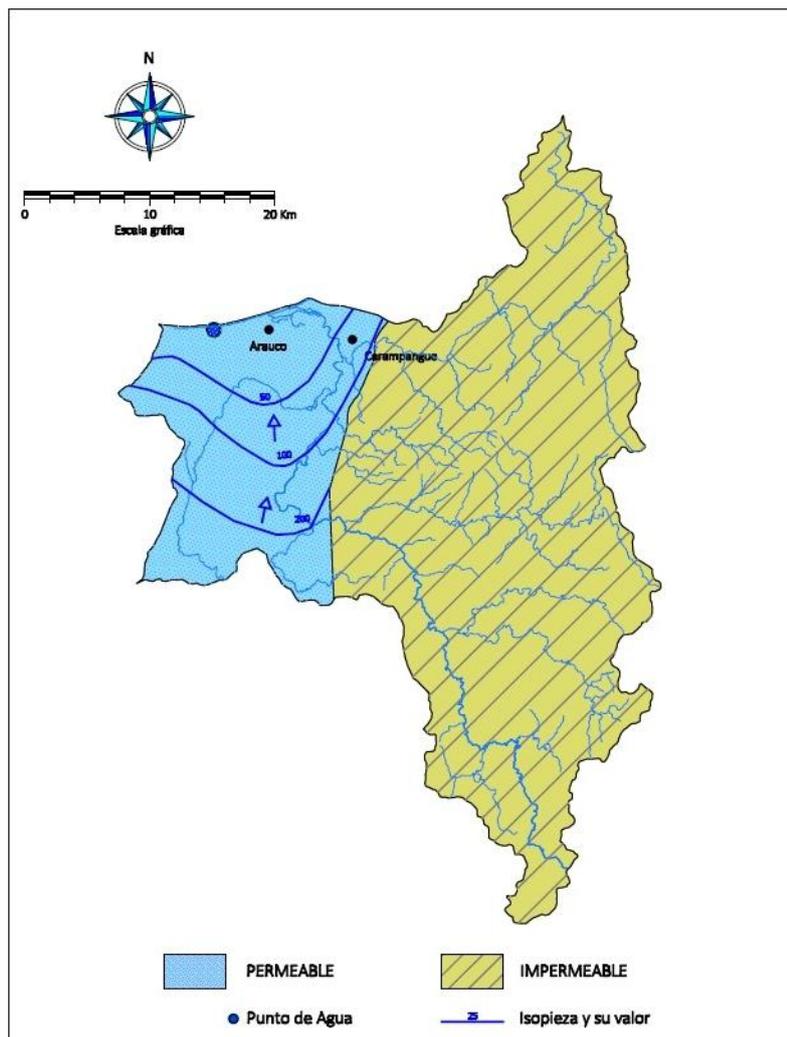


Figura 75. Mapa hidrogeológico Cuenca 085. Fuente: Elaboración propia

### 8.6.7. PARAMETROS ELASTICOS

No se dispone de datos relativos a permeabilidad y transmisividad de las formaciones acuíferas. Respecto a caudales específicos se dispone de datos tomados del "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" donde se estiman caudales específicos para el cuaternario de 4,9 l/s/m y de 1,24 l/s/m para la formación paleozoica.

### 8.6.8. BALANCE

Para los balances se han tomado en cuenta los valores obtenidos por cuenca en el "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región".

Al igual que en las otras cuencas costeras se ha considerado una infiltración del 10% para los materiales detríticos y del 3% para las formaciones paleozoicas. De esta manera se obtienen los siguientes datos:

Tabla 64. Balance cuenca 085

Cuenca 085	área km2	PP (mm)	ET (mm)	Escorrentía	Infiltración %	Infiltración mm.	Salidas Hm3/a	Balance	
Cuenca	1.262	1.600	600						
Paleozoico				970	3%	30			
Detrítico				900	10%	100			
		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	l/s
Paleozoico	1.208	1.932	725	1.171		36,23	0,00	36,23	1,149
Detrítico	54	87	33	49		5,43	0,69	4,74	150
<b>TOTALES</b>		<b>2.019</b>	<b>757</b>	<b>1.220</b>		<b>41,66</b>	<b>0,69</b>	<b>40,97</b>	<b>1,299</b>

Para el acuífero detrítico se obtiene unos recursos escasos por infiltración de 5,43 hm<sup>3</sup> y para el paleozoico de 36,23 hm<sup>3</sup>. No se dispone de datos acerca de donde se centran las explotaciones, por lo que se han atribuido a la unidad detrítica. Estas ascienden a 0.69 hm<sup>3</sup>/año, lo que deja unos recursos actuales de 150 l/s. Dicha unidad puede recibir transferencias laterales del paleozoico cifradas en 1.148, 88 l/s. En dicho caso los recursos disponibles están muy por encima de la explotación y el régimen del acuífero es casi natural.

### 8.6.9. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA

Para los análisis disponibles en esta cuenca, se ha obtenido una clasificación de las aguas mayoritariamente bicarbonatadas sódicas en las zonas costeras y medias. El dato pertenece al "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de Cuencas Costeras ESSBIO, VII Región. Para zonas más interiores se obtienen facies bicarbonatada cálcica.

El análisis de cationes e iones muestra que éstos se mantienen con bajas variaciones en el área costera, con una tendencia a incrementar, desde este a oeste, particularmente en lo que se refiere a la concentración de cloruro, alcalinidad y conductividad. Hacia el interior de las cuencas costeras predominan aguas del tipo bicarbonatadas- cálcicas a sódicas. En este caso, donde existe una predominancia de materiales paleozoicos, cabría asimilar las aguas a estas facies.

## **8.7. CUENCA COSTERA CARAMPANGUE-LEBU (CÓDIGO DGA 086)**

Presenta un área aproximada de 650 km<sup>2</sup>. La red de drenaje presenta direcciones preferenciales aproximadas norte y sur, las que representan la geomorfología del sector. Los principales esteros que drenan la parte sur de la provincia de Arauco corresponden a los Esteros Llico, Huilingo y Quidico. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

### **8.7.1. FORMACIONES PERMEABLES**

Los materiales detríticos que afloran en esta cuenca corresponden a las formaciones Q1, E1c, E1m y M1m. Su composición es la siguiente:

- Q1.- Depósitos deltaicos y litorales. Se ciñen a la parte sur y norte en la desembocadura de los esteros.
- M1m.- Secuencias marinas transgresivas formadas por areniscas finas, arcillolitas y limolitas.
- E1c.- Secuencias continentales; areniscas, lutitas y capas de carbón.
- E1m.- Secuencias sedimentarias marinas; areniscas y lutitas.

Los tramos acuíferos identificados en estudios previos corresponden a los siguientes:

Unidad A: Permeabilidad Alta a Media en Depósitos no Consolidados

Esta unidad incluye depósitos litorales del cuaternario, dispuestos en forma de terrazas marinas y depósitos de playa, con importante desarrollo en la cuenca costera entre límite regional norte y río Itata, cuenca entre el río Biobío y Carampangue, Cuenca entre el río Lebu y Paicaví y en la cuenca entre el río Paicaví y límite regional sur.

Otro depósito que forma parte de la unidad A corresponde a los depósitos fluviales, aluviales y fluviodeltaicos, de distribución areal mas acotada. Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q: Depósitos fluviales, aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cuaternario.
- Qm: Secuencias marinas litorales o fluviales estuarinas.

En el borde litoral, los depósitos de esta unidad forman terrazas marinas de espesor variable, entre 18 y 30 m; compuestos por estratos de arenas con escasa compactación y niveles de dunas.

En general, las terrazas marinas se caracterizan por una granulometría homogénea, compuestas por arenas finas a gruesas con escasos limos, que le confieren una alta permeabilidad y niveles de agua subterránea someros (AC Ingenieros Consultores, 1992).

#### Unidad B: Permeabilidad Media a Baja en Depósitos no Consolidados

Esta unidad se presenta exclusivamente en la Depresión Intermedia, agrupa a depósitos de origen glaciar que presentan granulometría de fina a gruesa. Depósitos de origen volcánico que varían de granulometría fina (cenizas y lapilli) a granulometría gruesa (bloques) y secuencias lávicas con rango de edad Pleistoceno –Holoceno.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q1g: Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glaciolacustres. Cuaternario.
- Q3av: Depósitos piroclásticos y de avalancha asociados a colapso parcial de volcanes. Cuaternario.
- PI3: Secuencia de lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos. Cuaternario.

#### Unidad C: Unidades de Media a Baja Permeabilidad en Depósitos Consolidados

Está constituida principalmente por rocas sedimentarias y secuencias volcánicas expuestas por erosión y/o por tectónica en la Cordillera de la Costa.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico).

- Ec1: Secuencia sedimentaria continental formada por areniscas, lutitas y mantos de carbón. Edad Eoceno.

- M1m: Secuencias marinas formada areniscas y lutitas. Eoceno Neógeno.
- PE1: Secuencias marinas-continentales conformadas por areniscas, limolitas calcáreas y mantos de carbón. Edad Neógeno.
- Ks1m: Secuencias marinas compuesta por lutitas, areniscas y conglomerados. Edad Cretácico.

#### Unidad D: Permeabilidad Baja a Nula en Rocas Metamórficas e Intrusivas

Esta unidad agrupa a las siguientes rocas:

- Cpg: Rocas Ígneas conformada por granito, granodioritas tonalita, monzodiorita. Edad Carbonífero-cretácico.
- Pz: Rocas Metamórficas formada por pizarras, filitas, metaarenitas, metapelitas, esquistos. Edad Paleozoica.

En las rocas graníticas los intensos procesos de meteorización química han permitido la formación *in situ* de un suelo residual con gradación uniforme del tipo arena gruesa a gravilla, denominado "maicillo". En la región se ha observado que estos suelos, de espesor variable, permiten la infiltración y formación de flujos locales de agua subterránea dirigidos hacia la Depresión Central (González *et al.*, 1999).

Las rocas graníticas, al estar alteradas generan una porosidad que les permite almacenar pequeños volúmenes de agua (porosidad 3-5%).

En general, en las rocas metamórficas los procesos de meteorización tienden a acentuarse en zonas de mayor fracturamiento, que les permite almacenar una cierta cantidad de agua cuyos volúmenes no son atractivos para ser utilizados en forma económica.

A diferencia de las cuencas de la zona costera situadas más al sur, en esta cuenca se reduce la presencia de los materiales cuaternarios más permeables, apareciendo las secuencias eocenas y miocenas de permeabilidad media y baja por la presencia de niveles más lutíticos. Dichas formaciones corresponderían a la unidad C definida en trabajos anteriores.

### **8.7.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS**

El conjunto de la unidad detrítica descrita anteriormente se distribuye en afloramientos limitados por fallas de direcciones NEE-SSW. Su anchura media es de 24 km en su parte más ancha al norte de la cuenca, y de 5 km en su parte más estrecha al sur. No existe un límite propio como acuífero para esta unidad dentro de la cuenca, ya que existe conexión hidráulica con las formaciones adyacentes de la cuenca del río Lebu y río Campangue.

Como se ha comentado en el capítulo anterior, no se dispone de datos de sondajes y pozos que hayan permitido valorar la distribución de espesores de la formación acuífera con mayor detalle. Su geometría se corresponde con las formaciones eocenas y miocenas principalmente que por el este se prolongan en la cuenca del Campangue. Teniendo en cuenta las características litológicas descritas en capítulos anteriores, el acuífero puede comportarse como un acuífero multicapa y libre, si bien pueden aparecer tramos semi-confinados y confinados en función de la existencia de cambios laterales de facies internos en la formación acuífera principal, o bien en los niveles infrayacentes. La disposición de las formaciones en bloques fallados puede originar la disposición de compartimentos con espesores saturados diferentes y saltos piezométricos de pequeña entidad.

### **8.7.3. LIMITES DEL SISTEMA**

Aunque la unidad geológica, como se ha mencionado anteriormente, se extiende más allá de los límites de cuenca, dentro de esta cabe considerar los siguientes;

- Al norte con la línea de costa.
- Al sur con la cuenca del Lebu en su desembocadura.
- Al oeste con la línea de costa
- Al este con las cuencas del Lebu y Carampangue.

### **8.7.4. CAPTACIONES**

En la documentación consultada del Ministerio de Obras Públicas se han encontrado datos referentes a 2 captaciones de aguas subterráneas con derechos aprobados y otras 2 pendientes de aprobación (región) en la cuenca. El total de las 4 suma 18 l/s.

### **8.7.5. PIEZOMETRÍA**

A falta de datos piezométricos cabe hablar de la distribución de isopiezas a nivel conceptual. En esta cuenca el principal nivel de base lo constituye, por una parte, el nivel del mar tanto al norte como en el oeste, como los esteros presentes en la cuenca. Considerando la conexión de los cauces principales con el acuífero, y las cotas mayores y menores del río, tenemos niveles situados entre los 70 y 0 m.s.n.m. Existe un umbral hidrogeológico que corta la cuenca en dirección NW-SE coincidente con la vertiente de aguas superficiales que separa los cauces que vierten al norte y al sur. Igualmente existe otro umbral piezométrico en el límite sureste coincidente con el límite de cuenca del río Lebu. Dichos umbrales son parteaguas de sentidos de flujo pero no constituyen límites de acuífero al existir conexión hidráulica de un lado a otro.

### **8.7.6. ESQUEMA DE FLUJO**

Las direcciones de flujo, de acuerdo con el modelo piezométrico mencionado, se orientan al norte, en la zona costera norte, y al sur y oeste en el resto de la cuenca.

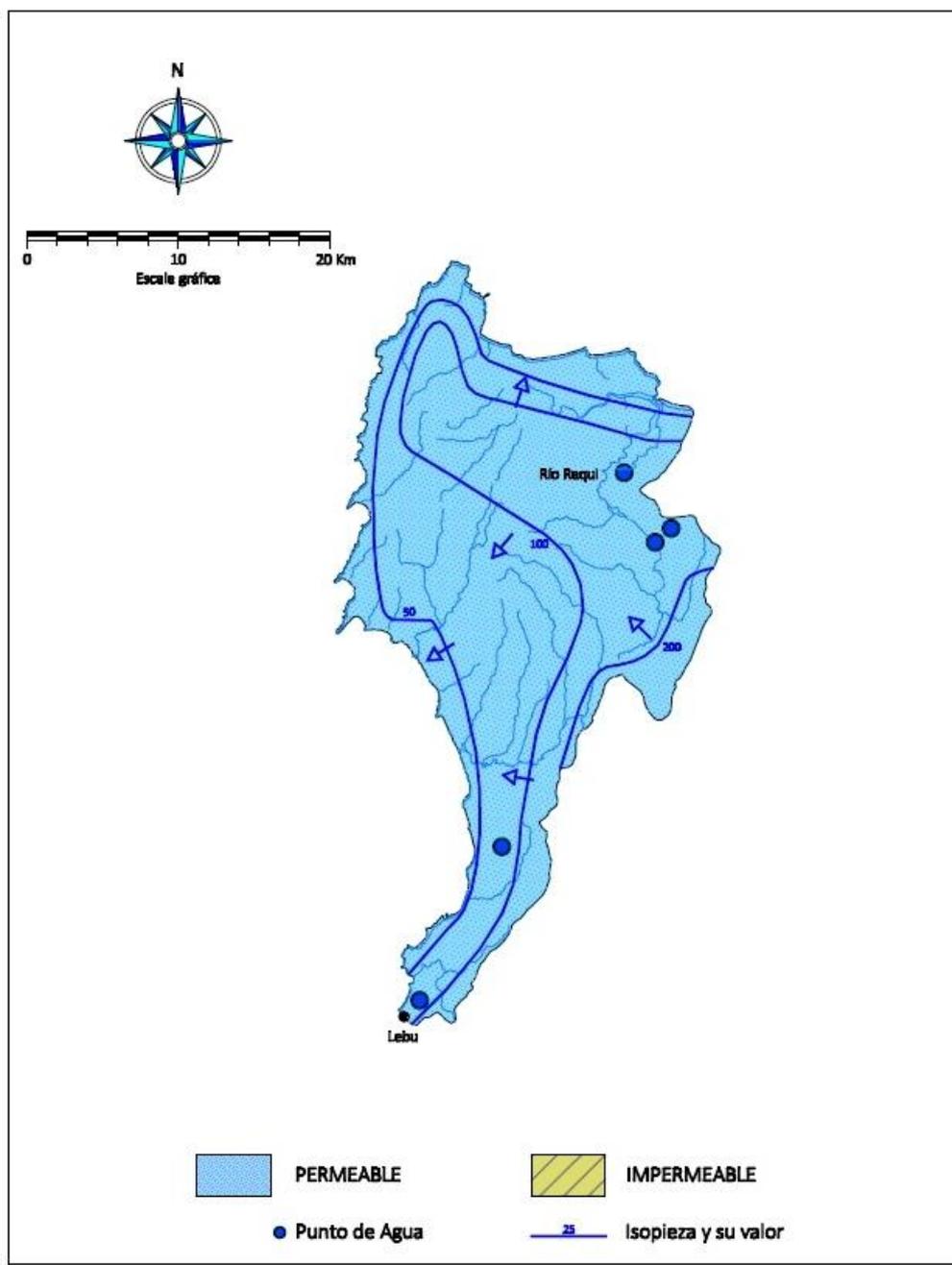


Figura 76. Mapa hidrogeológico Cuenca 086. Fuente: Elaboración propia

### 8.7.7. PARAMETROS ELÁSTICOS

No se dispone de datos para estimar los parámetros elásticos del acuífero por la falta de ensayos de bombeo. En trabajos anteriores se han fijado valores de caudales específicos en otras cuencas para las principales formaciones acuíferas. De acuerdo con dichos datos, la formación más

extensa en esta cuenca, la denominada C, presenta valores en torno a 1,62 l/s/m.

Tabla 65. Caudal específico promedio

Unidad Hidrogeológica	Caudal Específico Promedio (l/s/m)
A	4,9
B	–
C	1,62
D	1,24

### 8.7.8. BALANCE

Para los balances se han tomado en cuenta los valores obtenidos por cuenca en el "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" adjuntos (ver Tabla 58).

Al igual que en las otras cuencas costeras se ha considerado una infiltración del 10% para los materiales detríticos. De esta manera se obtienen los siguientes datos:

Tabla 66. Balance hídrico Cuenca 086

Cuenca 086	área km <sup>2</sup>	PP (mm)	ET (mm)	Escorrentía	Infiltración %	Infiltración mm.	Salidas Hm <sup>3</sup> /a	Balance	
cuenca	624	1.200	550						
detrítico				585	10%	65,00			
		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	l/s
detrítico	624	748	343	365		40,56	0,03	40,53	1.285
TOTALES		748	343	365		40,56	0,03	40,53	1.285

Para el acuífero detrítico se obtiene unos recursos por infiltración de 40,56 hm<sup>3</sup>. Al no disponerse de datos concretos de piezometría que puedan clarificar la relación acuífero-río en cuanto a aportaciones o drenajes entre uno y otro, se estima a priori un balance cero apoyándose en el régimen claramente estacional de los cauces. Los mismos serían cedentes al acuífero en épocas de crecida, mientras que drenarían recursos del acuífero en el estiaje.

Respecto a los retornos de riego, se han contabilizado en el Registro del Ministerio de Obras Públicas unos recursos actuales otorgados de 1.501 l/s. Asumiendo un valor medio de retornos del 20%, se tendrían 300,2 l/s.

Así pues, el total de recursos subterráneos sería de 1.570,49 l/s.

En resumen, y teniendo en cuenta los rangos de valores obtenidos, se considera el acuífero detrítico cercano a su régimen natural, drenando los excedentes anuales al mar y al río en épocas de estiaje.

### **8.7.9. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA**

No se dispone de datos en bibliografía sobre análisis previos existentes en esta cuenca. Por analogía con las cuencas colindantes donde se presentan además las mismas litologías, las aguas deben de ser bicarbonatadas sódicas.

Siguiendo con las analogías con otras cuencas, el análisis de cationes e iones muestra que éstos se mantienen con bajas variaciones en el área costera, con una tendencia a incrementar, desde Este a Oeste, particularmente en lo que se refiere a la concentración de cloruro, alcalinidad y conductividad.

Hacia el interior de las cuencas costeras predominan aguas del tipo bicarbonatadas- cálcicas a sódicas. Las diferencias en la composición aniónica están dadas por la concentración relativa de cloruro; y en la composición catiónica por las concentraciones de sodio y calcio.

En el área de estudio, las aguas tienen un pH entre 6,2 y 7,3 por lo que satisfacen los requerimientos potables y de riego.

### **8.8. CUENCA COSTERA RÍO LEBU (CÓDIGO DGA 087)**

Esta cuenca, situada en la VIII Región, cubre un área aproximada de 860 km<sup>2</sup>. El río principal corresponde al río Lebu, el que le otorga el nombre a la cuenca. Los afluentes al río principal son los ríos Trongol, Curanilahue y Curihuillin. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

### **8.8.1. FORMACIONES PERMEABLES**

Los materiales detríticos que afloran en esta cuenca corresponden a las formaciones E1c, E1m y M1m y parte de la formación Ks1m. Su composición es la siguiente:

- M1m.- Secuencias marinas transgresivas formadas por areniscas finas, arcillolitas y limolitas.
- E1c.- Secuencias continentales; areniscas, lutitas y capas de carbón.
- E1m.- Secuencias sedimentarias marinas; areniscas y lutitas.
- PE1.- Secuencias marinas y transgresivas; areniscas, limolitas calcáreas y capas de carbón.
- Ks1m.- Secuencias marinas de plataforma; areniscas, conglomerados, lutitas, calizas y secuencias turbidíticas.

Respecto a los materiales paleozoicos aparecen los siguientes términos:

- P1m.- Secuencias turbidíticas del Pérmico
- Pz4b.- pizarras, filitas, y metaareniscas (silúrico-carbonífero).

Los tramos acuíferos identificados en estudios previos corresponden a los siguientes:

Unidad A: Permeabilidad Alta a Media en Depósitos no Consolidados

Esta unidad incluye depósitos litorales del cuaternario, dispuestos en forma de terrazas marinas y depósitos de playa, con importante desarrollo en la cuenca costera entre límite regional norte y río Itata, cuenca entre el río Biobío y Carampangue, Cuenca entre el río Lebu y Paicaví y en la cuenca entre el río Paicaví y límite regional sur.

Otro depósito que forma parte de la unidad A corresponde a los depósitos fluviales, aluviales y fluviodeltaicos, de distribución areal mas acotada. Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q: Depósitos fluviales, aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cuaternario.
- Qm: Secuencias marinas litorales o fluviales estuarinas.

En el borde litoral, los depósitos de esta unidad forman terrazas marinas de espesor variable, entre 18 y 30 m; compuestos por estratos de arenas con escasa compactación y niveles de dunas.

En general, las terrazas marinas se caracterizan por una granulometría homogénea, compuestas por arenas finas a gruesas con escasos limos, que le confieren una alta permeabilidad y niveles de agua subterránea someros (AC Ingenieros Consultores, 1992).

#### Unidad B: Permeabilidad Media a Baja en Depósitos no Consolidados

Esta unidad se presenta exclusivamente en la Depresión Intermedia, agrupa a depósitos de origen glaciar que presentan granulometría de fina a gruesa. Depósitos de origen volcánico que varían de granulometría fina (cenizas y lapilli) a granulometría gruesa (bloques) y secuencias lávicas con rango de edad Pleistoceno –Holoceno.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q1g: Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glaciolacustres. Cuaternario.
- Q3av: Depósitos piroclásticos y de avalancha asociados a colapso parcial de volcanes. Cuaternario.
- PI3: Secuencia de lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos. Cuaternario.

#### Unidad C: Unidades de Media a Baja Permeabilidad en Depósitos Consolidados

Está constituida principalmente por rocas sedimentarias y secuencias volcánicas expuestas por erosión y/o por tectónica en la Cordillera de la Costa.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico)

- Ec1: Secuencia sedimentaria continental formada por areniscas, lutitas y mantos de carbón. Edad Eoceno.

- M1m: Secuencias marinas formada areniscas y lutitas. Eoceno Neógeno.
- PE1: Secuencias marinas-continentales conformadas por areniscas, limolitas calcáreas y mantos de carbón. Edad Neógeno.
- Ks1m: Secuencias marinas compuesta por lutitas, areniscas y conglomerados. Edad Cretácico.

#### Unidad D: Permeabilidad Baja a Nula en Rocas Metamórficas e Intrusivas

Esta unidad agrupa a las siguientes rocas:

- Cpg: Rocas Ígneas conformada por granito, granodioritas tonalita, monzodiorita. Edad Carbonífero-cretácico.
- Pz: Rocas Metamórficas formada por pizarras, filitas, metaarenitas, metapelitas, esquistos. Edad Paleozoica.

En las rocas graníticas los intensos procesos de meteorización química han permitido la formación *in situ* de un suelo residual con gradación uniforme del tipo arena gruesa a gravilla, denominado "maicillo". En la región se ha observado que estos suelos, de espesor variable, permiten la infiltración y formación de flujos locales de agua subterránea dirigidos hacia la Depresión Central (González *et al.*, 1999).

Las rocas graníticas, al estar alteradas generan una porosidad que les permite almacenar pequeños volúmenes de agua (porosidad 3-5%).

En general, en las rocas metamórficas los procesos de meteorización tienden a acentuarse en zonas de mayor fracturamiento, que les permite almacenar una cierta cantidad de agua cuyos volúmenes no son atractivos para ser utilizados en forma económica.

A diferencia de las cuencas de la zona costera situadas más al sur, en esta cuenca se reduce la presencia de los materiales cuaternarios más permeables, apareciendo las secuencias eocenas y miocenas de permeabilidad media y baja por la presencia de niveles más lutíticos. Dichas formaciones corresponderían a la unidad C definida en trabajos anteriores. Una salvedad a estas formaciones lo constituyen las formaciones aluviales del río Lebu cuyo desarrollo medio en algunas zonas puede dar lugar a acuíferos locales de mayor permeabilidad.

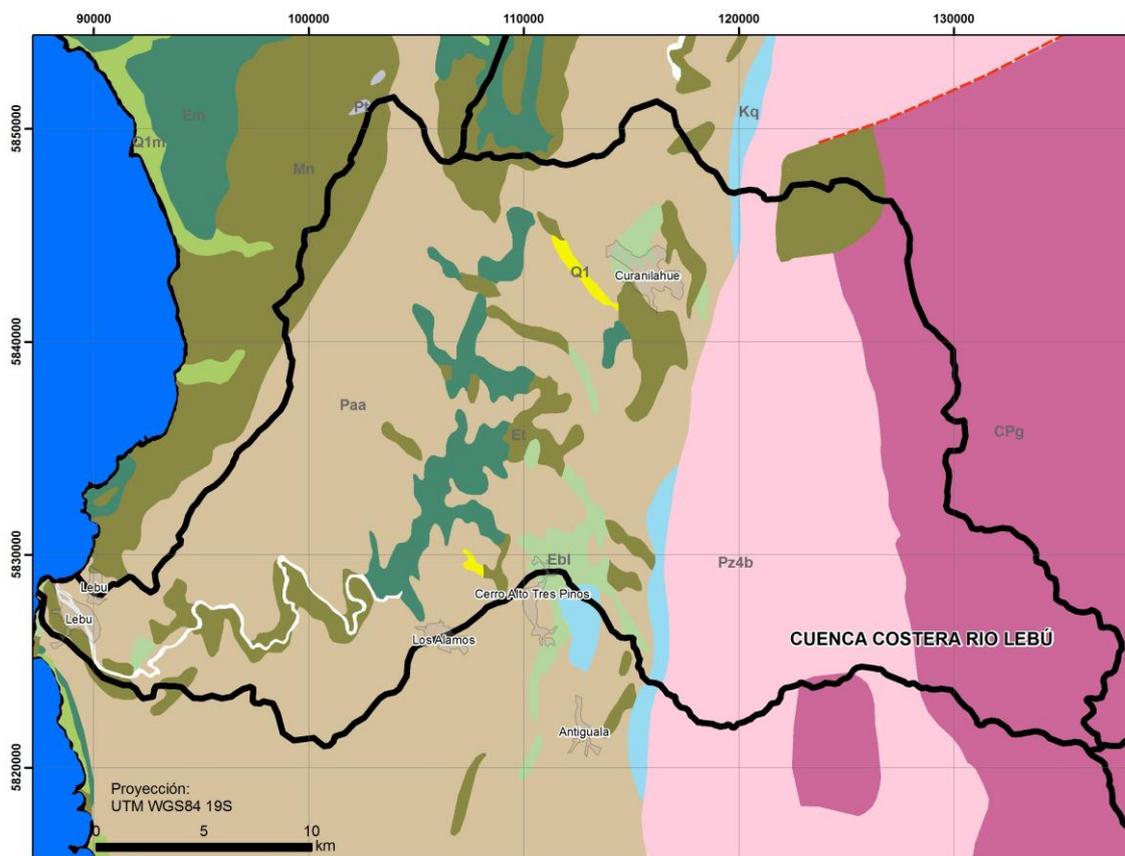


Figura 77. Geología Cuenca Costera Río Lebú

### 8.8.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS

El conjunto de la unidad detrítica descrita anteriormente se distribuye en una franja costera entre los límites norte y sur de la cuenca, limitando al este con las formaciones de filitas, pizarras y metaareniscas del Silúrico-Carbonífero y un afloramiento reducido del cretácico formado por areniscas, conglomerados y calizas. Su anchura media es de 49,36 km en su parte más ancha al sur de la cuenca, y de 26,8 km en su parte más estrecha al norte de la misma. No existe un límite propio como acuífero para esta unidad dentro de la cuenca, ya que se extiende tanto al norte como al sur a cuencas adyacentes.

Como se ha comentado en el capítulo anterior, no se dispone de datos de sondajes y pozos que hayan permitido valorar la distribución de espesores de la formación acuífera con mayor detalle. Su geometría se corresponde con las formaciones eocenas y miocenas principalmente que por el este entran en contacto con el paleozoico alineado en un eje norte-sur mediante fracturas regionales. Teniendo en cuenta las características litológicas

descritas en capítulos anteriores, el acuífero puede comportarse como un acuífero multicapa y libre, si bien pueden aparecer tramos semi-confinados y confinados en función de la existencia de cambios laterales de facies internos en la formación acuífera principal, o bien en los niveles infrayacentes.

### **8.8.3. LÍMITES DEL SISTEMA**

Aunque la unidad geológica, como se ha mencionado anteriormente, se extiende más allá de los límites de cuenca, dentro de esta cabe considerar los siguientes;

- Al norte con el área de San Agustín.
- Al sur con la localidad de Lebu y desembocadura del Lebu.
- Al oeste con la línea de costa
- Al este con el contacto con las formaciones paleozoicas en una lineación aproximada norte-sur y cercana a Curanilahue.

### **8.8.4. CAPTACIONES**

En la documentación consultada no se han encontrado datos referentes a captaciones de aguas subterráneas en la cuenca.

### **8.8.5. PIEZOMETRÍA**

A falta de datos piezométricos cabe hablar de la distribución de isopiezas a nivel conceptual. En esta cuenca el principal nivel de base lo constituye, por una parte, el nivel del mar en su parte más occidental, y en el resto de la cuenca es el río Lebu y de forma secundaria sus afluentes principales los que condicionan la distribución de isopiezas. Considerando la conexión de los cauces principales con el acuífero, y las cotas mayores y menores del río, tenemos niveles situados entre los 110 y 0 m.s.n.m. Al discurrir este río en dirección norte-sur en su primer tramo, la cuenca del mismo queda aislada de la línea de costa por las elevaciones topográficas que la separan de la cuenca del Carampangue, por lo que esto debe dar lugar a un umbral piezométrico en la misma dirección norte-sur. Al oeste, y ya dentro de la cuenca del Carampangue, las líneas de flujo serían perpendiculares a la costa.

En la zona sur-oeste de la cuenca, el río Lebu gira y se abre hacia el mar, dando lugar a un cambio en la orientación de las isopiezas que se disponen progresivamente paralelas a la línea de costa.

### 8.8.6. ESQUEMA DE FLUJO

Tal y como se ha recogido en el mapa correspondiente de la cuenca, las direcciones de flujo en la parte norte de la cuenca se orientan hacia el sur. En el borde con el zócalo paleozoico se dan flujos con dirección hacia el oeste por el drenaje de dicho zócalo, y en la zona sur- oeste, cercana a la desembocadura del río, la direcciones son oeste igualmente.

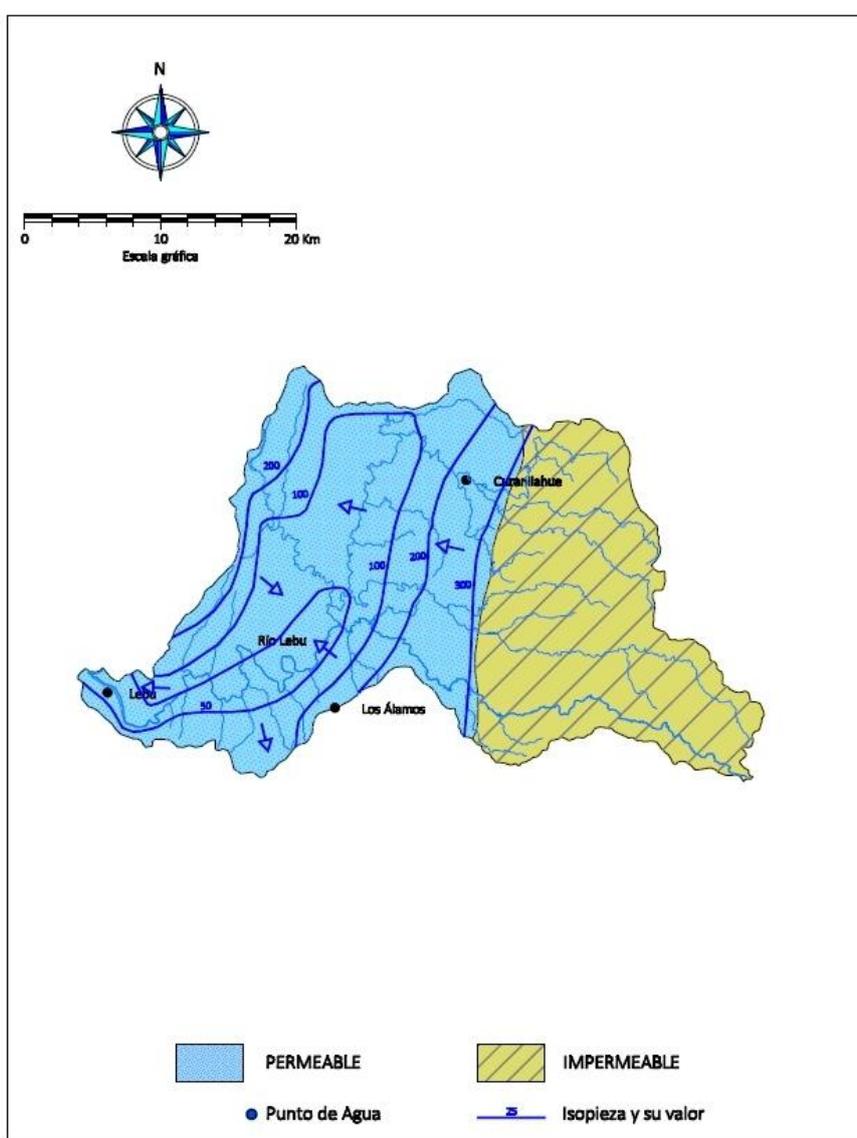


Figura 78. Mapa hidrogeológico Cuenca 087. Fuente: Elaboración propia

### 8.8.7. PARAMETROS ELASTICOS

No se dispone de datos para estimar los parámetros elásticos del acuífero por la falta de ensayos de bombeo. En trabajos anteriores se han fijado valores de caudales específicos en otras cuencas para las principales formaciones acuíferas. De acuerdo con dichos datos, la formación más extensa en esta cuenca, la denominada C, presenta valores en torno a 1,62 l/s/m.

Tabla 67. Caudal específico promedio

Unidad Hidrogeológica	Caudal Específico Promedio (l/s/m)
A	4,9
B	–
C	1,62
D	1,24

### 8.8.8. BALANCE HÍDRICO

Para los balances se han tomado en cuenta los valores obtenidos por cuenca en el "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" adjuntos (ver Tabla 58).

Al igual que en las otras cuencas costeras se ha considerado una infiltración del 10% para los materiales detríticos y del 3% para las formaciones paleozoicas. De esta manera se obtienen los siguientes datos:

Tabla 68. Balance hídrico Cuenca 087

Cuenca 087	área km <sup>2</sup>	PP (mm)	ET (mm)	Escorrentía	Infiltración %	Infiltración mm.	Salidas Hm3/año	Balance	
Cuenca	853	2.000	600						
Paleozoico				1.358	3%	42			
Detrítico				1.260	10%	140			
		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	l/s
Paleozoico	327	654	196	444		13,73	0	13,73	436
Detrítico	526	1.052	316	663		73,66	0	73,66	2.336
TOTALES		1.706	512	1.107		87,40	0	87,40	2.771

Para el acuífero detrítico se obtiene unos recursos por infiltración de 73,66 hm<sup>3</sup>. Los caudales infiltrados en el paleozoico se consideran cedidos

lateralmente a las formaciones detríticas, con lo que cabría sumar 13,73 hm<sup>3</sup>, resultando un total de 87,40 hm<sup>3</sup>/año.

Al no disponerse de datos concretos de piezometría que puedan clarificar la relación acuífero-río en cuanto a aportaciones o drenajes entre uno y otro, se estima a priori un balance cero apoyándose en el régimen claramente estacional de los cauces. Los mismos serían cedentes al acuífero en épocas de crecida, mientras que drenarían recursos del acuífero en el estiaje.

Igualmente, en esta cuenca no se dispone de datos de riego que permitan estimar los retornos al acuífero.

En resumen, y teniendo en cuenta los rangos de valores obtenidos, se considera el acuífero detrítico en régimen natural, drenando los excedentes anuales al mar y al río en épocas de estiaje.

#### **8.8.9. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA**

De acuerdo a análisis previos existentes en esta cuenca las aguas son Bicarbonatadas sódicas. El dato pertenece al "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de Cuencas Costeras ESSBIO, VII Región".

El análisis de cationes e iones muestra que éstos se mantienen con bajas variaciones en el área costera, con una tendencia a incrementar, desde este a oeste, particularmente en lo que se refiere a la concentración de cloruro, alcalinidad y conductividad.

Hacia el interior de las cuencas costeras predominan aguas del tipo bicarbonatadas- cálcicas a sódicas. Las diferencias en la composición aniónica están dadas por la concentración relativa de cloruro; y en la composición catiónica por las concentraciones de sodio y calcio.

En el área de estudio, las aguas tienen un pH entre 6,2 y 7,3 por lo que satisfacen los requerimientos potables y de riego.

#### **8.9. CUENCA COSTERA RÍO LEBU Y PAICAVÍ (CÓDIGO DGA 088)**

Abarca un área aproximada de 630 km<sup>2</sup>, integrando parte de las comunas de Lebu, Los Álamos y Cañete. Presenta una red de drenaje paralela en el

sector costero, donde se ubican en esa disposición una serie de esteros como el Curaco, Quinahue y Yeneco, entre otros. Aguas arriba, la red de drenaje se presenta dendrítica, definida por los ríos Cayucupil, Conhueco, Caramávida, Tucapel y Calebu. En el sector sur, en el límite con la cuenca costera entre el río Paicaví y límite regional sur, la confluencia de los esteros Provoque, Calebu, Peral y Buchoco generan el Lago Lanalhue. El régimen que presenta la cuenca corresponde a pluvial.

### **8.9.1. FORMACIONES PERMEABLES**

Las formaciones permeables presentes en esta cuenca son las siguientes;

Unidad A: Permeabilidad Alta a Media en Depósitos no Consolidados

Esta unidad incluye depósitos litorales del cuaternario, dispuestos en forma de terrazas marinas y depósitos de playa, con importante desarrollo en la cuenca costera entre límite regional norte y río Itata, cuenca entre el río Biobío y Carampangue, Cuenca entre el río Lebu y Paicaví y en la cuenca entre el río Paicaví y límite regional sur.

Otro depósito que forma parte de la unidad A corresponde a los depósitos fluviales, aluviales y fluviodeltaicos, de distribución areal mas acotada.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas (ver mapa geológico):

- Q: Depósitos fluviales, aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cuaternario.
- Qm: Secuencias marinas litorales o fluviales estuarinas.

De Buen (1993) caracteriza los depósitos que corresponderían a esta unidad hidrogeológica, los cuales se presentan en la Tabla 71.

En el borde litoral, los depósitos de esta unidad forman terrazas marinas de espesor variable, entre 18 y 30 m; compuestos por estratos de arenas con escasa compactación y niveles de dunas.

En general, las terrazas marinas se caracterizan por una granulometría homogénea, compuestas por arenas finas a gruesas con escasos limos, que

le confieren una alta permeabilidad y niveles de agua subterránea someros (AC Ingenieros Consultores, 1992).

Unidad D: Permeabilidad Baja a Nula en Rocas Metamórficas e Intrusivas

Esta unidad agrupa a las siguientes rocas (ver mapa geológico).

- Cpg: Rocas Ígneas conformada por granito, granodioritas tonalita, monzodiorita. Edad Carbonífero-cretácico.
- Pz: Rocas Metamórficas formada por pizarras, filitas, metaarenitas, metapelitas, esquistos. Edad Paleozoica.

En las rocas graníticas los intensos procesos de meteorización química han permitido la formación *in situ* de un suelo residual con gradación uniforme del tipo arena gruesa a gravilla, denominado "maicillo". En la región se ha observado que estos suelos, de espesor variable, permiten la infiltración y formación de flujos locales de agua subterránea dirigidos hacia la Depresión Central (González *et al.*, 1999).

Las rocas graníticas, al estar alteradas generan una porosidad que les permite almacenar pequeños volúmenes de agua (porosidad 3-5%).

En general, en las rocas metamórficas los procesos de meteorización tienden a acentuarse en zonas de mayor fracturamiento, que les permite almacenar una cierta cantidad de agua cuyos volúmenes no son atractivos para ser utilizados en forma económica.

Los materiales detríticos que afloran en esta cuenca corresponden a las formaciones PI1m y Qm. La primera se trata de secuencias litorales o fluviales con presencia de areniscas y gravas, mientras que la segunda corresponde a secuencias marinas litorales constituidas por arenas y gravas. Por debajo de estos materiales no se dispone de columnas de sondajes u otros datos que permitan establecer la serie, si bien, de acuerdo a los afloramientos cercanos en la zona de Lebu, podría considerarse la existencia de niveles del Paleoceno, Eoceno y Mioceno. El paleoceno aparece al norte con facies correspondientes a depósitos de transición marino-continental con litologías de areniscas, limolitas y capas de carbón. (PE1). El Eoceno se presenta en facies marinas de areniscas y lutitas (E1m). El Mioceno se dispone en facies marinas transgresivas formadas por areniscas finas, arcillolitas y limolitas (M1m). Todo este conjunto puede

constituir una unidad hidrogeológica con permeabilidades variables cuyo espesor se desconoce, siendo en todo caso mayor que el conjunto detrítico del acuífero costero en la zona sur (cuenca 089).

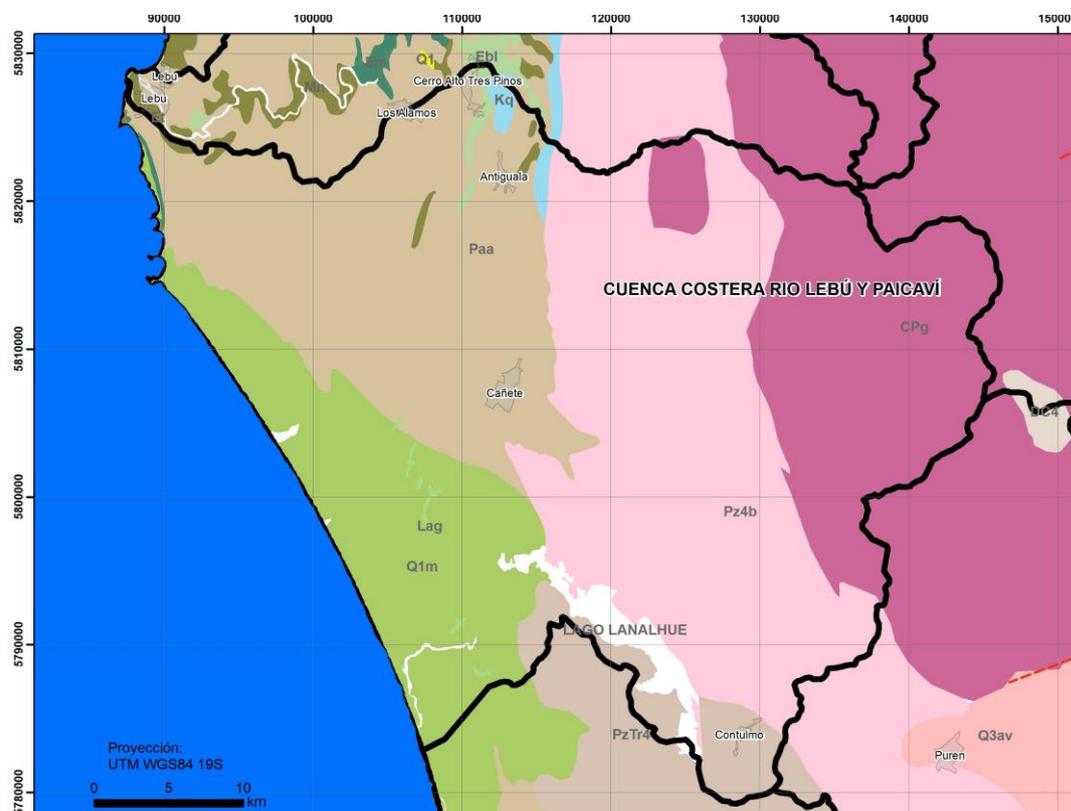


Figura 79. Geología Cuenca Costera Río Lebú y Paicaví

### 8.9.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS

El conjunto de la unidad detrítica descrita anteriormente se distribuye en una franja costera entre los límites norte y sur de la cuenca, limitando al este con las formaciones de filitas, pizarras y metaareniscas del Silúrico-Carbonífero. Su anchura mínima es de 8,8 km al sur y de 27,1 km al norte de la cuenca. No existe un límite propio como acuífero para esta Unidad permeable dentro de la cuenca, ya que se extiende tanto al norte como al sur a cuencas adyacentes.

Como se ha comentado en el capítulo anterior, no se dispone de datos de sondajes y pozos que hayan permitido valorar la distribución de espesores de la formación acuífera con mayor detalle. Su geometría se corresponde con las formaciones cuaternarias y pliocenas que por el este se acuñan perdiendo espesor desde la línea de costa hasta el contacto con el

paleozoico alineado en un eje norte-sur. No obstante, habría que considerar la presencia también de las series del paleoceno, eoceno y mioceno subyacentes a las anteriores, aflorantes más al norte, y que igualmente se apoyan discordantes sobre un paleorelieve paleozoico.

Teniendo en cuenta las características litológicas descritas en capítulos anteriores, el acuífero puede comportarse como un acuífero multicapa y libre, si bien pueden aparecer tramos semi-confinados y confinados en función de la existencia de cambios laterales de facies internos en la formación acuífera principal, o bien en los niveles infrayacentes al cuaternario.

### **8.9.3. LIMITES DEL SISTEMA**

Aunque la unidad geológica, como se ha mencionado anteriormente, se extiende más allá de los límites de cuenca, dentro de esta cabe considerar los siguientes;

- Al norte con el límite norte de cuenca y zona sur de la localidad de Lebu
- Al sur con el límite de cuenca y desembocadura del Paicaví.
- Al oeste con la línea de costa
- Al este con el contacto con las formaciones paleozoicas en una lineación aproximada norte-sur; Lago Lanalhue, Cañete y Antiguala

### **8.9.4. CAPTACIONES**

En el trabajo "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de cuencas costeras ESSBIO, VII Región", se recogen datos del 2008 sobre 7 captaciones que sumaban un caudal total de explotación de 51 l/s.

Tabla 69. Caudal de extracción total a Agosto de 2008 y N° de pozos.

Cuenca	N° de pozos	Caudal Extracción (l/s)
Entre R. Lebu y R. Paicaví	7	51

Como derechos constituidos no hay ninguna captación de aguas subterráneas, únicamente se tramitaron 3 expedientes con un total de 15 l/s solicitados y 0 l/s otorgados.

Respecto a captaciones de aguas superficiales hay un total de 80 solicitudes, de las cuales 65 fueron denegadas, 10 aprobadas y el resto fueron desistidas.

### **8.9.5. PIEZOMETRÍA**

De forma general, y atendiendo a un modelo conceptual, la distribución de isopiezas corresponde a una superficie piezométrica muy superficial, en la cual se pueden establecer algunas cotas de referencia. Por un lado se consideran las cotas próximas a la superficie en el contacto con el basamento paleozoico al este del acuífero (entre los 20 y 350 m.s.n.m. como rango medio). Otra cota de referencia la fija la lámina de agua del lago de Lanalhue, el cual entra en contacto con el detrítico en su parte occidental. Esta cota corresponde a un valor de 20 m.s.n.m. Por último, y al no existir casi explotaciones en el acuífero, y en concreto en la zona de la costa, el nivel en esa zona alcanzaría los 0 m.s.n.m.

Con estos datos aproximados se obtendrían valores de gradientes en torno a 0,002% en la zona del Lago Lanalhue.

En la zona norte se dan gradientes con valores de 0,008 % entre el borde paleozoico y la línea de costa, si bien hay que considerar que en esta zona existen dos formaciones acuíferas diferenciadas y por lo tanto presentarán gradientes ligeramente distintos. La formación costera por sus características más permeables puede presentar gradientes cercanos al 0%, mientras que las formaciones pliocenas se acercarán más al valor del 0,8% estimado.

Respecto a la distribución de isopiezas, hay que distinguir dos zonas en esta cuenca que presentan un patrón diferenciado.

La primera de ellas es la zona comprendida entre la costa y el límite de las formaciones de playa y campos dunares, donde el acuífero está formado por las series cuaternarias más permeables. Aquí cabe esperar una distribución de isopiezas con tendencia paralela a la línea de costa.

Desde el límite anterior hacia el contacto con el paleozoico, la red hidrográfica de esta cuenca presenta un patrón diferente al orientarse los cauces de forma anómala respecto al resto de cuencas cercanas. Sobre los

materiales pliocenos, la orientación de los cauces es marcadamente NNE-SSW y oblicua a la costa, mientras que aguas arriba, sobre el paleozoico, la red es de carácter dendrítico y los cauces se abren perpendiculares a la costa en el borde de dicha formación. Estas características especiales deben de alterar el patrón normal esperado en zonas de costa para las isopiezas, generando un patrón oblicuo en las mismas que poco a poco, en la franja costera, terminan por acomodarse paralelas a la línea de costa.

### 8.9.6. ESQUEMA DE FLUJO

De acuerdo a la piezometría estimada, las direcciones de flujo se orientan con un gradiente tendido en dirección NE-SW girando en la zona cercana en la costa a W-E.

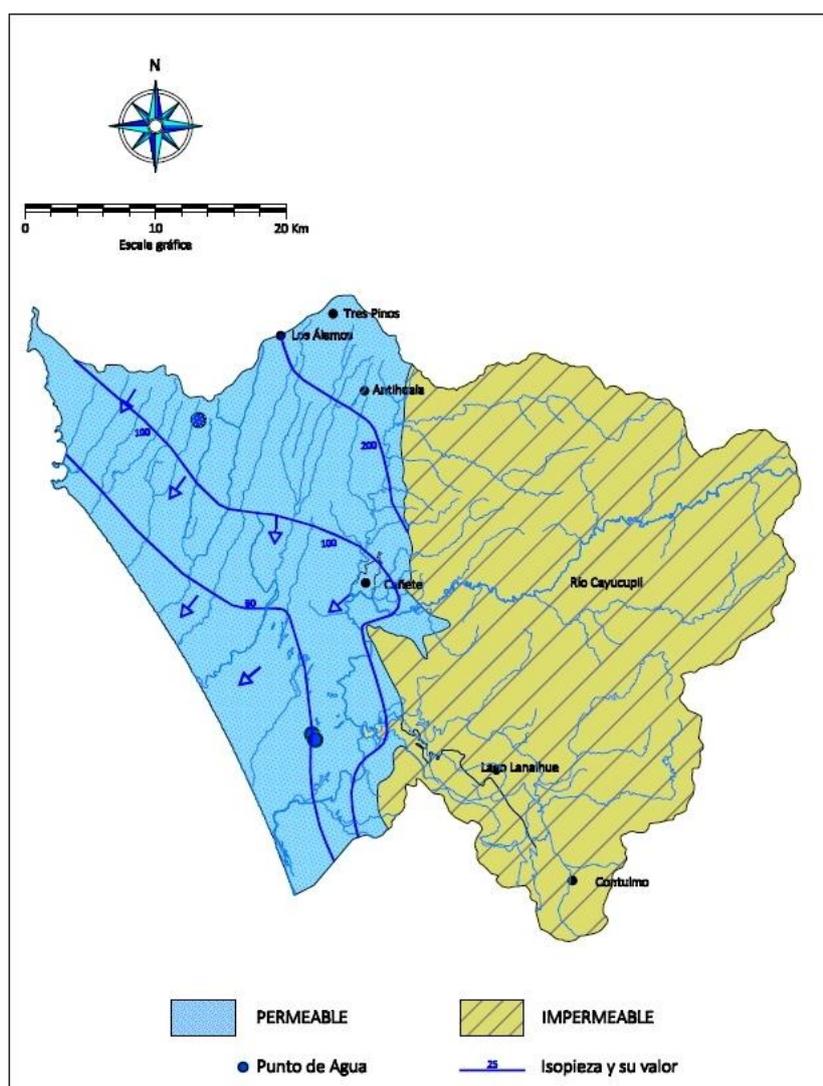


Figura 80. Mapa hidrogeológico Cuenca 088. Fuente: Elaboración propia

### 8.9.7. PARAMETROS ELASTICOS

No se dispone de datos relativos a permeabilidades y transmisividad de las formaciones acuíferas. Respecto a caudales específicos se dispone de datos tomados del "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" donde se estiman caudales específicos de 4.9 l/s/m para la formación más permeable.

Tabla 70. Caudal específico promedio.

Unidad Hidrogeológica	Caudal Específico Promedio (l/s/m)
A	4,9
B	-
C	1,62
D	1,24

Otros datos de referencia aportan valores de 0,2 -11 l/s/m (tabla siguiente).

Tabla 71. Características Hidrogeológicas Depósitos no Consolidados Unidad A

DEPÓSITO	GRANULOMETRÍA	NIVEL ESTÁTICO (m)	CAUDAL ESPECÍFICO (l/s/m)	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS
Depósitos Fluviales	gravas y gravas arenosas estratos arcillosos	3,0- 5,0		permeabilidad variable Acuíferos libres y semiconfinados
Depósitos Fluvio Deltáicos	variable (bolones - arcilla)	1,0- 3,0	0,2 - 11	Permeabilidad media a alta Acuíferos confinados Buena interconexión hidráulica.

Fuente: De Buen (1993)

### 8.9.8. BALANCE HÍDRICO

Para los balances se han tomado en cuenta los valores obtenidos por cuenca en el "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VIII Región" (ver Tabla 58).

Al igual que en las otras cuencas costeras se ha considerado una infiltración del 10% para los materiales detríticos y del 3% para las formaciones paleozoicas. De esta manera se obtienen los siguientes datos:

Tabla 72. Balance hídrico. Cuenca 088

Cuenca 088	área km <sup>2</sup>	PP (mm)	ET (mm)	Escorrentía	Infiltración %	Infiltración mm.	Salidas hm <sup>3</sup> /año	Balance	
Cuenca	1.691	2.000	600						
Paleozoico				1.358	0	42			
Detrítico				1.260	0	140			
		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	l/s
Paleozoico	931	1.862	558	1.264		39,09	0,00	39,09	1.240
Detrítico	760	1.520	456	957		106,37	1,60	104,77	3.322
TOTALES		3.381	1.014	2.221		145,46	1,60	143,86	4.562

Para el acuífero detrítico se obtiene unos recursos por infiltración de 106,37 hm<sup>3</sup>. Los caudales infiltrados en el paleozoico se consideran cedidos lateralmente a las formaciones detríticas, con lo que cabría sumar 39,09 hm<sup>3</sup>, resultando un total de 145,46 hm<sup>3</sup>/año. Detrayendo las explotaciones subterráneas de 1,6 hm<sup>3</sup>/año, se obtiene un valor de 143,86 hm<sup>3</sup>/año o 4.561,85 l/s.

Al no disponerse de datos concretos de piezometría que puedan clarificar la relación acuífero-río en cuanto a aportaciones o drenajes entre uno y otro, se estima a priori un balance cero apoyándose en el régimen claramente estacional de los cauces. Los mismos serían cedentes al acuífero en épocas de crecida, mientras que drenarían recursos del acuífero en el estiaje.

Igualmente, en este caso no se dispone de datos de riego que permitan estimar los retornos al acuífero.

En resumen, y teniendo en cuenta las escasas explotaciones subterráneas existentes, se considera el acuífero detrítico casi en régimen natural, drenando los excedentes anuales al mar.

### 8.9.9. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA

De acuerdo a análisis previos existentes en esta cuenca las aguas son Bicarbonatadas sódicas. El dato pertenece al "Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de Cuencas Costeras ESSBIO, VII Región.

El análisis de cationes e iones muestra que éstos se mantienen con bajas variaciones en el área costera, con una tendencia a incrementar, desde Este a Oeste, particularmente en lo que se refiere a la concentración de cloruro, alcalinidad y conductividad.

Hacia el interior de las cuencas costeras predominan aguas del tipo bicarbonatadas- cálcicas a sódicas. Las diferencias en la composición aniónica están dadas por la concentración relativa de cloruro; y en la composición catiónica por las concentraciones de sodio y calcio.

En el área de estudio, las aguas tienen un pH entre 6,2 y 7,3 por lo que satisfacen los requerimientos potables y de riego.

### **8.10. CUENCA COSTERA ENTRE RÍO PAICAVÍ Y LÍMITE REGIONAL SUR (CÓDIGO DGA 089)**

Esta cuenca abarca un área aproximada de 1.350 km<sup>2</sup>, drenando la provincia de Tirúa. La red de drenaje se presenta dendrítica, generando lagunas como la Lleu Lleu, formada por la confluencia de los ríos Mahuilque, Huilingo y los esteros Coihueco y Medihueco. En el sector sur el principal río es el Tirúa. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **8.10.1. FORMACIONES PERMEABLES**

Las formaciones permeables en la cuenca son las siguientes;

Unidad A: Permeabilidad Alta a Media en Depósitos no Consolidados

Esta unidad incluye depósitos litorales del cuaternario, dispuestos en forma de terrazas marinas y depósitos de playa, con importante desarrollo en la cuenca entre el río Paicaví y límite regional sur. Otro depósito que forma parte de la unidad A corresponde a los depósitos fluviales, aluviales y fluviodeltaicos, de distribución areal mas acotada.

Estos depósitos agrupan a las siguientes unidades geológicas:

- Q: Depósitos fluviales, aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cuaternario.
- Qm: Secuencias marinas litorales o fluviales estuarinas.

De Buen (1993) caracteriza los depósitos que corresponderían a esta unidad hidrogeológica, los cuales se presentan a continuación.

Tabla 73. Características Hidrogeológicas Depósitos no Consolidados Unidad A

DEPÓSITO	GRANULOMETRÍA	NIVEL ESTÁTICO (m)	CAUDAL ESPECÍFICO (l/s/m)	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS
Depósitos Fluviales	gravas y gravas arenosas estratos arcillosos	3,0- 5,0		permeabilidad variable Acuíferos libres y semiconfinados
Depósitos Fluvio Deltáicos	variable (bolones - arcilla)	1,0- 3,0	0,2 - 11	Permeabilidad media a alta Acuíferos confinados Buena interconexión hidráulica.

En el borde litoral, los depósitos de esta unidad forman terrazas marinas de espesor variable, entre 18 y 30 m; compuestos por estratos de arenas con escasa compactación y niveles de dunas.

En general, las terrazas marinas se caracterizan por una granulometría homogénea, compuestas por arenas finas a gruesas con escasos limos, que le confieren una alta permeabilidad y niveles de agua subterránea someros (AC Ingenieros Consultores, 1992).

Unidad D: Permeabilidad Baja a Nula en Rocas Metamórficas e Intrusivas

Esta unidad agrupa a las siguientes rocas:

- Cpg: Rocas Ígneas conformada por granito, granodioritas tonalita, monzodiorita. Edad Carbonífero-cretácico.
- Pz: Rocas Metamórficas formada por pizarras, filitas, metaarenitas, metapelitas, esquistos. Edad Paleozoico.

En las rocas graníticas los intensos procesos de meteorización química han permitido la formación *in situ* de un suelo residual con gradación uniforme del tipo arena gruesa a gravilla, denominado "maicillo". En la región se ha observado que estos suelos, de espesor variable, permiten la infiltración y formación de flujos locales de agua subterránea dirigidos hacia la Depresión Central (González *et al.*, 1999).

Las rocas graníticas, al estar alteradas generan una porosidad que les permite almacenar pequeños volúmenes de agua (porosidad 3-5%).

En general, en las rocas metamórficas los procesos de meteorización tienden a acentuarse en zonas de mayor fracturamiento, que les permite almacenar una cierta cantidad de agua cuyos volúmenes no son atractivos para ser utilizados en forma económica.

### **8.10.2. GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS**

El acuífero de esta cuenca se disponen a lo largo de la franja litoral de norte a sur con una anchura variable entre los 9,1 y 14,6 km. de ancho y 53 km. de largo. Al oeste conecta con la línea de costa y al este limita con la formación paleozoica que actúa de base impermeable. Respecto a sus límites norte y sur se pueden considerar abiertos al prolongarse la formación cuaternaria a cuencas adyacentes. La superficie total de la formación cuaternaria en esta área es de 309 km<sup>2</sup>.

Los espesores medios que se citan para esta formación son de 30 metros. No se dispone de datos de sondajes y pozos que hayan permitido valorar la distribución de espesores de la formación acuífera con mayor detalle. Su geometría se corresponde con las formaciones cuaternarias y pliocenas que por el este se acuñan perdiendo espesor desde la línea de costa hasta el contacto con el paleozoico alineado en un eje norte-sur. En algunas ocasiones, y de forma puntual para los cauces de mayor entidad, dichas formaciones cuaternarias se prolongan en los valles fluviales sobre el basamento conformando acuíferos locales formados por los depósitos aluviales.

Teniendo en cuenta las características litológicas descritas en capítulos anteriores, el acuífero puede comportarse como un acuífero multicapa y libre, si bien pueden aparecer tramos semi-confinados y confinados en función de la existencia de cambios laterales de facies internos en la formación y de carácter local.

### **8.10.3. CAPTACIONES**

Se han recopilado los datos existentes en bibliografía y en los registros pertenecientes a la base de datos del Centro de Información de Recursos Hídricos del Ministerio de Obras Públicas. En total, y en concreto en estos últimos registros, se han detectado 24 captaciones de aguas subterráneas, de las cuales 13 corresponden a concesiones aprobadas. El volumen total otorgado de acuerdo con estos datos es de 1,24 hm<sup>3</sup>/año, aunque hay que considerar su extracción discontinua. Frente al volumen otorgado, se han estimado los caudales más ajustados mediante los siguientes coeficientes de ocupación del derecho:

- Riego: 0,18
- Industrial: 1,00
- Minero: 1,00
- Abastecimiento: 0,70

De acuerdo a unos usos estimados en la cuenca, correspondientes a un 85% de riego, un 12 % de abastecimiento y un 3% industrial, se obtienen los siguientes caudales:

Tabla 74. Estimación del uso del agua en la cuenca 089

Uso	Riego	Abastecimiento	Industrial	Total
% Estimado	85%	12%	3%	100%
hm <sup>3</sup> /año Q Otorgado	1,05	0,15	0,04	1,24
hm <sup>3</sup> /año real	0,19	0,10	0,04	0,33

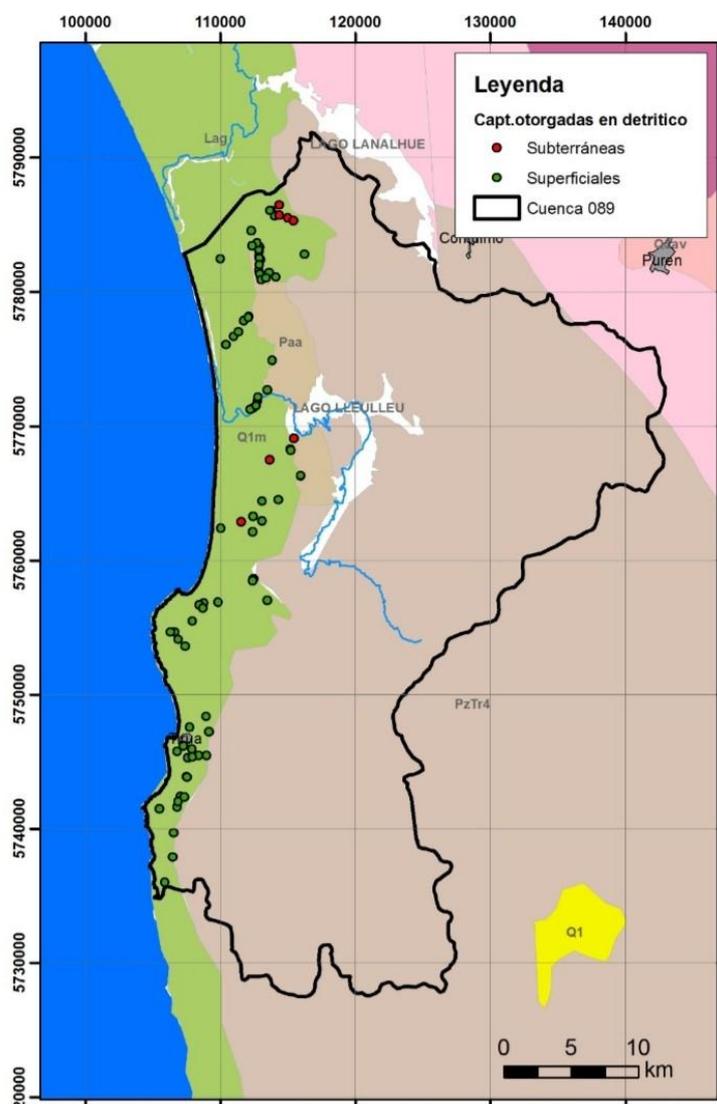


Figura 81. Captaciones otorgadas en materiales detríticos. Cuenca 089

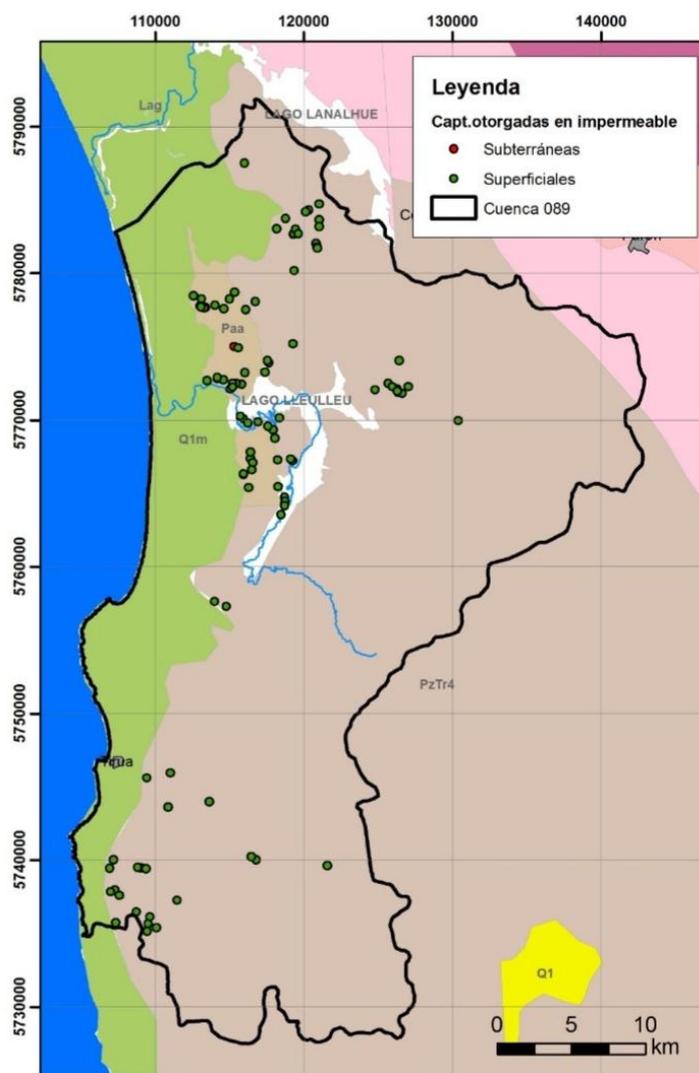


Figura 82. Captaciones otorgadas en materiales impermeables. Cuenca 089

#### 8.10.4. PIEZOMETRÍA

AC Ingenieros Consultores (1992) revisaron pozos existentes en la Comuna de Coronel con el fin de caracterizar el sistema acuífero litoral. Los mapas de curvas isofreáticas mostraban una cota del nivel freático a pocos metros del mar inferior a 1 msnm. siendo el gradiente hidráulico calculado entre  $1 \times 10^{-2}$  y  $2 \times 10^{-3}$  en el sector de industrias y el sector de Laguna Quiñenco. Para esta cuenca cabe considerar valores similares y fuertemente dependientes de la topografía.

De forma general, y atendiendo a un modelo conceptual, la distribución de isopiezas corresponde a una superficie con cotas próximas a la superficie en el contacto con el basamento paleozoico al este del acuífero (entre 8 y 150

m.s.n.m. como rango medio). Desde aquí hacia la línea de costa, la superficie piezométrica, condicionada localmente por cauces y relieves topográficos, se extiende en un gradiente muy tendido con isopiezas de tendencia paralela a dicha línea de costa, donde alcanzan el nivel de los cero m.s.n.m. Considerando algunas cotas de referencia absoluta de niveles se puede establecer un gradiente estimado, como son las cotas de contacto del detrítico con el paleozoico y el contacto con el nivel de base del Lago Lleulleu, el cual entra en contacto con el acuífero cuaternario en su parte occidental (20 m.s.n.m.). Para estas cotas y el nivel cero de la línea de costa, se obtienen gradientes del orden de 0.003, coherentes con los valores mencionados anteriormente.

### 8.10.5. ESQUEMA DE FLUJO

Como en todo el acuífero costero, el esquema de flujo viene condicionado por la línea de costa, el relieve topográfico y los cauces existentes. De forma general, cabe considerar un flujo E-W desde las zonas de mayor alimentación hacia el mar. En detalle, esta dirección E-W es condicionada por la topografía local y la relación acuífero-río de los cauces superficiales.

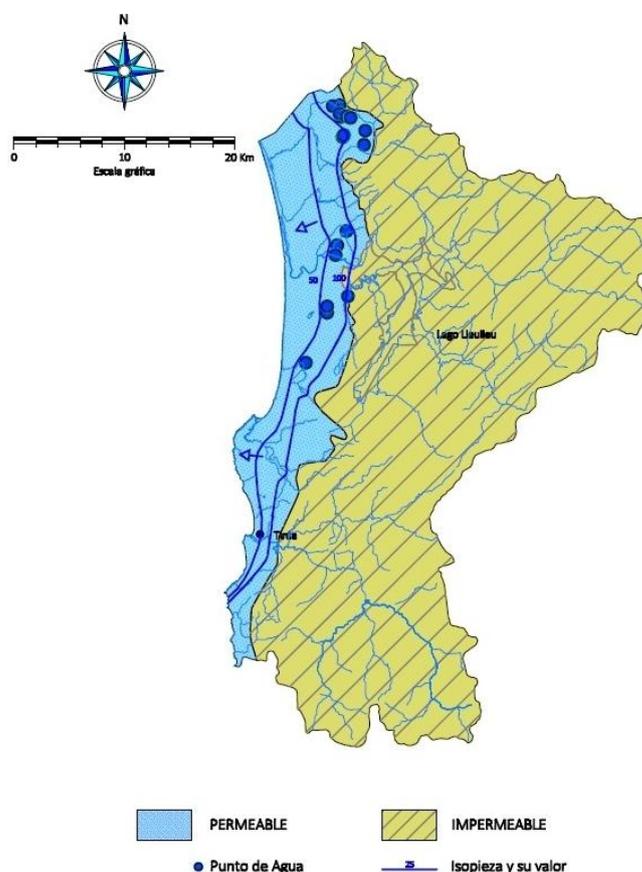


Figura 83. Mapa hidrogeológico Cuenca 089. Fuente: Elaboración propia

### 8.10.6. PARAMETROS ELASTICOS

Se dispone de datos relativos a ensayos de bombeo en las terrazas marinas, de los cuales es posible extraer entre 2,2 y 40 l/s con un descenso del nivel de agua entre 0,25 y 3 m respectivamente. De Buen (1993) aporta datos de caudales específicos para los depósitos fluvio-deltaicos entre 0,2 y 11 l/s/m., coherentes con los aportados en el "Estudio hidrológico e hidrogeológico de Cuencas Costeras Essbio, VII Región" con valores de 4,9 para la unidad A.

### 8.10.7. BALANCE HÍDRICO

De acuerdo a los trabajos previos, en este sector las precipitaciones anuales varían entre 1.600 hasta 3.000 mm. La evapotranspiración se mantiene en todo el sector bordeando los 600 mm/año.

Para poder determinar la recarga por lluvia o por escorrentía total se consideraron los datos meteorológicos y balances hídricos realizados en los trabajos de IPLA (1983) y REG (1985), y de las isóneas de precipitación y evapotranspiración resultantes del balance hídrico de Chile (DGA, 1975). Los resultados se han recogido del estudio "ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DE CUENCAS COSTERAS ESSBIO, VIII REGIÓN". Se estima que de la escorrentía total un 10% es capaz de infiltrarse.

Respecto a la infiltración, se ha considerado una tasa del 10% tal y como se establece en los trabajos anteriores para el acuífero detrítico. La tasa de infiltración en materiales paleozoicos se ha estimado en un 3 % basándose en valore comúnmente aceptados en este tipo de formaciones.

De esta manera el balance resultante sería el siguiente:

Tabla 75. Balance hídrico en la cuenca 089

Cuenca 089	área km <sup>2</sup>	PP (mm)	ET (mm)	Escorrentía	Infiltración %	Infiltración mm.	Salidas hm <sup>3</sup> /a	Balance	
Cuenca	1.358	1.800	600						
Paleozoico				1.164	0	36			
Detrítico				1.080	0	120			
		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a		hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	l/s
Paleozoico	1.049	1.888	629	1.221		37,77	0,00	37,77	1.198
Detrítico	309	556	185	334		37,08	0,33	36,75	1.165
TOTALES		2.445	815	1.555		74,85	0,33	74,52	2.363

Se obtiene una disponibilidad de 1.165,33 l/s para el acuífero detrítico por infiltración. A partir de este valor cabe considerar las entradas laterales al acuífero desde el basamento paleozoico, los retornos de riego y las entradas –salidas por comunicación con los cauces.

Considerando que los caudales infiltrados en el paleozoico, tanto en la zona alterada superficial como en formaciones fracturadas, terminan por drenar hacia el contacto con los materiales detríticos, cabe añadir los 1.197,60 l/s a los recursos del acuífero detrítico por entradas laterales.

A esto cabría añadir las entradas por retornos de riego (20% de las dotaciones). Las concesiones superficiales computadas suman 6.222,11 l/s, de los cuales, de acuerdo a los factores de equivalencia considerados, un 0,18 de ese caudal se considera de utilización real, es decir, 1.119,9 l/s. Los retornos de riego para esas dotaciones sumarían una entrada al acuífero de 224 l/s.

Respecto a la cesión o aportación de cauces, se puede estimar, a falta de datos más concretos, un balance cero dado el funcionamiento fuertemente estacional de los mismos.

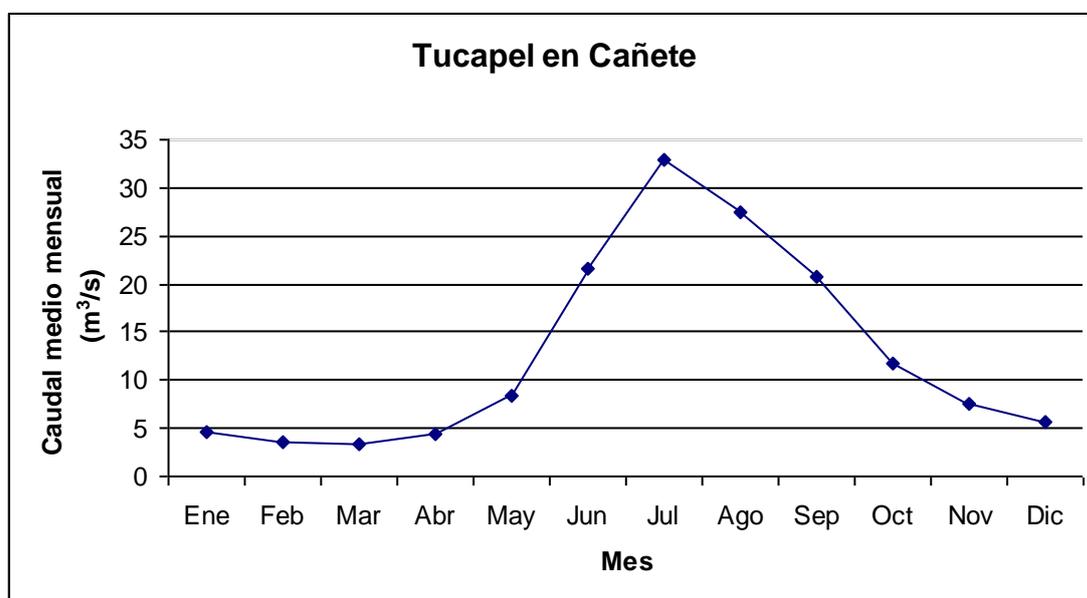


Figura 84. Variaciones de caudales medios mensuales. Est. Cañete.

Respecto a las salidas por explotaciones, como se ha computado anteriormente, en base a los datos existentes se estiman en 1,24 hm<sup>3</sup>/año las explotaciones concedidas y en 0,33 hm<sup>3</sup> los caudales reales.

Así pues, teniendo en cuenta lo anterior, se obtendrían unos recursos totales del acuífero detrítico de 2.586,94 l/s.

#### **8.10.8. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA**

No se disponen de datos analíticos para el agua subterránea de esta cuenca. De acuerdo a la bibliografía consultada, y teniendo en cuenta la similitud de litologías entre esta cuenca y la correspondiente a la 088 (Costera entre Río Lebu y Paicaví), donde sí se disponen datos, las aguas serían Bicarbonatada Sódicas.

## **9. MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE NILAHUE (VI REGIÓN)**

Una vez desarrollado el modelo conceptual del acuífero, se ha llevado a cabo un modelo numérico que permita la simulación del acuífero según la situación actual, y según unos escenarios futuros propuestos por la Inspección Fiscal, los cuales no se presentan en este informe al no haber sido consensuados, y que serán presentados en el informe final.

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.

### **9.1. 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, determinada mediante la extrapolación entre los perfiles geológicos trazados en apartados anteriores.

El mallado se ha realizado considerando 367 columnas y 481 filas, con tamaño de celdas de 100x100 metros y orientación norte sur.

La proyección geográfica se ha realizado en coordenadas UTM WGS84 19S, y las coordenadas locales (modelo) son:

- X máximo: 35909 m
- Y máximo: 47516 m



Figura 85. 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 85 se incluyen en blanco las celdas activas y en verde las inactivas.

## 9.2. 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 7.3 a partir de los datos recopilados y de geofísica.

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

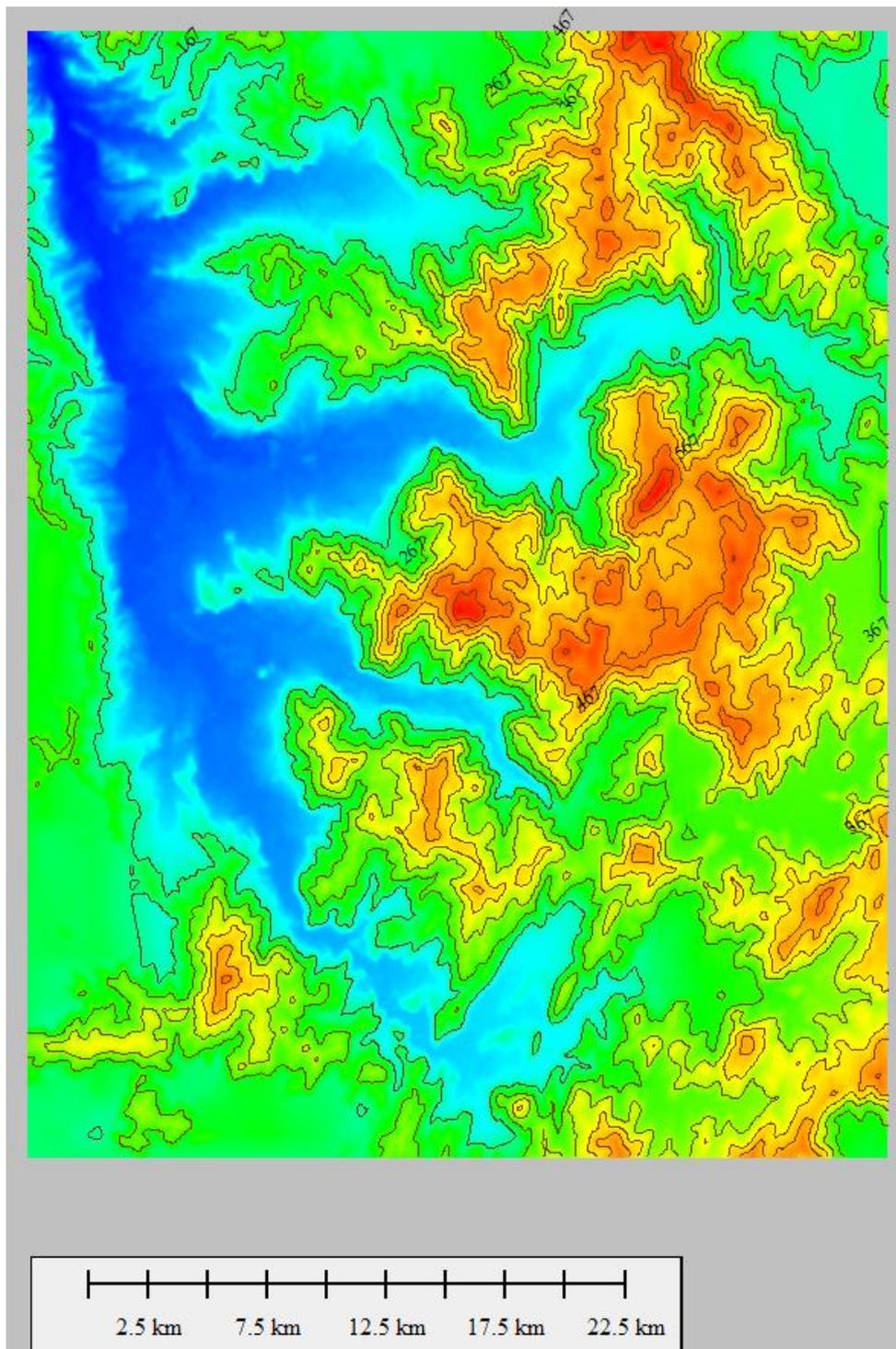


Figura 86. Topografía introducida en el modelo

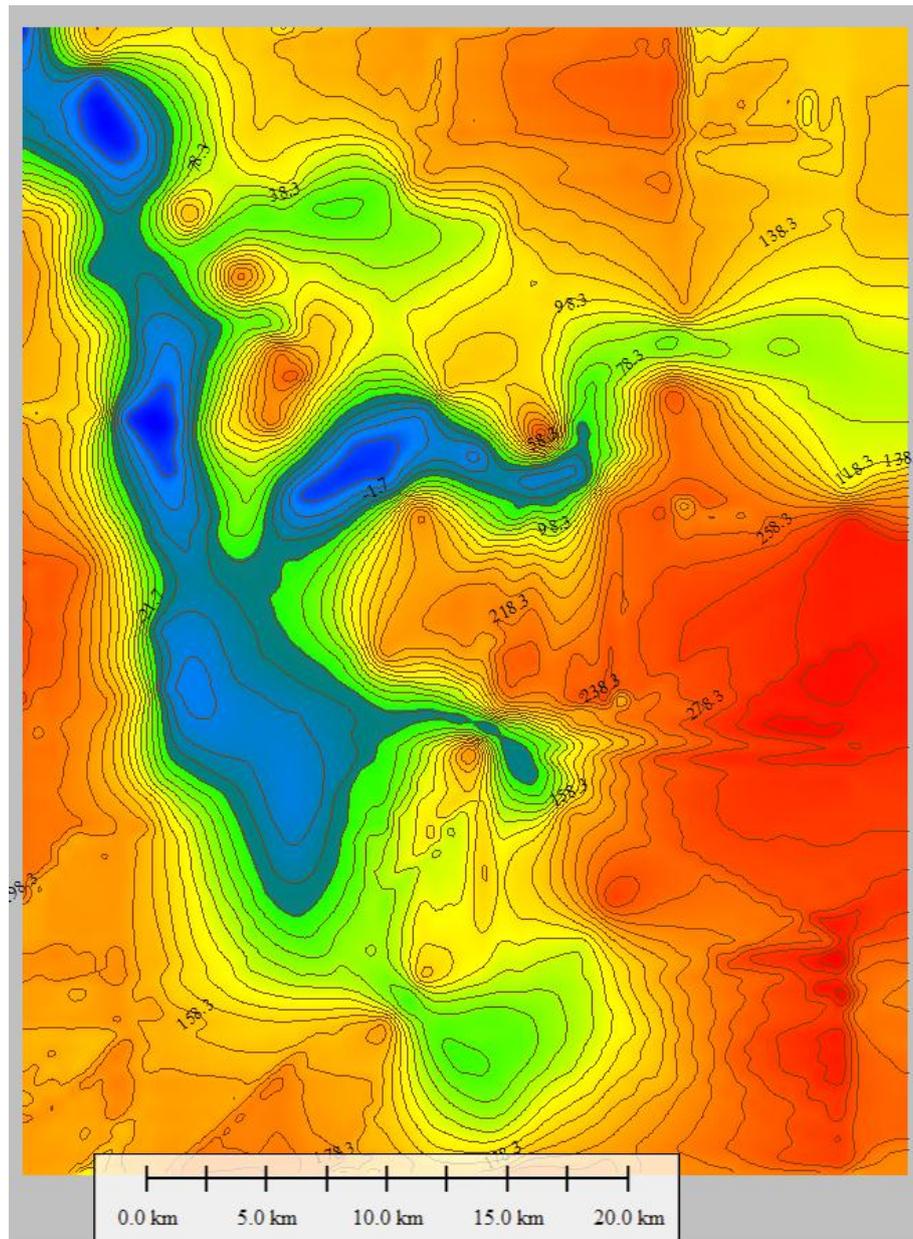


Figura 87. Basamento introducido en el modelo

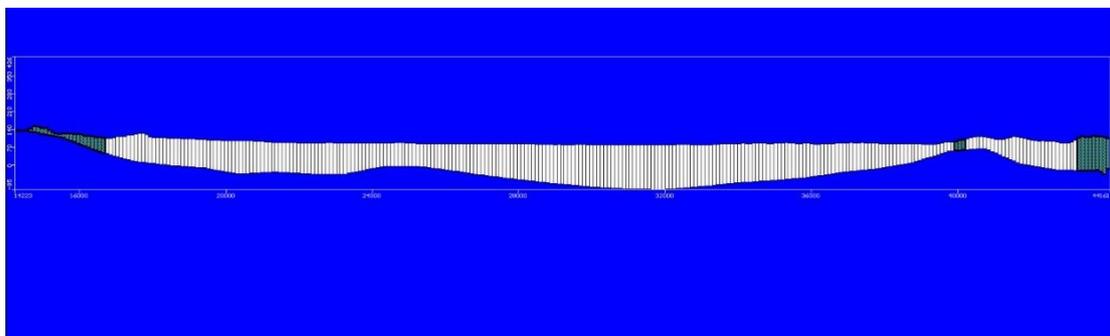


Figura 88. Corte del acuífero N-S con mallado

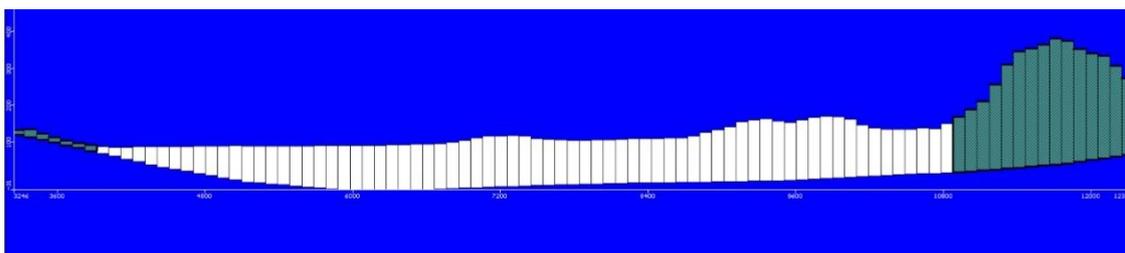


Figura 89. Corte W-E del acuífero con mallado.

### 9.3. 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 ha sido la siguiente:

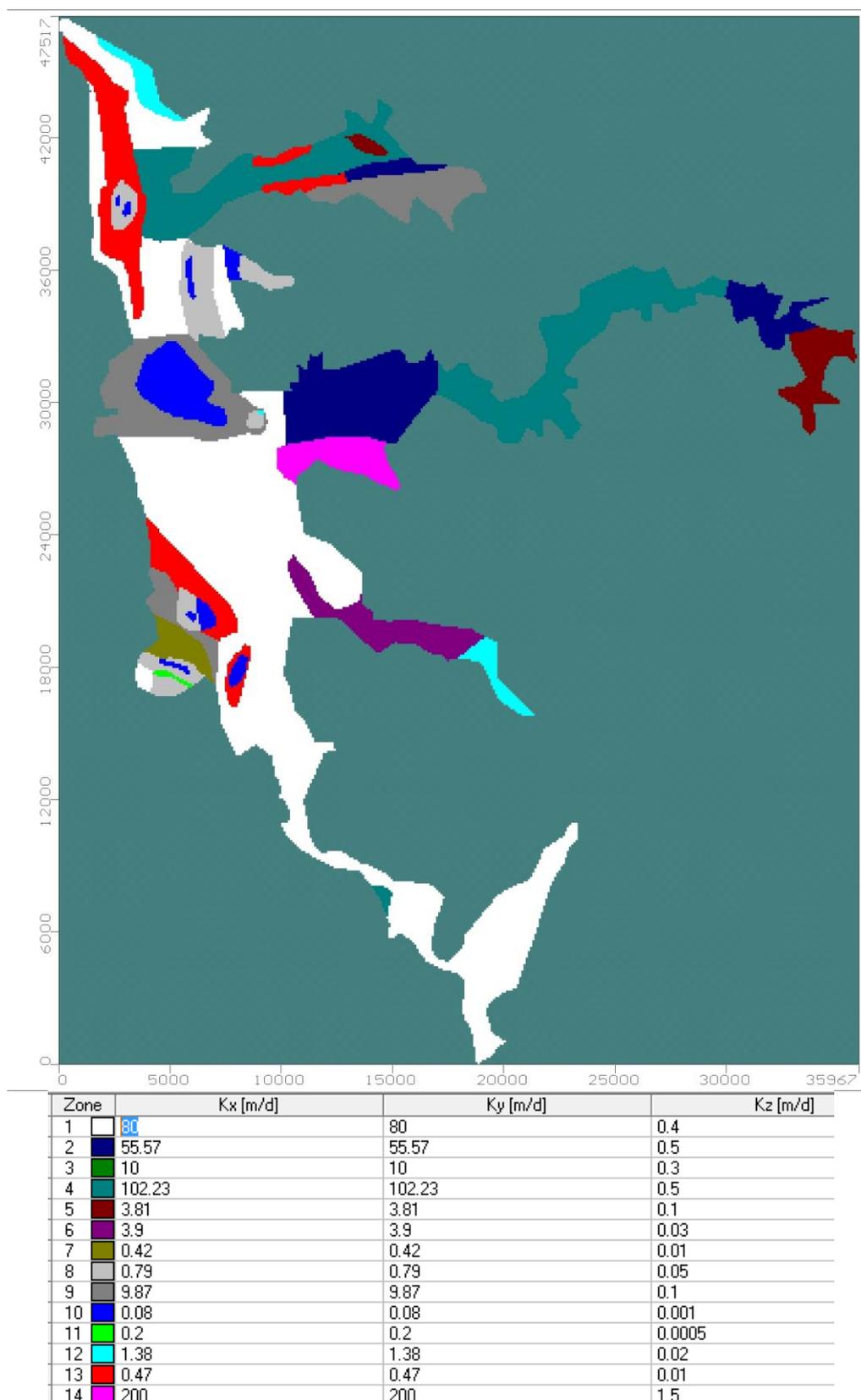


Figura 90. Permeabilidad obtenida tras calibración

## 9.4. CONDICIONES DE CONTORNO

### 9.4.1. 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 conexiones muy reducidas a través de los aluviales sobre el basamento paleozoico del Nilahue aguas arriba y abajo. En la parte norte 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.

La zona sur se ha tratado igual que el resto de entradas laterales (pozos de inyección).

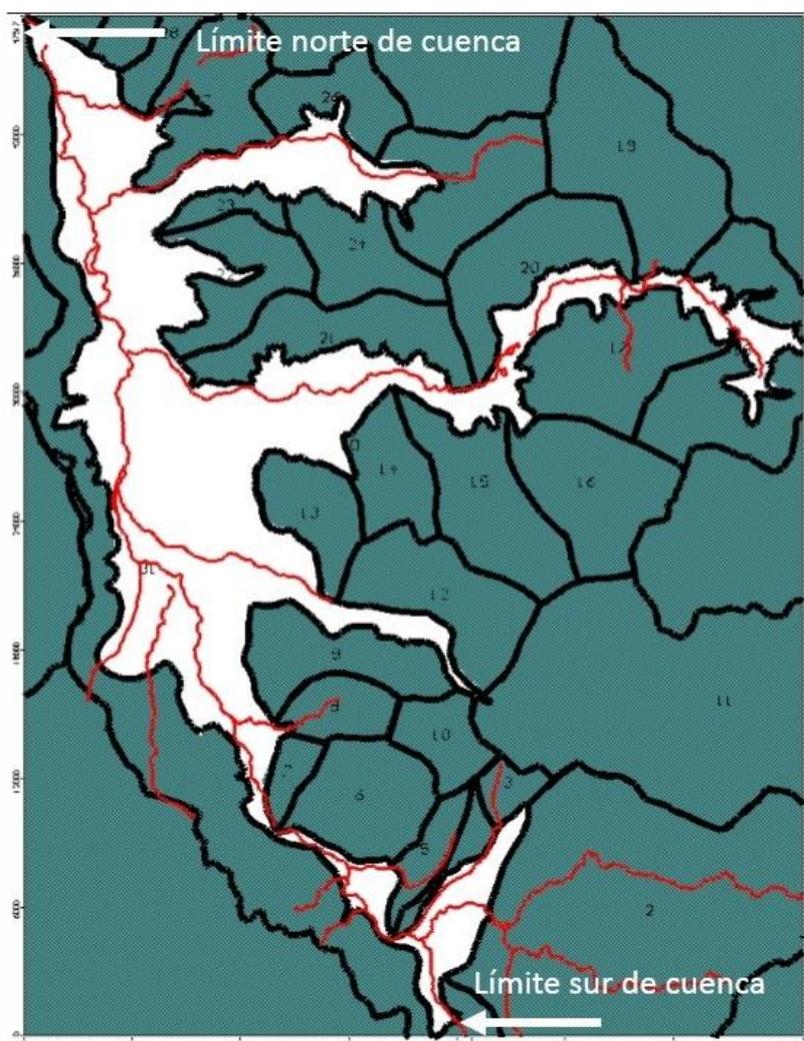


Figura 91. Límites de acuífero y subcuencas de alimentación

### 9.4.2. RIOS

Se han incluido como condición de río (River) el cauce del río Nilahue en su tramo incluido 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.

Se ha establecido el valor de permeabilidad vertical en el lecho considerando que éste suele estar en torno al 10% del valor de permeabilidad horizontal, y para materiales aluviales (depósitos del río) puede ser del orden de 1-2 m/d (Daniel, W.R. (Ed.) Laboratory field studies related to the radionuclide migration Project).

Respecto al espesor del lecho, puesto que no se trata de un cauce de gran entidad, y en base a las observaciones de terreno, se introdujo el valor de 0.5 metros con la finalidad de comprobar la respuesta de este valor en el modelo, el cual ha resultado coherente.

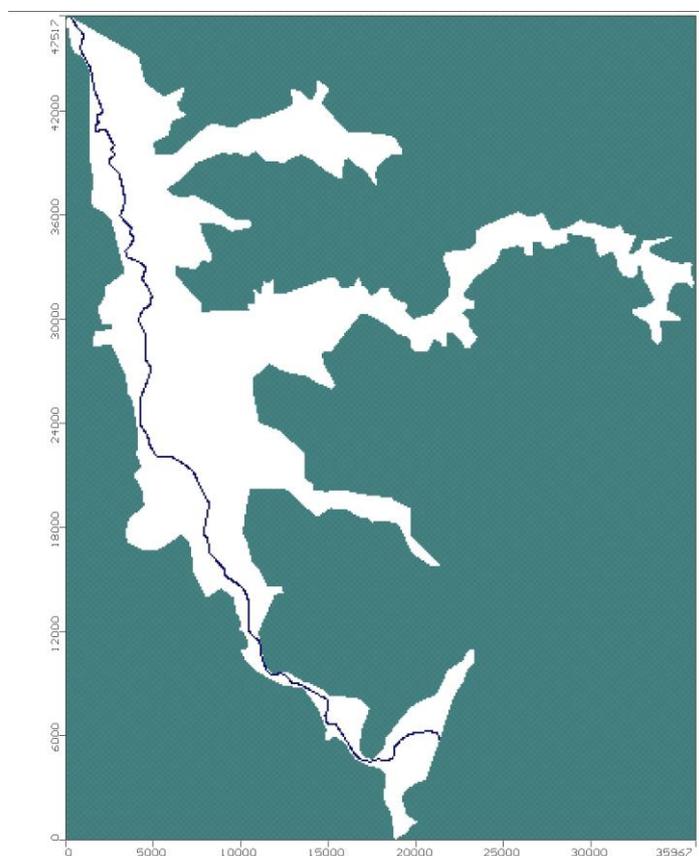


Figura 92. Celdas tipo "river"

### **9.4.3. 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, que para el mes de la modelación (julio 2013) fue de 7 mm.

Las entradas laterales se han modelizado con 282 pozos de inyección y caudal distribuido por cuencas atendiendo a los cálculos realizados en el apartado de balance hídrico.

Para que el modelo tuviese un comportamiento coherente, el caudal asignado de recarga lateral ha sido un 10 % del estimado en el apartado de balance hídrico, lo cual es indicativo del poco espesor de roca fracturada que poseen las cuencas aportantes al sistema, comportándose éstas más como un sistema superficial que subterráneo.

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

### **9.4.4. EXTRACCIONES POR BOMBEO**

Los pozos de extracción incluidos han sido los correspondientes al inventario existente, no obstante se han incrementado las extracciones en algunos sectores en los cuales se detectan conos de depresión por bombeo tal y como se apreció en el modelo conceptual.

El caudal de bombeo modelizado asciende a 1.214 l/s, a diferencia de los 800 l/s estimados en el catastro realizado.

### **9.5. PUNTOS DE OBSERVACIÓN**

Se han utilizado 124 puntos de observación, distribuidos por todo el acuífero (salvo alguna zona sin puntos catastrados por no existir) de forma más o menos homogénea.

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 93. Puntos de observación

## 9.6. EJECUCIÓN DEL MODELO

El modelo ha sido ejecutado en régimen estacionario, con fecha de inicio el 1 de Julio de 2013 y finalización 31 de Julio de 2013.

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

El modelo resulta convergente, no detectándose por tanto problemas de conectividad entre celdas.

## 9.7. 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 Julio de 2013, obteniéndose un ajuste con un error RMS del 5.1%.

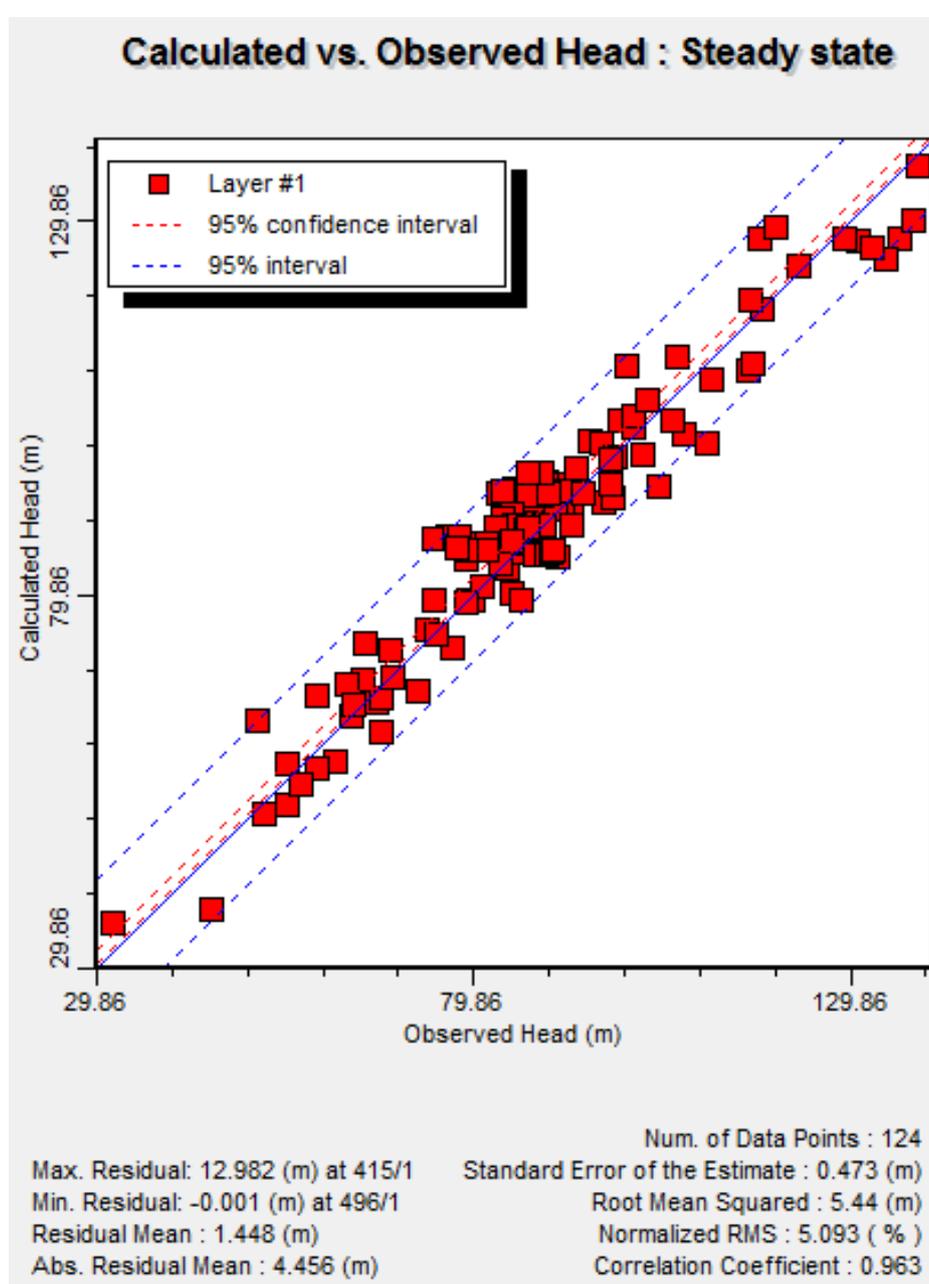


Figura 94. Niveles observados frente a calculados. Acuífero Nilahue

## **9.8. RESULTADOS OBTENIDOS**

Como segunda fase de la modelación numérica, se ha simulado una serie de escenarios con la finalidad de tener un conocimiento del comportamiento del acuífero en determinadas situaciones.

Dichos escenarios están enfocados hacia el conocimiento de la sustentabilidad del acuífero a futuro, teniendo en cuenta los derechos constituidos, derechos en trámite, así como el conocer las posibilidades de incremento de la demanda.

Los escenarios simulados fueron los siguientes:

1. Situación actual. Simulación en régimen estacionario de las condiciones según la fecha de realización del estudio.
2. Sustentabilidad a futuro (50 años) según criterios DAHR, teniendo en cuenta los derechos constituidos.
3. Situación de régimen natural (50 años).
4. Sustentabilidad a futuro (50 años) según criterios DAHR, teniendo en cuenta las captaciones catastradas.

### **9.8.1. ESCENARIO 1. SITUACIÓN ACTUAL**

El primer escenario simulado corresponde a la situación actual, en el cual se ha realizado la calibración.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

#### **9.8.1.1. Niveles calculados**

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

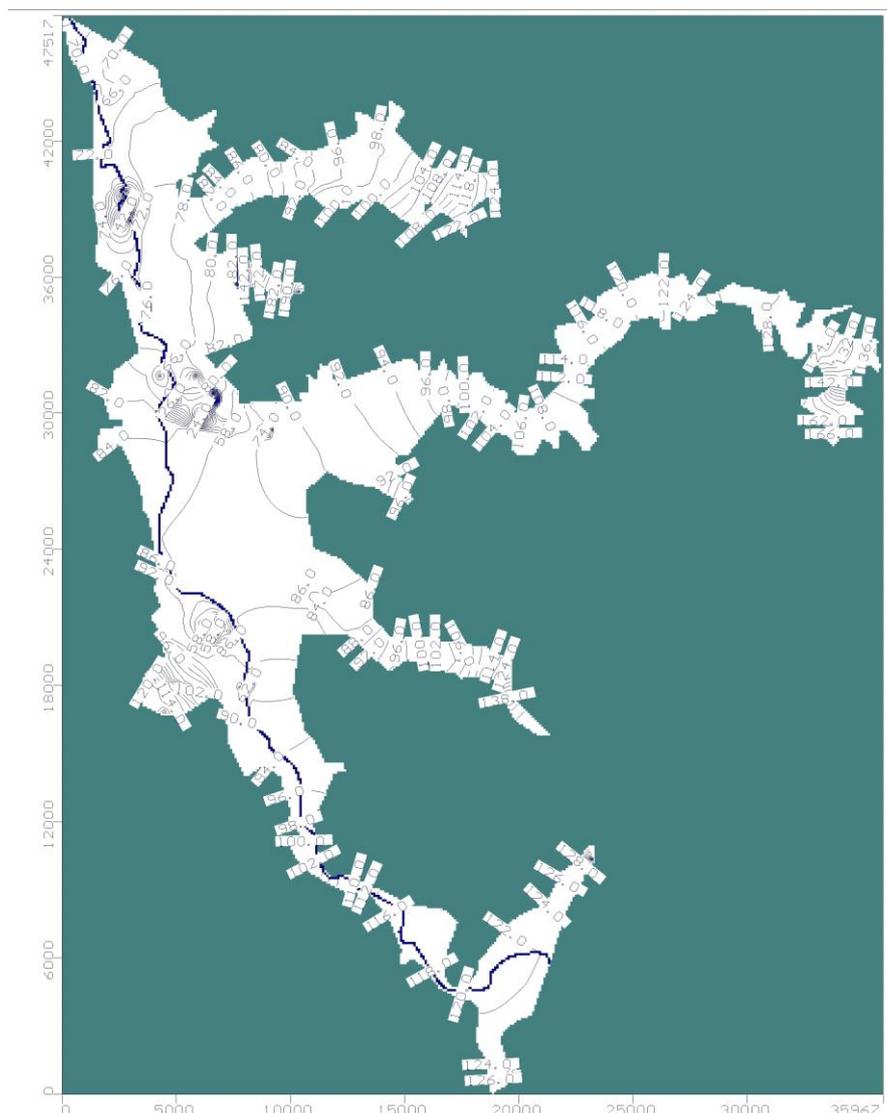


Figura 95. Niveles calculados. Acuífero Nilahue

### 9.8.1.2. Balance hídrico

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

Tabla 76. Balance hídrico modelizado. Acuífero Nilahue

Entradas		Salidas	
Concepto	Q (l/s)	Concepto	Q (l/s)
Recarga directa lluvia	73,88	Bombeos	1.214,26
Laterales	1.819,27	Subterráneas	121,73
Infiltración Estero Nilahue	251,87	Afloramientos	808,76
Total entradas	2.145,02	Total salidas	2.144,75

Hay un total de entradas en el sistema de 2.145 l/s, procedentes principalmente de entradas laterales. No obstante la principal salida del sistema es por bombeos.

## **9.8.2. ESCENARIO 2. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON DERECHOS OTORGADOS**

### **9.8.2.1. 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 a los derechos en trámite, y se ha ido ajustando este input hasta que se cumplieran todos estos criterios (DAHR):

- Descensos sostenibles en el tiempo a nivel de acuífero
- No afección al sistema superficial
- No afección a más del 5% de la demanda
- No afección a más del 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:**

Teniendo en cuenta que según el balance realizado en el apartado 8.2.7 se obtiene un coeficiente de infiltración (infiltración/precipitación bruta) del 3,1% en el acuífero, se le aplica este coeficiente a una supuesta serie de precipitación (serie histórica de la estación Nilahue en Santa Teresa, repetida hacia futuro).

- **Recargas laterales:**

Igual que para el acuífero, se han aplicado los coeficientes de recarga lateral obtenidos en el balance hídrico, con la modificación de estas realizadas en la calibración del modelo numérico, a la serie de precipitaciones obtenida.

- **Coefficiente de almacenamiento:**

Se ha introducido el valor de  $10^{-5}$  de forma homogénea en todo el ámbito del modelo, atendiendo a que es un valor característico de los acuíferos confinados 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 ha tomado el valor de 2,2 m<sup>3</sup>/s, tomado del análisis hidrológico realizado por Ingeorec, recogido en el estudio "Modificación de cauce provisoria del estero Nilahue, por instalación de captación subsuperficial".

- **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.

**9.8.2.2. 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 el caudal otorgado (2.400 l/s), el acuífero estaría fuertemente sobreexplotado, en el cual los niveles serían descendentes en todo el acuífero, y la afección al sistema superficial sería de en torno al 70%, muy por encima del límite máximo definido en los criterios anteriormente expuestos.

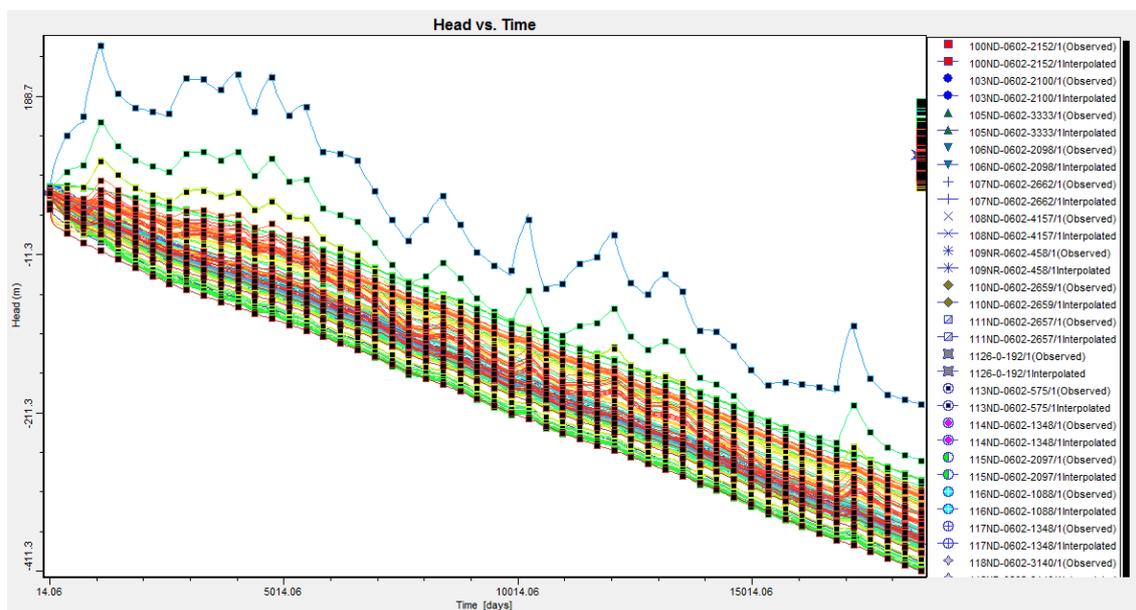


Figura 96. Evolución de los niveles en el acuífero según caudales otorgados

La principal entrada del balance hídrico de este supuesto sería procedente de la infiltración del río y de la variación de almacenamiento (agotamiento del volumen embalsado) tal y como se muestra en el gráfico siguiente:

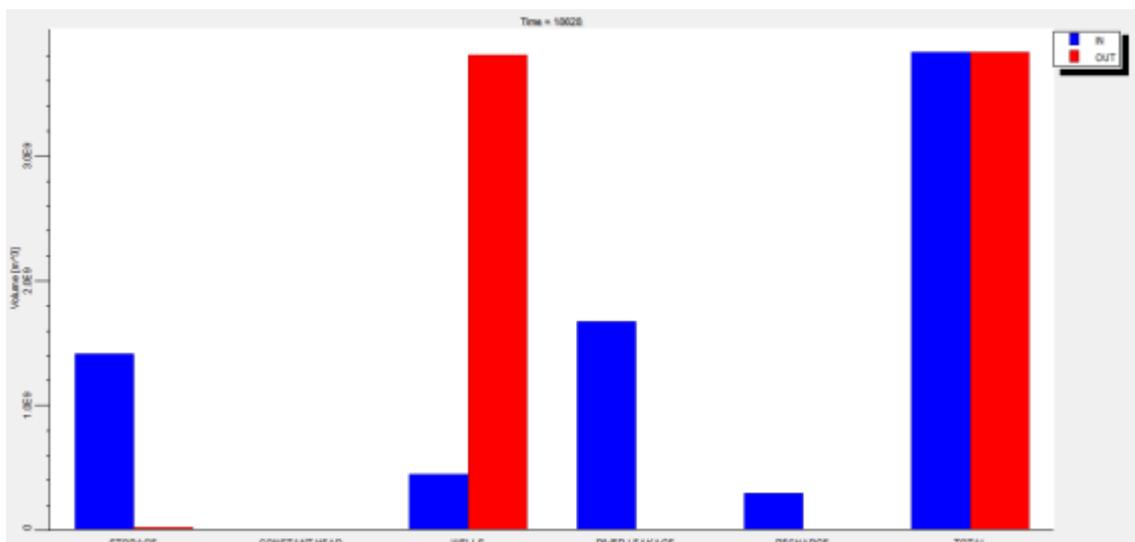


Figura 97. Balance hídrico al final del periodo (50 años)

En el caso de explotar el 50% de los derechos otorgados (1.200 l/s), los niveles permanecerían más o menos estables, pero la afección al sistema superficial seguiría siendo fuerte, en torno al 60%, ya que el río se convertiría en la principal fuente de recarga.

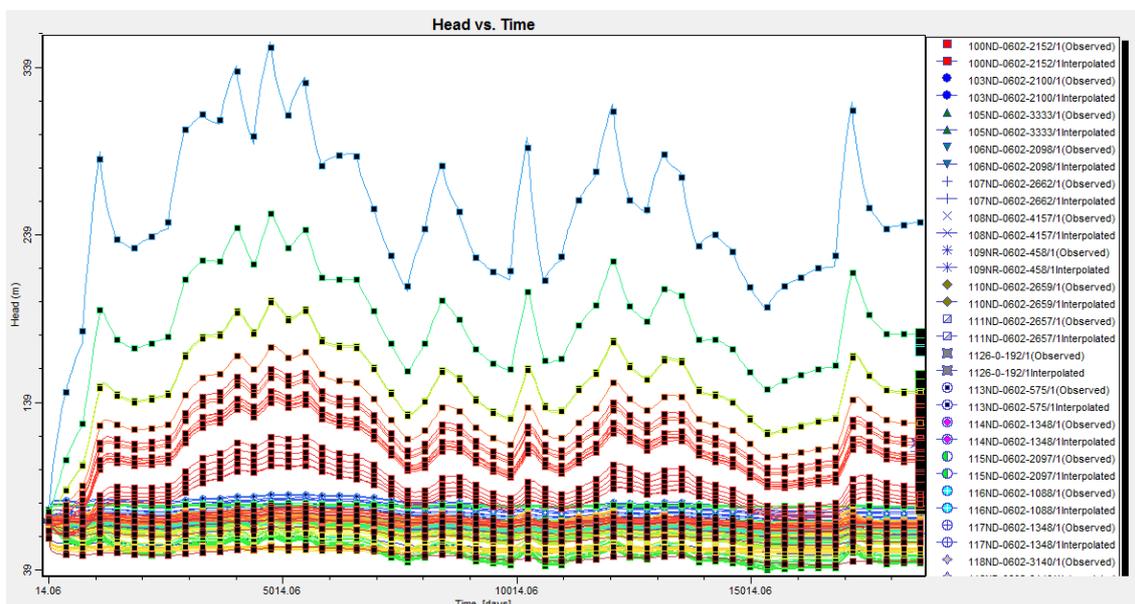


Figura 98. Evolución de los niveles en el acuífero según caudales otorgados al 50%

El balance hídrico ya no dependería de la variación del almacenamiento, es decir, el acuífero no estaría sobreexplotado en términos generales, pero la afección al sistema superficial seguiría siendo fuerte.

Es a partir del 5% de los derechos constituidos cuando la afección al sistema superficial comienza a bajar del 10%, y se cumpliría con todos los criterios de sustentabilidad a largo plazo.

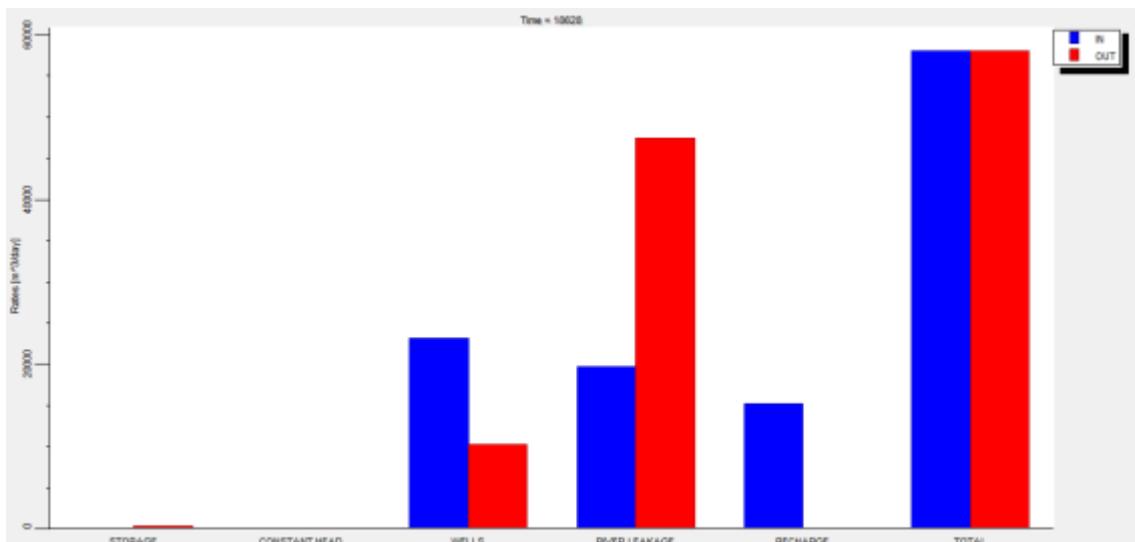


Figura 99. Balance hídrico al final del periodo (50 años), suponiendo un 5% de los caudales de derechos otorgados

### 9.8.3. ESCENARIO 3. REGIMEN NATURAL

#### 9.8.3.1. 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.

En este caso no se han considerado explotaciones por bombeos, de forma que se pueda conocer el funcionamiento del sistema en régimen natural, y así tener una idea del balance hídrico global.

#### 9.8.3.2. RESULTADOS

El balance hídrico este escenario resulta en un incremento en el volumen almacenado en el acuífero, además de un incremento en los afloramientos hacia el sistema superficial.

Al final del periodo (50 años), el balance resultaría de la siguiente forma:

Tabla 77. Balance hídrico en régimen natural. Acuífero Nilahue

Salidas l/s		Entradas l/s	
Almacenamiento	4,31	Almacenamiento	0,30
Salidas subterráneas	114,77	Entradas laterales	267,68
Afloramientos río	554,23	Infiltración río	229,59
		Recarga lluvia	175,92
	<b>673,31</b>		<b>673,49</b>

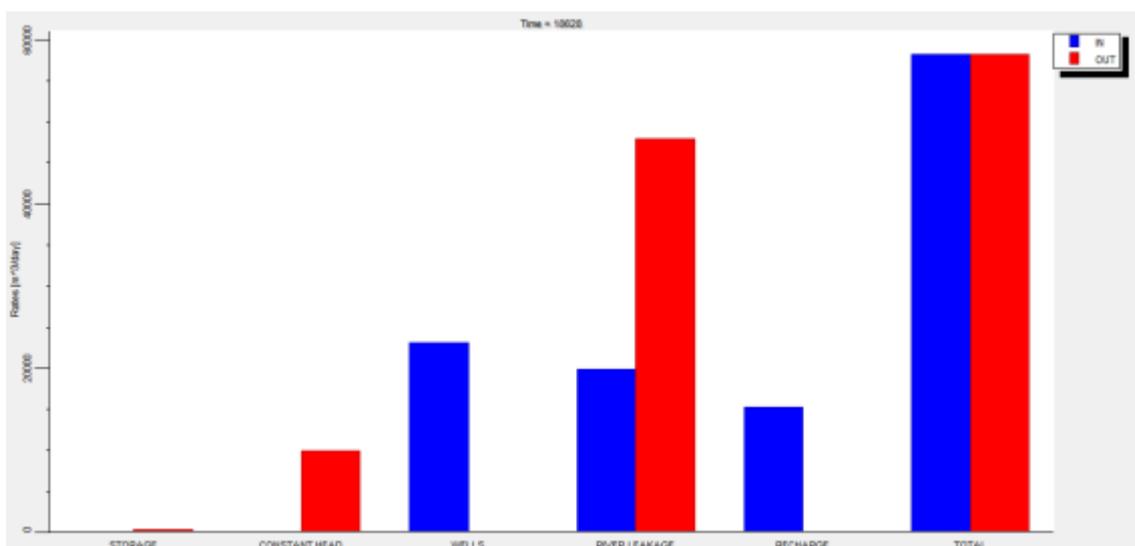


Tabla 78. Gráfico de balance hídrico en régimen natural. Acuífero Nilahue

#### 9.8.4. ESCENARIO 4. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON CATASTRO REALIZADO

##### 9.8.4.1. 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.

Los bombeos considerados han sido los obtenidos durante el catastro de terreno, modificados según la calibración realizada en régimen estacionario.

### 9.8.4.2. RESULTADOS

Este escenario es reflejo de una situación actual basada en una interpolación de la recarga futura, teniendo en cuenta la explotación actual del acuífero.

Como resultado, se obtiene que atendiendo a la explotación actual (1.200 l/s), los niveles se mantendrían en equilibrio, pero se produciría una fuerte afección al sistema superficial, de en torno al 60% del Q85. Caso muy similar al ocurrido con los derechos constituidos al 50% pero con diferente ubicación de las captaciones.

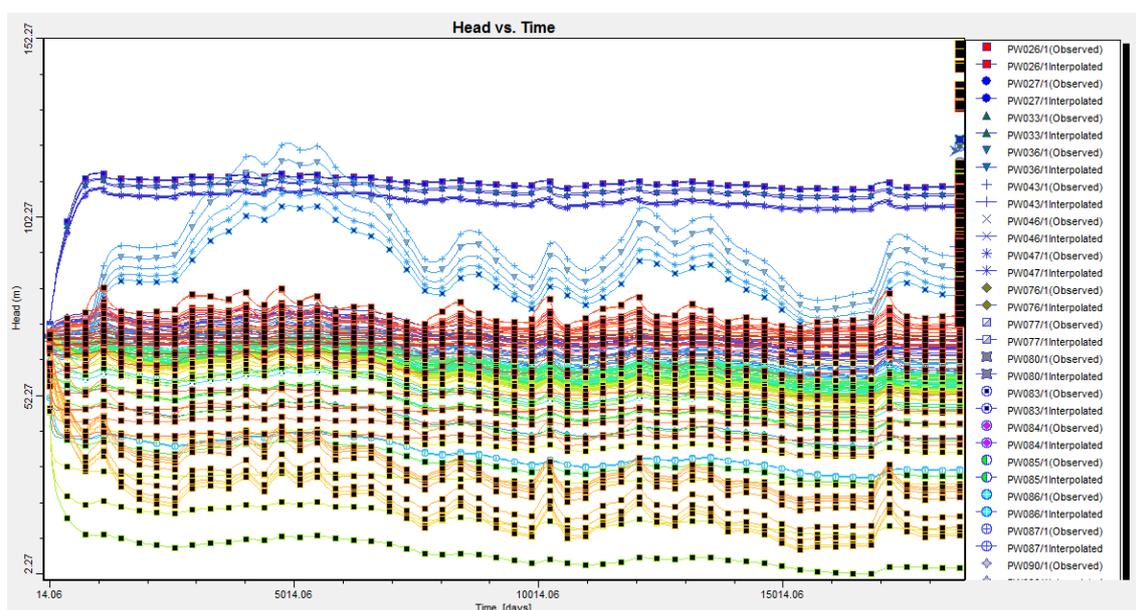


Tabla 79. Niveles en pozos catastrados atendiendo a explotación cuantificada

Si aplicamos un coeficiente del 0,3 para la explotación cuantificada, en términos de balance hídrico el sistema es excedente, pero la afección al sistema superficial sigue siendo superior al 10%, por lo que las extracciones deberían bajar al 15-20% de la explotación actual para que no exista dicha afección.



## 10. MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE TALCAHUANO (VIII REGIÓN)

Al igual que para el anterior, una vez desarrollado el modelo conceptual del acuífero, se ha llevado a cabo un modelo numérico que permita la simulación del acuífero según la situación actual, y según unos escenarios futuros propuestos por la Inspección Fiscal, los cuales no se presentan en este informe al no haber sido consensuados, y que serán presentados en el informe final.

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.

### 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, determinada mediante la extrapolación entre los perfiles geológicos trazados en apartados anteriores.

El mallado se ha realizado considerando 187 columnas y 147 filas, con tamaño de celdas de 100x100 metros y orientación norte sur.

La proyección geográfica se ha realizado en coordenadas UTM WGS84 19S, y las coordenadas locales (modelo) y originales son las siguientes:

Georeference Points		
<input checked="" type="radio"/> 2 points <input type="radio"/> 3 points		
X1	127171.6	[m]
Y1	5915273	[m]
X2	145343.6	[m]
Y2	5930067	[m]
X3		[m]
Y3		[m]

Model Origin		
X	127171.573	[m]
Y	5915272.61	[m]
Angle	0	°

Model Corners		
X1	0	[m]
Y1	0	[m]
X2	18171.9961	[m]
Y2	14794.2046	[m]

Grid	
NColumns	187
NRows	147
<input checked="" type="checkbox"/> Show Grid	

Figura 100. Coordenadas locales y originales. Acuífero Talcahuano

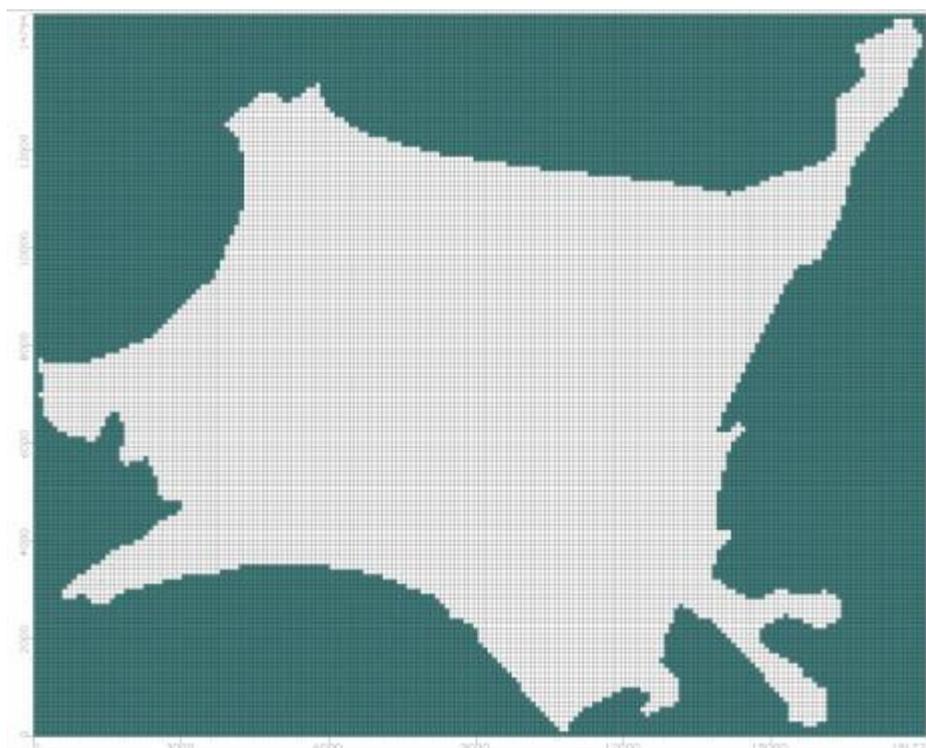


Figura 101. Mallado y celdas activas del modelo. Acuífero Talcahuano

La definición de celdas activas e inactivas ha sido basada en la delimitación de acuífero realizada en fases anteriores al estudio. En la figura anterior 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 7.3 a partir de los datos recopilados y de geofísica.

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

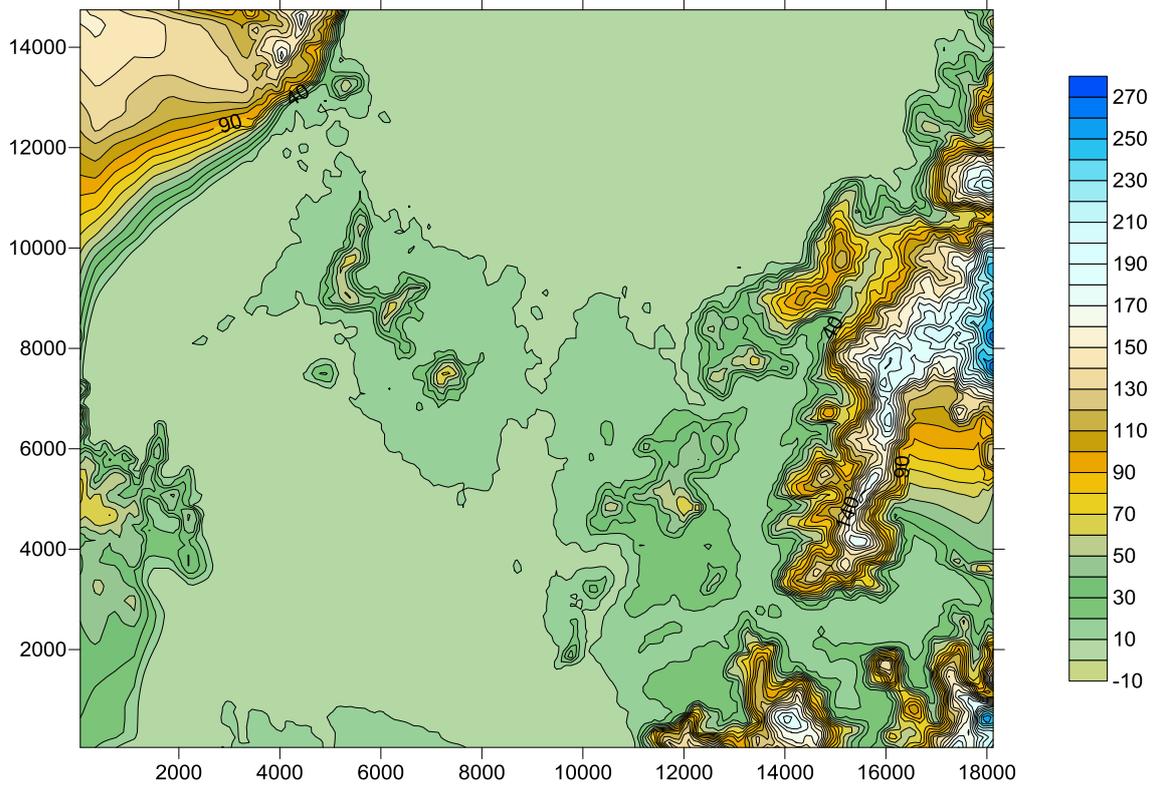


Figura 102. Topografía introducida en el modelo

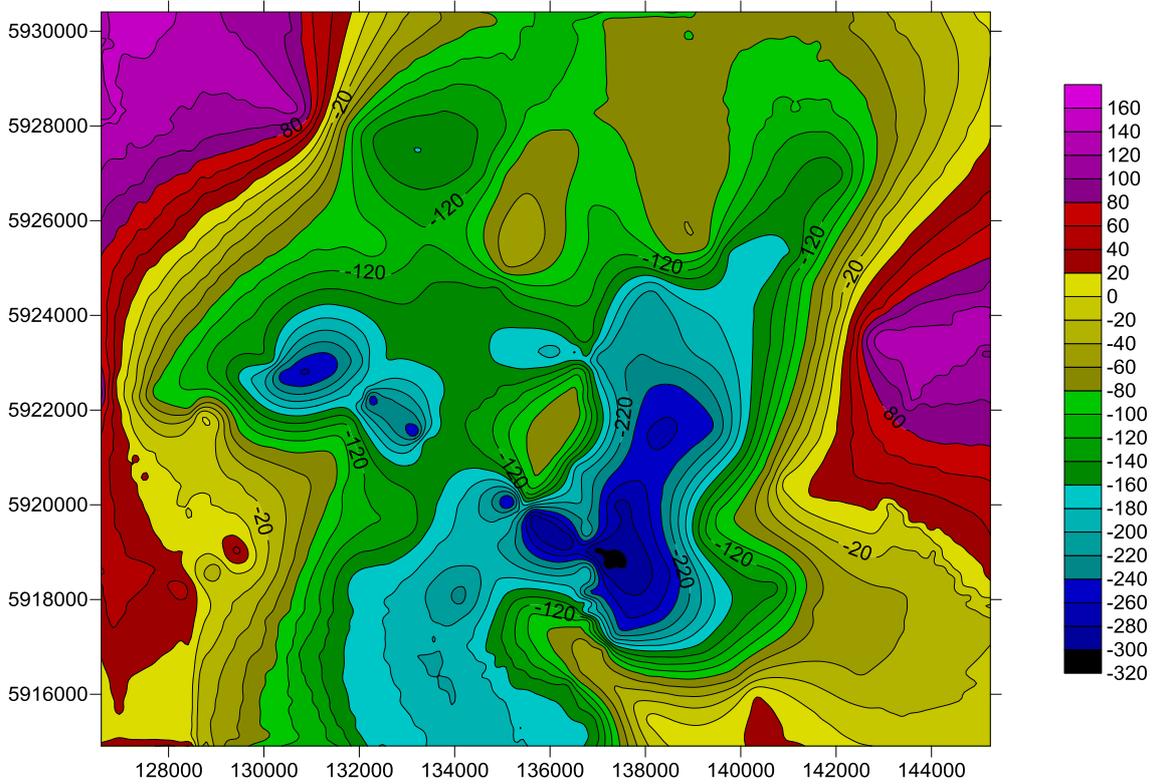


Figura 103. Basamento introducido en el modelo

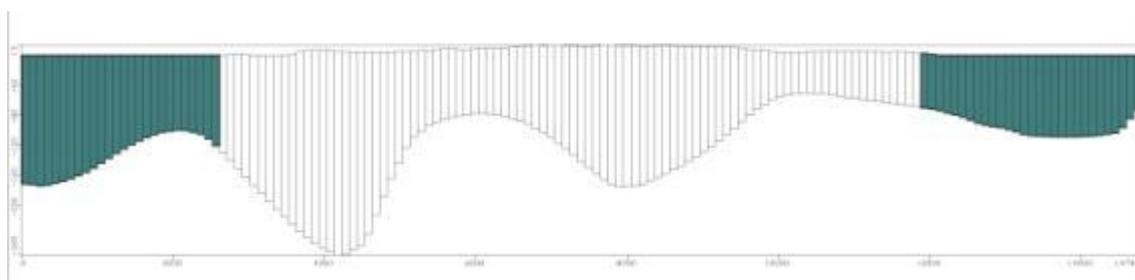


Figura 104. Corte del acuífero N-S con mallado (escala vertical x10)

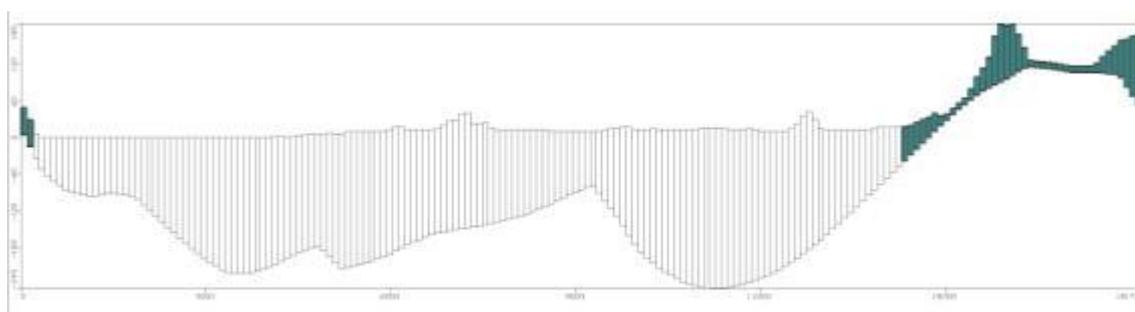


Figura 105. Corte W-E del acuífero con mallado (escala vertical x10)

### 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 ha sido la siguiente:

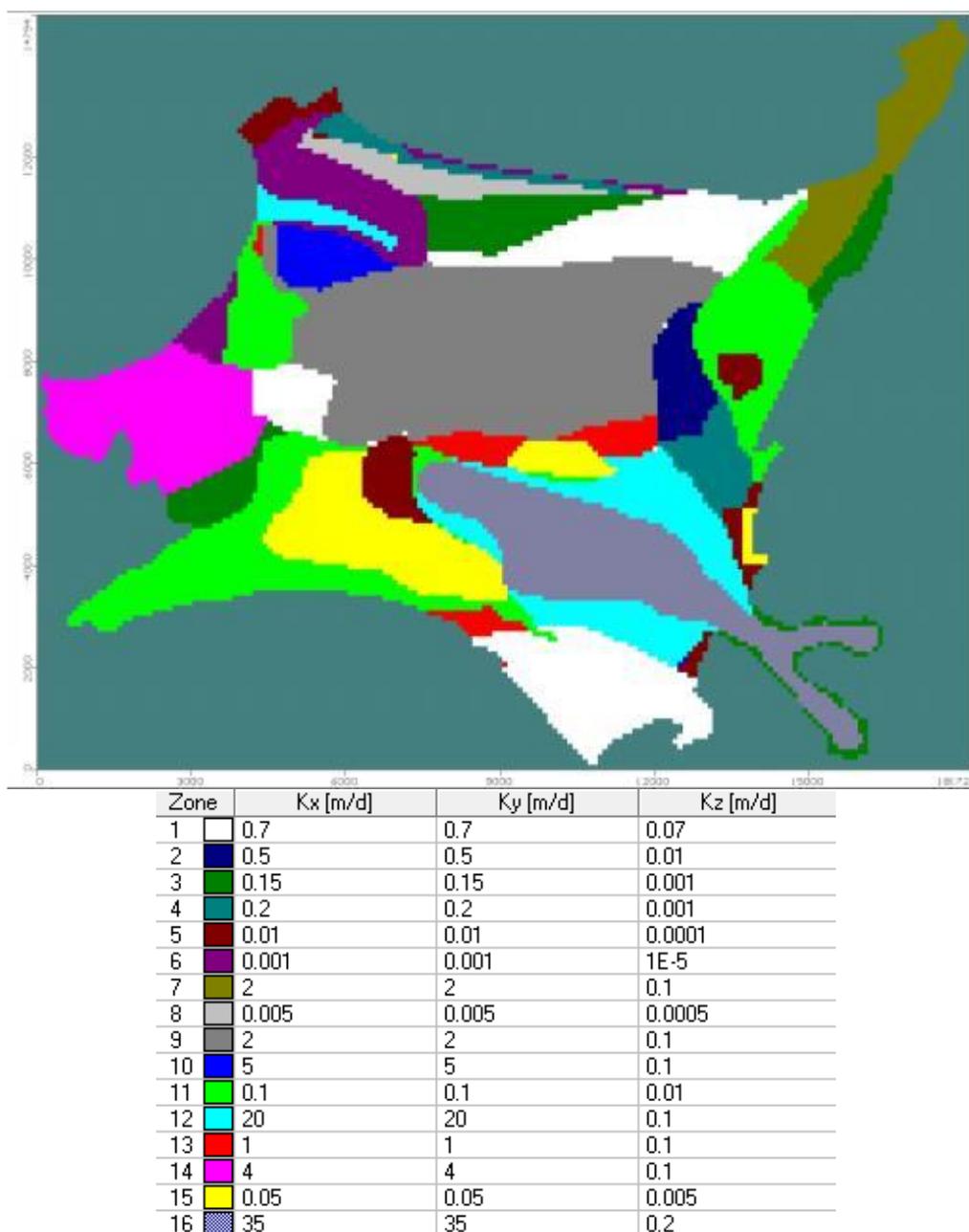


Figura 106. Permeabilidad obtenida tras calibración. Acuífero Talcahuano

## 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 conexiones muy reducidas a través de los aluviales sobre el basamento de

Talcahuano. En la parte norte y oeste, es decir, donde el acuífero presenta conexión con el mar, se ha incluido la condición de borde de celda constante (CHB).

Asimismo se ha incluido como celdas de nivel constante en la zona de conexión con el aluvial del río Andalién, ya que el acuífero presenta continuidad, aunque de forma encajada, hacia dicha zona. La cota introducida ha sido basada en la información piezométrica obtenida durante el estudio.

La zona este se ha tratado igual que el resto de entradas laterales (pozos de inyección).

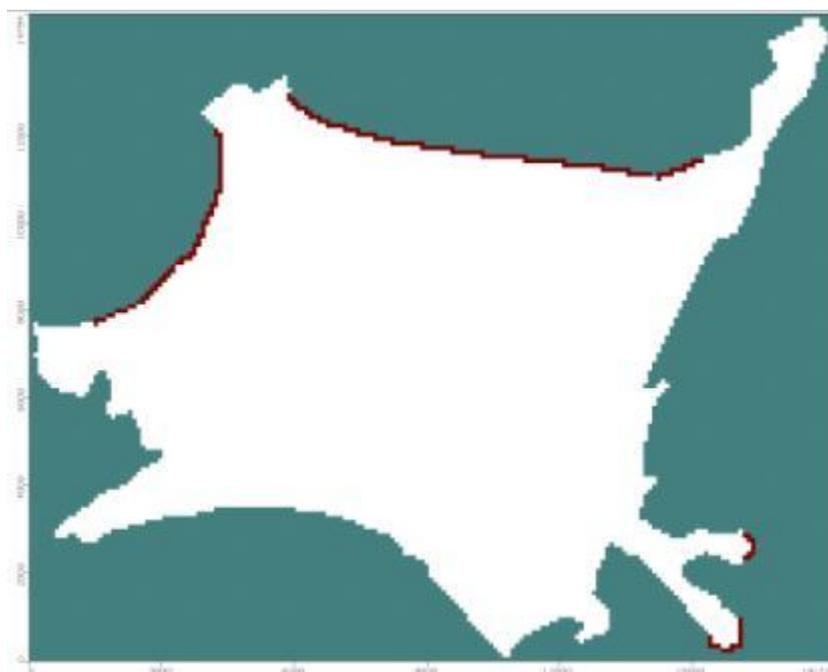


Figura 107. Celdas de nivel constante. Acuífero Talcahuano

#### **10.4.2. RÍOS**

Se han incluido como condición de río (River) el cauce del río Andalién y Bío-Bío en su tramo incluido 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 entre 0,1 y 0,01 m/d y 0,5-0,75 m de espesor.

En el caso del río Biobío, se ha empleado un espesor de lámina de agua obtenida a partir de los datos de la estación foronómica de la Dirección General de Aguas.

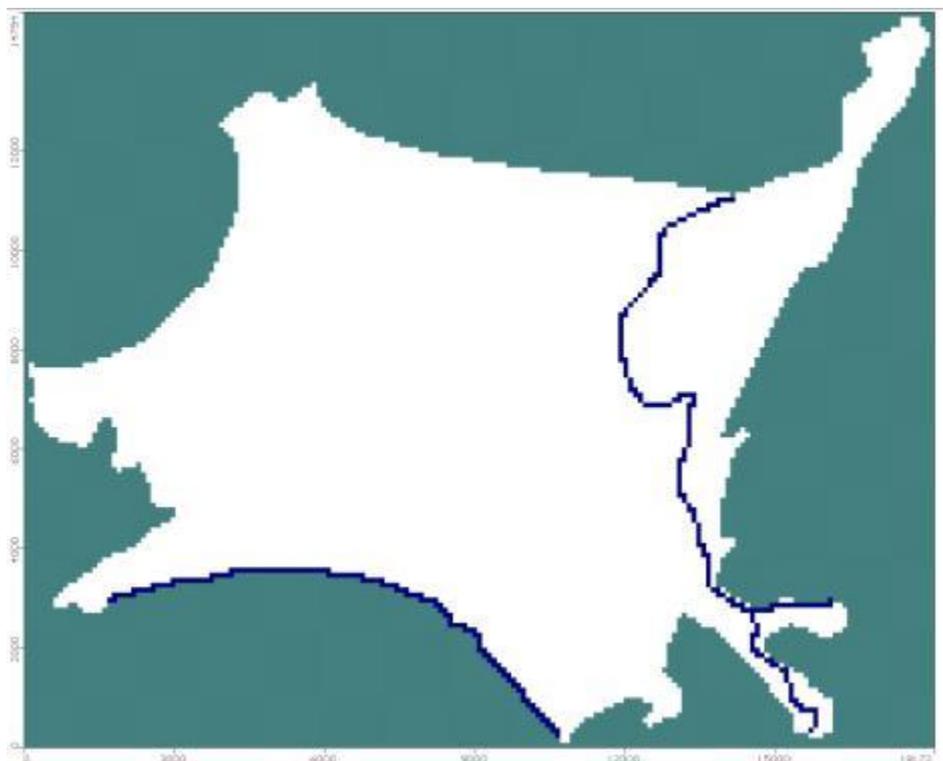


Figura 108. Celdas tipo River. Acuífero Talcahuano

### 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 (6,2 mm/año).

Las entradas laterales se han modelizado con 44 pozos de inyección y caudal distribuido por cuencas atendiendo a los cálculos realizados en el apartado de balance hídrico.

Para que el modelo tuviese un comportamiento coherente, el caudal asignado de recarga lateral ha sido un 70 % del estimado en el apartado de balance hídrico, lo cual es indicativo de que un 30 % vuelve al sistema superficial, al igual que en el acuífero anterior.

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 correspondientes al inventario existente, que en este acuífero son prácticamente inexistentes.

El caudal de bombeo modelizado asciende a 1,88 l/s.

#### **10.5. PUNTOS DE OBSERVACIÓN**

Se han utilizado 17 puntos de observación, cuya distribución y densidad no es muy amplia debido a la inexistencia de un número de captaciones en toda la extensión del acuífero.

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 109. Puntos de observación. Acuífero de Talcahuano

## 10.6. EJECUCIÓN DEL MODELO

El modelo ha sido ejecutado en régimen estacionario, con fecha de inicio el 1 de Agosto de 2013 y finalización 31 de Agosto de 2013. El motor de cálculo empleado ha sido MODFLOW 2005 y WHS como "solver".

El modelo 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 2,14%.

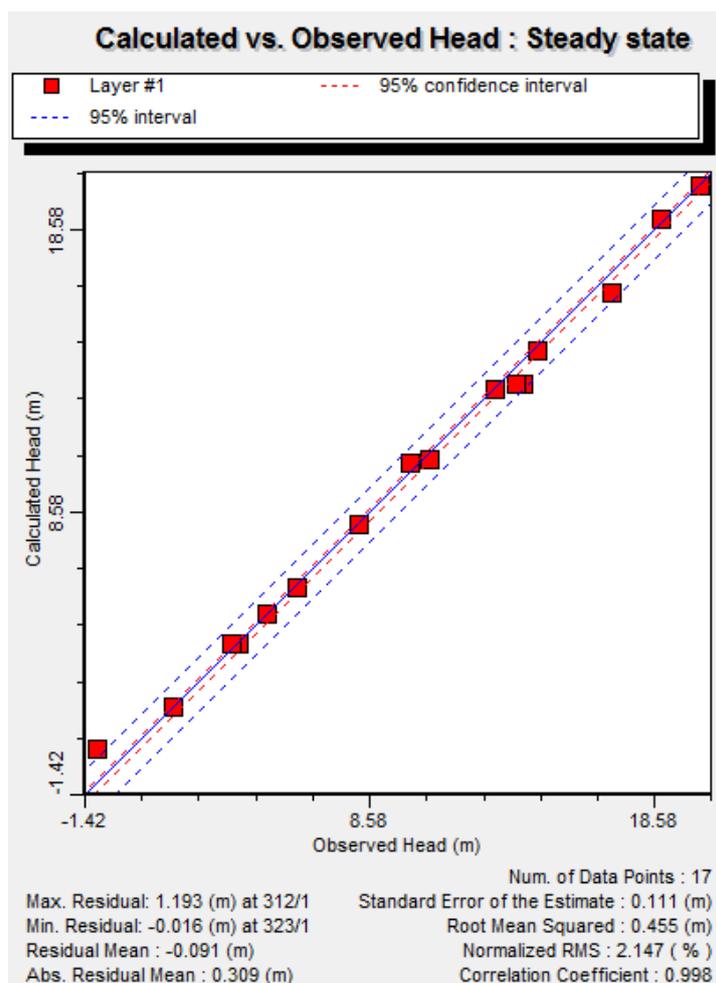


Figura 110. Niveles observados frente a calculados. Acuífero de Talcahuano

## **10.8.RESULTADOS OBTENIDOS**

Como segunda fase de la modelación numérica, se han simulado una serie de escenarios con la finalidad de tener un conocimiento de lo que pasaría en determinadas situaciones.

Dichos escenarios están enfocados hacia el conocimiento de la sustentabilidad del acuífero a futuro, teniendo en cuenta los derechos constituidos y posibilidades de incremento de la demanda, así como el crecimiento de la demanda en nuevas zonas.

Los escenarios simulados fueron los siguientes:

1. Situación actual. Simulación en régimen estacionario de las condiciones según la fecha de realización del estudio.
2. Sustentabilidad a futuro (50 años) según criterios DAHR incrementando la demanda.
3. Sustentabilidad a futuro (50 años) según criterios DAHR incrementando demanda y creando nuevas zonas de explotación industrial.
4. Sustentabilidad a futuro (50 años) según criterios DAHR incrementando demanda y creando nuevas zonas de explotación industrial y abastecimiento.

### **10.8.1. ESCENARIO 1. SITUACIÓN ACTUAL**

El primer escenario simulado corresponde a la situación actual, en el cual se ha realizado la calibración.

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 siguiente figura:

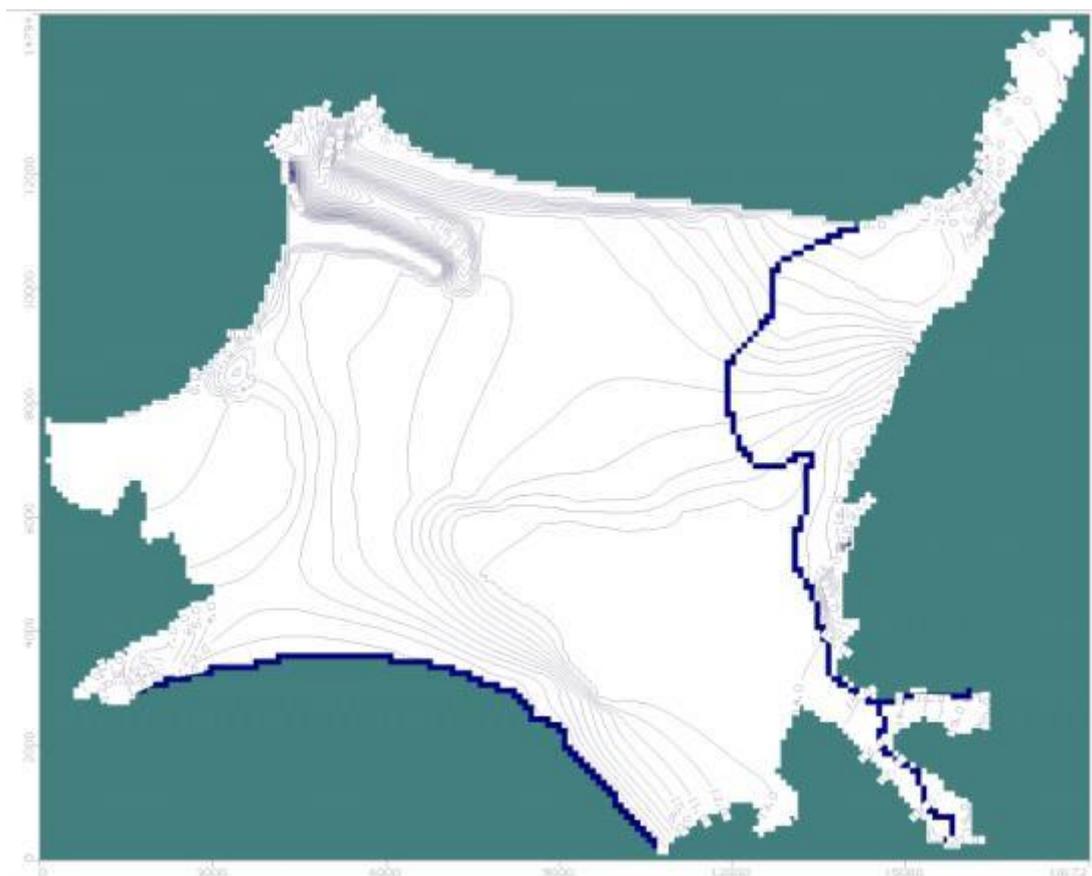


Figura 111. Niveles calculados. Acuífero de Talcahuano

### 10.8.1.2. BALANCE HÍDRICO

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

Tabla 80. Balance hídrico modelizado. Acuífero Talcahuano

Entradas		Salidas	
Concepto	Q (l/s)	Concepto	Q (l/s)
Recarga directa lluvia	23,87	Bombeos	1,88
Laterales	7,12	Subterráneas al mar	33,22
Infiltración ríos	39,91	Afloramientos	36,84
Subterráneas (Andalién)	1,03		
Total entradas	71,94	Total salidas	71,94

Hay un total de entradas en el sistema de 71,94 l/s, procedentes principalmente de la recarga de lluvia e infiltración por ríos. Las salidas por afloramientos y descarga al mar son indicativas de que el sistema se

encuentra en régimen natural, ya que éstas salidas son del orden de magnitud a las entradas por infiltración de lluvia y de percolación de ríos.

## **10.8.2. ESCENARIO 2. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON INCREMENTO DE LA DEMANDA**

### **10.8.2.1. 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:**

Teniendo en cuenta que según el balance realizado en el apartado 8.3.7 se obtiene un coeficiente de infiltración (infiltración/precipitación bruta) del 4,31%, se le aplica este coeficiente a una supuesta serie de precipitación (serie histórica de la estación Las Pataguas, 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:**

Tomado del estudio "Diagnostico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad. Cuenca del Biobío", con el valor de 652,39 m<sup>3</sup>/s para el río Biobío, y de 5,09 m<sup>3</sup>/s para el río Andalién.

- **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.

### 10.8.2.2. 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, se podría explotar el acuífero de forma sostenible sin que ello conlleve ni una afección al sistema superficial, ni a la demanda global, ni tampoco se vería afectada ninguna captación.

El límite máximo, a partir del cual se produciría una afección a una captación (lo que supondría una afección al 5,56% de las captaciones al haber un total de 18), dejando ésta colgada, sería de una explotación de más de 556 l/s con la distribución actual de pozos con derechos constituidos. Este caudal correspondería a un 550% del volumen otorgado.



Figura 112. Distribución de captaciones con derechos otorgados

Asimismo, en este caso, la afección al río Andalién sería del 5%  $Q_{\text{Flujo pasante}}$  y del 0,02% para el río Biobío suponiendo una extracción del 1000% de

los derechos constituidos, por lo que el sistema superficial no entraría en riesgo en el escenario simulado.

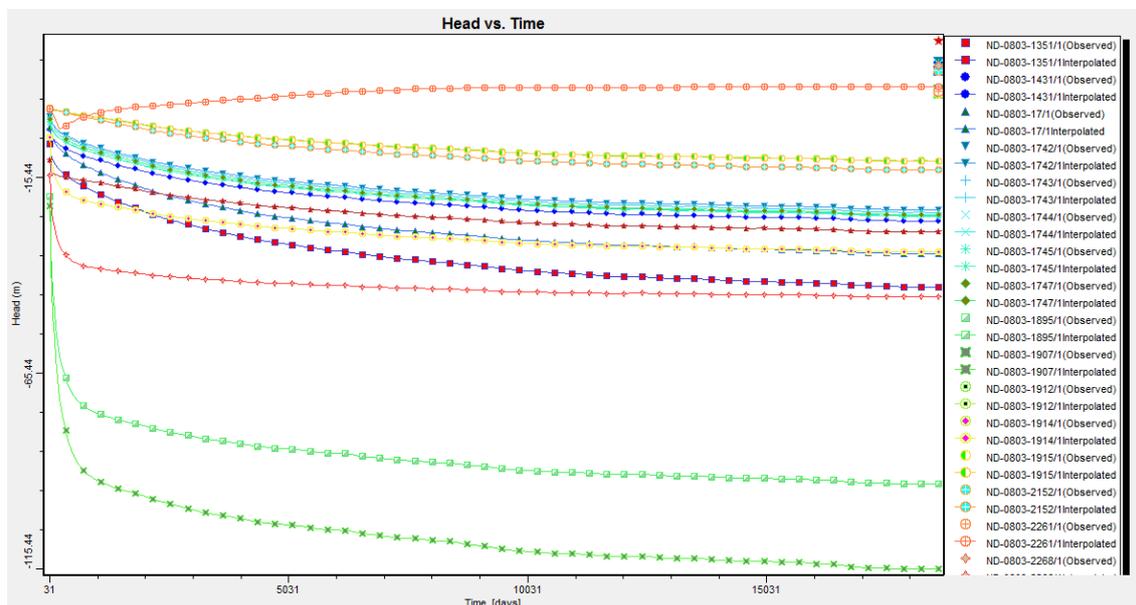


Figura 113. Evolución del nivel en las captaciones con derechos otorgados, suponiendo una extracción del 5,5 veces el caudal otorgado.

### 10.8.3. ESCENARIO 3. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON INCREMENTO DE LA DEMANDA, Y CREACIÓN DE UNA NUEVA ZONA INDUSTRIAL

#### 10.8.3.1. DESCRIPCIÓN Y SUPUESTOS

Este escenario, tiene el objetivo conocer si se puede ampliar las zonas de explotación del acuífero, bajo el supuesto de la creación de un nuevo foco de demanda industrial.

El escenario parte bajo las condiciones de explotación límites obtenidas en el anterior (explotación de derechos otorgados al 550%, equivalentes a 556 l/s), y se han añadido 3 captaciones en un sector industrial, cuya explotación se ha ido modificando hasta observar que se incumpliera alguno de los criterios expuestos en el escenario anterior.

Los supuestos (recarga, coeficiente de almacenamiento, etc.) sobre los que se ha partido son idénticos a los expuestos anteriormente. La única modificación es la creación de una nueva zona de explotación



Figura 114. Distribución de captaciones con derechos otorgados y suposición de nueva zona para suministro industrial

### 10.8.3.2. Resultados obtenidos

Como resultado de la simulación de este escenario, se ha determinado que, teniendo en cuenta una explotación del 550% de los derechos constituidos (556 l/s), se podría crear una nueva zona de explotación (ver Figura 114) con tres captaciones de 50 l/s cada una, lo que supondría una explotación total en el acuífero de 706 l/s.

En este escenario no habría afección al sistema superficial, ni quedaría ninguna captación colgada y la demanda abastecida supondría un 99,26 % de la demanda impuesta.

Si se incrementa ligeramente el caudal en la nueva zona, se vería afectada la demanda abastecida del acuífero, quedando ésta en un 92%.

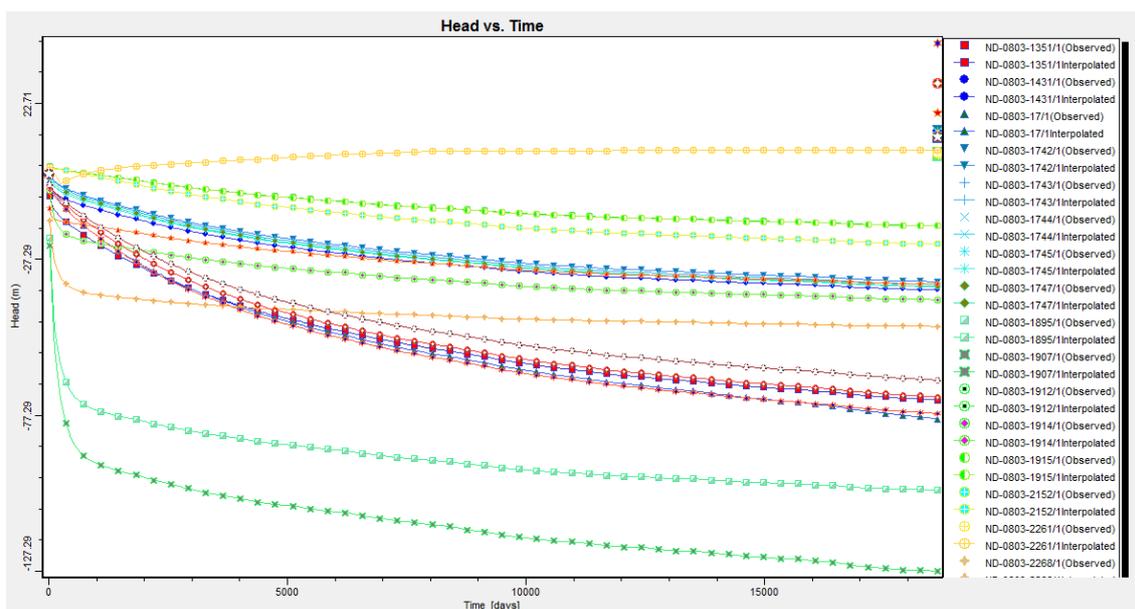


Figura 115. Evolución del nivel según escenario simulado

#### 10.8.4. ESCENARIO 4. SUSTENTABILIDAD FUTURA CON INCREMENTO DE LA DEMANDA, CREACIÓN DE UNA NUEVA ZONA INDUSTRIAL Y OTRA ZONA URBANA

##### 10.8.4.1. DESCRIPCIÓN Y SUPUESTOS

Este escenario, tiene el objetivo conocer si se puede ampliar las zonas de explotación del acuífero, bajo el supuesto de la creación de un nuevo foco de demanda industrial, y otro de abastecimiento urbano, en la ciudad de Tome.

El escenario parte bajo las condiciones de explotación límites obtenidas en el anterior (explotación de derechos otorgados al 550%, equivalentes a 556 l/s), zona de abastecimiento industrial (3 captaciones de 50 l/s), añadiendo otras tres captaciones en otro sector del acuífero, concretamente en la zona de Tome.

Al igual que para el anterior, se ha ido incrementando la explotación en estas tres captaciones hasta conocer el límite de explotación sin que se incumpla ninguno de los criterios expuestos con anterioridad.

Los supuestos (recarga, coeficiente de almacenamiento, etc.) sobre los que se ha partido son idénticos a los expuestos anteriormente. La única modificación es la creación de una nueva zona de explotación.

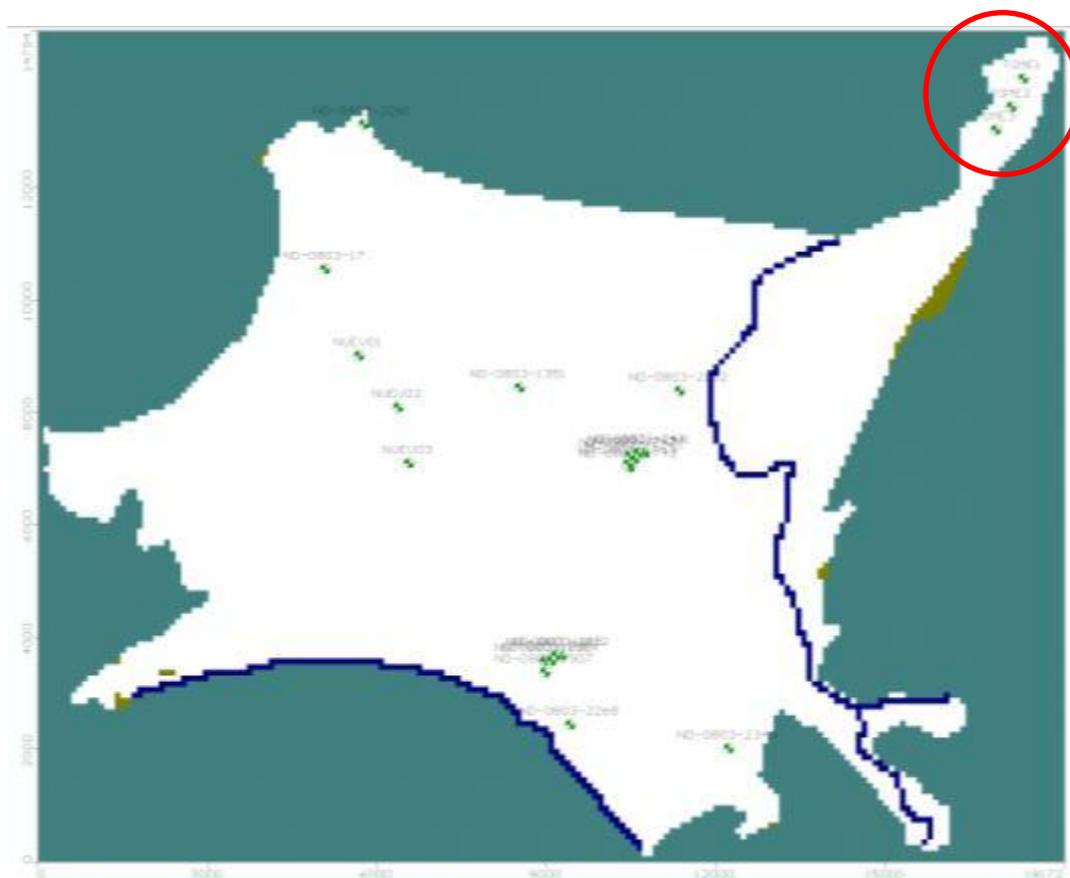


Figura 116. Distribución de captaciones con derechos otorgados y suposición de nueva zona para suministro urbano

#### 10.8.4.2. Resultados obtenidos

Como resultado de la simulación de este escenario, se ha determinado que, teniendo en cuenta una explotación del 550% de los derechos constituidos (556 l/s), se podría crear una nueva zona de explotación (ver Figura 114) con tres captaciones de 50 l/s cada una, y otra zona en Tome, con 3 captaciones de 7 l/s cada una, lo que supondría una explotación total en el acuífero de 727 l/s.

En este escenario no habría afección al sistema superficial, solo quedaría una captación colgada, lo que supondría un 4,17 %, y la demanda abastecida supondría un 98,35 % de la demanda impuesta.

Asimismo el sistema superficial tendría una afección máxima en el río Andalién del 3,8%.

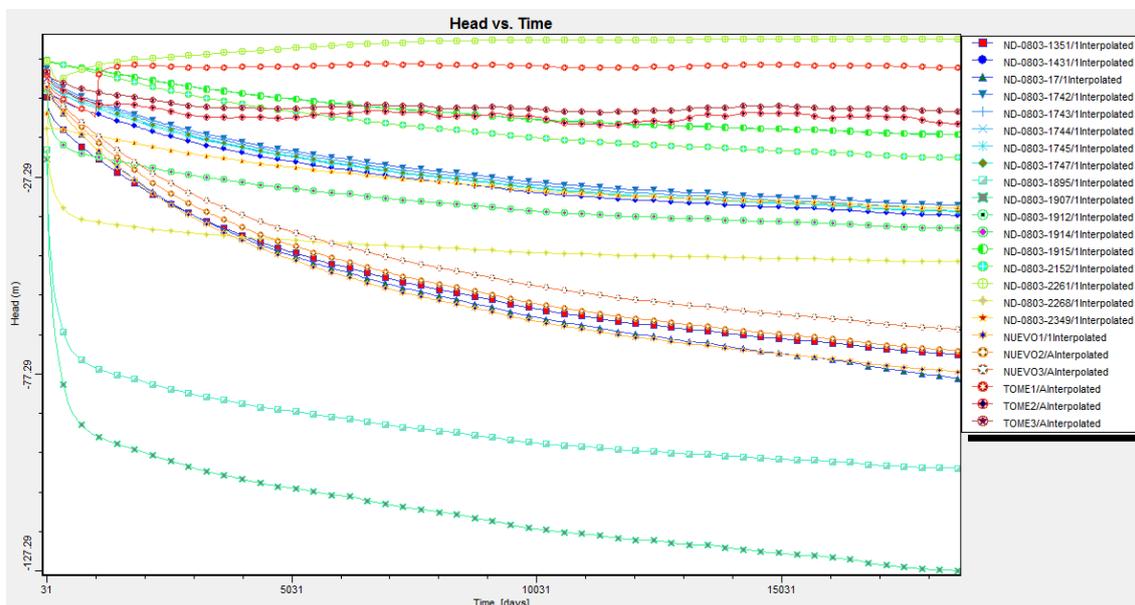


Figura 117. Evolución del nivel según escenario simulado



---

## **11. PROPUESTA DE RED DE MONITOREO DE PIEZOMETRÍA Y CALIDAD**

Como parte de los objetivos del estudio, se propone a continuación una red de monitoreo de piezometría y de calidad.

### **11.1. ACUÍFERO NILAHUE**

El acuífero de Nilahue es el que posee mayor riesgo de sobreexplotación, motivo por el cual se recomienda el diseño y construcción de una red de piezometría principalmente, y de forma secundaria de calidad, ya que esta no parece estar en riesgo.

En el acuífero existen numerosas captaciones que podrían ser utilizadas como parte de la red de monitoreo, no obstante, a continuación se presenta una distribución de la que podría ser una red de monitoreo de piezometría y calidad.

La distribución propuesta está basada en la consecución de una red de monitoreo que permita el seguimiento piezométrico y de calidad en todo el acuífero de una forma regular.

En las zonas propuestas hay pozos existentes, no obstante para la creación de la red se necesitará, o bien la obtención de un permiso por parte de los propietarios de las captaciones, o bien de la creación de nuevos sondajes.

Se recomienda la medición del nivel freático y del registro de la calidad química de parámetros in situ (conductividad, pH y temperatura) con periodicidad mensual, y de un control menos preciso del contenido en nitratos y metales pesados.

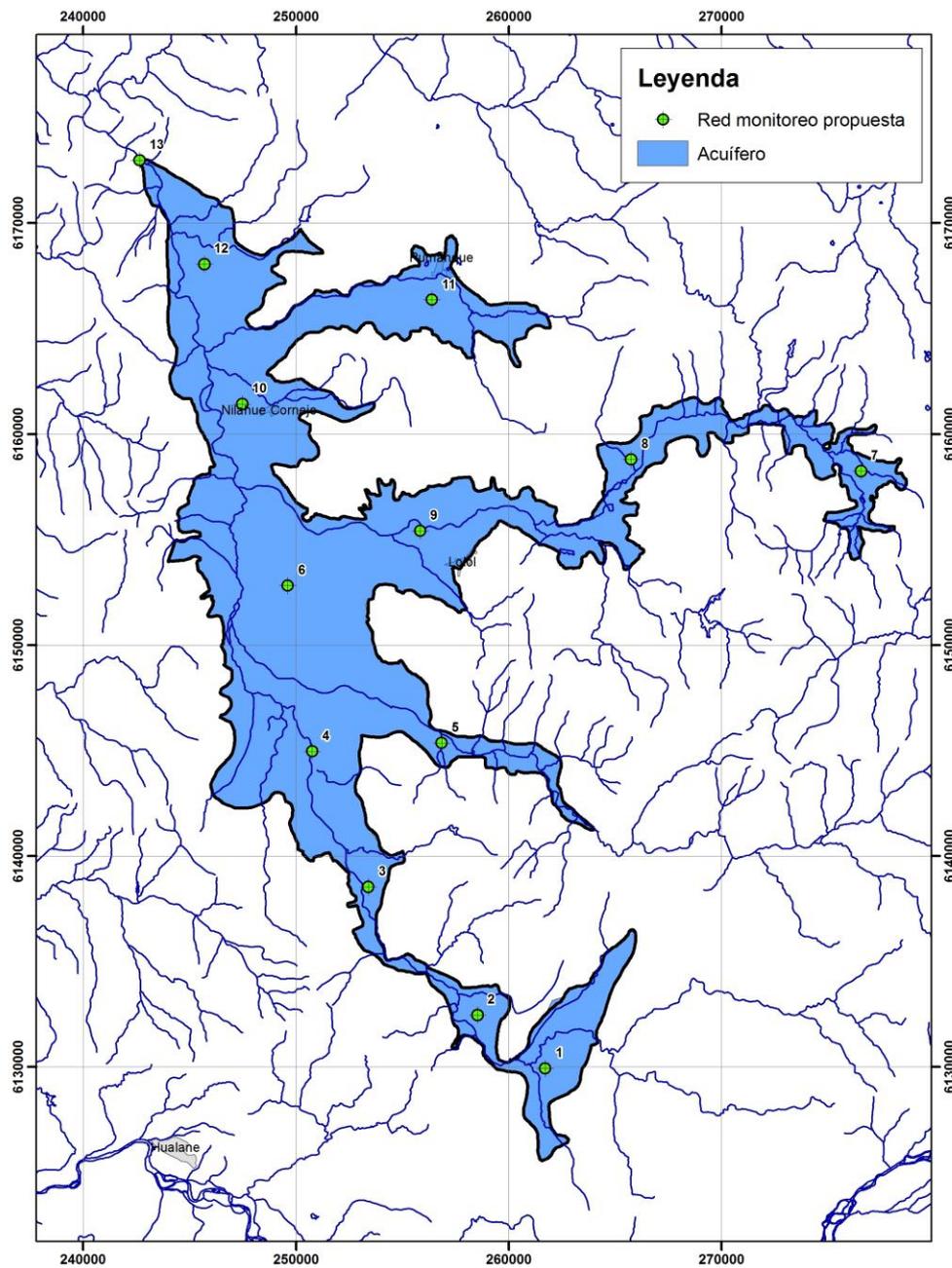


Figura 118. Propuesta de red de monitoreo en el acuífero Nilahue

## 11.2. ACUÍFERO DE TALCAHUANO

En el acuífero de Talcahuano no hay riesgo aparente de sobreexplotación, no obstante si se debería controlar la intrusión salina.

La distribución propuesta está basada en la consecución de una red de monitoreo que permita el seguimiento piezométrico y de calidad en todo el acuífero de una forma regular.

En las zonas propuestas no hay pozos existentes, por lo que se requiere de la ejecución de nuevos sondajes, salvo en los puntos 1 y 2, en los cuales se requeriría de la obtención de un permiso por parte de los propietarios de las captaciones (puntos 1 y 2).

Se recomienda la medición del nivel freático y del registro de la calidad química de parámetros in situ (conductividad, pH y temperatura) con periodicidad mensual, y de un control menos preciso del contenido en nitratos y metales pesados.

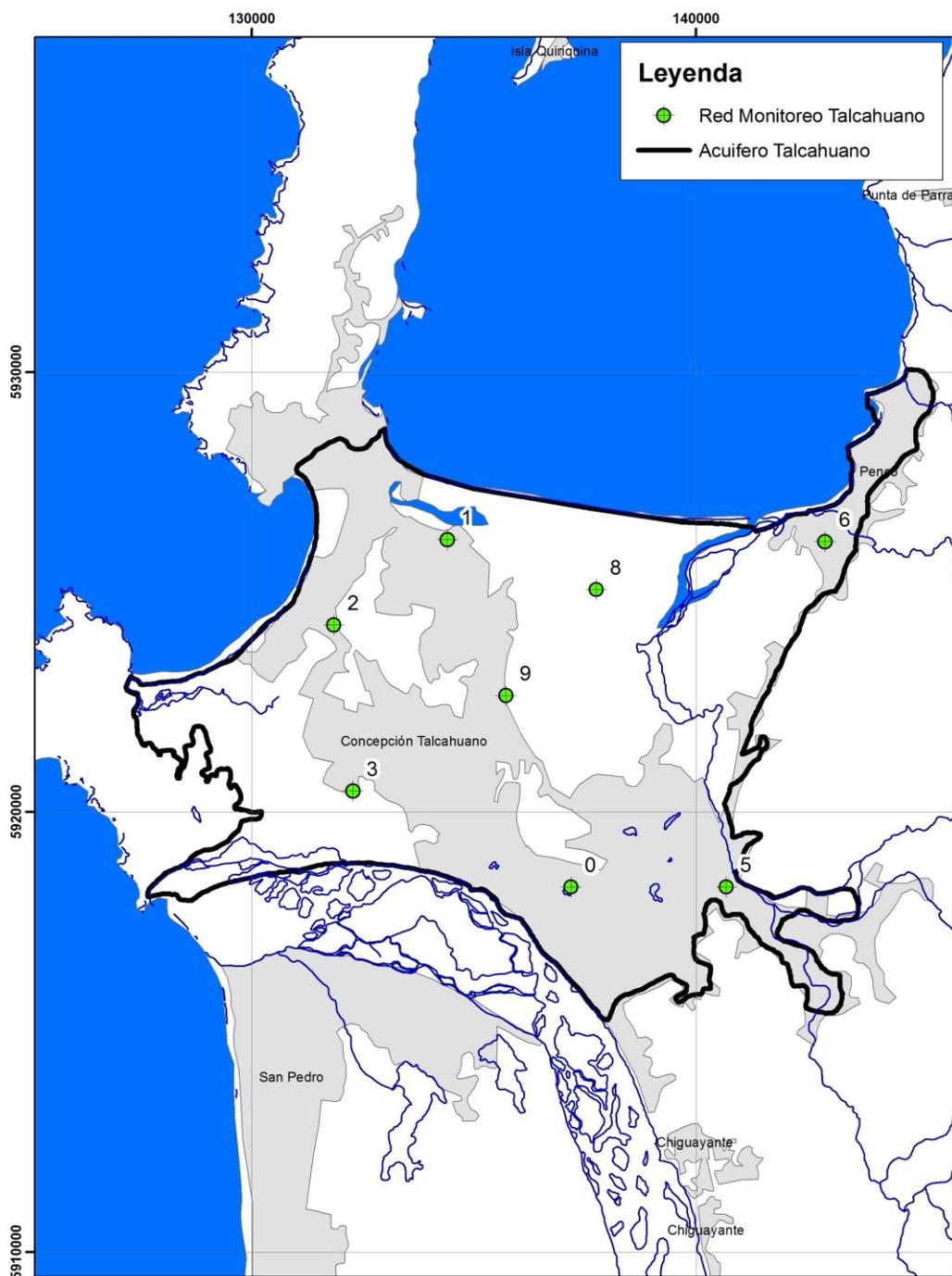


Figura 119. Propuesta de red de monitoreo en el acuífero Talcahuano

### 11.3. CUENCAS COSTERAS VIII REGIÓN

En el resto de cuencas se propone disponer de 2 puntos de piezometría y 1 de calidad por cada cuenca, a ubicar en el acuífero detrítico.



## **12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

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

Respecto al resto de cuencas, el estudio ha supuesto también una mejora en el conocimiento hidrogeológico, de una forma más somera que los anteriores, pero que proporciona una idea del comportamiento de los acuíferos, sus balances hídricos e información disponible.

Los principales resultados obtenidos han sido los siguientes:

- Definición geométrica de acuíferos (antecedentes y geofísica)
- Disponibilidad hídrica de los acuíferos 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, pudiendo de esta forma conocer la recarga de cada subcuenca dentro del conjunto y cómo afectaría tanto a la cuenca como al acuífero la incorporación de nuevas extracciones en la zona de estudio.

El acuífero de Nilahue, atendiendo a los derechos constituidos, se consideraría que está sobreexplotado ya que la recarga evaluada en el sistema es inferior al caudal otorgado. No obstante, la situación actual del mismo parece estar en equilibrio, aunque con una afección al sistema superficial.

Los escenarios simulados en el acuífero Nilahue determinan que los derechos otorgados debieran ser del 50% para que no se produzcan descensos generalizados en el acuífero para un periodo de 50 años. No obstante, bajo este escenario, la afección al sistema superficial sería fuerte, ya que la infiltración del río es una de las principales fuentes de recarga del acuífero.

Por otro lado, se recomienda revisar el criterio de afección al sistema superficial en el acuífero Nilahue, ya que este resulta muy limitante respecto a los recursos disponibles del acuífero, empleando por ejemplo otro límite distinto al 10% del caudal medio anual con 85% de probabilidad de excedencia.

Respecto al acuífero de Talcahuano, se puede concluir que tiene un comportamiento similar al de régimen natural, con un volumen de derechos otorgados sostenibles, que incluso se podrían incrementar en un 550%, además de poder crear nuevas zonas de explotación de pequeña entidad.

Asimismo, el acuífero de Talcahuano es de menor entidad que el de Nilahue, además de poder presentar riesgo de intrusión salina en caso de querer incrementar la demanda en la zona. Motivo por el cual se recomienda realizar un seguimiento de esta de forma más o menos continuado.

Cabe destacar que los escenarios simulados no resultan muy fiables puesto que los modelos han sido calibrados en régimen estacionario, y los escenarios simulados en transiente, además de que determinados supuestos pueden resultar poco fiables por tratarse de estimaciones.

Se recomienda obtener un registro continuo de los niveles en los acuíferos (medidas mensuales o cada dos meses) en distintos puntos de los acuíferos, además de una cuantificación de las explotaciones a nivel mensual para su posterior calibración en régimen transiente.

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.