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

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA BÍO BÍO

TOMO I

INFORME FINAL Y PLANOS

REALIZADO POR:

AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA

S.I.T. Nº 297

Santiago, Diciembre 2012

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Abogada Sra. Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas
Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Miguel Ángel Caro

AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Jorge Baechler Rojas

Profesionales

Ingeniero Civil Jaime Vargas P
Hidrogeólogo Carlos Parraguez D.
Ingeniero Civil Marcelo Matthey
Geofísico Manuel Araneda C.
Geóloga Sofía Aravena F.
Ingeniero Civil en Geografía Claudia Hernández L.
Ingeniero Geomensor Javier Bustamante E

ÍNDICE GENERAL
TOMO I INFORME FINAL Y PLANOS

INDICE INFORME FINAL

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS 1

1.1. Introducción 1
1.2. Objetivo General y Específicos 1
1.3. Etapas del Estudio. 2
1.4. Contenido del Presente Informe. 2

2. RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS E INFORMACIÓN 5

2.1. Labores Realizadas 5
2.2. Estudios Recopilados a Nivel Cuenca 5
2.3. Expedientes de Aguas Subterráneas 11

3. ESTUDIO HIDROLOGICO CUENCA RIO BÍO-BÍO 15

3.1. Pluviometría 15
3.1.1 Recopilación de la información disponible 15
3.1.2 Corrección, Relleno y Extensión de Estadísticas 19
3.1.3 Análisis de Frecuencia de las Estadísticas 21
3.2. Fluviometría 26
3.2.1 Introducción 26
3.2.2 Recopilación de la información disponible 26
3.2.3 Corrección, Relleno y Extensión de Estadísticas 27
3.2.4 Análisis de Frecuencia de las Estadísticas 27

4. GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA CUENCA BÍO-BÍO 31

4.1. Antecedentes Generales 31
4.2. Metodología y Antecedentes Recopilados 31
4.3. Geomorfología 32
4.4. Geología 37
4.4.1 Antecedentes Generales 37
4.4.2 Rocas Estratificadas 38
4.4.3 Depósitos No Consolidados (Cuaternario) 44
4.4.4 Rocas Intrusivas 46
4.5. Estructuras 49
4.6. Referencias 50

5. ESTUDIO GEOFISICO 53

5.1 Consideraciones Generales 53
5.2 Metodología Utilizada en el Estudio 54
5.2.1 Generalidades 54
5.2.2 Correcciones 55

TOMO I INFORME FINAL Y PLANOS
INDICE INFORME FINAL (Continuación)

5.2.3 Elección de densidades en las correcciones....56
5.2.4 Efectos regionales 56
5.3 Trabajo de Terreno 56
5.3.1 Labores Geofísicas....56
5.3.2 Labores Topográficas 58
5.4 Interpretación....60
5.5 Resultados y Conclusiones....60
5.6 Consideraciones....69

6. CARACTERIZACION HIDROGEOLOGICA CUENCA RÍO BÍO-BÍO..... 71

6.1. Aspectos Generales 71
6.2. Bases de Datos Captaciones- Catastro de Pozos y Medición de Niveles .71
6.3. Definición de Acuíferos 77
6.4. Unidades Hidrogeológicas 78
6.4.1.Perfiles Hidrogeológicos....79
6.5. Curvas Isofreáticas y Sentido de Escurrimiento....95
6.6. Parámetros Elásticos....96
6.7. Explotación y Uso de las Aguas Subterráneas 99

7. ESTIMACION RECARGA ACUIFERO CUENCA RIO BÍO-BÍO..... 101

7.1. Aspectos Generales 101
7.2. Generación de Caudales en Cuencas No Controladas 107
7.3. Análisis de Sensibilidad 108
7.4. Verificación del modelo....109
7.5. Resultados de la Modelación....113

8. MODELO HIDROGEOLÓGICO 115

8.1. Generalidades....115
8.2. Definición del Dominio de Modelación 115
8.3. Superficies de Terreno y Basamento Rocoso....120
8.4. Condiciones de Borde Definidas 120
8.4.1. Condiciones de Borde de Nivel Constante....120
8.4.2. Condiciones de Borde de Río 122
8.5. Recarga Incorporada....123
8.6. Explotación del Acuífero 125
8.7. Niveles Freáticos Observados 125
8.8. Parámetros Elásticos....125
8.9. Calibración de los Modelos Numéricos....125

TOMO I INFORME FINAL Y PLANOS
INDICE INFORME FINAL (Continuación)

9. RESULTADOS DEL MODELO 131

10. OPERACIÓN DEL MODELO 137

10.1. Escenario 1: Recarga Asociada a Probabilidad de Excedencia 50% 137
10.2. Escenario 2: Total de las Captaciones Incorporadas al Modelo 143
10.3. Escenario 3: Análisis de Sen.Factores de Uso en Pozos de Bombeo 148
10.4. Análisis Resultados y Conclusiones 151

TOMO I - INDICE FIGURAS INFORME FINAL

Figura 3-1 Estaciones Pluviométricas
Figura 3-2 Estaciones Fluviométricas
Figura 7-1 Zonas de Riego (Distritos Censales) por Sub Cuenca y Nudos de Simulación
Figura 8-1 Dominio de Modelación Definido. Modelo Bío Bío
Figura 9-1 Ubicación Pozos de Calibración y Curvas Equipotenciales Calibradas
Figura 10-3 Ubicación Pozos de Calibración y Curvas Equipotenciales Generadas Escenario 1
Figura 10-5 Ubicación Pozos de Calibración y Zonas Sensibles

TOMO I - INDICE PLANOS INFORME FINAL

Plano 4-1 Geología Cuenca Bío-Bío
Plano 5-1 Planta Perfiles Gravimétricos
Plano 5-2 Plano Isobático, Cuenca de Bío Bío
Plano 6-1 Acuífero Cuenca Río Bío-Bío y Captaciones Subterráneas
Plano 6-2 Geología Bío-Bío y Trazado Perfiles Estratigráficos
Plano 6-3 Permeabilidades Acuífero Cuenca Río Bío-Bío
Plano 6-4 Curvas Isofreáticas y Sentido Escurrimiento Aguas Subterráneas
Plano 6-5 Rangos de Profundidad Nivel Estático Cuenca Bío Bío

ÍNDICE GENERAL
TOMO II - ÍNDICE ANEXOS

CAPITULO 3 HIDROLOGÍA

ANEXO 3-1 Precipitaciones Mensuales Estadísticas Base
ANEXO 3-2 Correlaciones Precipitaciones Anuales
ANEXO 3-3 Precipitaciones Mensuales Estadísticas Corregidas y Rellenadas
ANEXO 3-4 Curvas Doble Acumuladas Precipitaciones Anuales
ANEXO 3-5 Análisis de Frecuencia Precipitaciones Mensuales
ANEXO 3-6 Caudales Medios Mensuales Estadísticas Base
ANEXO 3-7 Correlaciones Caudales Medios Mensuales
ANEXO 3-8 Caudales Medios Mensuales Estadísticas Corregidas y Rellenadas
ANEXO 3-9 Análisis de Frecuencia Caudales Medios Mensuales

TOMO III - ÍNDICE ANEXOS

CAPITULO 5 ESTUDIO GEOFISICO)

ANEXO 5-1 Valores de Gravedad Corregidos Estaciones Gravimétricas
ANEXO 5-2 Anexo Fotográfico Registro Labores Terreno Estudio Gravimétrico
ANEXO 5-3 Monografías PRs
ANEXO 5-4 Topografía Estaciones Gravimétricas
ANEXO 5-5 Resultados Estudio Gravimétrico

CAPITULO 6 HIDROGEOLOGÍA CUENCA BÍO-BÍO

ANEXO 6-1 Captaciones Subterráneas
ANEXO 6-2 Planos de Construcción, Pruebas de Bombeo (Cuenca Río Bío-Bío)- Respaldo Magnético
ANEXO 6-3 Permeabilidad Método Cooper-Jacob y Theis
ANEXO 6-4 Fichas Encuestas Pozos Cuenca Río Bío-Bío

ÍNDICE GENERAL
TOMO III - ÍNDICE ANEXOS

CAPITULO 7 **ESTIMACION RECARGA)**

ANEXO 7-1 Determinación Superficies de Riego y Secano (Fuente CENSO Agropecuario 2007).
ANEXO 7-2 Bases Conceptuales Modelo
ANEXO 7-3 Verificación Modelo Simulación (Respaldo Magnético)
ANEXO 7-4 Resultados Balances y Recargas
ANEXO 7-5 Manual de Uso

CAPITULO 8 **MODELO MODFLOW (Respaldo Magnético)**

ANEXO II **ANEXO SIG**

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

Dentro de las principales funciones que tiene la Dirección General de Aguas (DGA) está el estudio continuo de las fuentes de recursos hídricos, lo anterior con el principal objetivo de que sean aprovechados por el país de manera sustentable hoy y en el futuro.

Chile, al ser un país con una geografía diversa, distribuido entre latitudes tropicales y australes, dispone de recursos hídricos también diversos, presentes de forma muy dispar a lo largo y ancho del territorio. En el Norte, la mayor disponibilidad de agua se encuentra de manera subterránea, lo cual obliga a aproximarse a ella con énfasis en la hidrogeología. Hacia el Sur, y sobre todo en la zona austral, la disponibilidad es principalmente superficial, con lo cual el estudio del recurso se centra en la hidrología de las cuencas. La zona Centro Sur es una zona de transición, habiendo cuencas con avanzada explotación de aguas subterráneas y superficiales, y otras con explotaciones subterráneas incipientes.

Específicamente, la cuenca del río Bío-Bío, si bien es aprovechada principalmente de manera superficial, el acuífero está siendo cada vez más explotado, lo cual responde a demandas para el desarrollo de diferentes actividades productivas en el territorio, principalmente riego, industria y agua potable.

En este caso, el otorgamiento de derechos ha sido sólo de acuerdo a un análisis local, que ha involucrado la evaluación de la disponibilidad, a nivel de la fuente, a través de una prueba de bombeo. Este procedimiento se estima válido para el tipo de acuíferos en la zona sur, considerando que exhiben montos elevados de recarga y renovables anualmente.

Así, en términos generales, estos acuíferos se observan sin problemas para satisfacer la demanda de agua subterránea. Sin embargo, es de interés conocer el balance hídrico general, el cual permita avanzar en el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas de manera sustentable, que no comprometa ni la fuente ni a los usuarios.

1.2. Objetivo General y Específicos

El objetivo general del estudio es el levantamiento de la información hidrogeológica y, a partir de ello, el desarrollo de un modelo conceptual del acuífero de la cuenca del río Bío-Bío.

Los objetivos específicos son los siguientes:

a) Generar la geometría basal del acuífero principal (Geofísica)

b) Revisar y actualizar catastros de la demanda agrícola, sanitaria e industrial.
c) Definir y caracterizar unidades acuíferas principales
d) Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
e) Identificar las zonas de recarga y descarga.
f) Obtener parámetros hidrogeológicos del acuífero.
g) Representar territorialmente los resultados del estudio en un SIG.
h) Definir modelo conceptual del acuífero.
i) Implementar preliminarmente topología modelación integrada
j) Implementar un modelo numérico de flujo preliminar de aguas subterráneas en Visual MODFLOW.

1.3. Etapas del Estudio.

El desarrollo del estudio se dividió en 2 etapas.

Etapa 1 Recopilación y Análisis de Antecedentes, Caracterización Hidrológica e Hidrogeológica Cuenca Río Bío-Bío.

Etapa 2 Modelo Conceptual y Numérico Preliminar del Acuífero Bío-Bío, Conclusiones e Informe Final

El presente documento corresponde al Informe Final del Estudio Hidrogeológico Cuenca Bío-Bío.

1.4. Contenido del Presente Informe.

De acuerdo a lo estipulado en los términos de referencia que rigen la presente consultaría, los temas o áreas de trabajo desarrollados fueron lo siguientes::

- Recopilación y análisis de estudios y antecedentes existentes cuenca del Río Bío-Bío.
- Caracterización Hidrológica Cuenca Bío-Bío (caudales superficiales y precipitaciones)
- Geología acuífero Bío-Bío
- Estudio Geofísico (Gravimétrico) Acuífero Bío-Bío
- Caracterización Hidrogeológica acuífero Bío-Bío.
- Estimación de la Recarga Acuífero Bío-Bío
- Modelo Conceptual y Numérico Acuífero Mataquito
- Conclusiones

Toda la información generada y procesada junto con los resultados obtenidos fueron vertidos en el SIG que se desarrollo durante la consultoría, de modo de ir conformando un proyecto que permita una visualización y entendimiento de cada una de las variables incorporadas, así como la interacción entre éstas. En el Anexo II se incluye una descripción del contenido del SIG elaborado,

además se adjunta el archivo magnético con el respectivo respaldo de la información procesada y desarrollada.

En los capítulos siguientes se describen las labores realizadas en cada una de las áreas de trabajo antes indicadas, así como también se muestran los resultados obtenidos.

En el capitulo 2 se identifican y sintetizan los estudios recopilados y las fuentes de información utilizadas en el desarrollo de cada uno de los temas elaborados en el presente informe.

En el capitulo 3 se presenta la caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Bío-Bío, efectuada en base a las estadísticas pluviométricas y fluviométricas existente en la Cuenca; específicamente se analiza la calidad y extensión de los registros (precipitaciones mensuales y caudales medios mensuales), rellenando aquellas estadísticas que presentan datos incompletos, a través de correlaciones, finalmente se realiza un análisis de frecuencia analítico, a nivel mensual, obteniendo la función de mejor ajuste para diferentes probabilidades de excedencia.

En el capitulo 4 se realiza la descripción y caracterización Geológica de la Cuenca del Río Bío-Bío, la cual incluye la presentación de planos Geológicos (escala 1:250.000)

En el capitulo 5 se describe la metodología, las labores ejecutadas y los resultados obtenidos del estudio Geofísico realizado en la cuenca del río Bío-Bío, el cual se ejecutó utilizando Gravimetría, se incluye un plano de planta con la ubicación de los puntos tomados.

En el Capitulo 6 se presenta la caracterización hidrogeológica del acuífero en la cuenca del río Bío-Bío, apoyada en antecedentes existentes y en los resultados de las labores realizadas en la presente consultoría (catastro de pozos, visitas a terreno, interpretación de pruebas de bombeo de pozos, etc.), se incluye la presentación de planos en base SIG con la información procesada.

En el capitulo 7 se describe la metodología, las labores ejecutadas y los resultados obtenidos en la determinación de la recarga al acuífero en la cuenca del río Bío-Bío.

En el capitulo 8 se describe la metodología, las labores ejecutadas y los resultados obtenidos en el proceso de Calibración del Modelo Hidrogeológico del Acuífero del Valle Central de la Cuenca del Río Bío Bío.
En el capitulo 9 se muestran los resultados y balances obtenidos en la Modelación.

En el capítulo 10 se muestran los resultados obtenidos con la operación del modelo para tres escenarios distintos, así como también las conclusiones del estudio

2. RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS E INFORMACIÓN

2.1. Labores Realizadas

Durante esta etapa se realizó una búsqueda y recopilación de información y antecedentes, la cual y para efectos de presentación y claridad se dividió en dos áreas:

- La primera se centro en buscar estudios relacionados a las materias de interés de la presente consultoría, desarrollados para entidades públicas y privadas, tales como DGA, DOH, CNR, CONAMA.

- La segunda fue la recopilación de antecedentes técnicos de pozos o sondajes construidos en el área en estudio, incluidos en las carpetas de los expedientes de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

En los puntos siguientes se describen las labores y principales resultados obtenidos durante el desarrollo de estas tareas. Cabe indicar que en el punto 2.2 siguiente (Estudios Recopilados) solo se presentan y describen los estudios desarrollados a nivel de cuencas o región con características o contenidos similares al de la presente consultoría; los estudios que involucran temas específicos (como por ejemplo hidrología, geología, etc.) serán citados y descritos en los capítulos correspondientes al desarrollo del tema en cuestión.

2.2. Estudios Recopilados a Nivel Cuenca

REF 1 Estudio Hidrogeológico Cuencas Bío-Bío e Itata. Tomo III (DGA-DEP – Aquaterra Ingenieros Ltda. Diciembre 2011-SIT 258).

REF 2 Mejoramiento y Ampliación de Red de Aguas Subterráneas, Regiones VII a X. (Conic BF Ingenieros Civiles. - DGA. S.I.T. Nº 223 Diciembre 2010)

REF 1 Estudio Hidrogeológico Cuencas Bío-Bío e Itata. Tomo III (DGA-DEP –Aquaterra Ingenieros Ltda. Diciembre 2011-SIT 258).

El objetivo general y principal del estudio fue el levantamiento de la información hidrogeológica, y a partir de ello, el desarrollo de un modelo conceptual del acuífero de la cuenca del río Itata. Además, para la cuenca del río Bío Bío, se recopiló y generó información hidrogeológica a nivel preliminar.

Específicamente las labores desarrolladas en la cuenca del río Bío-Bío fueron:

a) Definir y caracterizar la Geología de la Cuenca
b) Catastrar Niveles de Pozos
c) Obtener parámetros hidrogeológicos del acuífero
d) Representar territorialmente los resultados del estudio en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

Geología

En este estudio se recopiló la información de la geología y geomorfología del área de interés, estructurando un mapa geológico a escala 1:250.000 que permitiera el trazado detallado del contacto roca-relleno. Metodológicamente se realizó lo siguiente:

i. Recopilación de antecedentes públicos, principalmente en los mapas geológicos estructurados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

ii. Digitalización de los Mapas Geológicos Preliminares de Chile denominados:

- Hoja Concepción-Chillan, escala 1:250.000, Región del Bío-Bío, elaborada por Aníbal Gajardo el año 1981.
- Hoja Los Ángeles-Angol, escala 1:250.000, Región del Bío-Bío, elaborada por Fernando Ferraris el año 1981.
- Hoja Arauco-Lebu, escala 1:250.000, Región del Bío-Bío, elaborada por Fernando Ferraris y Ramiro Bonilla el año 1981.

iii. Para la zona andina se utilizaron las Cartas Geológicas de Chile, escala 1:250.000 denominadas:

- Hoja Laguna del Maule, de las regiones del Maule y del Bío-Bío, del año 1984, elaborada por Jorge Muñoz y Hans Niemeyer.
- Hoja Laguna de la Laja, Región del Bío-Bío, elaborada por Hans Niemeyer y Jorge Muñoz el año 1983.
- Hoja Curacautín, regiones de la Araucanía y del Bío-Bío, elaborada por Manuel Suárez y Carlos Emparan el año 1997.

iv. Como complemento se utilizó el Mapa Geológico de Chile en formato digital, del SERNAGEOMIN (2003), escala 1:1.000.000.

Cabe señalar, y como suele ocurrir en los casos en que se cuenta con información de diversos estudios que se pretende unificar, los calces laterales por lo general, son poco coincidentes. Para tener una mayor claridad en esta situación, se consultó directamente al Sr. Aníbal Gajardo, Geólogo del SERNAGEOMIN y autor de la Carta Concepción-Chillán, quien gentilmente aclaró las diferencias

Caracterización Hidrogeológica Preliminar Cuenca Bío-Bío

Para describir la hidrogeología de la cuenca del Bío Bío, se consideró la información recopilada, descrita y elaborada en los capítulos anteriores. Básicamente los aspectos que se caracterizaron son:

- Catastro de Pozos
- Definición de Acuíferos
- Transmisibilidades
- Profundidad de Niveles

Catastro de Pozos

El catastro de pozos para la cuenca del Bío Bío se confeccionó considerando las siguientes fuentes de información:

i. Catastro de Pozos incluido en el estudio Mejoramiento y Ampliación de Red de Aguas Subterráneas, Regiones VII a X. (Conic BF Ingenieros Civiles. - DGA. S.I.T. Nº 223 Diciembre 2010)

ii. Recopilación de Expedientes de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas Provincia de Bío Bío, Concepción y Malleco.

Finalmente se llegó a establecer un universo de 321 captaciones subterráneas, de las cuales 196 están asociadas a un número de expediente.

Definición de Acuíferos

Se definió los acuíferos en el área en estudio en base a la información geológica desarrollada. Se consideró toda el área como un solo gran acuífero, el cual se subdividió en 3 zonas o sub acuíferos, las cuales se diferencian entre si por el tipo de relleno permeable presente o constituyente.

La extensión en planta del acuífero correspondió al límite roca-relleno definido A continuación se indica el tipo de relleno que conforma cada una de las unidades acuíferas definidas:

- Sub-Acuífero 1: Unidad **Q3av** Depósitos de avalancha volcánica
- Sub-Acuífero 2: Unidades
  - **Q1 :** Depósitos fluvio-aluviales Sedimentos de valles actuales
  - **Q1fa :** Depósitos Fluvio-Aluviales antiguos
  - **Q1m :** Terrazas Marinas (Pleistoceno-Holoceno)
  - **Q1t :** Sedimentos de terrazas fluviales (Holoceno)
  - **Hcrl :** Depósitos del cono fluvial del río Laja (Pleistoceno-Holoceno)
- Sub-Acuífero 3: Unidad PlHlm Formación La Montaña (Pleistocena-Holocena) y Unidad **PlHca** Sedimentos Glacio-Lacustres Collipulli-Angol (Pleistocena-Holocena)

Parámetros Elásticos

Para caracterizar el acuífero de manera preliminar se realizó el cálculo de la Transmisibilidad, tomando como base los antecedentes técnicos incluidos en los expedientes recopilados, específicamente con los datos de las pruebas de gasto variable y la relación de Dupuit, se estimó la Transmisibilidad para 192 pozos. En el Cuadro siguiente se muestran los rangos definidos y la cantidad de pozos existente en cada tramo.

Cuadro Rango de Transmisibilidades Cuenca Bío-Bío

Rango Transmisibilidad (m^2/día)	Cantidad de Pozos	% de pozos del Total
< 150	101	52,6 %
150-250	22	11,5%
250-350	23	12,0%
350-450	15	7,8%
>450	31	16,1 %
Totales	**192**	**100 %**

Niveles Estáticos

Se realizó una campaña de medición de niveles estáticos en pozos localizados en la cuenca del río Bío Bío, se encuestaron y/o midieron 200 pozos en la cuenca,

Con la información de profundidad de niveles estáticos medidos se generó un plano con sectores o zonas comprendidas en un mismo rango de profundidad, en el Cuadro siguiente se muestran los rangos de cada uno de los tramos definidos y la cantidad de pozos existente en cada tramo de profundidad.

Cuadro Tramos Con Rangos de Profundidad Nivel Estático Definidos

Rango Profundidad Nivel Estático (m)	Cantidad de Pozos	% de pozos del Total
0-5	101	48,3 %
5-10	47	22,5 %
10-25	41	19,6 %
25-50	17	8,1 %
>50	3	1,4 %
Totales	**209**	**100 %**

Utilidad para el Presente Trabajo: Toda la información recopilada y generada en este estudio (SIT 258) es utilidad para la elaboración del presente estudio y será complementada con los nuevos antecedentes a desarrollar.

REF 2 Mejoramiento y Ampliación de Red de Aguas Subterráneas, Regiones VII a X. (Conic BF Ingenieros Civiles. - DGA. S.I.T. Nº 223 Diciembre 2010)

El objetivo central del trabajo fue la formulación y/o proposición de una red de medición de aguas subterráneas para la zona comprendida entre el río Mataquito (VII Región) y el río Maullín (X Región de Los Lagos).

Dentro de las labores desarrolladas se efectuó, para cada región, una descripción Geológica e Hidrogeológica, incluyendo esta última aspectos tales como: catastro de captaciones, definición de acuíferos, profundidad de niveles y dirección de escurrimiento.

A continuación se resumen las consideraciones y resultados obtenidos en dos de las labores ejecutadas:

Catastro de Captaciones

- Los catastros recopilados consideraron los estudios más recientes efectuados, estudios que ha su vez han recopilado todos los catastros efectuados en trabajos anteriores.
- Como los catastros recopilados usaban coordenadas de los pozos en distintos Datum, se transformaron al Datum WGS 84 Huso 19, de modo

de trabajar con un Datum común. La transformación se realizó a través de un procedimiento que trae incorporado el software ArcGis 9.2.

- Respecto a la información del CPA, se eliminaron todas las captaciones con caudales constituidos menores que 3 l/s, y aquellos cuyos derechos de agua estaban pendientes y denegadas.
- Finalmente, se hizo un filtro eliminando aquéllas captaciones que se repetían entre un catastro y otro.
- Específicamente el catastro de pozos constituido en las regiones VIII y IX alcanzó un total de 1.518 y 641 captaciones respectivamente.

Medición de Niveles de Aguas Subterráneas.

- Para la red de pozos propuesta que conformaría la red de medición de Aguas Subterráneas, se realizó una campaña de terreno, la cual consideró entre otros aspectos la medición del nivel estático. En la región VIII y IX se seleccionaron 44 pozos, para los cuales se cuenta con el nivel del agua subterránea en diciembre del 2010, sin embargo solo 25 están dentro del área de las cuencas de los ríos Itata y Bío Bío.

Utilidad para el Presente Trabajo: la información que será de utilidad corresponde al catastro de pozos conformado, ya que se cuenta con una recopilación y georeferenciación de estas captaciones a un solo sistema (WGS 84 Huso 19). Específicamente los estudios o catastros utilizados para configurar el catastro final fueron:

i. Estudio Catastro de Pozos Provincia de Ñuble, Dirección General de Aguas VIII Región del Bío Bío; Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores, 2006.
ii. Diagnóstico Actual del Riego y Drenaje en Chile y su Proyección, CNR, 2001
iii. Catastro Público de Aguas

Adicionalmente la otra información de utilidad será los registros de niveles estáticos medidos en Diciembre del año 2010 en los pozos seleccionados como parte de la red y que están dentro del área en estudio. Esta última información permitirá visualizar el comportamiento de esta variable en el tiempo, ya que se cuenta con registro de niveles en otros períodos.

2.3. Expedientes de Aguas Subterráneas

Con el objeto de complementar la información existente relacionada a pozos, estratigrafías y pruebas de bombeo contenidas en los estudios y catastro indicados en el punto anterior, se procedió a realizar una recopilación y revisión de los antecedentes técnicos incluidos en los expedientes de las solicitudes de derechos de aguas subterráneas en el área en estudio. El procedimiento seguido fue el siguiente:

i. Se solicitó a la DGA la información de derechos de aguas subterráneas existente para la VIII y IX región. La información entregada fue la base de datos de expedientes contenida en el CPA (Catastro Público de Aguas).

ii. La base de datos entregada incluía el universo total de solicitudes, coexistiendo derechos otorgados, denegados, en trámite, etc., y provenientes también de orígenes disímiles (Articulo 4º y 6º transitorio, INDAP, Conadi, particulares, etc.), cabe señalar que la base de datos entregada y con la cual se trabajo no indica el tipo de captación asociada a cada solicitud, por lo cual no se sabe a priori cuales corresponden a pozo o sondaje, noria, dren, punteras, etc. Por las razones anteriores y dado el gran volumen de información, no toda de utilidad para los fines del presente estudio, se realizó una serie de filtrados y/o depuración de la base de datos, hasta llegar al universo de expedientes finalmente revisados.

iii. Específicamente los filtros y consideraciones efectuadas en la depuración del listado inicial de expedientes entregados fue la siguiente:

- Se identificó para cada región las provincias que están dentro del área en estudio, que en este caso corresponden a:

  Cuenca Bío Bío: VIII Región Provincia de Bío Bío (Código 02) y Provincia de Concepción (Código 03); IX Región Provincia de Malleco (Código 01).

- Luego y considerando que la información entregada por el CPA clasifica el expediente por su origen o estado, se filtro en primera instancia todos aquellos expedientes aprobados y pendientes región, excluyendo aquellos denegados o pendiente legal o DARH, luego en una segunda instancia se excluyeron todos aquellos expedientes asociados al artículo 4º Transitorio, INDAP y Conadi, por tratarse de solicitudes de caudales pequeños y generalmente asociadas a captaciones someras (Norias).

- De este modo quedaron en el listado o universo de expedientes a revisar los asociados a solicitudes de derechos de aguas subterráneas aprobados y pendientes región.

iv. Una vez determinado el universo o número de expedientes de interés a revisar, se tomo contacto con las Direcciones Regionales de la DGA, con el objeto de coordinar las labores a realizar en sus dependencias, las cuales fueron básicamente: revisar cada uno de los expedientes seleccionados, de modo de clasificar en una primera instancia el tipo de captación involucrada; para los efectos del presente estudio se seleccionaron aquellos expedientes cuya captaciones son sondajes o pozos profundos, dejando fuera de nuestra búsqueda los expedientes asociados a captaciones del tipo punteras, drenes y norias, lo anterior básicamente porque las características de esas captaciones describen o entregan antecedentes del estrato supsuperficial del acuífero (primeros metros), en contra posición de los sondajes. Finalmente para los expedientes asociados a sondajes se fotocopió, siempre y cuando estuviese incorporada en la respectiva carpeta, la siguiente información: ubicación de la captación, plano de construcción del pozo, prueba de gasto variable o constante e informe técnico.

v. En el Cuadro siguiente se muestra el número de expedientes iniciales entregados por la DGA, el número de expedientes seleccionados a revisar y finalmente el número de expedientes vinculados con captaciones del tipo pozo o sondaje, todo lo anterior se presenta por provincia:

Cuadro 2-1 Número de Expedientes Analizados Por Provincia

Provincia	Nº Exped. Iniciales	Nº Exped. a Revisar	Nº Exped. con Pozo	Nº Exped. con Pozo en Cuenca
Bío Bío	2.824	349	164	148
Concepción	1.146	238	48	12
Malleco	1.135	200	114	36
Totales	**5.105**	**787**	**326**	**196**

vi. La información técnica fotocopiada por expediente o captación del tipo pozo o sondaje fue escaneada y se anexa en formato PDF en la presente entregada, de acuerdo a lo solicitado por la inspección del Estudio.

vii. La información recabada de los pozos: niveles de agua subterránea, datos de pruebas de bombeo, estratigrafía e informes técnicos, fue utilizada en la caracterización de los acuíferos que se muestra en los capítulos siguientes del estudio.

viii. Los sondajes identificados a partir de los expedientes revisados se incorporaron a la base de datos de captaciones subterráneas en desarrollo, por consecuencia están georeferenciados e incorporados al SIG que se está desarrollando. Específicamente en el plano 6-1. se muestra el catastro de captaciones subterráneas para la cuenca del Río Bío-Bío.

3. ESTUDIO HIDROLOGICO CUENCA RIO BÍO-BÍO

3.1. Pluviometría

El análisis de las precipitaciones de la zona de estudio tuvo por objeto generar series estadísticas de precipitaciones mensuales y anuales para el período 1961/62 - 2010/11, para caracterizar el régimen pluviométrico de la zona de estudio, tanto en lo referente a la distribución espacial de las lluvias como en la determinación de precipitaciones para diferentes probabilidades de excedencia.

Para ello se seleccionaron un conjunto de estaciones pluviométricas bien distribuidas en la cuenca de interés y con registros suficientemente extensos y confiables, para luego proceder a recopilar las estadísticas disponibles en tales estaciones, tanto en la Dirección General de Aguas como en la Dirección Meteorológica de Chile.

Al mismo tiempo se revisaron los siguientes estudios realizados anteriormente en esta cuenca:

- Diagnóstico Actual del Riego y Drenaje en Chile y su Proyección. Diagnóstico del Riego y Drenaje en la VIII Región. (AC, CNR, 2003).

- Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Bío Bio". (Cade - Idepe, DGA, 2004).
- Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Bío-Bío. S.D.T. Nº 183 " .(DGA, 2004)

3.1.1 Recopilación de la información disponible

Las estaciones seleccionadas suman un total de 24. Sus antecedentes básicos y ubicación se presentan en el Cuadro Nº 3-1 y en la Figura Nº 3-1, respectivamente. Las estadísticas de precipitaciones mensuales recopiladas, que conforman las estadísticas pluviométricas base de este estudio, se presentan en el Anexo Nº3-1.

En todo caso, como se señaló anteriormente, el criterio para la elección de las estaciones se basó fundamentalmente en la extensión y la calidad de las estadísticas, así como su ubicación en la zona de interés.

Cuadro Nº 3-1. Estaciones Pluviométricas Seleccionadas

N°	Estación	Coordenadas UTM (m)		Institución	Período
		N	E		
01	Liucura	5.719.430	317.753	DGA	1987-2011
02	Lonquimay	5.741.398	292.633	DGA	1987-2011
03	Laguna Malleco	5.765.998	253.446	DGA	1961-2011
04	Encimar Malleco	5.778.066	226.474	DGA	1988-2011
05	Poco a Poco	5.803.748	236.965	DGA	1992-2011
06	Cerro El Padre	5.814.336	247.868	DGA	1961-2011
07	Quillaileo	5.831.353	264.109	DGA	1992-2011
08	San Lorenzo Bío-Bío	5.838.246	279.136	DGA	1992-2011
09	Quilaco	5.825.399	235.537	DGA	1961-2011
10	Pilguen	5.805.463	217.039	DGA	1992-2011
11	Mulchen	5.820.212	213.294	DGA	1962-2011
12	San Carlos de Purén	5.833.664	210.470	DGA	1985-2011
13	Ercilla (Vida Nueva)	5.783.856	195.639	DGA	1998-2011
14	Angol (La Mona)	5.812.049	179.444	DGA	1975-2011
15	Los Ángeles	5.843.411	188.879	DGA	1962-2011
16	Las Achiras	5.860.591	200.241	DGA	1964-2011
17	Tucapel (Reten)	5.86.9147	238.266	DGA	1975-2011
18	Cholguán	5.883.615	227.436	DGA	1961-2011
19	Pemuco	5.903.861	223.814	DGA	1971-2011
20	Laja	5.869.328	169.871	DGA	1961-2011
21	Chillancito	5.924.985	191.842	DGA	1961-2011
22	San Ignacio de Palomares	5.939.308	181.754	DMC	1961-2011
23	Nonguen Esbbio	5.910.978	145.499	DMC	1961-2011
24	Carriel Sur	5.921.921	137.419	DMC	1965-2011

FIGURA Nº 3-1 Ubicación de Estaciones Pluviométricas

3.1.2 Corrección, Relleno y Extensión de Estadísticas

Como primera parte del análisis se correlacionaron las estadísticas de precipitaciones anuales de todas las estaciones, de manera de revisar la consistencia de la información y eventualmente corregir valores alejados de la tendencia general de los puntos.

Se procedió luego a rellenar los vacíos existentes en meses aislados mediante el método de los módulos pluviométricos considerando estaciones con buenas correlaciones anuales y preferentemente cercanas. Se obtuvieron así series anuales de precipitaciones, considerando años con información completa.

Del conjunto de estaciones se identificaron aquellas estaciones con información más extensa y consistente. Se estableció un Patrón para la zona oriente y otro para la zona poniente. Para el sector oriente se eligió la estación Cerro El Padre, y para el poniente se eligió San Ignacio de Palomares.

Se procedió luego a rellenar las precipitaciones anuales faltantes en cada estación, utilizando las correlaciones realizadas con alguna de las estaciones Patrón.

En el Cuadro Nº3-2 se presentan los datos de las correlaciones usadas para el relleno de los datos anuales, y en el Anexo Nº3-2 se consignan las figuras con las rectas respectivas.

Cuadro Nº3-2 Correlación de Precipitaciones Anuales

Nº	Estación Y	Estación X	a	b	R2
01	Liucura	Cerro El Padre	0,474	-80,702	0,595
02	Lonquimay	Cerro El Padre	0,722	-19,769	0,597
03	Laguna Malleco	Cerro El Padre	1,291	289,996	0,617
04	Encimar Malleco	Cerro El Padre	0,819	331,809	0,778
05	Poco a Poco	Cerro El Padre	1,065	329,113	0,820
06	Cerro El Padre	Quilaco	1,172	265,379	0,879
07	Quillaileo	Cerro El Padre	0,945	181,779	0,802
08	San Lorenzo Bío-Bío	Cerro El Padre	0,883	250,231	0,836
09	Quilaco	Cerro El Padre	0,750	-12,690	0,879
10	Pilguen	Cerro El Padre	0,508	574,534	0,569
11	Mulchén	Cerro El Padre	0,547	108,044	0,790
12	San Carlos de Purén	Cerro El Padre	0,466	230,477	0,728
13	Ercilla (Vida Nueva)	Cerro El Padre	0,516	340,303	0,871
14	Angol (La Mona)	Cerro El Padre	0,426	305,133	0,558
15	Los Ángeles	Cerro El Padre	0,514	41,499	0,735
16	Las Achiras	Cerro El Padre	0,480	76,880	0,606
17	Tucapel (Reten)	Cerro El Padre	0,656	221,511	0,802
18	Cholguán	Cerro El Padre	0,608	106,748	0,568
19	Pemuco	Cerro El Padre	0,655	-144,077	0,831
20	Laja	San Ignacio de Palomares	0,782	170,574	0,601
21	Chillancito	San Ignacio de Palomares	0,871	72,923	0,853
22	San Ignacio de Palomares	Carriel Sur	1,024	1,191	0,741
23	Nonguen Esbbio	San Ignacio de Palomares	0,864	416,567	0,639
24	Carriel Sur	San Ignacio de Palomares	0,723	289,554	0,741

Una vez rellenados los datos anuales, se procedió a completar las lluvias mensuales, suponiendo igual distribución de las lluvias mensuales con relación a la estación utilizada para el relleno anual.

Las estadísticas rellenadas y corregidas finalmente obtenidas, se presentan en el Anexo Nº 3-3

Finalmente, se procedió a verificar la homogeneidad de las series anuales definitivas mediante un análisis de Curvas Doble Acumuladas (CDA), considerando los Patrones Pluviométricos indicados.

De acuerdo a estas curvas, presentadas en el Anexo Nº 3-4, se concluye que las estadísticas finales se pueden considerar rellenadas y corregidas adecuadamente.

3.1.3 Análisis de Frecuencia de las Estadísticas

Para las series de precipitaciones mensuales, semestrales y anuales definitivas de cada estación, se efectuaron análisis de frecuencia analíticos, ajustando las distribuciones Normal, Gumbel, Pearson III, Log-Normal, Log-Pearson III y Log-Normal III, considerando 5 probabilidades de excedencia: 5%, 20%, 50%, 85% y 95%.

La bondad del ajuste se determinó en base a un Test Chi-Cuadrado, agrupando los datos en 5 intervalos. La distribución de mejor ajuste es la que entrega el menor valor de Chi-Cuadrado.

En el Anexo Nº3-5 se presenta el detalle de los resultados y en el Cuadro Nº3-3 se consigna el resumen de este análisis, indicando para cada mes, la distribución de mejor ajuste.

Cuadro Nº3-3. Análisis de Frecuencia Precipitaciones Mensuales

01 LIUCURA

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	10,17	3,65	32,61	28,55	14,42	12,77	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	398,10	95,82	564,62
85%	19,16	41,98	76,06	45,59	38,45	24,75	19,25	4,99	2,25	0,00	0,09	4,97	479,03	127,96	658,04
50%	49,31	126,46	171,82	101,21	91,43	61,58	58,23	35,83	31,00	18,23	6,93	20,40	657,40	198,79	863,90
20%	92,07	221,56	279,62	193,40	151,07	108,02	102,11	70,54	63,36	45,50	60,30	39,85	858,18	278,54	1095,65
5%	152,26	344,92	419,46	358,81	228,42	162,25	159,04	115,56	105,34	80,88	193,77	65,40	1118,63	381,98	1396,27
Distribucion	PearsonIII	G	G	LN	G	LogPearIII	G	G	G	G	LogPearIII	PearsonII	G	G	G
Valor Chi2	7,195	6,481	10,329	8,833	10,481	11,614	11,614	12,100	13,090	15,129	15,233	18,462	7,995	10,500	6,357

02 LONQUIMAY

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	37,46	106,48	79,73	70,53	25,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	694,40	180,85	948,93
85%	24,67	70,82	145,90	121,30	96,42	41,26	11,29	4,54	7,13	0,00	0,00	8,36	819,91	210,18	1094,61
50%	81,29	179,49	249,47	216,84	164,23	92,15	95,15	60,12	47,41	27,57	22,12	35,20	1088,13	308,46	1415,66
20%	145,03	334,59	385,67	320,78	253,09	176,96	189,55	122,69	95,98	70,05	59,95	65,41	1369,29	447,89	1777,07
5%	227,72	548,28	584,48	445,07	382,42	329,86	312,01	203,85	158,10	125,15	118,52	104,60	1705,11	644,17	2245,89
Distribucion	G	LogPearIII	LN	PearsonII	LN	LN	G	G	PearsonIII	G	PearsonIII	G	LN	PearsonIII	G
Valor Chi2	7,624	6,424	11,500	13,557	12,148	10,157	9,481	16,557	14,929	14,748	17,490	7,929	8,500	12,757	13,329

03 LAGUNA MALLECO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	16,44	58,99	249,37	163,30	67,18	69,05	30,99	0,00	0,00	0,00	0,00	6,55	1396,15	405,72	1958,47
85%	68,99	159,56	331,03	227,20	162,31	100,62	81,14	37,33	13,61	10,15	4,33	28,25	1634,48	489,14	2236,67
50%	184,82	396,81	511,00	398,77	358,26	191,08	195,26	132,96	99,76	60,60	49,28	76,06	2159,72	672,99	2849,80
20%	315,20	660,46	713,59	629,68	551,79	321,65	318,35	240,61	198,45	117,38	115,81	129,88	2751,00	879,95	3540,00
5%	484,33	980,35	976,39	973,80	767,95	528,73	464,73	380,25	320,61	191,04	211,64	199,69	3517,99	1148,41	4435,32
Distribucion	G	PearsonIII	G	LN	PearsonIII	LN	PearsonII	G	PearsonIII	G	PearsonIII	G	G	G	G
Valor Chi2	18,100	8,795	8,300	10,548	6,424	10,100	14,500	12,224	10,700	6,862	21,367	7,729	9,033	6,929	10,395

04 ENCIMAR MALLECO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	9,04	71,84	179,70	135,39	114,38	49,04	25,15	11,54	0,00	0,00	0,00	5,10	1081,90	243,27	1398,69
85%	42,97	113,11	234,05	185,88	150,02	70,77	43,56	21,95	8,46	0,00	0,00	15,48	1227,51	306,77	1630,27
50%	118,20	245,06	353,81	303,54	238,12	132,20	111,08	65,59	62,05	35,84	37,32	47,68	1522,12	446,71	2024,75
20%	197,55	459,13	488,64	432,70	346,53	219,59	237,53	159,56	133,06	92,60	91,67	91,25	1812,63	604,24	2345,09
5%	290,45	835,91	663,53	586,34	495,74	356,39	490,64	372,73	229,23	166,21	162,18	150,97	2141,46	808,59	2650,81
Distribucion	PearsonIII	LN	G	LogPearII	LN	LN	LN	LN	PearsonIII	G	G	PearsonII	LN	G	N
Valor Chi2	9,481	6,329	10,624	13,414	13,290	8,481	8,414	9,329	16,367	13,148	17,414	11,348	6,357	4,300	11,614

05 POCO A POCO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	2,62	40,47	177,66	141,60	115,58	67,17	15,80	16,19	0,00	0,00	0,00	0,00	1384,84	301,48	1769,25
85%	48,48	139,12	288,15	211,71	161,93	94,98	63,03	29,86	0,99	0,00	2,18	16,99	1543,87	374,77	2005,49
50%	149,55	356,53	476,37	366,23	287,61	171,39	162,71	84,71	72,71	45,92	40,35	60,92	1894,35	542,94	2482,80
20%	263,33	601,28	629,21	540,17	458,56	276,79	263,39	197,58	163,14	117,06	103,13	110,38	2288,90	733,64	2952,80
5%	410,91	918,76	775,08	765,81	715,71	437,35	377,69	443,36	282,03	209,35	198,67	174,53	2800,71	977,80	3484,12
Distribucion	G	G	N	G	LN	LN	PearsonII	LN	PearsonIII	G	PearsonIII	G	G	LN	LN
Valor Chi2	6,081	6,548	11,348	13,214	6,729	5,757	9,357	10,290	23,262	13,529	15,881	11,157	6,014	6,929	8,757

06 CERRO EL PADRE

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	7,01	74,43	178,78	109,20	115,79	52,31	0,00	12,58	0,00	0,00	0,00	0,00	1090,42	243,89	1390,07
85%	43,39	122,24	242,82	168,71	151,64	74,88	49,46	23,32	4,55	0,00	0,54	14,73	1231,05	304,60	1596,09
50%	123,57	265,49	379,65	299,85	240,11	137,93	143,74	66,71	66,18	37,26	30,54	49,63	1541,00	444,81	2019,76
20%	213,83	468,59	512,04	447,49	348,73	226,52	220,29	156,62	140,59	98,02	82,61	88,91	1889,92	604,94	2445,25
5%	330,90	767,33	649,05	638,99	497,93	363,68	293,35	353,69	235,83	176,83	163,98	139,87	2342,52	811,26	2934,68
Distribucion	G	LogPearIII	LogPearIII	G	LN	LN	N	LN	PearsonIII	G	PearsonIII	G	G	LN	LN
Valor Chi2	7,957	6,500	7,614	13,262	8,529	6,929	10,129	12,500	22,157	11,929	15,529	13,090	8,500	5,529	8,614

07 QUILLAILEO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	16,51	79,62	195,68	132,70	115,86	52,68	8,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1153,38	266,08	1464,13
85%	49,65	122,83	249,50	191,26	153,56	75,58	49,01	23,23	2,20	0,00	0,00	15,65	1289,79	328,81	1670,11
50%	122,71	257,05	377,40	320,32	248,13	139,77	138,66	88,22	64,92	36,79	42,13	51,18	1590,42	467,06	2089,90
20%	204,95	468,23	528,15	465,60	366,36	230,27	239,57	161,38	142,42	98,92	99,17	91,18	1928,86	622,69	2507,28
5%	311,63	829,90	727,86	654,06	531,40	370,83	370,47	256,28	243,06	179,52	173,15	143,06	2367,86	824,56	2983,12
Distribucion	G	LN	LN	G	LN	LN	G	G	PearsonIII	G	G	G	G	G	LN
Valor Chi2	6,129	7,195	8,862	11,881	10,481	7,014	8,481	12,862	24,481	12,157	12,948	8,414	7,624	7,129	9,757

Cuadro Nº3-3. (Continuación) Análisis de Frecuencia Precipitaciones Mensuales

08 SAN LORENZO BIO BIO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	15,60	73,15	178,30	140,27	103,04	55,68	23,84	13,59	0,00	0,00	0,00	0,00	1136,41	268,17	1455,27
85%	48,80	114,89	237,04	185,87	140,14	78,86	54,58	24,82	0,76	0,00	0,00	15,37	1265,03	326,14	1647,63
50%	121,97	247,88	369,39	300,21	236,65	142,69	131,31	69,30	60,44	35,15	31,44	50,20	1548,48	453,91	2035,65
20%	204,34	462,86	510,99	443,10	362,13	230,96	220,47	159,52	136,01	94,07	90,27	89,40	1867,57	597,73	2417,04
5%	311,19	840,00	678,42	642,51	543,49	365,70	331,87	353,47	235,64	170,51	184,20	140,25	2281,49	784,30	2847,49
Distribucion	G	LN	PearsonIII	LN	LN	LN	PearsonII	LN	PearsonIII	G	PearsonIII	G	G	G	LN
Valor Chi2	7,081	7,300	8,214	13,414	10,281	6,729	11,414	10,290	23,195	12,157	17,900	11,157	6,614	6,281	9,329

09 QUILACO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	1,42	46,52	127,58	76,09	82,45	32,84	8,05	7,86	0,00	0,00	0,04	0,00	756,16	165,49	1047,37
85%	28,88	86,17	175,14	122,36	115,72	58,31	35,18	15,07	0,00	0,00	0,91	11,18	885,64	214,51	1183,74
50%	89,41	206,50	277,27	232,82	189,04	114,44	94,97	45,70	50,74	24,92	22,76	36,70	1159,31	322,56	1484,28
20%	157,54	362,21	376,02	342,72	271,58	177,63	162,28	112,50	117,19	65,75	71,94	65,44	1442,65	444,19	1822,61
5%	245,93	554,80	477,57	449,71	378,65	259,60	249,58	265,82	203,38	118,70	101,71	102,71	1777,42	601,97	2261,47
Distribucion	G	LogPearIII	LogPearIII	LogPearII	G	G	G	LN	G	G	LogPearIII	G	LN	G	G
Valor Chi2	8,595	7,662	8,948	6,814	5,929	6,929	11,614	9,700	12,948	12,157	20,529	11,614	7,957	9,557	6,900

10 PILGUEN

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	68,10	157,86	104,57	87,83	38,59	16,77	10,11	0,00	0,00	0,00	0,00	935,08	187,39	1263,30
85%	35,09	103,10	197,54	147,41	117,23	55,75	42,66	18,37	0,00	0,00	0,00	10,98	1041,66	234,03	1364,11
50%	106,46	208,99	294,01	241,82	191,71	104,31	99,72	50,78	49,90	26,60	24,22	38,75	1251,93	336,83	1586,28
20%	164,42	370,92	403,83	348,10	285,83	173,50	163,95	115,98	111,85	70,89	64,19	70,01	1453,54	452,55	1836,38
5%	219,74	641,33	539,24	485,97	418,45	281,95	247,27	255,09	192,20	128,35	124,44	110,55	1676,16	602,65	2160,81
Distribucion	N	LN	PearsonIII	G	LN	LN	G	LN	G	G	PearsonIII	G	LN	G	G
Valor Chi2	8,729	7,957	9,557	13,262	15,681	6,357	7,195	8,614	27,348	12,033	16,157	9,481	7,957	6,281	9,062

11 MULCHEN

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	2,62	26,37	79,83	73,47	57,84	21,15	8,73	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	577,83	122,21	862,73
85%	24,42	49,64	137,49	101,86	89,25	42,32	17,17	7,30	4,22	0,00	0,21	6,86	737,53	159,17	967,67
50%	74,00	145,75	235,72	177,69	156,11	88,96	54,30	46,03	30,04	17,77	11,88	26,96	993,88	240,62	1198,93
20%	127,43	349,53	315,49	279,19	224,15	141,46	138,32	89,63	76,44	49,72	68,25	50,11	1187,93	332,32	1459,26
5%	190,94	805,43	391,62	429,73	301,82	209,57	337,64	146,19	150,15	91,17	147,93	78,88	1361,72	451,26	1796,95
Distribucion	PearsonIII	LN	N	LN	PearsonIII	G	LN	G	PearsonIII	G	LogPearIII	PearsonII	PearsonIII	G	G
Valor Chi2	13,214	9,824	5,481	8,862	6,357	7,129	11,157	11,995	11,614	14,967	13,090	19,662	10,014	7,624	12,224

12 SAN CARLOS DE PUREN

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	4,69	20,75	108,41	71,34	50,91	19,66	0,00	5,82	0,12	1,92	0,00	0,00	662,99	121,33	801,47
85%	24,27	67,58	138,87	104,77	84,81	40,13	25,24	11,19	0,67	2,42	0,50	5,03	738,87	159,31	955,36
50%	67,41	170,79	211,76	178,44	152,06	85,25	78,87	34,10	12,31	10,14	15,59	27,74	906,12	243,03	1209,74
20%	115,97	286,97	298,28	261,37	216,17	136,04	122,41	84,30	130,54	41,38	43,72	53,30	1094,39	337,27	1391,84
5%	178,97	437,67	413,64	368,94	285,88	201,92	163,97	199,97	1242,64	108,82	89,17	86,45	1338,62	459,51	1533,87
Distribucion	G	G	LN	G	PearsonIII	G	N	LN	LN	PearsonII	PearsonIII	G	G	G	LogPearII
Valor Chi2	10,481	6,157	10,233	10,214	9,948	6,081	10,595	11,157	19,662	16,462	15,414	9,557	7,757	10,548	7,195

13 ERCILLA VIDA NUEVA

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	1,50	55,78	119,65	85,38	71,02	41,02	0,00	8,91	0,00	0,00	0,00	0,00	789,30	171,15	1041,58
85%	30,45	85,36	169,69	124,44	101,19	56,46	35,09	16,37	0,32	0,00	0,66	9,70	884,78	210,38	1158,25
50%	88,23	176,23	261,82	210,51	167,67	97,26	95,67	46,18	46,87	23,66	20,70	33,22	1074,76	299,01	1387,89
20%	143,60	317,48	343,25	307,41	242,51	151,28	144,86	107,17	99,28	62,95	54,56	59,70	1258,66	397,80	1607,46
5%	204,09	556,78	426,72	433,10	339,60	230,59	191,81	239,36	167,26	113,92	106,77	94,04	1463,46	522,38	1849,35
Distribucion	PearsonIII	LN	PearsonIII	G	G	LN	N	LN	G	G	PearsonIII	G	LN	LN	LN
Valor Chi2	6,814	6,167	7,690	14,481	10,129	10,329	8,462	10,062	25,481	12,529	11,795	10,557	7,624	7,424	8,414

14 ANGOL (LA MONA)

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	43,46	66,09	76,05	54,42	19,85	0,00	3,87	0,01	0,00	0,01	0,00	633,78	76,39	809,96
85%	11,06	70,39	112,52	106,46	77,25	39,24	14,37	10,91	0,39	0,00	0,34	5,55	760,04	105,72	947,83
50%	57,90	160,01	214,86	188,82	140,26	81,97	58,58	31,99	19,23	15,50	10,73	22,94	975,11	183,89	1182,69
20%	110,62	311,72	330,06	300,69	227,67	130,08	103,89	59,90	94,11	39,78	44,24	46,46	1149,76	288,25	1373,41
5%	179,02	589,07	479,49	468,80	361,47	192,48	155,87	97,66	176,28	71,29	77,88	78,70	1316,44	442,66	1555,42
Distribucion	G	LN	G	LN	LN	G	PearsonII	PearsonIII	LogPearIII	G	LogPearIII	PearsonII	N	LN	N
Valor Chi2	14,957	6,357	11,729	18,014	8,300	10,329	9,481	14,814	10,129	16,081	10,824	12,157	8,500	7,348	6,024

Cuadro Nº3-3. (Continuación) Análisis de Frecuencia Precipitaciones Mensuales

15 LOS ANGELES

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	37,66	79,73	57,60	48,70	18,64	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	536,11	96,34	737,55
85%	13,72	62,21	116,69	92,80	69,88	37,58	18,39	7,79	1,27	0,00	0,00	1,06	639,38	124,44	839,72
50%	63,46	146,31	198,03	170,39	129,27	79,34	57,05	34,68	20,08	14,03	11,07	23,70	863,15	192,44	1064,88
20%	119,46	292,98	283,31	257,73	213,03	126,35	100,57	71,87	56,88	37,01	35,30	49,18	1101,32	274,17	1318,35
5%	192,10	568,42	382,73	371,02	343,14	187,33	157,02	123,46	117,68	66,83	74,40	82,24	1389,69	384,37	1647,15
Distribucion	G	LN	PearsonIII	G	LN	G	G	PearsonIII	PearsonIII	G	PearsonIII	G	LN	LN	G
Valor Chi2	16,300	7,414	7,690	10,329	9,224	11,614	11,462	15,757	9,557	14,014	17,900	25,862	10,090	13,414	9,929

16 LAS ACHIRAS

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	37,13	93,31	44,43	45,91	22,69	0,00	2,95	0,01	0,00	0,00	0,00	531,50	105,87	696,82
85%	13,03	59,97	122,60	68,92	65,01	34,27	17,71	6,64	0,46	0,00	0,00	5,52	620,87	136,52	800,30
50%	59,04	135,69	195,18	145,60	117,59	69,22	59,81	26,42	21,59	9,02	15,62	25,61	817,83	204,05	1028,38
20%	110,84	263,34	284,72	267,26	190,27	122,49	107,21	81,09	96,10	28,00	38,98	48,22	1039,56	280,08	1285,12
5%	178,03	495,85	408,26	477,15	301,18	211,18	168,70	236,45	163,95	60,12	71,27	77,54	1327,19	378,70	1618,16
Distribucion	G	LN	LN	LN	LN	LN	G	LN	LogPearIII	PearsonII	PearsonIII	G	G	G	G
Valor Chi2	21,367	7,624	12,767	11,729	11,090	6,167	10,233	9,329	14,624	15,233	15,462	10,462	6,700	9,290	8,757

17 TUCAPEL (RETEN)

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	3,36	105,63	77,22	77,92	30,49	0,00	10,74	0,00	0,00	0,00	0,00	810,52	172,09	1140,55
85%	26,24	72,53	169,91	133,89	113,15	47,95	27,80	18,62	0,00	0,00	0,00	10,79	941,64	215,65	1262,45
50%	95,02	224,96	295,67	243,95	190,78	103,66	94,18	47,53	36,46	25,36	23,49	35,79	1215,68	311,65	1531,12
20%	172,44	396,56	413,91	346,70	278,18	193,86	168,90	101,71	86,42	54,19	65,21	63,93	1495,90	419,72	1833,57
5%	272,88	619,15	541,19	456,68	391,54	352,36	265,82	210,25	154,97	91,58	127,24	100,44	1823,37	559,91	2225,90
Distribucion	G	G	PearsonIII	PearsonII	G	LN	G	LN	PearsonIII	G	PearsonIII	G	LN	G	G
Valor Chi2	16,748	7,129	7,662	6,167	11,995	8,614	8,529	6,433	17,900	14,367	14,557	17,700	8,633	17,595	7,357

18 CHOLGUAN

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	8,85	0,00	106,61	39,83	88,94	23,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,25	575,09	90,23	870,49
85%	17,58	47,24	143,19	95,31	97,37	39,65	15,90	0,75	0,15	0,00	0,06	6,49	769,37	142,25	1007,57
50%	56,62	187,67	236,68	217,60	146,78	90,93	73,32	44,82	13,08	19,64	6,69	25,95	1100,34	258,26	1309,68
20%	146,32	345,76	355,94	355,25	238,62	166,89	137,95	94,44	109,21	59,06	75,31	58,53	1369,10	363,00	1649,76
5%	362,14	550,83	525,44	533,82	386,82	282,57	221,80	158,80	323,07	110,19	307,81	108,52	1625,59	454,48	2090,91
Distribucion	LN	G	LN	G	PearsonIII	LogPearIII	G	G	LogPearIII	G	LogPearIII	PearsonII	N	LogPearIII	G
Valor Chi2	13,414	6,081	10,748	9,224	13,024	13,795	11,157	13,290	13,090	13,529	17,414	9,557	10,462	10,129	10,157

19 PEMUCO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	45,45	78,74	53,70	56,11	7,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	585,53	99,91	685,48
85%	14,25	72,15	122,55	95,09	81,99	32,69	20,99	3,19	0,00	0,00	0,00	4,38	694,63	136,53	880,11
50%	66,20	158,54	220,65	186,84	145,33	87,95	69,93	38,08	28,22	9,91	15,27	22,80	935,07	217,25	1224,60
20%	128,36	300,47	325,03	283,62	216,94	150,15	125,01	77,37	68,34	34,90	47,71	44,48	1205,74	308,12	1482,61
5%	207,47	553,09	447,99	396,93	302,53	230,85	196,47	128,33	120,40	79,68	97,42	71,81	1556,86	425,99	1685,72
Distribucion	PearsonIII	LN	PearsonIII	PearsonII	LogPearIII	G	G	G	G	PearsonII	PearsonIII	PearsonII	G	G	LogPearII
Valor Chi2	17,090	9,024	11,614	14,557	6,729	11,957	11,462	16,833	16,148	13,329	20,614	13,890	8,500	12,757	7,662

20 LAJA

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	35,97	67,77	32,90	41,06	4,41	3,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	478,40	62,65	640,04
85%	9,60	59,43	101,30	90,25	60,61	21,74	9,81	1,56	0,00	0,10	0,00	1,80	620,61	81,81	755,03
50%	49,53	139,79	200,92	187,95	117,71	59,95	40,55	27,96	13,45	5,32	4,41	12,98	878,09	143,48	1008,47
20%	104,56	279,97	350,36	267,29	201,77	102,97	93,51	65,54	32,26	28,89	20,93	34,65	1101,71	228,89	1293,77
5%	180,77	543,22	595,66	343,01	337,48	158,77	175,97	118,55	56,65	81,55	52,06	70,27	1327,67	347,51	1663,86
Distribucion	PearsonIII	LN	LN	N	LN	G	PearsonII	PearsonIII	G	PearsonII	PearsonIII	PearsonII	PearsonIII	PearsonIII	G
Valor Chi2	14,557	15,348	11,157	14,814	7,757	6,424	13,262	13,824	27,014	15,729	17,824	17,557	8,214	7,729	10,167

21 CHILLANCITO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	27,07	59,98	53,11	36,71	19,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	493,55	51,82	648,18
85%	5,00	50,16	108,01	93,07	56,49	30,65	10,15	3,58	0,00	0,00	0,00	0,00	618,80	78,47	759,76
50%	51,82	133,56	213,88	181,15	117,75	66,00	46,08	21,26	8,28	5,85	5,82	14,96	877,45	137,23	1005,67
20%	104,54	277,62	333,05	280,30	213,79	123,04	86,54	51,20	32,72	21,50	23,99	37,22	1128,75	203,36	1282,49
5%	172,92	530,34	487,65	408,91	377,74	222,95	139,02	97,39	77,49	48,31	56,18	66,11	1399,93	289,16	1641,58
Distribucion	G	LogPearIII	G	G	LN	LN	G	PearsonIII	PearsonIII	PearsonII	PearsonIII	G	LogPearIII	G	G
Valor Chi2	12,824	11,357	17,148	13,700	15,614	10,748	18,129	7,014	13,490	18,557	17,414	22,214	5,033	8,414	10,557

Cuadro Nº3 - 3. (Continuación) Análisis de Frecuencia Precipitaciones Mensuales

22 SAN IGNACIO DE PALOMARES

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	30,40	63,11	57,05	48,52	20,02	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,54	557,80	55,08	700,77
85%	0,00	52,99	116,23	100,82	70,15	31,19	6,05	1,61	1,45	0,01	0,00	1,04	672,79	81,45	818,25
50%	57,10	136,52	233,30	197,29	131,45	66,40	50,02	25,30	11,35	1,11	2,72	9,31	925,85	145,24	1077,16
20%	126,46	294,38	365,08	305,88	218,90	122,65	99,53	56,34	37,22	22,14	20,08	30,13	1199,89	215,34	1368,62
5%	216,43	612,94	536,03	446,75	356,13	220,30	163,75	98,08	85,31	206,54	55,77	68,27	1536,76	295,91	1746,70
Distribucion	G	LN	G	G	LN	LN	G	PearsonIII	PearsonIII	LogPearII	PearsonIII	PearsonII	LN	LogPearIII	G
Valor Chi2	12,948	9,148	15,690	10,967	6,614	7,529	13,662	17,557	13,824	17,329	18,700	13,414	7,262	6,357	7,348

23 NONGUEN ESBBIO

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	54,46	134,11	77,88	52,04	13,64	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	5,54	704,39	87,54	875,34
85%	5,05	83,24	175,03	126,28	91,99	40,48	15,73	0,00	1,35	0,04	0,08	7,63	833,42	138,30	1025,36
50%	70,86	171,46	275,49	232,95	178,29	99,62	70,34	40,40	18,99	4,13	6,14	18,80	1109,95	230,83	1342,48
20%	144,93	308,32	398,19	353,03	267,29	166,21	131,81	90,79	62,22	53,23	56,21	38,77	1400,72	311,78	1670,87
5%	241,02	539,79	565,94	508,80	369,85	252,58	211,55	156,16	140,69	261,11	194,03	70,43	1749,01	394,07	2058,93
Distribucion	G	LN	LN	G	PearsonIII	G	G	G	PearsonIII	LogPearII	LogPearIII	PearsonII	LN	PearsonIII	LN
Valor Chi2	8,748	7,500	13,824	13,624	5,929	11,195	14,814	22,890	8,757	9,481	11,767	13,214	5,862	5,929	8,995

24 CARRIEL SUR

Prob Exced	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abr-sep	oct-mar	anual
95%	0,00	40,98	86,54	70,75	54,63	13,59	4,89	5,91	0,00	0,00	0,00	0,75	596,50	85,41	747,56
85%	9,69	64,21	126,83	100,14	76,69	32,86	10,75	7,49	0,00	0,12	0,11	2,11	685,84	112,29	845,53
50%	56,68	137,98	215,62	180,99	136,69	75,32	41,07	22,70	15,05	5,98	5,34	12,37	882,74	171,53	1061,44
20%	109,57	256,79	315,58	292,67	218,55	123,13	122,02	56,05	47,16	39,50	34,16	52,04	1104,40	238,22	1304,50
5%	178,18	464,55	445,23	463,01	342,04	185,13	344,93	113,90	100,46	105,96	90,04	205,01	1391,93	324,73	1619,78
Distribucion	G	LN	G	LN	LN	G	LN	PearsonIII	PearsonIII	LogPearII	LogPearIII	LN	G	G	G
Valor Chi2	10,433	9,795	13,929	12,995	6,729	10,624	10,290	13,824	12,490	7,757	10,614	10,748	6,424	7,262	8,529

3.2. Fluviometría

3.2.1 Introducción

El análisis fluviométrico de la zona de estudio tuvo por objeto generar series estadísticas de caudales medios mensuales para el período 1961/62 - 2010/11, en los distintos cauces del área de estudio que cuentan con control fluviométrico, con el objeto de obtener los caudales de entrada a la cuenca del río Bío-Bío, necesarios para el cálculo del balance hídrico y la cuantificación de las recargas al acuífero. Igualmente, las estadísticas obtenidas permitirán generar caudales en cuencas no controladas y calibrar el modelo de balance.

Se seleccionaron un total de 19 estaciones, considerando su distribución en el área de estudio y la extensión de sus estadísticas.

3.2.2 Recopilación de la información disponible

Se recopilaron las estadísticas de caudales medios mensuales observadas de las estaciones seleccionadas, que se indican en el Cuadro Nº 3-4, y cuya ubicación se consigna en la Figura Nº 3-2. Los datos recopilados en la Dirección General de Aguas, corresponden a las series base de este estudio, y se presentan en el Anexo Nº3-6.

Cuadro Nº3-4 Estaciones Fluviométricas Seleccionadas

N°	Estación	Coordenadas UTM (m)		Período
		N	E	
1	Río Lonquimay antes Junta Río Bío-Bío	5.743.371	304.861	1985-2011
2	Río Lirquén en Cerro El Padre	5.814.855	247.662	1961-2011
3	Río Bío-Bío en Rucalhue	5.822.332	244.245	1961-2011
4	Río Duqueco en Villucura	5.839.240	232.042	1961-2011
5	Río Rucue en Camino Antuco	5.863.374	252.268	1983-2011
6	Río Laja en Tucapel	5.869.822	235.109	1961-2011
7	Río Duqueco en Cerrillos	5.838.925	217.098	1961-2011
8	Río Mulchén en Mulchén	5.819.930	213.535	1961-2009
9	Río Bureo en Mulchén	5.820.629	215.010	1961-2009
10	Río Renaico en Longitudinal	5.805.924	201.804	1982-2011
11	Río Mininco en Longitudinal	5.803.968	201.377	1963-2011
12	Río Malleco en Collipulli	5.792.537	198.144	1961-2011
13	Río Vergara en Tijeral	5.817.789	181.063	1964-2011
14	Río Bio-Bío en Coihue	5.836.984	182.976	1983-2011
15	Río Nicodahue en Pichún	5.847.021	168.266	1988-2011
16	Río Guaqui en Diuquín	5.859.864	173.733	1985-2003
17	Río Laja en Puente Perales	5.873.000	186.112	1961-2010
18	Río Claro camino Yumbel Estación	5.886.049	185.028	1985-2000
19	Río Bío-Bío en Desembocadura	5.915.012	135.367	1970-2011

FIGURA Nº3-2 Ubicación de estaciones Fluviométricas

3.2.3 Corrección, Relleno y Extensión de Estadísticas

Se realizaron correlaciones de caudales medios mensuales entre estaciones vecinas, con el objeto de detectar puntos anómalos que debieran ser corregidos. Estos puntos fueron eliminados de las estadísticas, conformándose así series mensuales depuradas, con correlaciones que luego fueron utilizadas para el relleno de los meses sin información y para la corrección de los puntos defectuosos.

En el Anexo Nº3-7 se presentan las correlaciones realizadas, y en el Anexo Nº3-8 la estadísticas rellenadas y corregidas de la estaciones seleccionadas.

3.2.4 Análisis de Frecuencia de las Estadísticas

Para las series de caudales medios mensuales, semestrales y anuales definitivas de cada estación, se efectuaron análisis de frecuencia analíticos, ajustando las distribuciones Normal, Gumbel, Pearson III, Log-Normal, Log-Pearson III y Log-Normal III, considerando 5 probabilidades de excedencia : 5%, 20%, 50%, 85% y 95%.

Como se señaló anteriormente, la bondad del ajuste se determinó en base a un Test Chi-Cuadrado, agrupando los datos en 5 intervalos. La distribución de mejor ajuste es la que entrega el menor valor de Chi-Cuadrado.

En el Anexo Nº3-9 se presenta el detalle de los cálculos realizados, y en la Figura Nº3-3 se presentan las curvas de variación estacional. Estas curvas permiten identificar un régimen pluvio-nival solo en las cuencas de cabecera: Río Lonquimay antes Junta Bío-Bío y Río Bío-Bío en Rucalhue. En el resto de las cuencas, el régimen es pluvial, pues la mayor parte de la superficie aportante se encuentra sobre la cota cero.

Por otra parte, se considera que la estación Mininco en Longitudinal, cuyo régimen de escorrentía es netamente pluvial resulta confiable para la generación de caudales en cuencas pluviales, dada las buenas correlaciones establecidas y la extensión de los datos observados. Además la pequeña magnitud de su cuenca aportante, igual a 416 km2, le dan poca variabilidad espacial a las precipitaciones en esa cuenca, lo que le da menor incertidumbre a una transposición por unidad de superficie y por unidad de precipitación media anual.

Figura Nº3-3 Curvas de Variación Estacional de Caudales

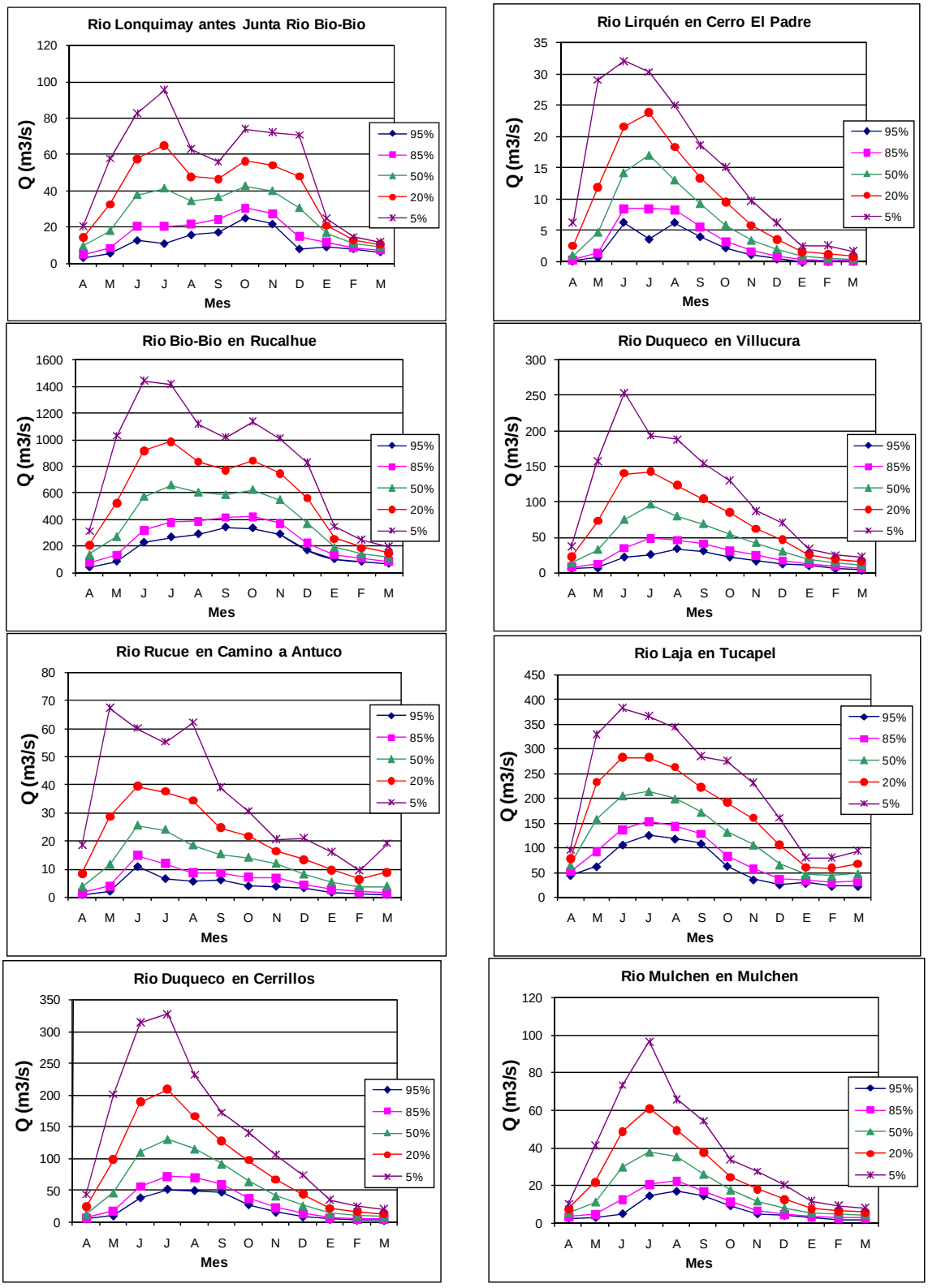


Figura N°3-3 (Continuación) Curvas de Variación Estacional de Caudales

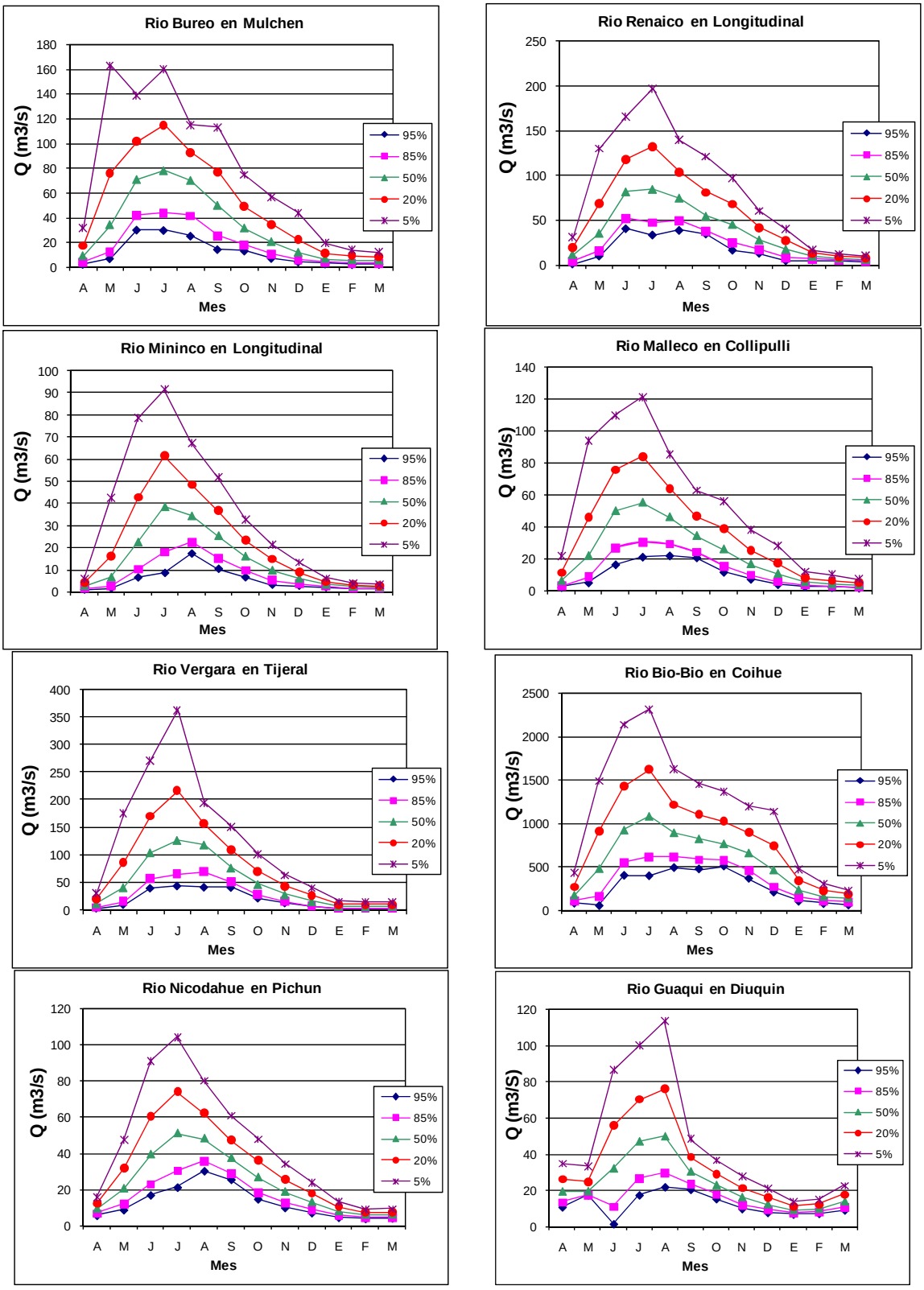
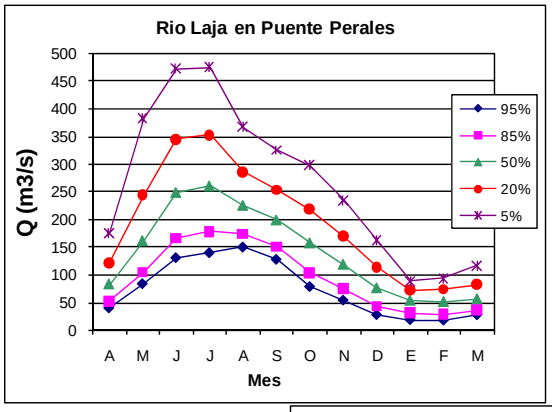
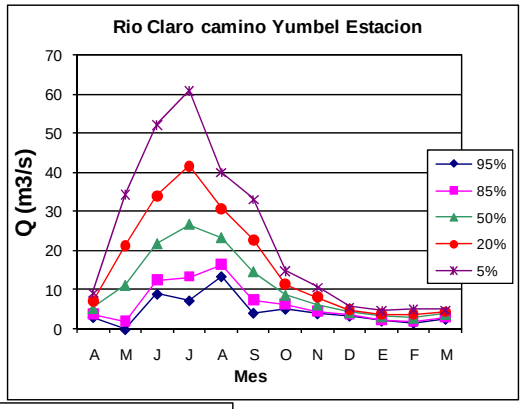
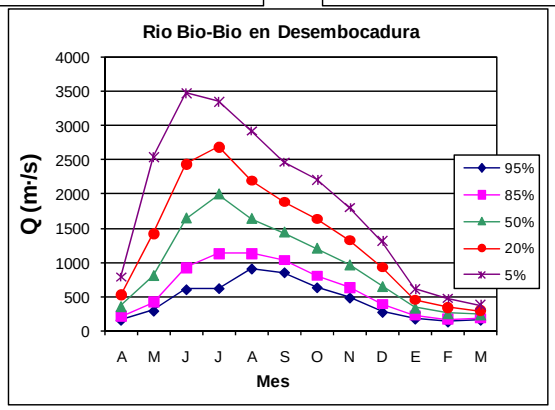


Figura N°3-3 (Continuación) Curvas de Variación Estacional de Caudales







4. GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA CUENCA BÍO-BÍO

4.1. Antecedentes Generales

En esta etapa del estudio se recopiló la información de la geología y geomorfología del área de interés, que se encontraba disponible, con el objeto de estructurar un mapa geológico a escala 1:250.000 que permitiera el trazado detallado del contacto roca-relleno.

El área de estudio se encuentra emplazada en la VIII Región del Bío-Bío y la IX Región de la Araucanía y comprende la cuenca hidrográfica del río Bío-Bío.

4.2. Metodología y Antecedentes Recopilados

Para alcanzar el objetivo señalado se siguieron los pasos metodológicos que a continuación se indican:

- Recopilación de antecedentes públicos. Este trabajo se fundamenta principalmente en los mapas geológicos estructurados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

- Luego se digitalizaron los Mapas Geológicos Preliminares de Chile denominados:

  - Hoja Concepción-Chillan, escala 1:250.000, Región del Bío-Bío, elaborada por Aníbal Gajardo el año 1981.
  - Hoja Los Ángeles-Angol, escala 1:250.000, Región del Bío-Bío, elaborada por Fernando Ferraris el año 1981.
  - Hoja Arauco-Lebu, escala 1:250.000, Región del Bío-Bío, elaborada por Fernando Ferraris y Ramiro Bonilla el año 1981.

- Para la zona andina se utilizaron las Cartas Geológicas de Chile, escala 1:250.000 denominadas:

  - Hoja Laguna del Maule, de las regiones del Maule y del Bío-Bío, del año 1984, elaborada por Jorge Muñoz y Hans Niemeyer.
  - Hoja Laguna de la Laja, Región del Bío-Bío, elaborada por Hans Niemeyer y Jorge Muñoz el año 1983.
  - Hoja Curacautín, regiones de la Araucanía y del Bío-Bío, elaborada por Manuel Suárez y Carlos Emparan el año 1997.

- Además se utilizó el Mapa Geológico de Chile en formato digital, del SERNAGEOMIN (2003), escala 1:1.000.000.

Por último se consultaron diversos estudios de la Dirección General de Aguas y memorias de la Universidades de Chile y de Concepción. Entre estos

documentos cabe destacar el informe realizado por CADE-IDEPE a la DGA el año 2004, denominado “Cuenca del río Bío-Bío” de acuerdo al diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.

Como suele ocurrir en los casos en que se cuenta con información de diversos estudios que se pretende unificar, los calces laterales por lo general, son poco coincidentes. Para tener una mayor claridad en esta situación, se optó por consultar directamente al Sr. Aníbal Gajardo, Geólogo del SERNAGEOMIN y autor de la Carta Concepción-Chillán, quien gentilmente aclaró las diferencias fundamentales detectadas entre las distintas cartas.

4.3. Geomorfología

Las regiones del Bío-Bío y de la Araucanía cuentan con cinco unidades morfológicas mayores que de oeste a este son las siguientes: Planicies litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Central, La Montaña (o Precordillera) y la Cordillera Andina, (Ver Figuras 3-1, 3-2 y 3-3). También existe una unidad morfológica menor que se incluye en las anteriores, denominada Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional.

Las planicies litorales, se distribuyen en forma discontinua de norte a sur, con una altura variable entre 10 a 50m s.n.m. Las de mayor desarrollo están en el sector meridional, en la costa de la ciudad de Concepción y en las localidades de San Pedro y Escuadrón.

Los Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional se distribuyen aledaños al curso distal del río Bío-Bío, cercano a su desembocadura y corresponde a llanos de sedimentación fluvial de arenas negras provenientes de la actividad del volcán Antuco, que se depositan finalmente en las playas al norte del río por deriva litoral. Mientras que al sur de la desembocadura del río Bío-Bío las arenas son blancas por la alteración del intrusivo granítico de la costa.

La Cordillera de la Costa corresponde a la Cordillera de Nahuelbuta, que constituye una unidad morfológica importante, con alturas que sobrepasan los 1.000 ms.n.m. Al oeste de la misma y en el sector noroccidental del área, se encuentra un resto de la planicie costera de Arauco-Lebu. La vertiente oriental de la cordillera es abrupta y se encuentra bordeada por los ríos Vergara y Bío-Bío, este último la atraviesa en el sector Nacimiento-Santa Juana. Esta cordillera se caracteriza por un lomaje moderado que deja una expedita comunicación entre la depresión central y la costa.

Por su parte la Depresión Intermedia corresponde a una “planicie fuertemente ondulada, con un relieve local que sobrepasa los 200m” (Fuenzalida, 1965). Hacia el sur del río Bío-Bío, ésta se estrecha paulatinamente con relieves y lomajes menores, hasta quedar en contacto con la Cordillera de Nahuelbuta por el oeste. Se encuentra intensamente regada por los cursos fluviales de la región. En esta sección de la cuenca se presentan depósitos fluvio–glacio–

volcánicos arrastrados desde la Cordillera de Los Andes. Causados por fenómenos de transporte de las aguas o por aluviones; por efecto de avance y retroceso de glaciares o bien por la actividad volcánica de la zona. Estos materiales (bloques, rodados, arenas, limos y arcillas) se distribuyen en la cuenca en forma de cono.

El empalme entre la Cordillera de Los Andes y los Valles Longitudinales se estructura a través de la llamada "La Montaña" o Precordillera, cuya altura fluctúa entre los 300 y 850m s.n.m. Esta unidad tiene origen sedimentario y forma una acumulación caótica de materiales glaciales, volcánicos y fluviales dispuestos al pie de la cordillera. Se caracteriza por laderas abruptas, ríos encajonados, materiales arcillosos y otros muy permeables como rodados. Es un complejo sistema de conos superpuestos, siendo los más antiguos de origen glaciovolcánico, luego fluviovolcánico y las más recientes corresponde a hidrocineritas (cenizas volcánicas transportadas por el agua). Estos depósitos están marcados por bruscos procesos de acumulación y erosión desde la cordillera Andina.

La Cordillera Andina está representada en la zona de estudio por sus contrafuertes más occidentales, que constituyen un relieve abrupto de difícil acceso. Sus alturas promedio fluctúan entre los 1.700 y 1.800m s.n.m. Se encuentra disectada por numerosos cursos menores y por grandes ríos (Bío-Bío. Duqueco, Laja y Cholguán), que la cruzan y constituyen grandes valles. En el sector cordillerano de la cuenca aparecen cadenas transversales y otras en forma de bisel o forma de arco montañoso. También se reconoce una hoya lacustre en las nacientes del río Bío-Bío (lago Gualletue). Una segunda característica es la ocupación de sus altos valles por recubrimiento glaciovolcánico.

En la Cordillera Principal se ubican numerosos volcanes activos, que de sur a norte se denominan Lonquimay, Tolguaca, Callaqui y Antuco. Además existe un volcán inactivo, el Sierra Nevada. Sus alturas máximas varían entre 1.800 a 3.100m s.n.m. Se presenta además, desde las nacientes del río Bío-Bío, el valle que forma este río, de extensión norte-sur (50 Km. aprox.), limitada aproximadamente entre el río Rahue por el norte y el cerro Bateamahuida por el sur.

En la unidad Cordillera Andina se advierte la presencia de glaciares que cubren una reducida superficie y que se asocian a las cumbres de los estrato-volcanes (Llaima, Sierra Nevada y Lonquimay). Se observan además, numerosas lagunas, de diversos tamaños y formas, embalsadas en depresiones por depósitos morrénicos, emplazadas en circos glaciares o debido al tectonismo de la zona. La más importante dentro de la cuenca del río Bío-Bío corresponde a la Laguna de la Laja con un área de 128 km2.

A continuación, en las Figuras 4-1,4-2 y 4-3, se pueden observar las unidades morfoestructurales previamente descritas. Las dos primeras corresponden a los mapas geomorfológicos de las regiones VIII y IX respectivamente. La Figura 4-

3, corresponde a un mapa 3D de la cuenca del Bío-Bío, construido a partir de las curvas IGM con cotas cada 25m, mediante el Software Vertical Mapper.

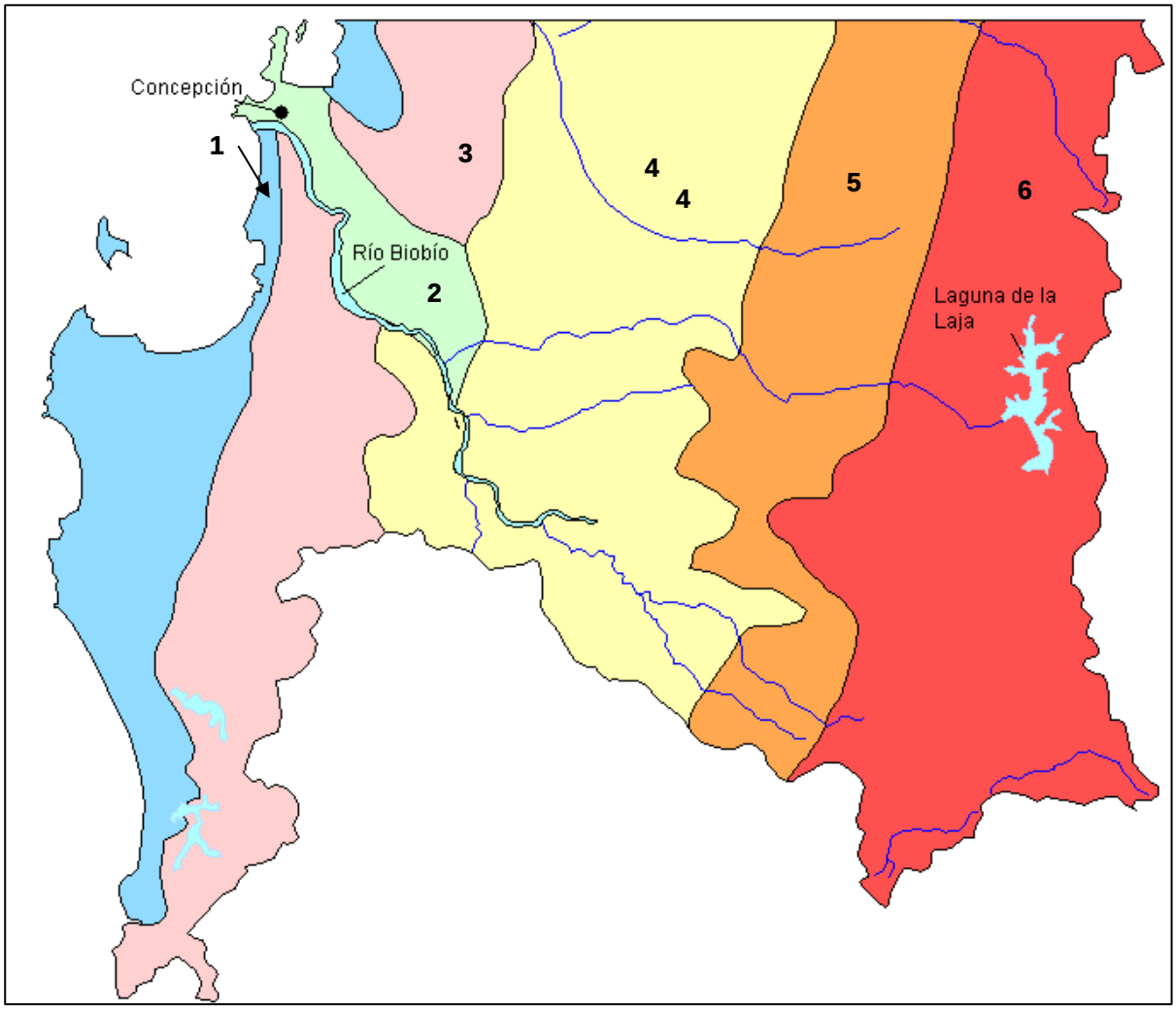


Figura 4-1. Geomorfología de la región del Bío-Bío. Las unidades morfoestructurales que se observan corresponden a: 1. Planicies litorales. 2. Llanos Fluviales. 3. Cordillera de la Costa. 4. Depresión Central. 5. 'La Montaña' o Precordillera. 6. Cordillera Andina. Fuente: Börgel, 1983.

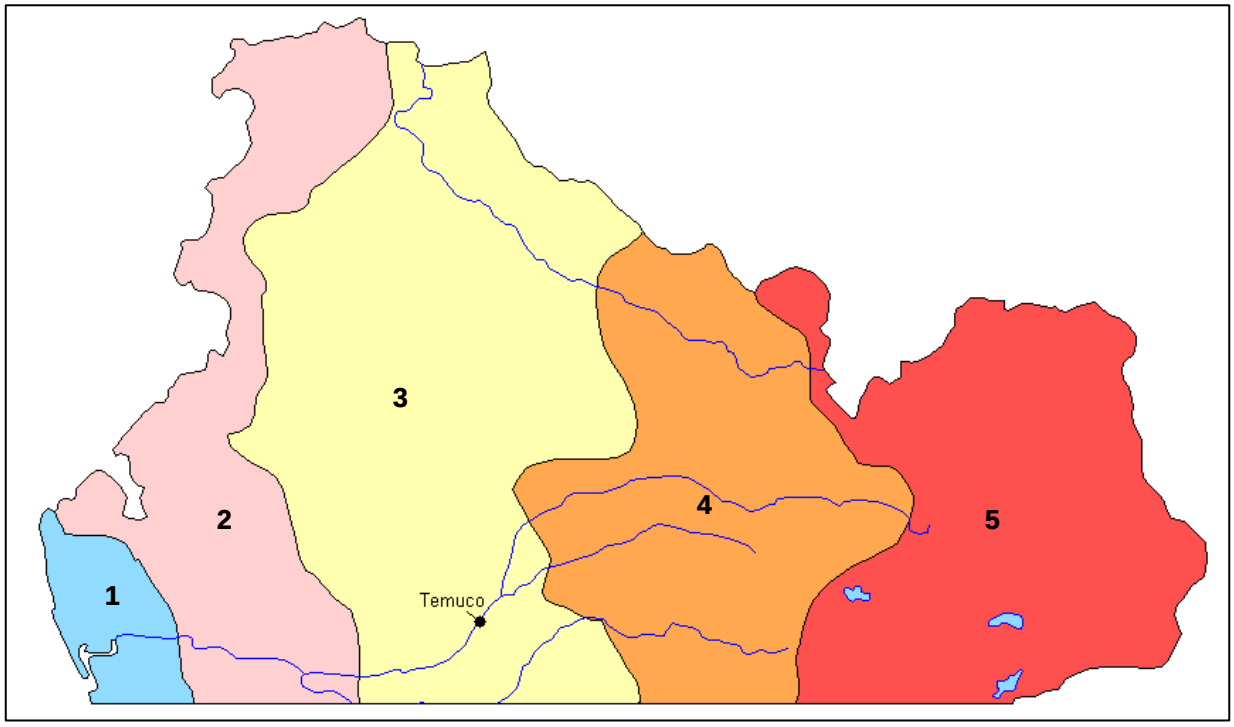


Figura 4-2. Geomorfología de la región de la Araucanía (hasta el límite sur de la cuenca del Bío-Bío). Las unidades morfoestructurales que se observan corresponden a: 1. Planicies litorales. 2. Cordillera de la Costa. 3. Depresión Central. 4. 'La Montaña' o Precordillera. 5. Cordillera Andina. Fuente: Börgel, 1983

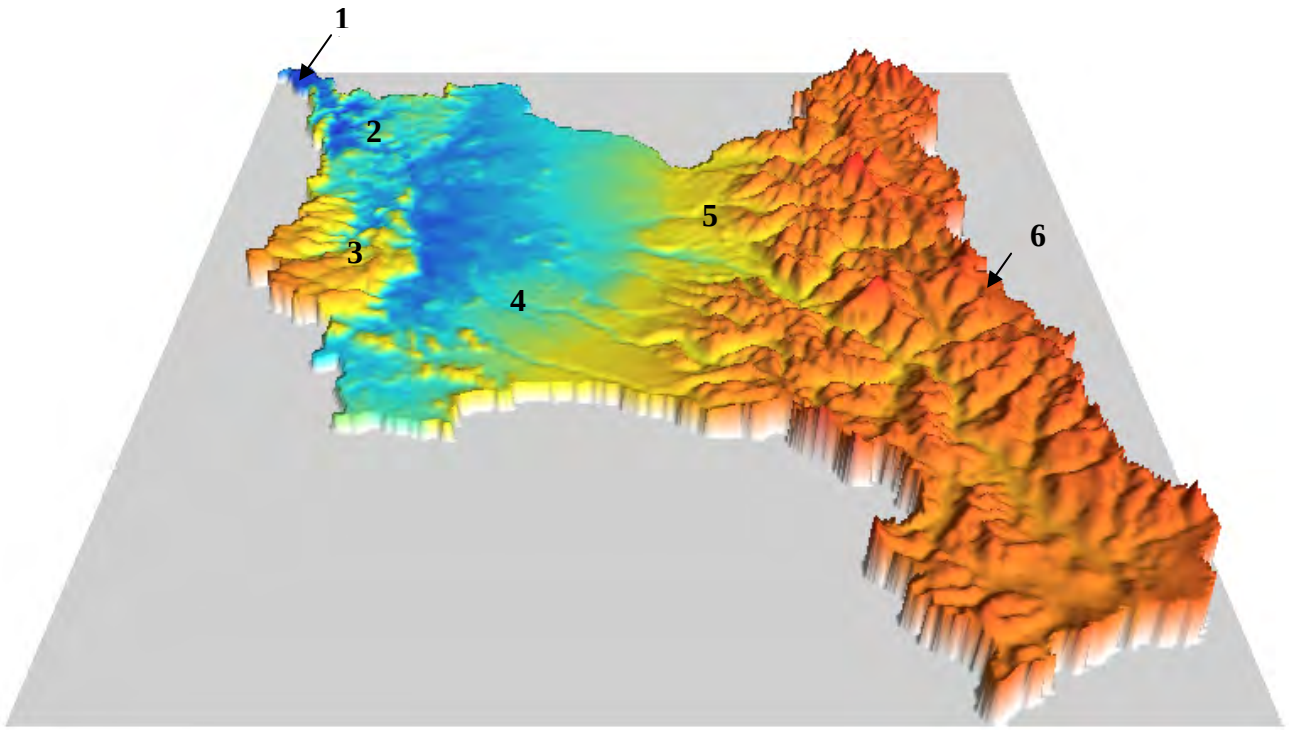


Figura 4-3 . Imagen 3D de la cuenca del Río Bío-Bío mediante el Software Vertical Mapper. Las unidades morfoestructurales que se observan corresponden a: 1. Planicies litorales. 2. Llanos Fluviales. 3. Cordillera de la Costa. 4. Depresión Central. 5. 'La Montaña' o Precordillera. 6. Cordillera Andina

4.4. Geología

4.4.1 Antecedentes Generales

Estratigráficamente, las rocas más antiguas reconocidas en el área de estudio corresponden a rocas metamórficas paleozoicas, que se distribuyen principalmente en el sector occidental de la Cordillera de Nahuelbuta y conforman las series oriental y occidental según Hervé, (1977), depositadas probablemente en el paleozoico.

Discordantemente sobre ellas se exponen los Estratos de Pocillas-Coronel de Maule-Quirihue y rocas de la Formación Santa Juana, asignadas al Triásico y que incluyen sedimentitas clásticas y volcanitas, expuestas en el sector de Pocillas-Coronel de Maule-Quirihue, y sedimentitas marinas y continentales, en el extremo noroccidental de la cuenca del Bío-Bío.

En la Cordillera Andina el Jurásico se expone mediante la Formación Nacientes del Bío-Bío, correspondiente a una secuencia sedimentaria marina y volcánica marina- continental.

El lapso Jurásico-Cretácico Inferior, está representado por rocas volcano-clásticas, en la zona precordillerana de los Estratos Polcura-Cholguan. Durante el Cretácico superior ocurre la Formación Quiriquina, en la zona costera, correspondientes a rocas transgresivas marinas sobre el basamento metamórfico, y en la Cordillera Andina por potentes secuencias volcano-sedimentarias de la Formación Río Blanco.

La transición cretácica-paleógena se evidencia mediante el Complejo Vizcacha-Cumilao, que aflora en la Cordillera Andina y corresponde a secuencias principalmente volcánicas.

Las rocas terciarias corresponden a sedimentitas marinas y continentales (Formación Curanilahue), con mantos de carbón en la región costera, y a sedimentitas (Formación Cura-Mallín) en la Cordillera Andina. Sobre la unidad anterior se disponen, discordantemente, potentes coladas de lavas andesítico-basálticas atribuidas al Plioceno-Pleistoceno y sobre estas últimas se disponen volcanes y lavas (Pleistoceno Superior-Holoceno), conformadas por más de 1.000m de lavas andesíticas a basálticas y depósitos piroclásticos, calcoalcalinos, bien conservados. Desde el Plioceno, en la Cordillera Andina, se produce el depósito de gruesos espesores de lavas que constituyen, durante el Pleistoceno, un verdadero “plateau”. Sincrónica a esta actividad volcánica se deposita, en la Depresión Central, una secuencia de sedimentos finos, tobáceos, la que constituye una unidad importante en el desarrollo de la morfología posterior.

Durante el Pleistoceno-Holoceno, las glaciaciones afectaron el área con la acumulación de potentes secuencias sedimentarias glacio-lacustres y morrénicos en la Depresión Central y Cordillera Andina (dando forma a 'La Montaña' o precordillera).

Finalmente, procesos eólicos, fluviales, volcánicos modernos y de erosión determinaron la acumulación y movimiento de materiales hasta alcanzar la morfología actual. Además de lo anterior, en la zona costera, existen depósitos de terrazas marinas desarrollados probablemente durante el Pleistoceno y Holoceno. También la mano del hombre ha conseguido variar, en parte, estos procesos, con el aumento de la erosión debido a la explotación de los bosques y la agricultura.

Las rocas intrusivas expuestas en superficie se han agrupado en cuatro fases magmáticas, desarrolladas entre el Carbonífero-Pérmico, el Jurásico, el Cretácico y el Terciario.

4.4.2 Rocas Estratificadas

A continuación se describen las unidades líticas estratificadas del área estudiada, ordenadas cronológicamente.

Pz4a Serie Occidental del Basamento Metamórfico (Silurico-Carbonífero)

Esta serie fue definida por Aguirre et al., (1972) en un estudio sobre le basamento cristalino de la Cordillera de la Costa del centro y sur de Chile. Comprende micaesquistos, metabasitas, metacherts y serpentinitas, que afloran entre Pichilemu y Valdivia. Las pizarras, filitas y metareniscas de ésta unidad presentan un metamorfismo de bajo gradiente presión/temperatura.

Pz4b Serie Oriental del Basamento Metamórfico (Silurico-Carbonífero)

Las rocas metamórficas que se distribuyen en la región más occidental del área, como una franja prácticamente continua de dirección general NNE-SSW, corresponden según Aguirre et al. (1972) a la serie oriental, compuesta principalmente por esquistos, filitas, gneises y metareniscas, cuyo grado de metamorfismo varia entre las facies esquistos verdes y granulita (alto gradiente presión/temperatura), y se caracterizan por la aparición sucesiva, de poniente a oriente, de bíotitas, andalucitas y sillimanitas según el grado creciente de metamorfismo.

DC4 Metareniscas y filitas (Devónico-Carbonífero)

Corresponden a metareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos, metaconglomerados y metaturbiditas con facies de 'mélange'.

Tr1m Estratos de Pocillas-Coronel del Maule_ Quirihue (Triásico Superior)

Se distribuyen en el sector noroccidental de la Cordillera de la Costa, en forma de afloramientos prácticamente continuos, entre los 36°05' y los 36°22' de latitud sur. Los autores Moreno et al. (1976) y Lagno (1979) reconocen en estos estratos las siguientes litologías: lutitas pizarrosas, areniscas, lavas y brechas andesíticas, conglomerados de cuarzo, alternancia de andesitas porfídicas, areniscas cuarcíferas con intercalaciones de conglomerados de cuarzo, brechas volcánicas, riolítas y cherts.

Trsj Formación Santa Juana (Triásico Superior)

Corresponden a secuencias continentales y marinas, reconocidas en el curso inferior del río Bío-Bío. Sobreyace, en discordancia de erosión, al basamento granítico. Además, se encuentra en contacto por falla sobre la Serie Oriental del Basamento Metamórfico y, parcialmente, también lo sobreyace. Se divide en cuatro miembros de los cuales la litología principal corresponde a conglomerados de cuarzo, arcosas continentales, areniscas conglomerádicas, areniscas finas, lutitas, areniscas gruesas y arcillolitas de origen marino y brechas de origen continental.

Pz-Trhi Estratos de Huinucal Ivante (Pre-Jurásico)

Corresponde a una secuencia de 70m de espesor de metasedimentitas foliadas, como lutitas y metareniscas, que forman una gran inclusión en rocas graníticas del Grupo Plutónico Gualletué. Aflora en los lomajes adyacentes a la ribera sureste de la laguna de Gualletué.

Jnb Formación Nacientes del Bío-Bío (Jurásico Inferior a Superior)

Este nombre se utiliza para designar una secuencia sedimentaria marina y volcánica marina y continental, constituida, en su parte inferior y media, por rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas, y lavas basálticas, de ambiente marino y, en su parte superior, por rocas volcánicas de ambiente subaéreo en su mayor parte (De La Cruz y Suárez, 1997). Esta unidad presenta un desarrollo litológico vertical, que caracteriza un ciclo marino regresivo de edad jurásica. La formación no presenta base expuesta. En el sector de la Laguna de Icalma y en la Cordillera de Lonquimay, está intruida por granitoides del Grupo

Plutónico Gualletué, de edad jurásica superior-cretácica superior. Subyace con discordancia angular y de erosión a la Formación Cura-Mallín y al Complejo Vizcacha-Cumilao. En esta formación se distinguen tres miembros, donde se diferencian los basaltos submarinos y turbiditas, de las turbiditas volcanoclásticas marinas y de las sedimentitas volcanoclásticas, rocas calcáreas marinas y rocas volcánicas subaéreas con niveles marinos en la base.

JKpch Estratos de Polcura-Cholguan (Jurásico Superior-Cretácico Inferior)

Esta unidad sedimentaria comprende fragmentos de rocas volcánicas subangulares a subredondeadas y restos de cristales (plagioclasa, piroxeno y cuarzo). Incluye además, tobas brechosas de cemento vítreo con fragmentos líticos, volcánicos, plagioclasas y piroxenos. Aflora en la parte suroriental del mapa geológico (ver plano 4-1).

Kq Formación Quiriquina (Cretácico Superior)

Esta unidad geológica está constituida por areniscas conglomerádicas, areniscas finas y medias, y arcillolitas marinas, de color amarillo y verde, que sobreyacen, en discordancia angular y de erosión a las filitas y esquistos del Basamento Metamórfico y subyacente, también en discordancia, a la Formación Pilco (que aflora fuera del mapa geológico presentado en plano 4-1 anexo).

KTvc Complejo Vizcacha-Cumilao (Cretácico-Paleógeno)

Corresponden a secuencias principalmente volcánicas, compuestas por lavas andesíticas macizas y subordinadamente basálticas (que en ocasiones podrían ser cuerpos intrusitos) y rocas piroclásticas, generalmente alteradas y tectonizadas, con intercalaciones sedimentarias clásticas. El nombre de esta unidad alude a las dos localidades, el cerro Vizcacha y el estero Cumilao, donde se exponen litologías frecuentes en este complejo. En algunas localidades, se ha reconocido que rocas asignadas a esta unidad infrayacen discordantemente a la Formación Cura-Mallín y a lavas basálticas columnares asignadas a la Formación Malleco.

Ec Formación Curanilahue (Eoceno Inferior)

Definida por Muñoz Cristi el año 1959, aflora en el sector costero de Lota-Coronel y hacia el SSO, fuera del área de estudio, en el sector de Curanilahue-Pilpilco. Corresponde a una secuencia de areniscas y limolitas continentales, con carbón en su miembro superior e inferior. El miembro medio corresponde a areniscas de origen marino.

Ebl Formación Boca Lebu (Eoceno)

Corresponde a bancos de limonita arcillosa y calcárea con areniscas hacia la base. Se distribuye en la desembocadura del río Lebu, en el sector Cullinco - Pilpilco y en el sector de Curanilahue. Esta formación fue definida por Muñoz-Cristi el año 1946.

Et Formación Trihueco (Eoceno)

Se compone de areniscas con intercalaciones de lutitas y mantos de carbón. Se ubica en la costa al sur de Lebu, en el sector Cruz de Tierra-Los Ríos y al oeste de Pilpilco. Esta formación fue definida Muñoz-Cristi el año 1946.

Em Formación Millongue (Eoceno Superior)

Ésta unidad corresponde a lutitas y limonitas con impresiones de flora fósil. Se distribuye entre Punta Millongue el sector de Punta Lavapié a Bahía Carnero. La definió Muñoz-Cristi el año 1946.

OM2c Formación Cura-Mallín (Eoceno-Mioceno Inferior)

Está compuesta por una secuencia de rocas piroclásticas, sedimentitas clásticas, tobas, brechas y, subordinadamente, areniscas, conglomerados, lutitas y coladas de lava, de composición intermedia, de colores pardo-rojizas, violáceas, verde, gris, amarillo y blanco. Fue definida por González-Ferran y Vergara el año 1962. En la zona de estudio aflora en la parte oriental, siendo el principal afloramiento presente en la sección de la Cordillera Andina perteneciente a la cuenca del río Bío-Bío.

Mlh Lavas de Huelehueico (Mioceno Inferior)

Corresponde a una secuencia de lavas andesíticas y basálticas, que afloran en sectores aislados de la Depresión Central, entre el río Laja y el pueblo de Collipulli. Los afloramientos más representativos se encuentran ubicados en el cerro Huelehueico y en la laguna de Los Alpes, al sur de Mininco, y comprenden andesitas de piroxena y andesitas basálticas de texturas porfíricas.

Mn Formación Navidad (Mioceno Inferior-Superior)

Ésta formación fue definida como “areniscas amarillas de grano fino con venas ferruginosas y concreciones duras de areniscas calcáreas” por Darwin (1846) y reconocida en Chile Central y en el golfo de Arauco. Ésta unidad aflora por un posible control tectónico sobre el complejo granítico y el Basamento Metamórfico. Comprende areniscas gris-blancas y amarillas y limonitas blancas, bastante alteradas.

Mtt Formación Trapa-Trapa (Mioceno Medio-Superior)

Se designa como Formación Trapa-Trapa a una secuencia de aglomerados volcánicos, lavas andesíticas y conglomerados, que se dispone de manera concordante y transicional sobre la Formación Cura-Mallín. Su techo está marcado por una discordancia angular que la separa de la Formación Cola de Zorro.

Msm Formación Mitrauquen (Mioceno Superior)

Esta unidad se compone de rocas volcánicas y sedimentarias continentales, con conglomerados, ignimbritas y lavas andesíticas, expuesta a los largo de una franja ubicada al este del río Bío-Bío, principalmente entre el río Liucura y el río Mitrauquen. Incluye dos miembros: un miembro esencialmente conglomerádico, con intercalaciones de ignimbritas dacíticas y lavas andesíticas, y un miembro de lavas andesíticas y tobas.

Mpc Formación Campanario (Mioceno Superior-Plioceno Inferior)

Se define como Formación Campanario a una secuencia de tobas, tobas brechosas, brechas, ignimbritas y coladas de lavas andesíticas a dacíticas, que aflora en los alrededores y al norte de la laguna del Maule (Drake, 1976). Estas rocas, de color amarillo claro a gris, se proyectan hacia el sur alcanzando el área de estudio.

Pt Formación Tubul (Plioceno)

Se encuentra ubicada en la costa sur del golfo de Arauco, en la desembocadura del río Tubul. Corresponden a areniscas arcillosas y limonitas fosilíferas.

PPlim Formación Malleco (Plioceno-Pleistoceno Inferior)

En el mapa geológico (Plano 4-1), se distingue una secuencia volcánica continental de edad pliocena-pleistocena inferior. Se incluye en esta unidad un conjunto volcánico compuesto por diferentes asociaciones de facies volcánicas (brechas, tobas, lavas andesítico-basálticas y flujos piroclásticos) con algunas intercalaciones sedimentarias (areniscas, conglomerados, paraconglomerados y diamictitas), que aflora principalmente en el lado occidental de la Cordillera Principal. El área tipo de la Formación Malleco es el curso del río Malleco. Esta unidad sobreyace con discordancia angular al Complejo Vizcacha-Cumilao, a la Formación Cura-Mallín y a los Estratos de Huichahue y con discordancia de erosión al 'Stock' Pemehue y a granitoides del Grupo Plutónico Melipeuco. A su vez, la formación está cubierta por el Conjunto de Volcanes de la Cordillera Principal. Se subdivide en 4 unidades.

PPl3 Formación Cola de Zorro (Plioceno-Pleistoceno)

Esta unidad tiene una gran distribución areal en la Precordillera y en la Cordillera Andina. Esta formación fue definida por González y Vergara (1962) y su composición litológica local es bastante homogénea y comprende rocas volcánicas correspondientes a lavas y piroclastos. Las primeras, vale decir las lavas, consisten en coladas de carácter andesítico y andesítico-basáltico, gris oscuras a negras, cuyos espesores varían entre 10-60m, con promedios de 30-50m. Las andesitas basálticas presentan estructura de disyunción columnar hexagonal. Las rocas piroclásticas son brechas gris-oscuras, principalmente con clastos andesíticos, inter-estratificadas en las coladas de lavas. Según IIG-MMAJ (1979), la serie presenta también ignimbritas grises, de composición dacíticas y andesítica, ubicadas estratigráficamente en su parte alta y geográficamente, en el sector norte de los afloramientos. En el río Ñuble afloran conglomerados volcánicos de 50-80m de espesor, compuestos por clastos andesíticos y graníticos que infrayacen a coladas andesíticas con estructura columnar.

PPlm Formación Mininco (Plioceno-Cuaternario)

Fue definida por Muñoz Cristi el año 1960. Esta unidad se distribuye en la Depresión Central y sus afloramientos se observan, principalmente, en los valles de los ríos y esteros como también en los cortes de carreteras, caminos y vías férreas. Comprende sedimentitas lagunares y fluviales, representadas por areniscas tobáceas, limonitas y conglomerados, con intercalaciones de arcillolitas y tobas. El aporte es principalmente andesítico en las areniscas, encontrándose también cenizas en la matriz.

PPlbl Formación Banco del Laja (Pleistocena-Holocena)

Esta unidad fue definida por Brüggen (1913), in Hoffstetter et al. (1957), como “una roca de conglomerado o brecha, sin estratificación y potencia variable entre 1 y 40m”. En general se trata de un banco de tobas brechosas, con clastos angulosos que varían de 1 a 50cm en una matriz cinerítica de composición andesítico-basáltica.

PlHlm Formación La Montaña (Pleistocena-Holocena)

Esta unidad está conformada por una serie de depósitos morrénicos y aluviales, de composición relativamente uniforme, y bancos lenticulares de arcillas y arenas finas, todos ellos con poca compactación y sin cementación. Fue definida por Muñoz Cristi en 1960, como la “Formación Morrena de la Montaña”

PlHca Sedimentos Glacio-Lacustres Collipulli-Angol (Pleistocena-Holocena)

Se define como una secuencia compuesta por niveles de arcilla, arenas y conglomerados, con potencias de 10-50cm, que aflora, principalmente, en el camino que une ambas localidades y se distribuye, en la zona central y meridional de la Depresión Central desde el río Laja hacia el sur. Los conglomerados y areniscas de esta unidad están formados por clastos de andesitas y basaltos, y matriz cinerítica.

Q3i Estratovolcanes y complejos volcánicos

En el área de estudio se ubican asociados a los complejos volcánicos Lonquimay, Callaqui, Copahue y Antuco. Están compuestos por brechas y lavas andesítico-basálticas negras a gris-rojizas, que sobreyacen, en discordancia de erosión a la Formación Cola de Zorro y cuyo límite superior corresponde a la superficie de erosión actual.

4.4.3 Depósitos No Consolidados (Cuaternario)

Paa Depósitos de Areniscas y arcillolitas marinas (Plioceno?-Holoceno)

Se ubican en la Península de Arauco, conformada por areniscas y arcillolitas. Su techo es la superficie actual y depósitos de dunas y playas, y su base es la Formación Tubul.

Pl3t Depósitos piroclásticos (Pleistoceno)

Corresponden a flujos piroclásticos de composición riolítica, asociados a colapso de calderas volcánicas. Este depósito se ubica en la parte sur de la cuenca del río Itata.

Q3av Depósitos de avalancha volcánica (Cuaternario)

Asociados a colapso parcial de edificios volcánicos. Los clastos son de composición riolítica a andesítica, con tamaños que varían entre grava gruesa y sedimentos finos. La ubicación de este depósito corresponde a la zona suroccidental del área de estudio.

Hcrl Depósitos del cono fluvial del río Laja (Pleistoceno-Holoceno)

Esta unidad se compone de material piroclástico, proveniente de la actividad volcánica del volcán Antuco y centros adyacentes, cuyo transporte fue mixto, tanto fluvial (río Laja y tributarios menores) como eólicos. Estos materiales se abrían depositados en la Depresión Central, debido a la disminución en la

capacidad de transporte de esos agentes, rellenando cuencas subacuaticas locales. Posteriores redistribuciones eólicas habrían originado las dunas que se reconocen en distintos sectores. De acuerdo al tipo de sedimentos y a la granulometría que definen otros autores, es posible estimar para estos depósitos fluviales permeabilidades variables entre 10-3 y 10-4 cm/seg.

Q1t Sedimentos de terrazas fluviales (Holoceno)

Esta unidad corresponde a los depósitos de gravas y arenas en niveles de terrazas, que se ubican en los ríos principales del área. Están compuestos por gravas y ripios, con clastos redondeados a subredondeados de andesitas y granitos de diámetro promedio entre 8 y 30cm, con fracciones variables de arenas y limos. Sus espesores máximos alcanzan a 20m. Conforme a la descripción que entregan los autores que han levantado la geología del área, es posible estimar para estos rellenos aterrazados, una permeabilidad promedio de más o menos 10-3 cm/seg.

Q1m Terrazas Marinas (Pleistoceno-Holoceno)

Estas unidades están cubiertas por sedimentos arenosos y limosos, parcialmente estratificados, compuestos por material proveniente de las erupciones volcánicas de la Cordillera Andina. Estos sedimentos se disponen a alturas máximas de 15m s.n.m. Según Veyl (1961) y podrían representar diversas cotas del nivel medio del mar en el pasado.

Q1g Depósitos glaciares Depósitos morrénicos, fluvioglaciares y glacilacustres (Pleistoceno-Holoceno)

En las riberas de los principales cauces de agua, los depósitos fluvio-glaciales forman varios niveles de terrazas discontinuas, adosadas a las laderas de los valles, que permiten un buen desarrollo de suelo y vegetación, útiles para la agricultura, la ganadería o para la implantación de casas y poblados. Los materiales que componen los depósitos se presentan relativamente bien estratificados, mal seleccionados e inmaduros, donde participan clastos, de tamaño bloque, grava y arena, englobados en una matriz arenoso-arcillosa. Es probable que la permeabilidad media de estos depósitos alcance unos 10-4 cm/seg.

Los depósitos de origen glacial están parcialmente desmembrados por la erosión o cubiertos por los depósitos fluviales. Se pueden reconocer morrenas mayores, asociadas a una glaciación antigua y pequeñas morrenas a glaciares actuales. Estas últimas están relacionadas con los glaciares que cubren las cumbres altas. Se reconocen depósitos morrénicos de más de 100m de potencia, que dan una típica morfología de lomajes suaves, compuestos por material clástico, anguloso, predominantemente volcánico, que yace en una matriz arenosa de colores gris-amarillento y rojizo. Los depósitos morrénicos mencionados fueron asignados al último período glacial o a su etapa de retroceso.

Q1fa Depósitos fluvio-aluviales antiguos (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a materiales no consolidados, representados por gravas, ripios y arenas, que constituyen el relleno de los cauces de los ríos y esteros. Se diferencian de los depósitos actuales al ser estos últimos asociados al cauce actual, mientras que los descritos corresponden a los depósitos generados en los paleocauces. Estos rellenos subactuales probablemente presenten permeabilidades entre 5x10-3 y 10-3 cm/seg.

Q1e Depósitos piroclásticos (Pleistoceno-Holoceno)

Los depósitos piroclásticos están asociados usualmente a depósitos lacustres en donde se mezclan con arenas arcillosas. Estos depósitos suelen formar niveles aterrazados.

Q1c Depósitos coluviales (Pleistoceno-Holoceno)

Los depósitos de origen coluvial se localizan en las laderas de fuerte pendiente y sin vegetación, de los valles de origen glacial. Los depósitos de origen coluvial son muy inmaduros y los componen fragmentos rocosos, provenientes de las partes altas de las laderas, generalmente monomícticos y angulosos. Tienen forma de abanico irregular que, a causa de la inestabilidad gravitacional o por saturación de agua, provocan derrumbes. En términos hidrogeológicos estos depósitos constituyen áreas propicias de recarga que facilitan la infiltración de una fracción de las precipitaciones.

Q1 Depósitos fluvio-aluviales actuales (Pleistoceno-Holoceno)

En el cauce actual de los ríos y esteros se encuentran depósitos fluviales, torrenciales, donde se mezclan bloques, gravas, arenas y arcillas. Estos depósitos, aunque tienen buen desarrollo sólo en los ríos principales, se encuentran también en cada uno de los cauces menores. Es frecuente observar, en la desembocadura de un cauce menor en otro mayor, abanicos fluviales donde se depositan importantes espesores de arenas y gravas. Estos rellenos actuales debieran tener permeabilidades entre 10-2 y 10-3 cm/seg.

4.4.4 Rocas Intrusivas

Los cuerpos intrusivos existentes en la zona de interés se describen a continuación.

CPg Intrusivos Carboníferos-Pérmicos tonalitas y granodioritas indiferenciadas

Se distribuyen como una franja continua de dirección general NNE-SSO, al oeste de las rocas metamórficas descritas anteriormente, conformando gran parte de la Cordillera de la Costa. Está conformado por un complejo plutónico cuya composición petrográfica varía entre tonalita y granodiorita, con sectores

menos extensos de diorita cuarcífera y granito. Este complejo plutónico fue definido por González-Bonorino, 1970; Hervé et al. 1976, como el Batolito de la Costa. Tiene una relación de contacto intrusivo con las rocas del basamento metamórfico e infrayace, con discordancia de erosión, a las series sedimentarias y sedimentario-volcánicas del Triásico.

Jkl Grupo Plutónico Gualletué (Jurásico Superior-Cretácico)

Esta unidad se compone de monzogranitos, dioritas cuarcíferas y tonalitas que conforman una faja de rocas plutónicas en el sector sur oriental del mapa geológico (fuera de texto). En algunos lugares existen relaciones de intrusión entre los plutones que lo componen. Así, en el filo nororiental del cerro Cordán, que desciende al estero Pichirrucanuco, una microdiorita cuarcífera de hornblenda intruye a una tonalita de bíotita, con la cual tiene una diferencia de 7Ma de acuerdo a sus edades radiométricas.

Kiag Intrusivos Cretácicos

En el sector oriental de la Cordillera de la Costa, se ha reconocido un conjunto de cuerpos graníticos, de composición en general semejante a los granitoides carboníferos y de textura más fina. Estos cuerpos se localizan en una franja en dirección general NNE-SSO y representan altos topográficos, que sobresalen del nivel promedio de las rocas graníticas del carbonífero.

Tl 'Stock' Lolco (Paleoceno)

Esta unidad aflora en un tramo del río Bío-Bío inmediatamente al este de la desembocadura del río Lolco, en el área de confluencia del estero Piedras Paradas y en el río Lomín, aguas arriba de su desembocadura. El 'Stock' Lolco incluye, principalmente, rocas monzograníticas y, en los afloramientos de los Baños de Lolco, sienogranitos. Son rocas de color rosado, sin inclusiones. Localmente, en el área situada al este de la desembocadura del río Lolco, las rocas de este 'stock' se presentan como cataclásticas.

Tm Grupo plutónico Melipeuco (Mioceno)

Se compone de rocas graníticas. Se ubican en la zona en torno al pueblo de Melipeuco, tanto por el lado del río Allipén, como hacia el norte del poblado. Entre los distintos componentes de estas rocas se han reconocido, muy localmente, las siguientes relaciones de contacto: tonalita intruida en una granodiorita en el río Renalco y una granodiorita emplazada en una tonalita en las cabeceras de la quebrada Nalcas, afluente del río Nalcas.

Ming Intrusivos del Mioceno medio a superior

Constituyen pequeños "stocks", filones y filones-manto de variada forma, dimensión del afloramiento y su composición, destacando sienogranitos, monzogranitos, granodioritas tonalitas, dioritas y monzodioritas cuarcíferas.

Mg Intrusivos Miocénicos

Corresponden a cuerpos plutónicos de tipo ‘stock’ que intruyen a las formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa. Se encuentran cubiertos con discordancia de erosión por las volcanitas de la Formación Cola de Zorro. Estas rocas se destacan por su color gris claro u por la prominencia de sus afloramientos. La composición petrográfica de los ‘stocks’ corresponde a diorita, diorita cuarcífera y granodiorita.

Mr Stocks de Riodacita (Mioceno Superior)

Se incluyen bajo este nombre a dos pequeños cuerpos riodacíticos, de color blanco-amarillento, que intruyen a las formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa al oriente del estero Trapa-Trapa al oriente del estero Trapa-Trapa; además de algunos filones de similar composición ubicados aledaños al afloramiento principal.

PPlab Intrusivos Orientales (Pliocena Superior-Pleistocena)

Las rocas intrusivas así denominadas constituyen pequeños "stocks", filones, filones-manto, lacolitos y cuellos volcánicos, desde andesíticos a basálticos, que intruyen a rocas de la Formación Cola de Zorro y de unidades más antiguas. Estos intrusivos tienen color gris a gris oscuro, textura porfírica, ocasionalmente vesicular a microvesicular, y masa fundamental intergranular, con marcada orientación de microcristales.

Prm Intrusivos Hipabisales de río Renaico y cerro Mocho (Plioceno)

Se incluye a esta unidad diques, filones-mantos y cuerpos intrusivos irregulares, de andesitas y localmente basaltos y gabros, emplazados en unidades de edad pre-pliocena superior. Este nombre alude a la mayor concentración de intrusivos andesíticos porfídicos expuestos en las cabeceras del río Renaico y Vilcura y en la exposición de un gabro de piroxeno en el cerro Mocho, al este de la Laguna de Gualletué.

4.5. Estructuras

En la cuenca del río Bío-Bío se distinguen dos zonas donde se presentan las principales estructuras: en la Cordillera de la Costa, y en el conjunto conformado por la Precordillera y la Cordillera Andina.

En la primera unidad morfológica (Cordillera de la Costa) se observa que la Serie Oriental y la Serie Occidental del Basamento Metamórfico son las unidades que presentan los mayores plegamientos, con pliegues asimétricos, volcados y aún recumbentes. Sus ejes buzan en general, al oriente y tienen rumbos muy variables, predominantemente NNE. Las rocas sedimentarias marinas, formaciones Quiriquina y Curanilahue, están fuertemente basculadas y las rocas de la Formación Mininco se presentan suavemente basculadas o sub-horizontales y la Formación Santa Juana se presenta con un suave plegamiento.

El fallamiento y/o fracturamiento alcanza su mayor intensidad en el Batolito de la Costa, tanto en su porción central como periférica. En la Depresión Central, las trazas de estas estructuras están cubiertas por los depósitos pleisto - holocénicos, mientras que en el flanco occidental de la Cordillera Andina, se observa un menor desarrollo relativo de estas estructuras.

Los sistemas de fallas principales son N-S a NNE-SSO y NNO-SSE. El primero controla, fundamentalmente, tanto los acantilados costeros, como los quiebres de pendiente locales entre la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, manifestándose también en la Cordillera Andina. El segundo sistema (NNO-SSE) controla, mediante estructuras de mayor desarrollo aparente, los cauces principales y tributarios que atraviesan estas cordilleras, los cuales tienen una dirección general semejante y son sensiblemente paralelos entre sí. Por otra parte, estas estructuras que permitieron el levantamiento relativo de la Cordillera de la Costa respecto de la Depresión Central, son las responsables de las grandes acumulaciones sedimentarias que existen al oriente de la Cordillera de la Costa, debiendo los ríos, como el Bío-Bío, abrirse paso a través de ésta mediante llanos relativamente estrechos.

En la segunda unidad morfológica, el conjunto de la Precordillera con la Cordillera Andina, se observa en general una tectónica compresiva y se caracteriza por pliegues más o menos amplios acompañados ocasionalmente, por fallas inversas de pequeña magnitud, que afectan a las formaciones de Cura-Mallín y Trapa-Trapa. En la zona suroriental de la cuenca se han reconocido fallas longitudinales que atraviesan la región y que han controlado el emplazamiento de volcanes y el desarrollo de rasgos importantes de la morfología actual, así como otras fallas menores, muchas extensionales, algunas inversas y otras probablemente de rumbo. Las rocas jurásicas de la Formación Nacientes del Bío-Bío exhiben pliegues y fallas generadas probablemente en el Cretácico; el Complejo Vizcacha-Cumileo (Paleógeno) está fallado y localmente plegado; La Formación Cura-Mallín (Mioceno) presenta un plegamiento amplio, las formaciones más jóvenes, post-mioceno

medio, son subhorizontales y están localmente cruzadas por fallas normales y por lineamientos. Localmente se han reconocido rocas de falla (milonitas y cataclasitas), principalmente en rocas graníticas.

En la Cordillera Andina presente en la cuenca del Bío-Bío, existen grandes lineamientos de orientación norte-sur y nor-noreste, que corresponden a grandes sistemas de fallas. De estos destacan dos, que controlan parte importante de la morfología: el Sistema de Falla Liquiñe - Ofqui, de orientación nor-noreste (Hervé, 1976; Hervé, 1984; Hervé y Thiele, 1987) y el Sistema de Falla Bío-Bío-Aluminé de orientación aproximada norte-sur a nor-noroeste (Muñoz y Stern, 1988).

4.6. Referencias

- Aguirre, L.; Hervé, F.; Godoy, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile. An outline. Kristalinikum, Nº9, p.7-19.

- Bravo, Francisco. 2006. Geología y Modelo Conceptual del Sistema Geotermal Nevados de Chillan. Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

- De la Cruz, R.; Suárez, R.1997. El Jurásico de la cuenca de Neuquén en Lonquimay, Chile: Formación Nacientes del Bío-Bío (38-39ºS). Revista Geológica de Chile, Vol. 24, Nº1, p.3-24.

- Drake, R.E. 1976. The chronology of Cenozoic igneous and tectonic events in the Central Chilean Andes. In Symp. Andean Antarct. Volcanol. Probl., Proc., p. 670-697. Santiago

- Ferraris, Fernando. 1981, Hoja Los Ángeles-Angol, escala 1:250.000, región del Bío-Bío. Mapa Geológico Preliminar de Chile, Instituto de Investigaciones Geológicas. Nº 5, 26 p.

- Fuenzalida, P., H. 1965. Clima. In Geografía Económica de Chile. (Texto refundido). Edit. Universitaria, p. 98-151. Santiago.

- Gajardo, Aníbal. 1981. Hoja Concepción-Chillan, escala 1:250.000, región del Bío-Bío. Mapa Geológico Preliminar de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas. Nº 4, 32 p

- González-Bonorino, F. 1970. Series metamórficas del basamento cristalino de la Cordillera de la Costa, Chile Central. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Publicación., Nº 24, 119 p.

- González, O.; Vergara, M. 1962. Reconocimiento Geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35º y 38º Lat. Sur. Universidad de Chile, Inst. Geol., Publ., Nº 24, 119p.

- Hervé, F.; Munizaga, F.; Mantovani, M.; et al. 1976. Edades Rb-Sr neopaleozoicas del basamento cristalino de la Cordillera de Nahuelbuta. In Congreso Geológico Chileno, Nº 1, Actas, Vol. 2, p. F19-F26. Santiago.

- Hervé, F.1976. Estudio geológico de la falla Liquiñe-Reloncaví en el área de Liquiñe, antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). In Congreso Geológico Chileno, Nº1, Actas. Vol. 1. p. B39-B56. Santiago.

- Hervé, F. 1977. Petrology of the crystalline basement of the Nahuelbuta Mountains, South-Central Chile. In Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific orogenic belt in Japan and Chile (Ichiwaka, T.; Aguirre, L.; eds). Japan. Soc. for Promotion of Sci, p. 1-51. Tokyo.

- Hervé, F.1984.Rejuvenecimiento de edades radiométricas en la zona de falla de Liquiñe, antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). In Congreso Geológico Chileno. Nº1, Actas Vol. 1. p. B39-B56. Santiago.

- Hervé, F.; Thiele, R. 1987. Estado de conocimiento de las megafallas en Chile y su significado tectónico. Comunicaciones, Nº38, p.67-91.

- Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG); Metal Mining Agency of Japan (MMAJ). 1979. Informe de reconocimiento geológico de la región andina situada al este de la ciudad de Concepción. Fase 1. (Inédito), 281 p.

- Lagno, L.; Gana, P.; Moraga, J.; et al. 1979. Geología de las hojas Coronel de Maule y Pocillas, Cauquenes VII Región. Práctica de vacaciones. Departamento de Geología, Universidad de Chile, (inédito), Santiago.

- Moreno-Roa, H.; Hervé, F.; Godoy, E.; et al. 1976. Reconocimiento geológico del área de Pocillas (Cauquenes, VII Región). Departamento de Geología, Universidad de Chile, (inédito), 9 p. Santiago.

- Muñoz-Cristi, J. 1946. Estado actual del conocimiento sobre la geología de la Provincia de Arauco. In Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, An., Nº3, p.64-70.

- Muñoz-Cristi, J. 1959. Chile In Handbook of South American geology. (Jenks, W.F.;ed.), Geology Society of America, Mem. 65, p. 187-214.

- Muñoz-Cristi, J. 1960. Contribución al conocimiento geológico de la Cordillera de la Costa de la Zona Central. Minerales, Vol. 15, Nº 69, p.28-46.

- Muñoz, J.; Niemayer, H. 1984. Hoja Laguna del Maule, escala 1:250.000, de las regiones del Maule y del Bío-Bío. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería. Nº 64, 98 p.

- Muñoz, J.; Stern, C.R. 1988. The Quaternary volcanic belt of the southern continental margin of South America: Transverse structural and petrochemical variations across the segment between 38ºS and 39ºS. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 1. Nº2, p. 147-161.

- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile en formato digital, escala 1:1.000.000.

- Veyl, C. 1961. Contribución al conocimiento de la geología regional de la Provincia de Concepción. Minerales, Vol. 26, Nº 72. p. 21-71.

5. ESTUDIO GEOFISICO

5.1 Consideraciones Generales

El presente estudio da a conocer resultados del levantamiento gravimétrico realizado en el área de la cuenca del río Bío-Bío, VIII y IX Región.

El estudio tiene como objetivo principal determinar la morfología del basamento subterráneo de acuerdo a la escala de ubicación de las estaciones gravimétricas en el área. Los resultados proporcionan antecedentes generales de la morfología del basamento subterráneo del Valle Central entre las latitudes 37º S y 38 S aproximadamente. Se realizaron 15 perfiles, la distribución de las estaciones fue cada 2 kilómetros aprox. y algunos con distancias menores de acuerdo a los objetivos requeridos. . En Cuadro 5-1 siguiente se presenta las principales características de cada perfil gravimétrico efectuado.

Cuadro 5.1 Principales Características de Los Perfiles Gravimétricos

Perfil Nº	Nº Estaciones Gravimétricas	Longitud (m.)
1	14	25.298
2	13	23.847
3	62	119.495
4	15	29.987
6	18	33.449
7	49	92.533
8	29	55.388
9	17	32.629
10	17	31.365
12	4	5.127
16	9	15.522
17	30	58.571
18	16	31.683
19	14	22.813
20	24	47.699
Total	**331**	**625.406**

En el Plano 5-1 (escala 1:250.000), adjunto en el Anexo de Planos, se muestra el trazado en planta de los 15 perfiles, incluyendo la ubicación e identificación de cada uno de los puntos gravimétricos tomados. La distribución de los puntos estuvo de acuerdo a los objetivos planteados, complementados con observaciones “in situ”.

5.2 Metodología Utilizada en el Estudio

5.2.1 Generalidades

El método gravimétrico de prospección se sustenta normalmente en medidas realizadas en la superficie de la tierra del campo potencial de ella. Este campo potencial se ve perturbado por la distribución de estructuras geológicas de densidades y profundidades variables, por lo que conociendo aquellas se puede llegar a una interpretación lo más probable de su distribución de cuerpos de diferentes densidades en profundidad. Los fundamentos físicos del método son la 1era y 2da ley de Newton expresadas de la siguiente forma:

1era $$F = G \frac{m_1 \, m_2}{r^2}$$

en que:

F= fuerza ejercida entre las partículas de masa m1 y m2
R= distancia entre las partículas
G= constante de gravitación universal cuyo valor obtenido experimentalmente es 6.670 x 10-^{11} m^3 kg^{-1} seg^{-2}.

2da $$a = G \frac{m_2}{r^2}$$

en que:

$a =$ aceleración de un cuerpo de masa m_1 atraído por una masa m_2.

El procedimiento del método es medir en superficie pequeñas variaciones de la componente vertical del campo de gravedad. Para ello en la actualidad se han diseñado instrumentos que miden la centésima y milésima de un miligal (1 miligal = 10^{-3} gal= 10^{-3} $\frac{cm}{seg^2}$).

Estos instrumentos se instalan en superficie con su eje en la dirección del campo mediante niveles de burbuja. Como las anomalías de la gravedad son muy pequeñas comparadas con el valor medio del campo gravitatorio terrestre se deduce que la dirección es prácticamente constante, normal a la superficie según se vio anteriormente. Los datos de gravedad son tomados en lugares diferentes, estos requiere que sean referidos a un plano datum para ser comparables entre ellos, normalmente este datum es el nivel medio del mar.

Usando esta referencia se pueden eliminar los efectos que influyen sobre las medidas y son los siguientes: latitud, altura, Bouguer, topografía y el efecto de mareas, esta última es de magnitud pequeña por lo que normalmente se asimila a la corrección por deriva, corrección instrumental. A continuación se describen brevemente las correcciones realizadas a los datos.

5.2.2 Correcciones

a) Corrección de altura

Esta corrección considera la variación de la gravedad por efecto de altura, considerando como referencia el nivel medio del mar, su valor es de 0.3086 [mGal/m].

b) Corrección de Bouguer

Esta corrección considera el efecto de masa existente entre la estación medida y el plano datum. Para corregir este efecto se resta la atracción de una placa horizontal plana de extensión infinita de altura igual a la de la estación sobre el plano datum. El valor es de 0.0419 ρ [mGal/m], en que ρ corresponde a la densidad de la placa considerada.

El valor de esta corrección depende de la densidad del material involucrado. En este caso se asignó un valor de 2.1 [gr/cm^3] para los sedimentos cuaternarios que se ubican en el Valla Central. Con la densidad considerada la corrección de Bouguer toma el valor de 0.08799 [mGal/m].

c) Corrección por latitud

Esta corrección considera el efecto de gravedad debido a la latitud en que se encuentra la lectura de las estaciones de gravedad. Para ello se usa la formula:

$$\boxed{g_0 = g_{ec}\,(1 + C_1\,Sen^2\,\varphi + C_2\,Sen^2\,2\varphi)}$$

donde: g_0 = Gravedad Teórica (mGal)

g_{ec} = 978031.85 mGal (valor de gravedad normal en el Ecuador)

C_1 = 0.005302357

C_2 = - 0.000005864

φ = latitud

d) Corrección por marea y deriva instrumental

La corrección por marea considera el efecto atractivo de la luna y el sol en el instante en que se efectúa la medida de gravedad y la deriva instrumental considera el efecto de elasticidad en el tiempo del sistema interno del gravímetro. Estos efectos son considerados en el programa computacional que fue usado.

5.2.3 Elección de densidades en las correcciones

Una de las variables más importante en la interpretación gravimétrica es la elección de las densidades usadas en el modelamiento de estructuras geológicas. En el caso de depósito sedimentario Cuaternario del Valle Central se consideró una densidad media de 2.1 [gr/cm3], y al basamento subterráneo 2.6 [gr/cm3], por lo tanto el contraste usado en el modelamiento de las secciones gravimétricas fue de 0.5 [gr/cm3]. El valor de densidad 2.1 [gr/cm3] es representativo del relleno sedimentario del Cuaternario.

5.2.4 Efectos regionales

La disminución de la gravedad en el sentido oeste-este por efecto de la isostacia de los Andes se presenta con diferentes magnitudes que dependen de la latitud que se considera. Este efecto se denomina regional.

Normalmente estos regionales se utilizan para estudiar los efectos de estructuras geológicas de grandes dimensiones.

En el caso de los perfiles realizados en la zona de estudio las secciones modeladas son asignadas a cuerpos geológicos de mediana magnitud. Este hecho hace considerar como regional aquellos determinados entre afloramientos rocosos de una misma sección o perfil o sondaje que cortan la roca basal. Este procedimiento fue utilizado en nuestro estudio.

5.3 Trabajo de Terreno

5.3.1 Labores Geofísicas

El trabajo de terreno se efectuó en dos etapas (29 a 31 de Agosto y 24 al 25 de Septiembre de 2012). En ambas etapas se tomaron 331 estaciones de gravedad. La planificación inicial del estudio fue realizada en Santiago, para ello se utilizó la cartografía Base del SIG de la DGA, la cual esta construida en base las planchetas IGM (escala 1:25.000; 1:50.000), por otro lado, se consideró como punto de partida el trazado de los perfiles gravimétricos incluidos en los términos de referencia. Considerando o tomando como premisa que las estaciones gravimétricas deben estar ubicadas en lugares de fácil acceso, se adoptó como norma trazar los perfiles por rutas o caminos existentes, de este modo los trazados iniciales se adaptaron y/o trasladaron a rutas cercanas existentes. Posteriormente en terreno hubo pequeños cambios debido a las modificaciones de las rutas consideradas inicialmente en la cartografía base. Estas modificaciones siempre estuvieron de acuerdo con los objetivos del Proyecto.

En el estudio de gravedad se utilizó un gravímetro LaCoste y Romberg modelo G y N° de serie 463 de SEGMI. La precisión de este instrumento es de la centésima de un miligal, (10-3 gales). La fábrica especifica una deriva instrumental aproximada de 1 [miligal/mes].

La determinación de las alturas y coordenadas de las estaciones gravimétricas fueron tomadas mediante el sistema satelital GPS de doble frecuencia lo que da una precisión suficiente para el estudio realizado. Para el control de los circuitos gravimétricos se utilizó la base establecida en la plaza de Armas de Los Ángeles perteneciente a la Red Nacional de Gravedad de Chile. No fue necesario establecer una base auxiliar ya que todos los días se partió y se llegó a la base de Los Ángeles. En el Cuadro siguiente se muestra los parámetros de la base de Los Ángeles.

Cuadro 5-2 Punto Red Nacional de Gravedad

Estación	Gravedad [mGal]	Altura [m]	Latitud	Longitud
Loa Ángeles 9308LA	9799905.186	134.11	37° 28.00'S	73° 20.90'O

El procedimiento en terreno fue iniciar las medidas en la mañana de cada día en la base auxiliar mencionada anteriormente y cerrar en la misma estación durante la tarde del mismo día. Este hecho tuvo como finalidad comprobar el funcionamiento del instrumento, y referir los datos a la Red Nacional de Gravedad. Estos valores con sus respectivas correcciones se muestran en el Anexo 5-1, adicionalmente en el Anexo 5-2 se adjuntan fotografías que muestran diferentes fases del estudio en terreno. En la Fotografía siguiente se muestra la Estación Los Ángeles.

5.3.2 Labores Topográficas

Se realizó un levantamiento topográfico de perfiles gravimétricos en el sector de la cuenca del Río Bío-Bío.

En las extensiones cubiertas por los trabajos de topografía se identificaron todos los puntos que componen los perfiles en donde se tomo lectura gravimétrica, para una buena representación de cada uno de estos.

El procedimiento adoptado en terreno para el desarrollo de las labores de levantamiento, consistió en primer lugar construir una red geodésica primaria que abarcara toda la cuenca en estudio, vinculada al sistema de coordenadas WGS84 proyección UTM, para la cual se utilizó como referencia el Vértice IGM de la Red SIRGAS, TUCA.

El procedimiento utilizado para georeferenciar la Red Primaria, fue el método GPS Modo Diferencial Estático con soluciones en Post-Proceso, con observaciones independientes de los vectores, y formando una figura cerrada que pueda ser ajustada. (Figura 5-1)

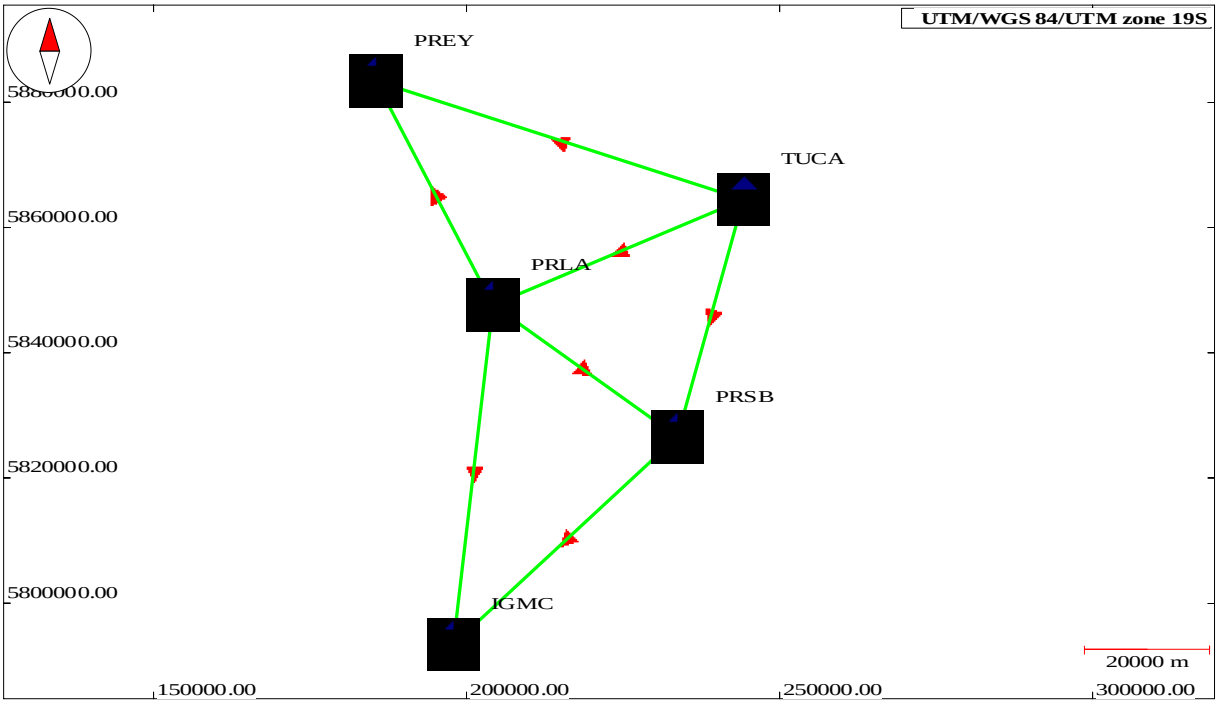


Figura 5.1 –Red Geodésica Primaria Utilizada

Método Diferencial GPS en Tiempo Real

A partir de la Red Geodésica Primaria, se realizo el levantamiento de los Perfiles Gravimétricos mediante el Método Diferencial GPS en Tiempo Real, también denominado RTK.

Esta modalidad requiere un constante enlace de comunicación entre equipo base y equipo remoto. Este enlace puede ser a través de ondas de radio, quedando limitada su transmisión por la topografía del lugar, o también vía GPRS. Este último tipo de enlace fue el utilizado debido a las mayores distancias que permite para la obtención de soluciones fijas.

El instrumental utilizado para las labores de levantamiento consistió en Receptores Geodésicos GPS, de doble frecuencia modelo Promark 200, marca ASHTECH, con memoria interna para el almacenamiento de la información registrada, con una precisión de:

- Modo Estático: 3 mm + 0,5 ppm en horizontal y 5 mm + 0,5 ppm en vertical.
- Modo Cinemático: 10 mm + 1 ppm en horizontal y 15 mm + 1 ppm en vertical.

El Post-Proceso de los datos fue totalmente automatizado mediante el uso de un software especializado. Los archivos de captura fueron traspasados directamente a una estación de trabajo (PC) y procesados por medio del software GNSS SOLUTION, de ASHTECH, para la generación de los vectores utilizados obteniendo las coordenadas geográficas, UTM WGS 84 y cotas ortométricas definitivas de cada uno de los puntos GPS.

Las coordenadas UTM Geodésicas en el sistema WGS84 que se obtuvieron fueron las siguientes:

Cuadro 5-3 Coordenadas UTM Geodésicas. Datum WGS84 Poligonal Primaria

PUNTO	ESTE	NORTE	COTA (NMM)
PRSB	233538.770	5826371.838	223.793
TUCA	244143.909	5864302.798	590.640
PRLA	204112.927	5847662.197	139.032
IGMC	197977.984	5793425.093	249.435
PREY	185600.290	5883388.957	89.951

En el Anexo 5-3 se presentan las monografías de los PRS utilizados en la Red Primaria. Por otro lado las coordenadas UTM, cotas y distancia entre estaciones

obtenidas para cada uno de los puntos que conforman los 15 perfiles gravimétricos tomados, se presentan en el Anexo 5-4.

5.4 Interpretación

La interpretación se basa en encontrar el modelo que mejor se ajusta al residual calculado de cada perfil, considerando los datos de densidades de las formaciones involucradas así como toda la información de geología, sondajes y otras observaciones interesantes que cubran el área investigada.

El proceso inicial en la interpretación es tener los datos de gravedad corregidos, es decir llevados a un mismo plano de referencia. Posteriormente se introduce en el programa de modelamiento (GM SYS INT), el cual por medio de iteraciones sucesivas se obtiene el cuerpo que mejor se ajusta a la gravedad observada (residual).

Los resultados de la interpretación se pueden observar en los Gráficos 1 a 15, incluidos en el Anexo 5-5 las cuales corresponden a los perfiles ejecutados en cada sector. Estas figuras muestran la anomalía de Bouguer calculada, el ajuste del modelo calculado al residual obtenido y el modelo del basamento calculado complementado con antecedentes geológicos, sondajes y observaciones de terreno.

5.5 Resultados y Conclusiones

En general el método de gravedad es un método geofísico indirecto que en la mayoría de los casos da una buena aproximación de la profundidad a la que se encuentra el contacto sedimento – roca basal. En el caso estudiado se tomaron como fundamentales para la interpretación todos aquellos perfiles que en sus extremos se midieron sobre roca.

Adicionalmente en el Cuadro 5.4 siguiente se presenta para cada estación gravimétrica de los perfiles realizados: la cota de terreno, la distancia entre estaciones y la profundidad de la roca.

Cabe indicar que en el presente trabajo y con el objeto de complementar la información de profundidad de roca en el sector norte de la cuenca de Bío Bío, se utilizó la información gravimétrica de la cuenca del río Itata (cuenca vecina), determinada en el estudio de la REF 1 (SIT 258), lo anterior fue posible, dado que el método, las consideraciones y el procedimiento utilizado en ambos trabajos gravimétricos es coincidente. Específicamente se utilizó la información de 123 puntos gravimétricos, de los cuales 13 se localizan en la cuenca del Bío Bío y 110 en la parte sur de la cuenca del Itata (puntos cercanos al límite norte de la cuenca del Bío Bío).

En resumen para generar el plano isobático (profundidad de roca) en el valle central de la cuenca del Bío Bío se utilizó la información de 454 puntos gravimetricos. El resultado final que cumple con el objetivo principal del estudio se muestra en el Plano 5-2 adjunto, el cual muestra un plano isobático del área del valle central de la cuenca de Bío Bío, obtenido mediante las profundidades de cada perfil y las secciones calculadas en lo sectores de interés del proyecto.

Cuadro 5-4 Estaciones Gravimétricas por Perfil (Cota Terreno-Distancia y Profundidad Roca)

Perfil 1			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
1	182,26		-801
2	188,25	1.957	-801
3	191,88	1.970	-801
4	200,63	2.025	-687
5	213,26	2.021	-725
6	220,45	1.808	-878
7	230,52	2.059	-1050
8	249,13	1.748	-1012
9	262,77	2.129	-1088
10	278,29	1.908	-878
11	290,59	1.939	-668
12	305,58	1.686	-515
13	366,47	2.294	-286
14	479,82	1.754	0

Perfil 2			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
1	127,68		-797
2	137,29	1.997	-764
3	142,51	1.870	-649
4	148,77	2.006	-573
5	156,72	2.004	-668
6	157,47	2.174	-888
7	172,6	1.817	-1050
8	182,01	2.493	-1136
9	181,12	965	-1088
10	189,69	2.937	-1212
11	196,07	1.993	-1260
12	205,1	2.018	-1260
13	213,17	1.574	-1184

Continuación Cuadro 5-4

Perfil 3			
Punto	**C. Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Prof. Roca (m)**
1	129,25		-238
2	130,26	2.101	-253
3	131,75	2.033	-320
4	131,3	2.071	-425
5	131,56	1.967	-477
6	131,05	2.016	-582
7	130,09	1.797	-850
8	129,13	2.594	-902
17	127,14	1.864	-902
16	125,19	2.096	-926
15	124,22	1.996	-797
14	137,36	1.843	-716
13	139,39	1.936	-530
12	125,98	1.988	-267
11	131,76	1.941	-134
10	130,24	2.030	-396
9	135,58	1.996	-530
18	133,51	4.132	-634
19	133,35	2.051	-768
20	139,2	1.678	-745
21	137,43	1.840	-797
22	135,66	2.028	-768
23	157,5	1.999	-955
25	144,9	3.509	-1222
26	143,12	1.977	-1140
27	144,55	2.068	-1140
28	149,97	1.992	-1298
29	127,95	1.968	-1088
30	136,39	2.204	-1245
31	151,8	1.930	-1537
32	135,29	1.925	-2014
33	128,78	2.053	-2176
34	154,38	2.008	-2043
35	174,31	748	-1962
36	158,82	2.224	-2067
37	137,18	2.005	-2148
38	178,41	2.860	-1909
39	133,84	1.902	-1962
40	128,57	2.126	-1990
41	171,37	1.724	-1962
42	200,72	2.132	-1828
43	199,46	2.006	-1642
44	205,06	2.080	-1618
45	216,8	2.062	-1618
46	221,96	1.955	-1699
47	209,59	2.005	-1752
48	200,45	1.863	-1723
49	172,73	1.877	-1699
50	173,79	1.357	-1537
51	126,5	1.829	-1060
52	231,82	2.784	-1098
53	230,87	2.138	-978
54	257,23	1.928	-611
55	272,98	1.923	-373
56	257,42	1.895	-291
57	217,23	2.030	0
58	237,78	1.807	0
59	251,77	1.946	0
60	269,12	1.871	0
61	275,51	786	0
24	133,49	PR Gravedad	-873

Continuación Cuadro 5-4 Estaciones Gravimétricas por Perfil (Cota Terreno-Distancia y Profundidad Roca)

Perfil 4			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
1	71,76		-537
2	73,72	2.277	-659
3	92,81	2.148	-568
4	87,56	2.203	-535
5	67,35	2.264	-535
6	86,45	1.734	-854
16	81,45	1.616	-840
15	74,66	1.923	-725
14	73,22	1.862	-706
13	68,05	1.903	-725
12	65,23	2.043	-568
11	70,14	2.019	-544
10	66,86	1.974	-525
9	60,4	1.913	-387
8	72,1	1.934	-477
7	73,82	2.173	-535
Perfil 6			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
1	228,27		-1184
2	240,22	2.071	-1217
3	254,77	1.992	-1160
4	268,89	2.097	-1136
5	276,5	1.910	-1274
6	285,32	1.955	-1408
7	299,31	1.958	-1499
8	306,23	2.012	-1441
9	317,04	2.094	-1284
10	335,72	1.987	-1375
11	295,13	1.899	-1308
12	312,04	1.940	-1193
13	323,94	1.998	-1055
14	310,62	1.963	-897
15	304,8	1.964	-907
16	293,45	1.769	-897
17	296,92	1.945	-964
18	301,89	1.893	-978

Continuación Cuadro 5-4 Estaciones Gravimétricas por Perfil (Cota Terreno-Distancia y Profundidad Roca)

Perfil 7			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
49	59,54		0
48	63,97	257	-38
47	67,07	1.919	-76
46	69,39	1.836	-114
45	55,38	2.124	-153
44	55,34	1.908	-267
43	63,62	2.122	-343
42	66,1	1.890	-572
41	64,9	1.505	-535
40	63,15	2.476	-572
39	70,92	2.018	-649
38	95,32	1.908	-763
37	114,45	2.089	-763
36	104,11	2.018	-649
35	103,85	1.796	-801
34	107,44	2.033	-763
33	111,26	2.033	-801
32	121,17	1.939	-801
31	130,99	2.018	-649
30	139,7	1.965	-725
29	136,14	2.005	-916
1	146,09	2.880	-1107
2	148,99	2.006	-1260
3	145,02	1.974	-1183
4	163,63	2.059	-1183
5	166,7	1.952	-1107
6	170,45	1.961	-916
7	166,95	2.031	-840
8	178,7	1.948	-763
9	181,44	1.909	-801
10	183,06	2.025	-725
11	179,45	1.905	-649
12	194,7	2.017	-725
13	204,47	1.956	-535
14	193,1	2.153	-190
15	198,52	1.773	-649
16	198,54	1.802	-763
17	207,75	2.129	-801
18	220,21	1.934	-763
19	223,42	1.110	-763
20	229,87	1.575	-687
21	232,54	1.974	-535
22	242,71	2.035	-496
23	261,92	2.041	-420
24	272,42	1.941	-496
25	280,21	2.147	-420
26	284,16	1.910	-153
27	282,63	2.097	-190
28	304,05	1.429	0

Continuación Cuadro 5-4 Estaciones Gravimétricas por Perfil (Cota Terreno-Distancia y Profundidad Roca)

Perfil 8			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
12	72,93		-525
13	70,71	1.930	-525
14	69,22	1.929	-477
15	74,2	1.792	-530
16	84,57	1.179	-558
17	101,85	2.014	-850
18	130,68	2.069	-873
19	117,11	1.992	-1165
20	90,7	1.997	-1222
21	112,64	1.973	-1246
22	86,7	2.045	-1112
23	93,2	1.894	-1060
24	104,57	2.073	-1060
25	126,36	1.793	-873
29	143,94	1.751	-983
28	146,71	1.895	-873
27	179,8	1.914	-983
26	141,71	1.958	-926
1	188,38	3.472	-873
2	194,27	1.976	-716
3	202,08	1.857	-716
4	233,92	2.189	-687
5	236,23	2.033	-525
6	257,8	2.016	-134
7	277,47	1.937	-105
8	275,53	1.866	-40
9	319,68	2.089	0
10	329,94	1.852	0
11	332,28	1.905	0

Perfil 9			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
1	217,23		-391
2	244,24	2.436	-153
3	236,83	2.030	-153
4	219,51	1.995	-272
5	207,66	1.919	-300
6	203,14	1.995	-377
7	188,86	2.134	-859
8	171,91	1.925	-1059
9	117,89	1.816	-1093
10	95,03	2.405	-1102
11	98,45	1.348	-1093
12	79,93	1.989	-1093
13	76,49	2.071	-969
14	71,89	1.919	-635
15	71,76	1.921	-439
16	71,11	2.087	-286
17	75,18	1.659	-76
18	121,14	979	0

Continuación Cuadro 5-4 Estaciones Gravimétricas por Perfil (Cota Terreno-Distancia y Profundidad Roca)

Perfil 10			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
5	89,65		0
6	69,75	1.418	-67
4	71	1.693	-1317
3	81	1.944	-1523
2	87	2.009	-1909
1	87	1.963	-1661
7	89,33	3.373	-955
8	98,02	1.708	-1002
9	100,36	2.019	-1136
10	105,24	1.956	-907
11	115,29	1.993	-410
12	119,14	2.037	-430
13	123,39	1.814	-362
14	125,38	1.815	-501
15	130,04	2.024	-477
16	134,54	1.993	-477
17	143,49	1.605	-582

Perfil 12			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
1	129,27		-21
2	91,58	1.643	-119
3	102,51	1.741	-62
4	75,43	1.743	-114

Perfil 16			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
2	122,45		-902
3	118,37	1.993	-745
4	112,88	2.027	-537
5	109,71	1.994	-792
6	104,06	1.975	-864
7	102,01	1.952	-878
8	94,85	2.023	-1222
9	91,9	2.037	-1150
10	70,1	1.520	-1289

Continuación Cuadro 5-4 Estaciones Gravimétricas por Perfil (Cota Terreno-Distancia y Profundidad Roca)

Perfil 17			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
1	154,19		-955
2	160,41	1.941	-907
3	170,01	2.017	-1002
4	178,29	2.015	-1112
5	186,32	1.649	-1093
6	191,35	2.076	-1136
7	203,63	1.980	-1093
8	213,82	1.981	-1045
9	226,68	1.996	-955
10	240,78	2.014	-978
11	257,27	1.937	-1045
12	274,53	2.063	-930
13	290,42	1.979	-955
14	295,32	1.972	-955
15	299,05	1.983	-978
16	313,45	1.962	-1069
17	331,23	1.995	-1184
18	354,1	2.022	-1184
19	365,94	1.969	-1093
20	377,31	1.970	-907
21	381,16	2.080	-930
22	405,71	1.924	-1045
23	410,75	2.054	-978
24	409,48	1.907	-978
25	432,6	2.037	-930
26	454,74	1.972	-883
27	462,78	1.872	-864
28	478,34	2.040	-706
29	487,72	2.023	-272
30	515,97	3.139	0

Perfil 18			
Punto	**Cota Terreno (m)**	**Distancia Parcial (m)**	**Profundidad Roca (m)**
1	128,01		-1962
2	130,48	790	-2000
3	181,73	1.501	-2071
4	164,1	1.923	-1933
5	166,45	1.876	-1795
6	186,86	1.746	-1727
7	194,68	1.926	-1589
8	205,38	1.810	-1480
9	244,26	2.042	-1227
10	282,76	1.917	-930
11	318,71	1.923	-682
12	361,25	2.849	-616
13	401,77	2.775	-430
14	471,1	2.932	-158
15	507,04	2.939	-91
16	347,53	2.734	0

Continuación Cuadro 5-4 Estaciones Gravimétricas por Perfil (Cota Terreno-Distancia y Profundidad Roca)

Perfil 19			
Punto	Cota Terreno (m)	Distancia Parcial (m)	Profundidad Roca (m)
2	89,15		-854
3	78,48	1.994	-1279
4	85,78	1.874	-1413
5	78,5	1.970	-1432
6	78,18	1.898	-1384
7	130,24	2.225	-1394
8	175,51	1.271	-1508
9	181,8	1.279	-1546
10	99,93	839	-1499
11	108,06	1.438	-1585
12	174,15	1.862	-1566
13	181,43	1.963	-1566
14	187,02	1.988	-1555
15	192,84	2.212	-1537

Perfil 20			
Punto	Cota Terreno (m)	Distancia Parcial (m)	Profundidad Roca (m)
9	121,28		0
8	121,99	3.302	-137
7	117,78	1.371	-227
6	126,49	2.079	-181
5	130,08	2.317	-227
4	133,14	2.254	-272
3	136,71	2.305	-181
2	138,6	1.745	0
1	145,64	2.476	-238
10	150,97	2.160	-181
11	156,62	2.037	-137
12	162,98	1.879	-45
13	173,53	3.013	-137
14	176,59	1.037	-272
15	179,36	1.932	-727
16	184,4	1.942	-907
17	190,1	2.056	-864
49	194,45	1.960	-1045
50	200,49	1.922	-1136
51	206,49	1.908	-1184
52	215,21	2.489	-1273
53	223,16	1.498	-1136
54	232,56	2.016	-1136
55	240,21	1.999	-1184

5.6 Consideraciones

Para comparar o introducir información dentro de un banco de datos establecidos de gravedad es fundamental que dicha información esté referida a la Red Nacional de Gravedad la que a su vez está ligada a la Red Internacional de Gravedad (IGNS 71). De no cumplir con esta premisa es imposible obtener información coherente. El procedimiento seguido en este estudio cumple con lo expuesto anteriormente.

En el cálculo de la anomalía de Bouguer se utilizó una densidad de 2.1 gr/cm3 para el paquete sedimentario y 2.6 gr/cm3 para la roca base. Esta elección es coherente con el modelo calculado.

En general la zona estudiada mediante el método de gravedad se observan importantes variaciones de la anomalía de Bouguer que interpretadas, indican un modelo isobático con variaciones de la profundidad a la que se encuentra el basamento (ver Plano 5-2). La morfología de éste se obtuvo fundamentalmente de la interpolación de aquellos perfiles que fueron amarrados sobre afloramiento rocoso de la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes.

De acuerdo a estudios del valle central de Chile es normal que la potencia sedimentaria vaya aumentando hacia el sur con algunas excepciones. En el caso de la cuenca del río Mataquito se puede considerar como una de ellas. En el caso estudiado (cuenca del río Bio-Bio) sigue la tendencia aportada por los estudios del Valle Central.

La distribución de las estaciones de gravedad cada 2 Km. y grandes extensiones en que no existieron medidas de gravedad pueden influir notoriamente en el modelo calculado. De todas formas del análisis de la estructura del basamento se puede concluir la existencia de una gran depresión en la zona central, correspondiente al Valle Central de Chile con dirección norte-sur.

6. CARACTERIZACION HIDROGEOLOGICA CUENCA RÍO BÍO-BÍO

6.1. Aspectos Generales

Para definir las características del acuífero de la cuenca del río Bío-Bío, se trabajo en las siguientes áreas temáticas:

- Base de Datos Captaciones Subterráneas, Catastro de pozos y medición de niveles estáticos (Agosto-Septiembre 2012)
- Identificación y descripción Unidades Hidrogeológicas
- Generación de Curvas Equipotenciales y sentido de escurrimiento de las aguas subterráneas
- Identificación de sectores de isoprofundidad.
- Parámetros Elásticos (Permeabilidad)

En los puntos siguientes se describen las labores realizadas y resultados obtenidos en cada uno de los aspectos mencionados.

6.2. Bases de Datos Captaciones- Catastro de Pozos y Medición de Niveles

6.2.1 Base de Datos Captaciones Subterráneas

Con el objeto de generar una base de datos de captaciones de aguas subterráneas para el área de estudio, se realizó un análisis de la información obtenida en el Catastro Público de Aguas (CPA) y en los estudios correspondientes a la REF 1 y REF 2, identificados en el capitulo 2 del presente informe. A continuación se presentan los pasos que se siguieron para generar el listado de captaciones para el presente estudio, identificando las fuentes de donde se obtuvo la información, los filtros realizados y resultados obtenidos en cada punto.

i. Se utilizó, como base, el listado de Derechos de Aguas subterráneas, solicitado a la DGA, para el Estudio Hidrogeológico Itata - Bío-Bío Año 2011 (REF1), considerando aquellas provincias que forman parte de la Cuenca del Río Bío-Bío y que se identifican en el párrafo siguiente:

   Cuenca Bío Bío: VIII Región Provincia de Bío Bío (Código 02) y Provincia de Concepción (Código 03); IX Región Provincia de Malleco (Código 01). Luego se procedió a realizar las siguientes labores:

a. El listado de derechos se filtro separando aquellos derechos de aguas subterráneas que tuvieran coordenadas de aquellos sin coordenadas.

b. Los listados de derechos (con y sin coordenadas) se filtro dejando solo los Derechos de Aguas Subterráneas Aprobados.

c. Del listado de derechos aprobados y con coordenadas, se dejaron solo aquellos pertenecientes a la Cuenca del Bío-Bío (792 captaciones).

d. Las captaciones con derechos aprobados y sin coordenadas se les asignó, las coordenadas del centroide de la comuna a la cual pertenecían (200 captaciones)

ii. Por otro lado, se utilizó el Catastro de pozos, realizado para el Estudio Hidrogeológico Itata – Bío-Bío2011, el cual considero, un total de 321 pozos, entre Derechos de Agua (Aprobados y Pendiente Región y un caudal mínimo) y pozos provenientes de catastro realizado en el estudio de Conic BF. (REF2)

iii. Este último catastro (Estudio REF1) se comparó con el listado de Derechos de Aguas Subterráneas Aprobados, para ver las coincidencias (por número de expediente o nombre del propietario y/o peticionario o características de la captación o por ubicación).

iv. Una vez realizada la comparación anteriormente mencionada, se incluyeron todos aquellos pozos del Catastro de la REF 1 sin coincidencias con el listado de Derechos de Aguas Aprobados (99 pozos).

v. En el Estudio Hidrogeológico Itata – Bío-Bío se realizó una campaña a terreno para la medición de Nivel Estático. La base de este listado fue el catastro de pozos realizado para el mismo estudio, sin embargo en terreno se agregaron pozos, ubicados en terrenos, pero que no pertenecían al Catastro, los cuales se identificaron para ser comparados con derechos de agua aprobados y ver las coincidencias (por nombre del propietario o características del pozo o por ubicación).

vi. Aquellos pozos medidos en terreno, que no pertenecían al catastro de pozos del mismo estudio y no tuvieran coincidencia con el listado de Derechos de Agua Aprobados, fueron agregados al listado captaciones (49 pozos).

vii. Por lo tanto, dentro de la Cuenca del Río Bío-Bío se presenta un total de 940 captaciones. En el Cuadro siguiente se muestra un resumen de lo explicado en los puntos anteriores:

Resumen Listado de Captaciones Localizadas al interior de Cuenca de Bio-Bío

FUENTE DE INFORMACION	Nº TOTAL DE CAPTACIONES	Nº DE CAPTACIONES INCLUIDAS EN CUENCA BÍOBIO
Derechos de Agua (DGA)	2.343 (Aprob. y Pend, y con Coord)*	792 (Aprob y con coord.)
Catastro de Pozos (Est. REF1)	321	99
Listado de pozos Medición de NE, (Est. REF1)	207	49
Derechos de Agua (DGA)	200 (Aprob. y sin Coord)*	200 (Aprob y sin coord.)
SUB TOTAL CAPTACIONES		**1.140**

*Total de captaciones en las Provincias de Bío-Bío, Concepción y Malleco.

viii. Del total de captaciones del listado anterior existe un universo de 817 captaciones asociadas a un número de expediente identificado y 123 captaciones sin número de expediente.

ix. Se recopiló para un total de 194 captaciones, su expediente (respaldo en archivo PDF), el cual contiene entre otros antecedentes: la Prueba de gasto constante y/o variable del pozo y/o el Plano de Construcción.

Incorporación de Pozos localizados Fuera de la Cuenca

x. Anexo al listado de captaciones antes descrito, se incorporaron a la base de datos, captaciones cuya ubicación queda fuera de la cuenca, pero cuya información contribuye al desarrollo y caracterización del acuífero en estudio. Específicamente se identificaron e incorporaron 117 pozos, para los cuales se cuenta con su expediente técnico (prueba de gasto constante y/o variable y/o Plano de Construcción)

xi. Por lo tanto, la base total de captaciones quedó formado por 1257 captaciones, de las cuales 940 esta localizadas al interior de la cuenca del río Bío-Bío, 200 localizadas en el centroide de la comuna a la cual pertenecen y 117 fuera del límite de la cuenca. En el Cuadro siguiente se presenta un resumen de la información

Resumen Captaciones dentro y fuera de la Cuenca de Bío-Bío y captaciones con información de Prueba de Bombeo y/o Plano de Construcción

Captaciones	Captaciones con Prueba de Bombeo	Captaciones con Plano de Construcción	Nº Captaciones Totales
Al Interior Cuenca de Bío-Bío	194	170	940
Fuera de Cuenca de Bío-Bío	117	89	117
Centroide Comuna respectiva	-	-	200
Totales	**311**	**259**	**1.257**

6.2.2 Campaña de Terreno Medición de Niveles

Se realizó una campaña de medición de niveles estáticos en pozos localizados en la cuenca del río Bío-Bío, específicamente esta labor se desarrolló en el período comprendido entre los meses de Agosto y Septiembre del año 2012, se encuestaron y/o midieron 200 pozos en la cuenca, dicha labor fue realizada por dos técnicos de manera independiente, cada uno de ellos contaba con todos los implementos necesarios para un correcto trabajo de terreno:

- Movilización propia
- Pozómetro
- GPS
- Máquina Fotográfica
- Celular
- Ficha de Encuesta
- Planos con ubicación de pozos
- Carta Credencial

Cabe indicar que se alcanzó un rendimiento promedio entre 5 a 6 pozos diarios efectivamente encuestados y/o medidos, es importante mencionar que al habitual escenario de desarrollo de esta actividad (el cual involucra visita a pozos sellados, imposibilidad de ubicar al propietario, no se permite el acceso, pozos abandonados, etc.), se sumo la variable climática en este período (precipitaciones abundantes) lo cual disminuyó el avance y/o rendimiento diario de pozos encuestados.

Para definir los pozos a encuestar se contaba con el catastro de pozos elaborado en la presente consultoría, el cual contiene entre otros antecedentes la ubicación en coordenadas UTM (Datun WGS 84 huso 19) de cada una de las captaciones. Cabe recordar que gran parte de la información elaborada esta

siendo incorporada al SIG, motivo por el cual fue posible visualizar la posición y/o ubicación espacial de las captaciones del catastro.
Específicamente en la cuenca del río Bío-Bío se cuenta con un catastro de 1057 captaciones subterráneas, en base a este universo y con el objeto de realizar una encuesta de pozos que permitiera conocer el comportamiento del acuífero (profundidad de nivel estático, sentido de escurrimiento de las aguas) en toda su extensión, se subdividió el acuífero central de la cuenca del río Bío-Bío en ejes verticales (norte –sur) equidistantes a 5 Km., lo anterior permitió visualizar, seleccionar e identificar preliminarmente los sectores y los pozos que se debían encuestar para obtener una distribución espacial de la información los más completa y uniforme posible.

Cabe indicar que durante el recorrido de terreno se identificaron nuevos pozos que se incorporaron al catastro inicial. Se encuestaron 200 pozos, en la página siguiente se adjunta la ficha tipo utilizada en la encuesta realizada y en el Anexo 6-4, se presenta cada una de las fichas elaboradas.

Ficha Catastro Pozos Utilizada

ESTUDIO HIDROGEOLOGICO CUENCA DE RIO BIO-BIO (AÑO 2012)

REGISTRO DE POZOS

1.- UBICACIÓN

NUMERO DEL POZO :	51	EXPEDIENTE	ND-802-418_1/1
COMUNA :	NEGRETE		
LOCALIDAD :	NEGRETE		
NOMBRE DEL PREDIO:	ESSBIO		
PROPIETARIO:	EMPRESA DE SERVICIOS SANITARIOS DEL BIO BIO S.A.		
ENTREVISTADO :	VECINO		
COORDENADAS UTM	NORTE: 5.837.402	ESTE:	718.871
DATUM	WGS-84	HUSO :	18 Sur
		COTA:	71

2.- CARACTERISTICAS POZO Y DIAGNOSTICO A LA FECHA

NIVEL ESTATICO (m):	4,08	PROFUNDIDAD (m):	40
NIVEL DINAMICO (m):		DIAMETRO (pulg):	8"
CAUDAL (l/s):	16	POTENCIA BOMBA	
FECHA CONSTRUCCIÓN.	2005		
DERECHOS DE AGUA:			

USO ACTUAL: RIEGO ( ) POTABLE (X) INDUSTRIAL ( )
OTRO ( ) SIN USO ( )

3.- FRECUENCIA DE BOMBEO

VERANO	HORAS	**8**	DIAS	30	MESES	OCT - MARZO
INVIERNO	HORAS	**8**	DIAS	30	MESES	ABRIL - SEPT

OBSERVACIONES: Nº DE ARRANQUES 2.100 POZOS

ENCUESTADOR: CECILIA NAVARRETE
FECHA: 2012

6.3. Definición de Acuíferos

Para definir los acuíferos en el área en estudio, se tomo como base la información geológica desarrollada en el capitulo 4 del presente Informe de Etapa, de este modo, y a nivel preliminar se consideró toda el área como un solo gran acuífero, el cual se subdividió en 3 zonas o sub acuíferos, las cuales se diferencian entre si por el tipo de relleno permeable presente o constituyente.

La extensión en planta del acuífero corresponde al límite roca-relleno definido y presentado en el Plano Geológico (ver Plano 4-1). A continuación se indica el tipo de relleno que conforma cada una de las unidades acuíferas definidas:

- Sub-Acuífero 1: Unidad **Q3av** Depósitos de avalancha volcánica

- Sub-Acuífero 2: Unidades
  - **Q1 :** Depósitos fluvio-aluviales Sedimentos de valles actuales
  - **Q1fa :** Depósitos Fluvio-Aluviales antiguos
  - **Q1m :** Terrazas Marinas (Pleistoceno-Holoceno)
  - **Q1t :** Sedimentos de terrazas fluviales (Holoceno)
  - **Hcrl :** Depósitos del cono fluvial del río Laja (Pleistoceno-Holoceno)
- Sub-Acuífero 3: Unidad PlHlm Formación La Montaña (Pleistocena-Holocena) y Unidad **PlHca** Sedimentos Glacio-Lacustres Collipulli-Angol (Pleistocena-Holocena)
-

En el Cuadro Nº 6-1 se presenta un resumen para cada sub acuífero definido, con el tipo de relleno que lo constituye y su extensión.

Cuadro 6-1 Definición Sub-Acuíferos Cuenca del Bío Bío

Sub- Acuífero Nº	Unidad Geológica	Área (km2)
1	Q3av	1.792,7
2	Q1, Q1fa, Q1t, Hcrl, Q1m	3.377,9
3	PlHca, PlHlm	4.003,3

En el Plano 6-1 Definición de Acuíferos y Captaciones Subterráneas se muestra la delimitación y extensión de los 3 sub sectores o sub acuíferos definidos.

Cabe indicar que todos los planos confeccionados se están desarrollando en una plataforma SIG, con el objeto que al final del estudio se tenga un proyecto con toda la información generada.

6.4. Unidades Hidrogeológicas

A continuación se describen las unidades hidrogeológicas presentes, las cuales se han agrupado según clases o categorías, que van desde Alta a Nula importancia hidrogeológica, de acuerdo a su potencial hidrogeológico.

Esta distinción según categorías fue adoptada a partir del método propuesto por Struckmeyer y Margat (1995) y combina información acerca del potencial acuífero (productividad y extensión) con el tipo de régimen de flujo (intergranular o fisurado). Este método es utilizado por el SERNAGEOMIN para la elaboración de las cartas hidrogeológicas de la cuenca de Piedra Pómez, Salar de Maricunga y Salar de Pedernales, entre otras. En el presente trabajo se ha considerado que las unidades se clasificarán según su potencial para transmitir agua, ya sea que se encuentre saturada, parcialmente saturada o no saturada.

Las unidades hidrogeológicas reconocidas en superficie y en profundidad se han representado a través de seis perfiles hidrogeológicos cuya ubicación en planta se muestra en el Plano 6-2 adjunto; por otro lado en las Figuras de las páginas siguientes se presentan cada uno de los perfiles estratigráficos desarrollados. Para esto se ha considerado la información estratigráfica presentada por los peticionarios en sus solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

i. Unidad de Alta Importancia Hidrogeológica

Bajo esta denominación se agrupan los depósitos no consolidados del cuaternario tales como depósitos fluviales y fluvio-aluviales, actuales y antiguos, depósitos coluviales sedimentos de terrazas fluviales y terrazas marinas.

Litológicamente está conformada por gravas y arenas polimícticas, de origen principalmente volcánico, en una matriz de arenas finas y escasos limos, que presentan una baja compactación.

La importancia hidrogeológica de esta unidad radica en que tiene la habilidad de conducir las aguas provenientes de la recarga hacia niveles inferiores saturados.

ii. Unidad de media a baja importancia hidrogeológica

En esta categoría se han agrupado sedimentos que por su origen glacio-lacustre poseen porcentajes de finos superiores a 30%. Están genéticamente relacionados con procesos de glaciación y deglaciación de masas de hielo ubicadas a mayores elevaciones. Estos depósitos se reconocen en las riberas de los principales cauces, formando terrazas o lomajes suaves, que permiten un buen desarrollo de suelo y vegetación, lo cual resulta conveniente para la agricultura, ganadería o el emplazamiento habitacional.

Litológicamente consiste en depósitos estratificados, conformados por clastos angulosos, predominantemente volcánicos, de tamaño bloque a arena en una matriz arenosa-arcillosa.

iii. Acuícludos de nula importancia hidrogeológica

Incluye rocas intrusivas y metamórficas que se reconocen en la zona de estudio.

6.4.1. Perfiles Hidrogeológicos

Perfil A-A

Este perfil es el más extenso que se ha elaborado en el presente informe, alcanzando una longitud de aproximadamente 120 km y una orientación NO-SE. En su extremo Norte se alcanza a detectar, en los sondajes 67 y 68 (ND-0802-3945), ya sea en superficie o en forma muy somera rocas intrusivas paelozoicas que corresponden al acuífugo o basamento impermeable.

Desde aproximadamente el sondaje 58 (ND-0802-3869) se reconoce en superficie la unidad de alta importancia hidrogeológica que en este sector está referida a una variedad de depósitos de diferente génesis, no obstante, tienen un comportamiento hidrogeológico semejante. Esta unidad está conformada por un alternancia de arenas gruesas, medias grava, ripio y con niveles de mayor contenido de arcilla (no superior al 20%) y ocasionalmente se describen fragmentos de roca denominados “tosca” que corresponderían a fragmentos de roca volcánica de tamaño bloque.

Desde el sondaje 58 al 252 (NR-0802-483), esta unidad está conformada principalmente por depósitos de avalancha volcánica, asociados a colapso parcial de edificios volcánicos. Hacia el sur estos depósitos consisten en depósitos fluvio-aluviales, los cuales están conformados casi en su totalidad por alternancia de arenas medias, fina y escasos finos. Finalmente en el sector sur del perfil, esta unidad se encuentra asociada a sedimentos morrénicos y glacio-lacustres de la Fm. La Montaña, los cuales presentan una composición relativamente uniforme, y bancos lenticulares de arcillas y arenas finas, todos ellos con poca compactación y sin cementación.

Bajo la unidad de alta importancia hidrogeológica se reconoce a lo largo de casi todo el perfil la presencia de una nivel arcilloso-limoso, que en algunos sectores presentaría alta plasticidad, el cual se ha asignado s la unidad hidrogeológica de media a baja importancia hidrogeológica. Aunque la mayoría de los sondajes sólo alcanza los primeros metros de esta unidad, el sondaje 121 (ND-0802-795) ha permitido establecer que esta unidad llega a tener, en algunos niveles, un contenido de finos de tipo arcilla-limo de hasta 95 %.

Perfil B-B

Este perfil tiene una orientación general NO-SE y tiene una longitud de aproximadamente 70 Km.

A lo largo de todo el perfil se reconoce la unidad hidrogeológica de alta importancia conformada por arenas gruesas, arenas medias y finas con proporciones variables de gravilla y grava. Esta unidad está expuesta en superficie casi en toda su extensión, salvo en la zona sur del mismo, en la cual se encuentra cubierta por sedimentos morrénicos y glacio-lacustres, que originan morfologías de lomajes de mayor elevación topográfica.

En el sector del pozo 69 (ND-0802-395) se identificó en la base del sondaje un aumento del contenido de arcilla, sobre un nivel calificado como conglomerado con materia orgánica, que presumiblemente se asocia a un nivel de baja energía de sedimentación, posiblemente de origen lagunar, que contenía abundante vegetación. Este nivel se presentaría de manera ininterrumpida entre este punto y el sondaje 60 (ND-0802-3905).

Perfil C-C

Este perfil se extiende por aproximadamente 50 km y tiene una orientación NS. Desde el río Guaqui al Renaico se exhibe en superficie la unidad de alta importancia hidrogeológica, que se origina por la depositación asociada a los principales cauces actuales. En el sector sur de este perfil se reconoce en superficie la unidad conformada por depósitos glacio-lacustres que poseen altos contenidos de finos (unidad de media a baja importancia hidrogeológica), la cual, hacia el norte del perfil, subyace a la unidad del alta importancia hidrogeológica.

En el sector del sondaje 199 (ND-0901-2300) se reconoció la roca impermeable, que de acuerdo a su disposición podría corresponder a Lavas de Hulehueico. Sin embargo, esta roca no se reconoce en el pozo 234 (ND-0901-2752) de mayor profundidad y distante aproximadamente 2500 m, por lo cual este nivel de roca podría corresponder tanto al basamento rocoso como a un fragmento de dimensiones indeterminadas, que no presentaría continuidad en profundidad. Con los antecedentes disponibles no es posible dilucidar esta situación, sin embargo se espera que el estudio geofísico contribuya a esto.

En la base del sondaje 28 (ND-0802-3346), se reconoció una unidad compuesta por arena y gravilla, que se calificó como una unidad de alta importancia hidrogeológica.

Perfil D-D

Este perfil se ubica en el sector costero de la VIII Región y se extiende por aproximadamente 30 Km. entre las localidades de Hualpén y Coronel, caracterizado por la gran actividad industrial, conocido comúnmente con Escuadrón.

En superficie se reconoce a lo largo de todo el perfil depósitos conformados por arenas medias, arenas fina, gravas que se han asociado a la unidad de alta importancia hidrogeológica y que geomorfológicamente conforman en parte la terraza marina. Subyaciendo a esta unidad y a profundidades entre 20 y 90 m se reconoció el basamento impermeable, que en este sector consiste pizarras, filitas y metareniscas (acuícludo de nula importancia hidrogeológica).

En el sector N del perfil entre las unidades antes descritas se reconoció un nivel sedimentario de material fino que se ha asociado a una unidad de media a baja importancia hidrogeológica.

Perfil E-E´

Este perfil tiene una longitud de aproximadamente 45 Km. y una orientación principal SO-NE. La escala de trabajo utilizada permite obtener una descripción de mayor detalle de la configuración en subsuperficie de las unidades hidrogeológicas reconocidas en la zona de estudio.

En el extremo SO se determinó que a nivel regional el pozo 187 (ND-0901-2086) se emplaza en una unidad geológica que corresponde a sedimentos glacio-lacustres, conformados principalmente por arcillolitas, arenas y conglomerado, calificados como unidad de media baja importancia hidrogeológica. Sin embargo, localmente se emplaza en depósitos fluviales-aluviales asociados al cauce del río Huequén, los cuales consisten en arenas y gravas y por lo tanto se han definido como de alta importancia hidrogeológica. Esta última unidad se extiende en profundidad hacia el N, reconociéndose entre 20 y 40 m bajo la superficie del terreno.

La mayor parte de la superficie que cubre este perfil se encuentra conformada por una unidad de media a baja importancia hidrogeológica conformada por sedimentos de origen glacio-lacustre, mientras que bajo las arenas y gravas se reconoció otra unidad de semejante características hidrogeológicas, que consiste en un potente estrato de arcillas de alta plasticidad, la cual podría tener un origen lagunar, ya que en algunos pozos se detectó presencia de materia orgánica.

Finalmente los sondajes 44 (ND-0802-3595) y 199 (ND-0901-2300) detectaron roca a los 20 m y 70 m, respectivamente que, en el evento de tener extensión regional constituiría el basamento rocoso o acuícludo de nula importancia hidrogeológica). Considerando la morfología de la superficie del terreno se

presume una profundización de esta unidad hacia el NO, en la dirección principal de la red de drenaje.

Perfil F-F

Este perfil tiene una dirección casi NS y se extiende por aproximadamente 60 Km. En el sector Norte y central del mismo es posible reconocer en superficie depósitos de arenas medias, finas y ocasionalmente gravas y bolones, que conforman un extenso abanico aluvial originado por depositación entorno a los cauces que se ubican entre los ríos Laja y Bío Bío. Estos depósitos se asimilan a la unidad de alta importancia hidrogeológica.

En el sector sur del perfil, en cambio, priman en superficie depósitos con alto contenido de finos como limos y arcillas, que tienen un origen glacio-lacustre, y se asocian a la unidad de media a baja importancia hidrogeológica. En los sondajes 87 (ND-0802-420) y 77 (ND-0802-4005) la existencia de esta unidad queda evidenciada a demás por la surgencia que se indicó en estos dos sondajes. Cabe señalar que la información estratigráfica de los pozos 258 y 259 (expedientes VPC-0802-5 y VPC-0802-6, respectivamente) no se utilizó en la elaboración de los perfiles por cuanto resultó ser poco precisa o inconsistente con la de los pozos adyacentes.

En este sector, la unidad antes descrita sobreyace a sedimentos conformados por arenas, las cuales se asocian a la unidad de alta importancia hidrogeológica.

Finalmente se puede indicar que ninguno de los sondajes analizados alcanzó al basamento rocoso impermeable, no obstante en los sondajes 103 (ND-0802-571) y 125 (ND-0802-807) se reconoció un nivel rocoso, aproximadamente entre los 14 y 16 m de profundidad, que por ser una condición muy local no se dibujó en el perfil.

En las páginas siguientes se presentan los perfiles estratigráficos elaborados, pudiéndose apreciar en cada uno de ellos, las unidades acuíferas en vertical atravesadas y definidas en este estudio.

Insertar perfil A-A

Insertar perfil B-B

Insertar perfil C-C

Insertar perfil D-D

Insertar perfil E-E

Insertar perfil F-F

6.5. Curvas Isofreáticas y Sentido de Escurrimiento

Durante la campaña de terreno realizada en esta etapa (Agosto y Septiembre del año 2012), se procedió entre otras labores, a medir el nivel estático de 180 pozos distribuidos espacialmente en la cuenca del río Bío-Bío; cada pozo fue georeferenciado en coordenadas UTM (Datum WGS 84) y en cota a través de un GPS navegador. (ver descripción punto 6.2 anterior).

En base a la información de cotas del nivel estático se generó un plano con curvas isofreáticas o equipotenciales cada 20 m, el rango comprendido de las curvas fue entre los 500 msnm y los 40 msnm. Específicamente para generar las curvas se analizaron y/o probaron distintos métodos de interpolación (Natural Neighbor, Kriging e IDW) incluidos como alternativas dentro de las opciones de herramienta del sofware ARGIS. Finalmente y de acuerdo a los resultados obtenidos, se adopto la interpolación Natural Neighbor ("cercanía" o "proximidad natural") para generar el plano de isofreáticas o equipotenciales. Este método genera una triangulación de Delauney a partir de las locaciones medidas y selecciona los nodos más cercanos para crear polígonos o escudos convexos alrededor de las locaciones que los conforman. Luego, pondera sus valores en base a un área proporcionada. Este método es el más adecuado cuando los valores se encuentran distribuidos de manera desigual. Es una técnica de interpolación muy adecuada para propósitos genéricos y posee la ventaja de no tener parámetros específicos y complejos como radio, cercanía, lag, sill u otros

En el Anexo Planos, se adjunta el plano 6-4 con las curvas equipotenciales trazadas.

Sentido Escurrimiento

El patrón general de flujo, muestra claramente una tendencia de escurrimiento similar a la de la cuenca hidrográfica. La orientación general de las curvas equipotenciales es E-W en la zona norte y central de la cuenca y SE-NW parte sur de la cuenca, en general son perpendiculares al flujo superficial de ríos y esteros.

En general la zona de las subcuencas de los ríos Laja y Bío-Bío comprendida al oriente de la ruta 5 Sur, presenta un escurrimiento de las aguas subterráneas en dirección E-W y valores del gradiente hidráulico comprendido entre 0.0064 y 0.0046. Por otro lado, el sector sur (subcuenca río Malleco) presenta un escurrimiento en dirección SE-NW con un valor de gradiente hidráulico igual a 0.0078.

Luego al poniente de la ruta indicada anteriormente, se produce un cambio en la dirección de escurrimiento de las aguas subterráneas en cada una de las subcuencas, todas van convergiendo a la confluencia del río Bío-Bío (sector de Nacimiento río Malleco con Bío-Bío y sector de San Rosendo río Laja con Bío-

Bío); específicamente el sentido de escurrimiento y el gradiente hidráulico asociado a cada una de estas subcuencas es:

- Subcuenca río Laja sentido escurrimiento NE-SW, gradiente hidráulico 0.0019
- Subcuenca río Bío-Bío, sentido escurrimiento E-W, gradiente hidráulico 0.0058
- Subcuenca Río Malleco , sentido escurrimiento SE-NW

Finalmente todas las aguas subterráneas de la cuenca convergen al sector de confluencia de los ríos Bío-Bío y Laja y escurren en el mismo sentido de las aguas superficiales del río Bío-Bío, entre San Rosendo y la desembocadura en el mar.

En el plano 6-4 se muestran las curvas equipotenciales generadas, el sentido de escurrimiento de las aguas subterráneas y los gradientes hidráulicos calculados.

Profundidad Nivel Estático

Finalmente con la información de profundidad de niveles estáticos medidos se estratifico en cinco tramos la profundidad del nivel estático. En el Cuadro 6.3 siguiente se muestran los rangos de cada uno de los tramos definidos y la cantidad de pozos existente en cada tramo.

Cuadro 6.3 Tramos Con Rangos de Profundidad Nivel Estático Definidos

Rango Profundidad Nivel Estático (m)	Cantidad de Pozos	% de pozos del Total
0-5	107	53,8 %
5-10	47	23,6 %
10-25	36	18,1 %
25-50	5	2,5 %
>50	4	2,0 %
Totales	**199**	**100 %**

En el Plano 6-5 se muestra la distribución espacial de los sectores, por rango de profundidad definidos, para la cuenca del Bío Bío. Cabe indicar que el método de interpolación utilizado para generar este plano fue el mismo que se utilizó para la generación de las curvas equipotenciales (Natural Neighbor

6.6. Parámetros Elásticos

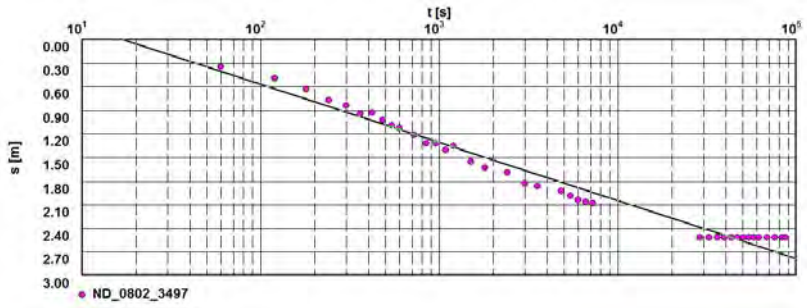
Para la determinación de los parámetros elásticos de los acuíferos asociados a la cuenca del río Bío-Bío, se ha empleado la información técnica contenida en los expedientes de solicitudes de derechos de aguas subterráneas asociados a captaciones tipo pozo profundo. Específicamente los antecedentes utilizados

fueron: planos de construcción de pozos, pruebas de bombeo de gasto variable y constante e informe técnicos incluidos en expedientes.
Para determinar la permeabilidad del acuífero de Bío-Bío se utilizó la información proveniente de la prueba de gasto constante y variable de 185 pozos.

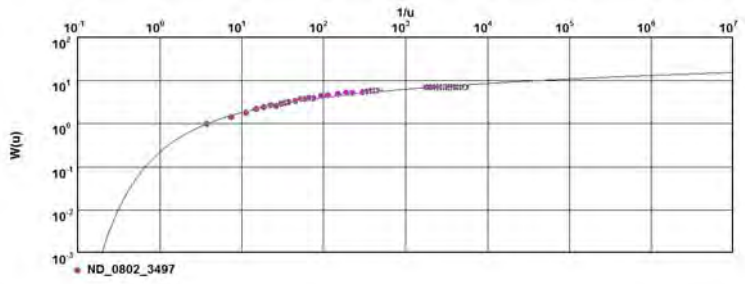
Específicamente para un total de 185 pozos se calculo la permeabilidad del acuífero en base a los datos de la prueba de gasto constante incluida en los antecedentes técnicos de los expedientes recopilados. Para lo anterior se utilizó el Software Aquifer Test versión 2.5 para Windows, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc . Específicamente se determino la permeabilidad utilizando los métodos de Cooper – Jacob y Theis. Los datos utilizados y los resultados obtenidos para cada uno de los pozos analizados se adjunta en el Anexo 6-3. A manera de ejemplo en la Figura 6-1 siguiente se presenta los gráficos obtenidos para dos pozos en particular.

Figura 6-1 Resultado Calculo Permeabilidad Utilizando Datos prueba de Gasto Constante Método Cooper & Jacob y Theis

Nº Pozo: 39	Expediente: ND-0802-3497
Caudal: 15.0 (l/s)	Método: Cooper & Jacob
Permeabilidad: 1.85E-04 (m/s)	



Nº Pozo: 39	Expediente: ND-0802-3497
Caudal: 15.0 (l/s)	Método: Theis
Permeabilidad: 1.68E-04 (m/s)	



Finalmente en el Anexo 6-3, se adjunta los valores de permeabilidad calculados por cada uno de los métodos antes señalados. El valor final adoptado corresponde al promedio de ambos métodos, para cada uno de los 185 pozos analizados. Con los valores obtenidos se pudo visualizar los rangos entre los cuales fluctúa la permeabilidad en la zona en estudio, en el Cuadro 6-4 siguiente se muestran los rangos definidos y la cantidad de pozos existente en cada tramo.

Cuadro 6-4 Rango de Permeabilidad Obtenidos

Rango Permeabilidad (m/s)	Cantidad de Pozos	% de pozos del Total
< 4,50E-05	73	39,46
4,50E-05 - 1,31E-04	46	24,86
1,31E-04 – 5,193E-04	33	17,84
5,19E-04 – 2,32E-02	33	17,84
Totales	**185**	**100 %**

Finalmente se confeccionó un plano (ver Plano 6-3) en el cual se visualiza espacialmente las zonas o sectores con los distintos rangos de permeabilidad definidos. Específicamente para generar este plano se analizaron y/o probaron distintos métodos de interpolación (Natural Neighbor, Kriging e IDW) incluidos como alternativas dentro de las opciones de herramienta del software ARGIS. Finalmente y de acuerdo a los resultados obtenidos, se adopto la interpolación Natural Neighbor ("cercanía" o "proximidad natural") para generar el plano de isotransmisibilidades. Este método genera una triangulación de Delauney a partir de las locaciones medidas y selecciona los nodos más cercanos para crear polígonos o escudos convexos alrededor de las locaciones que los conforman. Luego, pondera sus valores en base a un área proporcionada. Este método es el más adecuado cuando los valores se encuentran distribuidos de manera desigual. Es una técnica de interpolación muy adecuada para propósitos genéricos y posee la ventaja de no tener parámetros específicos y complejos como radio, cercanía, lag, sill u otros.

6.7. Explotación y Uso de las Aguas Subterráneas

Para estimar y determinar la explotación y uso de las aguas subterráneas en la cuenca del río Bío-Bío, se utilizó por una parte la información de derechos otorgados, entregada por la DGA, y los antecedentes recopilados en estudios anteriores. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- La DGA entregó a este consultor un listado con las solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados, en trámite y denegados para la cuenca del río Bío Bío.

- La información entregada identifica para cada solicitud, el número de expediente respectivo, el nombre del peticionario, la ubicación (comuna,

coordenadas), el caudal solicitado y el estado de la solicitud, es decir, se indica si ésta ha sido otorgada, denegada, o si se encuentra pendiente. En el cuadro siguiente se muestra el número de expedientes totales (con y sin coordenadas) con derecho de agua subterránea otorgado y el monto total de caudal otorgado (el detalle de cada uno de los expediente se puede apreciar en el Anexo 6.1)

Q otorgado	
Total (l/s)	**Nº Expedientes**
6.263,54	992

- Cabe mencionar que el listado anterior no indica el uso que le será dado a los recursos subterráneos solicitados, motivo por el cual, la distribución del uso de las captaciones subterráneas se basó, en los siguientes criterios y/o antecedentes:

  - Revisión de antecedentes indicativos del uso en el expediente
  - Dato obtenido del catastro efectuado en el presente estudio
  - Nombre del propietario del derecho, es decir:
    Sanitarias y Comité de APR ➔ uso potable
    Sociedad agrícola, ganaderas, etc. ➔ uso riego
    Industrias ➔ uso industrial
  - Si el caudal otorgado era menor a 1,5 l/s ➔ uso doméstico

En el cuadro siguiente se presenta la distribución del recurso subterráneo por uso y caudal.

Captaciones Uso	**Cantidad**	**Distribución**	**Q (l/s)**	**Distribución**
		por uso %	**Otorgado**	**por Q %**
Agua Potable	100	10,08 %	1.524,8	24,34 %
Industrial	152	15,32 %	2.717,7	43,39 %
Riego	65	6,55 %	896,1	14,31 %
Doméstico	552	55,65 %	355,7	5,68 %
Sin Información	123	12,40 %	769,4	12,28 %
Total	**992**	**100,0%**	**6263,5**	**100 %**

- Finalmente cabe recordar que existe un total de 1257 captaciones subterráneas identificadas en la cuenca del Bío Bío, de las cuales 992, tienen asociado un número de expediente y un derecho de aprovechamiento otorgado; el resto de las 265 captaciones identificadas, se encuentran en alguno de los siguientes situaciones:

  - Captación con solicitud y/o expediente y con derecho denegado, en trámite y/o pendiente.
  - Captación sin solicitud de derecho de aprovechamiento.

7. ESTIMACION RECARGA ACUIFERO CUENCA RIO BÍO-BÍO

7.1. Aspectos Generales

Para estimar preliminarmente las recargas al acuífero se desarrollo un modelo de simulación hidrológico simplificado, el cual fue implementado en una planilla Excel, con hojas de datos y hojas de resultados interrelacionadas entre sí.

El modelo considera la interacción de sectores de riego, cauces superficiales, embalses y pozos de bombeo. Se simulan 12 meses de un año con disponibilidad de agua para una probabilidad de excedencia dada, tanto en lo que se refiere a los cauces superficiales como a las precipitaciones.

A continuación se describe cada una de las partes del modelo.

A) Sectores de Riego

Cada sector de riego posee un área de cultivo y un área no cultivada, ésta última compuesta de bosques, sectores de cerros, etc. A su vez, dentro del área de cultivo, una parte es de riego y la restante es de secano. En esta área se tiene una diversidad de cultivos con una demanda evapotranspirativa, que se calcula con la información mensual de la evapotranspiración potencial y el coeficiente de cultivo. Parte de esa demanda es satisfecha por la precipitación efectiva, luego por el agua captada en un cauce superficial, luego por el agua disponible en un embalse, y si aún faltara, por el agua bombeada desde pozos. Se considera que al interior de los predios existe un reuso de los derrames, por lo que la demanda de riego a nivel predial es inferior a la demanda de riego a nivel de cultivos.

Un volumen de agua importante en este balance se genera por la precipitación en exceso, es decir aquella que no es aprovechada para la evapotranspiración. De esta precipitación excedente, una parte percola hacia el acuífero y otra se incorpora a los cauces superficiales. Esta proporción de precipitación en exceso que percola es un parámetro del modelo, que tiene una importante incidencia en la percolación total a la napa, como queda demostrado en el análisis de sensibilidad que se presenta más adelante.

Un sector de riego puede ser abastecido por un embalse, y un embalse puede abastecer a varios sectores de riego. En cada embalse se tiene una cierta disponibilidad anual de agua, y esa disponibilidad se distribuye entre esos sectores, de acuerdo a un porcentaje preestablecido. La distribución mensual del agua en cada sector se hace proporcionalmente a la distribución de la demanda.

En este caso, se considera un total de 10 sectores de riego, delimitados en función de las subcuencas existentes en la cuenca del río Bío-Bío. En la Figura Nº 7-1 se presenta la zonificación indicada.

Para identificar la superficie de riego y secano dentro de la Cuenca de Bío-Bío, se utilizó la información del Censo Agropecuario 2007. Esta información se descargo de la página oficial de ODEPA del Ministerio de Agricultura (www.odepa.gob.cl). Desde allí se descargaron 2 archivo shp, con la información de Distritos censales para la VIII y IX Región, con el objeto de cubrir toda la Cuenca en estudio. Además se descargaron dos archivos Excel, con la información de cifras totales y Usos de Suelo, ambos del VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal, esta información se encuentra por distrito censal. El detalle del procedimiento seguido y los resultados obtenidos se presentan en el Anexo 7-1.

Los cultivos fueron separados en 3 rubros: a) cultivos anuales y permanentes, b) Especies Forrajeras Permanentes y c) Plantaciones Forestales. En tanto, la zona de no cultivo incorpora también 3 tipos de vegetación o suelo: a) Praderas Mejoradas y Praderas Naturales, b) Barbechos y c) Matorrales. El resto de la superficie de cada subcuenca, corresponde a áreas aportantes al sector de riego respectivo. En estas áreas se incluyeron las superficies de bosque nativo, que en toda la cuenca suman un total de 6181 km2, lo que representa aproximadamente un 25% de la superficie total de la cuenca, igual a 24337 km2. En el Cuadro Nº7-1 se presenta el detalle de superficies por sector.

Para obtener a Evapotranspiración Potencial en cada una de las subcuencas en estudio se realizó el siguiente cálculo y procedimiento:

i. La fuente de información de los sectores de evapotranspiración por región se obtuvo del shape de agro clima del SIG de la Comisión Nacional de Riego, en el cual se presenta la evapotranspiración mensual y anual por sectores (distritos) y región.

ii. La Cuenca fue dividida en subcuencas de manera de obtener valores representativos de cada sector de evapotranspiración asociado a cada una de las subcuencas que conforman la Cuenca del río Bío-Bío.

iii. Por lo cual, para cada subcuenca se calculó la superficie de cada sector de evapotranspiración, contenida en la subcuenca. Para luego calcular el porcentaje de participación (en relación a la superficie) de cada sector de evapotranspiración en la subcuenca de manera que la suma de porcentaje entregara la superficie total de cada subcuenca.

iv. Este porcentaje fue aplicado a los valores de evapotranspiración mensual y anual de cada sector, obteniendo el valor ponderado de evapotranspiración según el aporte de superficie de cada sector a cada subcuenca.

A continuación se presenta como ejemplo el trabajo realizado para la subcuenca “Laja Bajo”.

a) La subcuenca Laja Bajo, está formada por 5 sectores (distritos) con distinta evapotranspiración.

Sectores en la Sub Cuenca Laja Bajo														
Sector en la VIII Región		Valores de Evapotranspiración Mensuales y Anual en la VIII Región												
Código Distrito	Superficie (ha)	EPT-01	EPT-02	EPT-03	EPT-04	EPT-05	EPT-06	EPT-07	EPT-08	EPT-09	EPT-10	EPT-11	EPT-12	EPT-Anual
8-06	311707,52	146,0	137,2	113,2	80,5	47,7	23,8	15,0	23,8	47,8	80,5	113,3	137,2	966,0
8-11	390177,66	148,0	139,1	114,7	81,5	48,2	23,9	15,0	23,9	48,3	81,5	114,8	139,1	978,0
8-15	154852,75	165,0	155,2	128,5	92,0	55,5	28,8	19,0	28,8	55,5	92,0	128,5	155,2	1104,0
8-26	422250,65	145,0	136,4	112,7	80,5	48,2	24,6	16,0	24,6	48,3	80,5	112,8	136,4	966,0
8-27	206828,64	156,0	146,7	121,2	86,5	51,7	26,3	17,0	26,3	51,8	86,5	121,3	146,7	1038,0

b) La superficie de cada sector de evapotranspiración en la subcuenca y los porcentajes de participación en el total del área de la subcuenca se presentan a continuación.

Código Sector	Superficie del Sector en la VIII Región (ha)	Superficie del Sector en la Subcuenca Laja Bajo (ha)	Porcentaje de participación del sector en la Subcuenca Laja Bajo
8-06	311707,52	23184,21	0,12
8-11	390177,66	105370,19	0,55
8-15	154852,75	37,31	0,00
8-26	422250,65	53080,15	0,28
8-27	206828,64	10119,32	0,05
Total Sub Cuenca		**191791,18**	**1,00**

c) El porcentaje de participación obtenido para cada sector de evapotranspiración dentro de la subcuenca, se aplico a los valores de Evapotranspiración mensual y anual de la región, para obtener el valor ponderado asignado a la subcuenca Laja Bajo.

Cód. Sector	% de part. Sub Cuenca	Valores ponderados de Evapotranspiración mensual y anual para la Sub Cuenca Laja Bajo												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
8-06	0,12	17,65	16,59	13,68	9,73	5,77	2,88	1,81	2,88	5,78	9,73	13,70	16,59	116,77
8-11	0,55	81,31	76,42	63,02	44,78	26,48	13,13	8,24	13,13	26,54	44,78	63,07	76,42	537,31
8-15	0,00	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,21
8-26	0,28	40,13	37,75	31,19	22,28	13,34	6,81	4,43	6,81	13,37	22,28	31,22	37,75	267,35
8-27	0,05	8,23	7,74	6,39	4,56	2,73	1,39	0,90	1,39	2,73	4,56	6,40	7,74	54,77
Total Sub Cuenca		**147,4**	**138,5**	**114,3**	**81,4**	**48,3**	**24,2**	**15,4**	**24,2**	**48,4**	**81,4**	**114,4**	**138,5**	**976,4**

La Evapotranspiración Potencial así calculada se presenta en el Cuadro Nº7-2, para cada una de las 10 subcuencas. En tanto, para los los coeficientes de cultivo se adoptaron los datos del "Proyecto Itata. Estudio Hidrológico y Situación Actual Agropecuaria" (ProItata, CNR, 1992), que se consignan en el Cuadro Nº 7-3. En este caso, para los cultivos anuales y permanentes, se adoptó el kc promedio de los valores señalados en ProItata. En tanto para las plantaciones forestales, se consideró un kc igual a 1,2 veces el kc de las praderas naturales, considerando que la profundidad del horizonte radicular de un bosque es subtancialmente mayor al de una pradera. Para los métodos de riego, se consideró que cada rubro se cultiva en 3 superficies de igual tamaño, cada una de las cuales se riega por goteo, surco o tendido.

Cuadro Nº7-1 Superficies por Sector de Riego

Sector de Riego	Subcuenca Asociada	Superficie			Superficie No Cultivada	Superficie Cuenca Aportante	Total Superficie Subcuenca	
		Riego	Secano	Total Cultivada				
		(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(km2)
1	Río Bío-Bío Alto (Hasta después junta Río Lamin)	1812	1868	3680	105043	320813	429536	4295
2	Río Bío-Bío entre Río Ranquil y Río Duqueco	7760	30583	38343	64461	259369	362173	3622
3	Río Duqueco	14413	57228	71641	42917	56517	171075	1711
4	Río Bío-Bío entre Río Duqueco y Río Vergara	14274	68750	83024	37828	47093	167945	1679
5	Río Renaico	5209	55324	60533	23162	67081	150777	1508
6	Ríos Malleco y Vergara	9868	127502	137370	71754	74455	283578	2836
7	Río Bío-Bío entre Río Vergara y Río Laja	18022	92156	110178	57429	98572	266179	2662
8	Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucue)	780	3419	4199	60882	209099	274180	2742
9	Laja Bajo	13976	58745	72721	50316	68755	191791	1918
10	Río Bío-Bío Bajo	9943	42662	52604	25443	58440	136487	1365
	TOTAL	**96056**	**538236**	**634293**	**539234**	**1260194**	**2433721**	**24337**

Cuadro Nº7-2 Evapotranspiración Potencial (mm)

Sector	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	Total
1	73,2	42,5	20,0	11,8	20,0	42,5	73,2	103,9	126,4	134,6	126,4	103,9	878,3
2	84,2	50,0	25,0	15,8	25,0	50,1	84,2	118,5	143,5	152,6	143,5	118,4	1010,8
3	80,8	47,7	23,5	14,7	23,5	47,7	80,8	113,8	138,0	146,9	138,0	113,8	969,2
4	85,0	50,6	25,5	16,3	25,5	50,7	85,0	119,4	144,5	153,7	144,5	119,3	1019,9
5	82,8	49,3	24,8	15,8	24,8	49,4	82,8	116,3	140,9	149,9	140,9	116,3	994,1
6	92,0	55,5	28,7	18,9	28,7	55,5	92,0	127,1	155,3	165,1	155,3	128,6	1102,8
7	84,7	50,5	25,5	16,3	25,5	50,6	84,7	118,9	143,9	153,1	143,9	118,9	1016,5
8	82,3	49,0	24,6	15,7	24,6	49,0	82,3	115,7	140,1	149,0	140,1	115,7	988,2
9	81,4	48,3	24,2	15,4	24,2	48,4	81,4	114,4	138,5	147,4	138,5	114,3	976,4
10	85,2	51,0	26,0	16,8	26,0	51,1	85,2	119,0	144,5	153,6	144,5	119,4	1022,2

Cuadro Nº 7-3 Coeficientes de cultivo Kc

Rubro	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar
Zona Cultivo												
Cultivos Anuales y Permanentes	1,00	0,95	0,40	0,60	0,98	0,67	0,73	0,80	0,86	0,95	1,02	0,80
Forrajeras Permanentes	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,90	1,07	1,15	1,11	1,05	0,99
Plantaciones Forestales	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	0,88	1,10	1,20	1,20	1,14	1,06
Zona No Cultivo												
Praderas Mejoradas y Naturales	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,73	0,92	1,00	1,00	0,95	0,88
Barbechos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,73	0,92	1,00	1,00	0,95	0,88
Matorrales	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,73	0,92	1,00	1,00	0,95	0,88

Para los datos pluviométricos y fluviométricos se utilizaron los cuadros de resultados de análisis de frecuencia del análisis hidrológico del presente estudio (ver capitulo 3-Hidrología), de manera que para cada estación se tienen los valores de precipitación o escorrentía, para las diferentes probabilidades de excedencia consideradas.

El cálculo de la precipitación efectiva se realizó con la fórmula de Blanney Criddle. Este método calcula la precipitación efectiva como un factor “a” de la precipitación mensual P, que varía según el rango en que se encuentra P. En el Cuadro Nº 7-4 se indican los valores de a.

Cuadro Nº 7-4 Cálculo de Precipitación Efectiva Según Blanney y Criddle

Rango de P (mm)	a	Pefec max	Pefec
		(mm)	(mm)
0<P<25	0,95	23,75	a * P
25<P<50	0,90	46,25	a * (P-25) + 23,75
50<P<75	0,82	66,75	a * (P-50) +46,25
75<P<100	0,65	83,00	a * (P-75) + 66,75
100<P<125	0,45	94,25	a * (P-100) + 83,00
125<P<150	0,25	100,50	a * (P-125) + 94,25
150<P	0,05		a * (P-150) + 100,50

En lo que dice relación con los derechos de captación de cada bocatoma, se asumió una relación proporcional a la superficie de riego, en cada cauce. En el Cuadro Nº 7-5 se indica para cada sector de riego, el cauce del cual capta sus aguas, y que proporción del caudal puede captar como máximo. En los casos en que esta proporción es igual al 100% es porque existe solo una subcuenca para el río indicado.

Cuadro Nº 7-5 Derechos de Agua por Sector como porcentaje del caudal pasante

Sector	Cauce de captación	Derechos (%)
1	Bio-Bio	9,29
2	Bio-Bio	39,76
3	Villucura	100,00
4	Mulchen	100,00
5	Renaico	100,00
6	Malleco	100,00
7	Nicodahue	100,00
8	Laja	5,29
9	Laja	94,71
10	Bio-Bio	50,95

B) Embalses

La laguna Laja es el embalse de mayor importancia en la zona de estudio. Se encuentra en la cabecera del río Laja, y su efecto dentro de la modelación se encuentra incorporado en las estadísticas de este río, que se utilizan para generar los caudales en las cuencas no controladas de la cuenca del mismo nombre.

C) Cauces Superficiales

Con respecto a la modelación de los cauces, se consideraron los cauces superficiales relevantes, los que fueron discretizados en una serie de nudos. Entre pares de nudos consecutivos se producen pérdidas por percolación en el lecho, que son función de un coeficiente Pl (%/km), que permite calcular la percolación total en cada tramo, en función del caudal o volumen de agua entrante y la longitud del tramo. Por otra parte, en un nudo puede haber una captación hacia un sector de riego, se pueden producir aportes de cuencas de cabecera o laterales, o también puede haber una entrada de escorrentía superficial proveniente de alguno de los 10 sectores de riego considerados.

Cabe señalar que el valor Pl puede ser positivo o negativo. En caso de ser negativo, existen afloramientos, es decir, entrega de agua desde la napa al cauce respectivo.

7.2. Generación de Caudales en Cuencas No Controladas

En la cabecera de las cuencas nivo-pluviales, correspondientes a los ríos Bío-Bío y Laja, se generaron los caudales de entrada al sistema transponiendo por unidad de superficie los caudales de las estaciones Río Bío-Bío en Rucalhue y Río Laja en Tucapel.

En tanto, en el resto de las cuencas aportantes, la generación de caudales se realizó por transposición por unidad de superficie y por unidad de precipitación anual con 50% de probabilidad de excedencia. La estación base utilizada para la transposición es Río Mininco en Longitudinal.

El modelo genera internamente los caudales medios mensuales en cada cuenca no controlada. Para ello se requiere la superficie de la cuenca y una estación pluviométrica representativa. Para la cuenca de la estación base Río Mininco en Longitudinal, se consideró como representativa, la estación pluviométrica Pilguén, cuya precipitación anual con 50% de probabilidad de excedencia es igual a 1586 mm.

Este método de generación de caudales fue validado en la cuenca del Río Nicodahue, donde existe una estación fluviométrica. En la Figura Nº7-2 se presentan los caudales generados y los observados en esta cuenca, en un año con probabilidad 50% de excedencia. Debe señalarse que el caudal medio anual simulado y el observado es igual a 22,186 m3/2 y 23,989 m3/s, respectivamente, lo que representa una diferencia menor al 7% del valor observado.

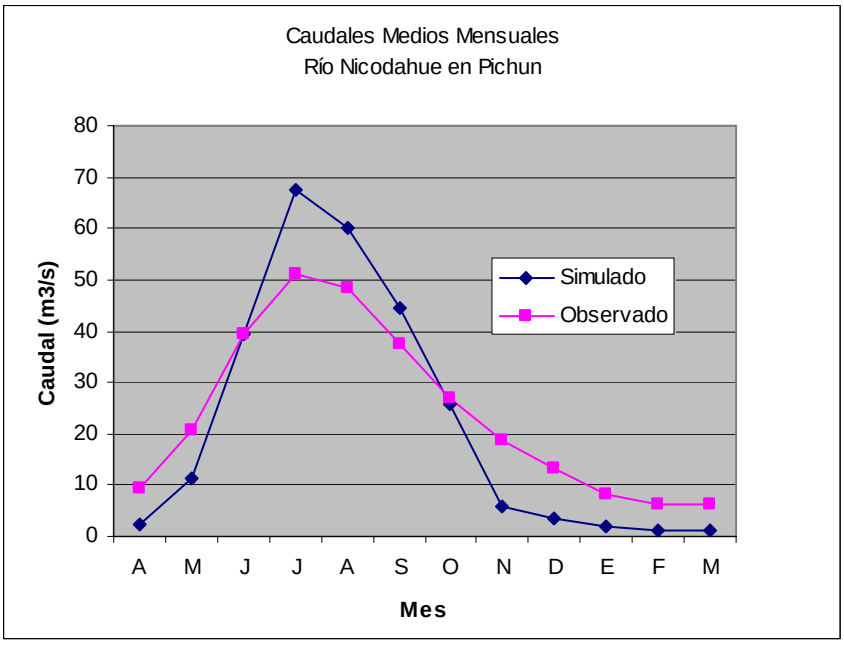


Figura Nº7-2 Validación de Método de Generación de Caudales

7.3. Análisis de Sensibilidad

Además se realizó un análisis de sensibilidad de distintos parámetros asociados al riego, a las precipitaciones y a los cauces, en cuanto a sus efectos sobre los volúmenes de percolación hacia el acuífero. Se constata una incidencia muy importante del parámetro de percolación por Km. en cauces y del parámetro de porcentaje de precipitación en exceso que percola. Y por otra parte, se constata una incidencia mínima del reuso de derrames, de la proporción de excedentes de riego que percolan y de los métodos de riego. Esto se puede ver en el Cuadro siguiente.

Cuadro Nº 7-7 Análisis de sensibilidad de Parámetros modelados Efectos sobre la Percolación

a) Parámetros de Zonas de Riego

Parámetro	Valor Parámetro	Percolación Anual Sectores		Precolación Total Anual	
	(%)	(Mill m3)	(m3/s)	(Mill m3)	(m3/s)
Proporción Excedente Agua Predial que percola	10	2.068,4	65,6	3.186,4	101,0
	90	2.272,8	72,1	3.387,3	107,4
Reuso de Derrame	10	2.171,1	68,8	3.287,1	104,2
	90	2.162,6	68,6	3.279,9	104,0
Porcentaje Aplicación Método de Riego (*)					
Goteo	100	2.034,0	64,5	3.154,0	100,0
	0	2.310,7	73,3	3.423,0	108,5
Surco	100	2.239,8	71,0	3.354,0	106,4
	0	2.143,3	68,0	3.260,0	103,4
Tendido	100	2.412,9	76,5	3.522,4	111,7
	0	2.108,3	66,9	3.226,0	102,3

(*) Se indica porcentaje de aplicación método indicado en área de cultivo. Dos métodos restantes se distribuyen en área faltante en partes iguales.

b) Parámetros de Precipitación

Parámetro	Valor Parámetro	Percolación Anual Sectores		Percolación Total Anual	
		(Mill m3)	(m3/s)	(Mill m3)	(m3/s)
Proporción de P en exceso que percola (%)	10	1.540,6	48,9	2.674,7	84,8
	90	12.074,4	382,9	12.911,9	409,4

d) Parámetros de Cauces

Parámetro	Valor Parámetro	Percolación Anual Cauce		Percolación Total Anual	
	(%/km)	(Mill m3)	(m3/s)	(Mill m3)	(m3/s)
Percolación en todos los cauces (%/Km.)	0, 01	564,2	17,9	2.735,5	86,7
	0,10	5.114,8	162,2	7.284,4	231,0

7.4. Verificación del modelo

El modelo fue verificado comparando caudales medios mensuales simulados y observados en 14 estaciones fluviométricas distribuidas en la zona de estudio. En el Cuadro Nº 7-6 y en la Figura Nº7-3 se presentan los resultados para una probabilidad de excedencia del 50%.

El ajuste es igualmente bueno para una probabilidad del 20%. Se debe señalar eso sí, que para una probabilidad del 85%, en una primera pasada los caudales medios mensuales observados quedan por sobre los simulados, mostrando una discrepancia respecto a las otras probabilidades. Esto, probablemente se debe a que en años secos, al disminuir las percolaciones existe una entrega neta desde el acuífero a los cauces, lo que no se ve reflejado en la simulación que solo considera los aportes provenientes de las precipitaciones. Para incorporar este hecho, al simular para 85% de probabilidad de excedencia, se incorporó una percolación negativa en los cauces, es decir, afloramiento.

Considerando los resultados del análisis de sensibilidad, los parámetros relevantes en la recarga del acuífero, son los relativos a la percolación areal de las lluvias y la percolación en los cauces, en tanto que los parámetros de riego presentan una incidencia menor. Los valores que finalmente se ajustaron a estos parámetros son los siguientes:

a) Con respecto a la proporción mensual de precipitación en exceso que percola, se adoptaron los valores utilizados en el Estudio de la REF 1. Estos valores son: 5% entre agosto y marzo, 10% en abril, 20% en mayo, 30% en junio y 20% en julio.

b) Dependiendo del tramo modelado y de la probabilidad, se asumió una percolación de 0,02%/Km. del caudal entrante en cada tramo en análisis, y/o un afloramiento en el tramo igual a 0,5%/km (o percolación negativa -0.5 % Km.)

c) Se considera una eficiencia en los canales de conducción de agua para riego, igual al 85%. Además se asume que el 50% de los excedentes de riego, percola.

Cuadro Nº 7-6 Caudales Medios Anuales Simulados y Observados (m3/s)

Probabilidad Excedencia (%)	20		50		85	
Estación Fluviométrica	Sim	Obs.	Sim	Obs.	Sim	Obs.
Río Bío-Bío en Rucalhue	566,553	586,957	375,174	403,075	375,174	403,075
Río Duqueco en Cerrillos	82,925	90,017	50,111	56,171	50,111	56,171
Río Bureo en Mulchén	50,548	51,690	29,781	33,138	29,781	33,138
Río Mulchén en Mulchén	28,377	25,185	17,241	16,362	17,241	16,362
Río Bío-Bío en Coihue	789,244	833,945	508,436	573,295	508,436	573,295
Río Malleco en Collipulli	38,053	36,093	22,854	23,503	22,854	23,503
Río Vergara en Tijeral	74,949	78,319	44,635	49,726	44,635	49,726
Río Renaico en Longitudinal	54,163	57,871	31,988	38,276	31,988	38,276
Río Mininco en Longitudinal	22,512	22,290	13,752	14,069	13,752	14,069
Río Nicodahue en Pichún	27,936	33,035	16,536	23,989	16,536	23,989
Río Guaqui en Diuquín	33,912	33,552	20,174	23,964	20,174	23,964
Río Laja en Tucapel	153,644	167,618	107,508	121,673	107,508	121,673
Río Laja en Puente Perales	221,792	195,091	145,257	141,425	145,257	141,425
Río Bío-Bío en Desembocadura	1373,850	1359,480	866,295	968,858	866,295	968,858

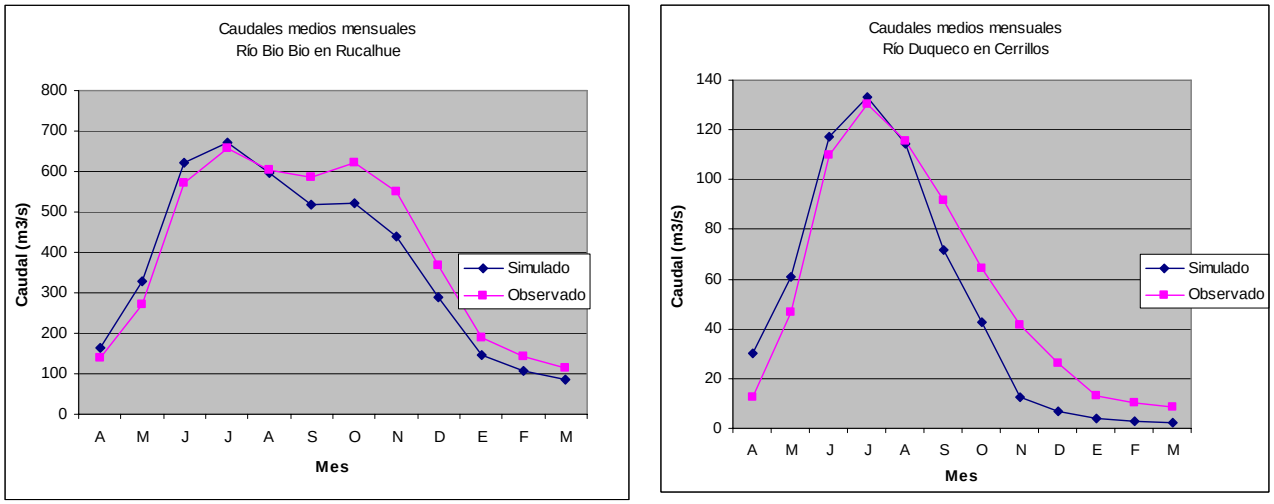
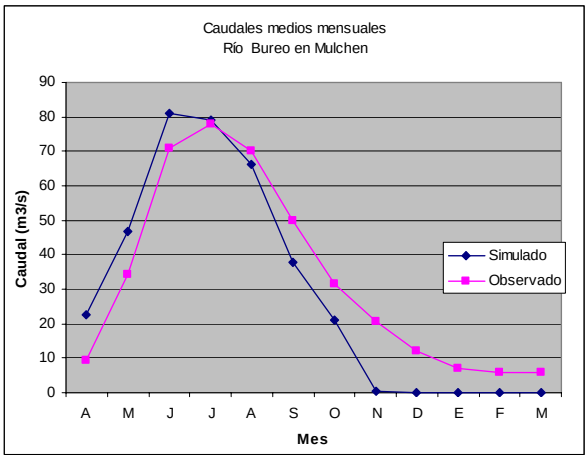
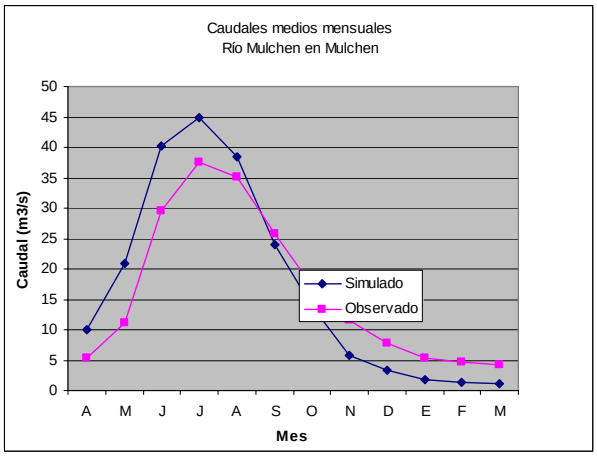
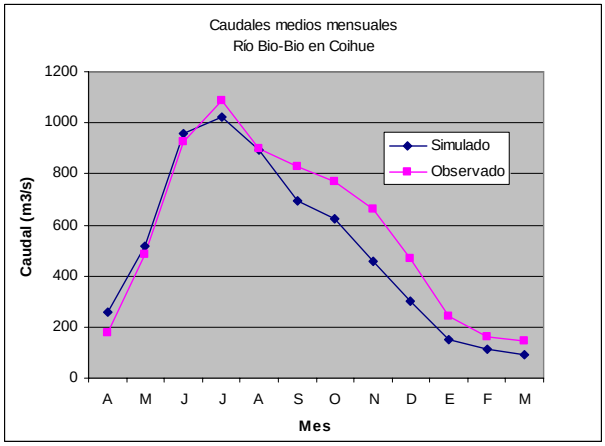
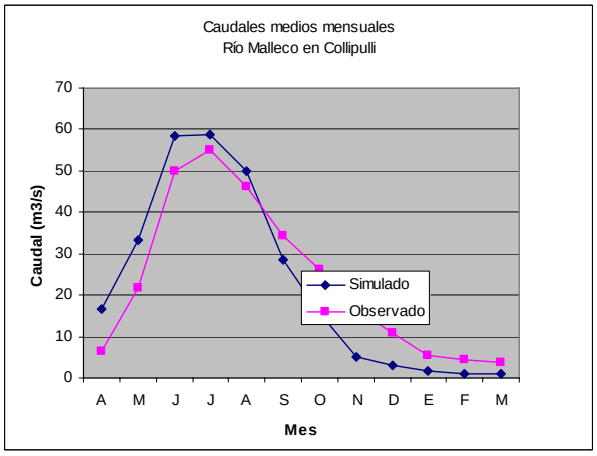


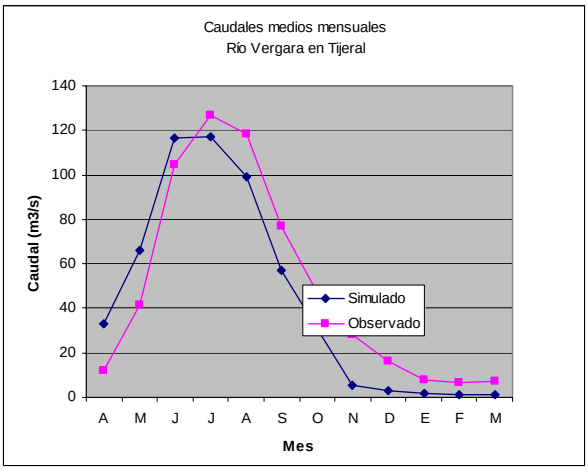
Figura Nº7-3 Verificación Modelo de Simulación (Pexc = 50%)











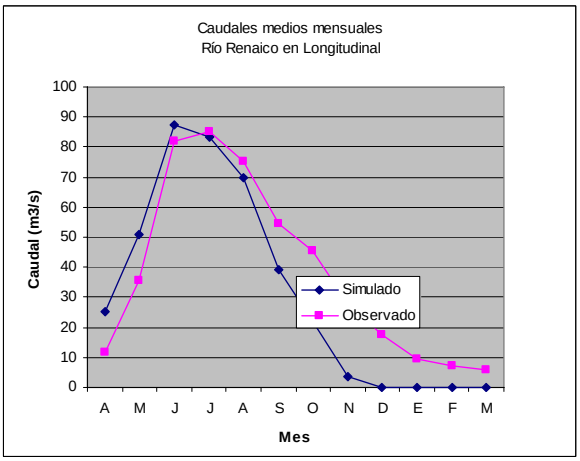
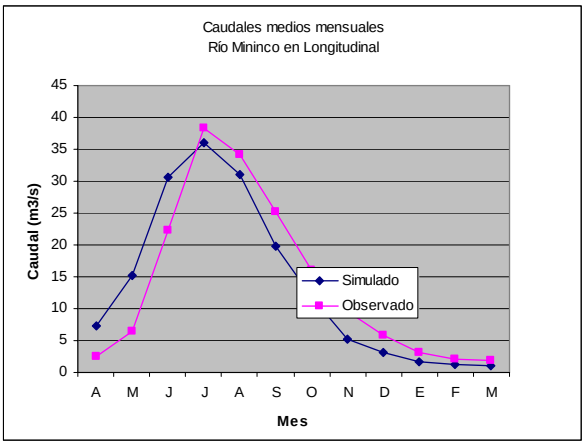
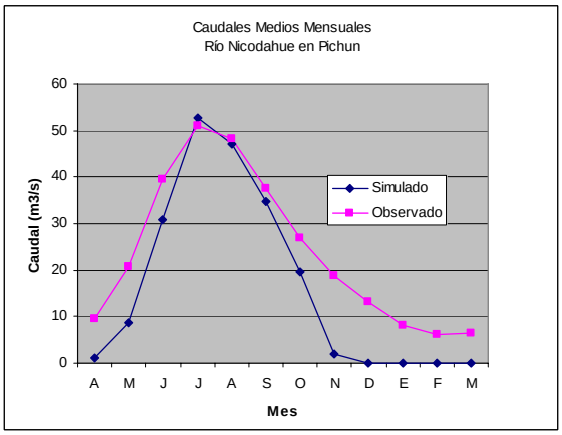
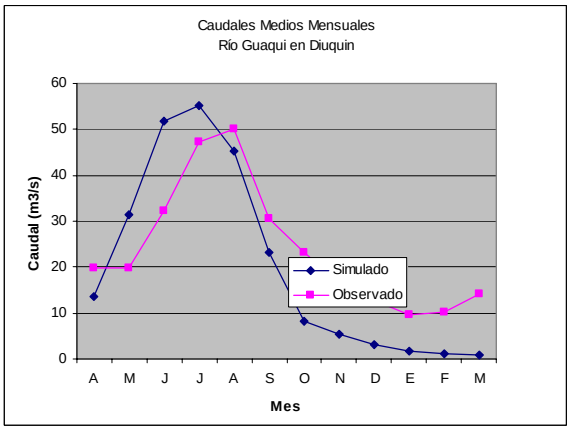
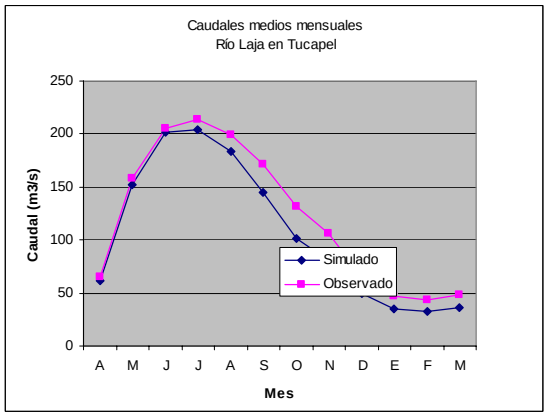


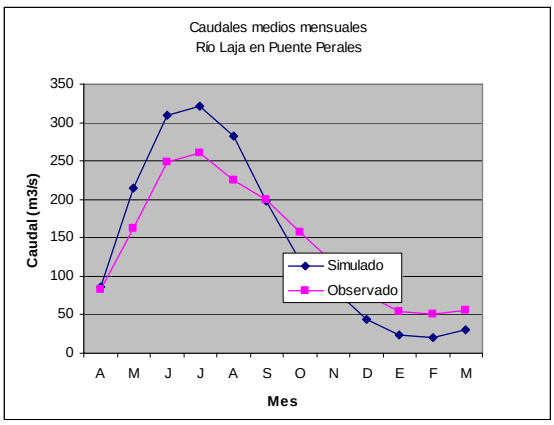
Figura N°7-3 (Continuación) Verificación Modelo de Simulación (Pexc = 50%)











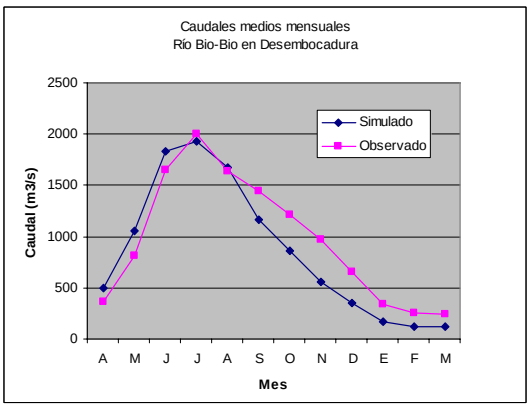


Figura N°7-3 (Continuación) Verificación Modelo de Simulación (Pexc = 50%)

7.5. Resultados de la Modelación

Se modeló el sistema para probabilidades de excedencia del 20%, 50% y 85%, y se obtuvieron los balances hídricos y las recargas al acuífero, a nivel mensual y anual. Los resultados para una probabilidad de 50 % se resumen en los Cuadros Nº 7-8 y 7-9. El resto de los resultados se detalla en Anexos.

Los valores adoptados para los parámetros relativos a la percolación al acuífero son los indicados en el acápite anterior, es decir:

a) Proporción mensual de precipitación en exceso que percola: 5% entre agosto y marzo, 10% en abril, 20% en mayo, 30% en junio y 20% en julio.

b) Eficiencia en los canales de conducción de agua para riego, igual al 85%. Además se asume que el 50% de los excedentes de riego, percola.

d) Dependiendo del tramo modelado y de la probabilidad, se asumió una percolación de 0,02%/Km. del caudal entrante en cada tramo en análisis, y/o un afloramiento en el tramo igual a 0,5%/km (o percolación negativa -0.5 % Km.)

Si se compara los resultados de recarga del estudio de la REF 1, en el cual se estimó, para la cuenca de Itata y para una probabilidad de excedencia del 50%, una recarga media anual de 123,575 (m3/s), los valores de recarga en este caso resultan un poco menor, ya que la recarga media anual obtenida es de 105,751 (m3/s). Por otro lado , al realizar un cálculo aproximado del volumen total anual de agua precipitado sobre toda la cuenca del río Bío-Bío, multiplicando la precipitación anual en cada subcuenca y la superficie de la misma, se obtiene 37895 millones de m3, lo que llevado a caudal medio anual, da 1202 m3/s. Por otra parte, el caudal medio anual con probabilidad del 50% en la estación Río Bío-Bío en desembocadura es de 1036 m3/s. Es decir, existen 166 m3/s que precipitan sobre la cuenca, que no llegan a la desembocadura. De esta manera, la recarga media anual simulada, se encuentra dentro de un rango factible.

Cuadro Nº 7-8 Balance Global del Sistema (Caudales en m3/s)
Probabilidad de excedencia 50 %

	abr	may	jun.	jul.	ago	sep	oct.	nov.	dic.	ene	feb.	mar	Anual
Entrada													
Aporte Cuencas	191,5	416,8	873,7	1123,1	1022,4	889,0	788,2	638,1	417,2	227,9	174,9	151,3	578,7
Aporte Lluvia	421,0	876,5	1302,7	1051,3	815,8	503,5	432,8	249,3	192,7	112,3	109,9	164,6	521,6
Aporte Bombeo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	612,6	1293,3	2176,4	2174,4	1838,2	1392,6	1221,0	887,4	609,9	340,1	284,8	315,9	1100,3
Salida													
Precipitación Evapotranspirada	30,5	18,4	4,0	3,8	9,6	143,2	273,7	226,2	177,0	105,6	103,7	153,4	104,1
Evaporación Sectores	23,7	4,8	4,9	5,3	10,1	19,5	28,3	25,6	19,8	10,5	9,0	13,0	14,5
Precolación Sectores	40,3	171,6	259,7	157,1	80,6	18,0	9,6	18,2	19,6	18,3	17,2	11,0	68,7
Riego Sectores	1,8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,3	23,7	26,0	24,9	23,3	14,5	9,6
Precolación Cauces	19,5	41,1	72,7	77,7	67,9	50,6	41,5	29,5	18,8	9,6	7,2	6,4	37,1
Caudal Saliente Cuenca	496,8	1057,4	1835,0	1930,6	1670,0	1161,3	865,7	564,3	348,7	171,2	124,4	117,5	866,3
TOTAL	612,6	1293,3	2176,4	2174,4	1838,2	1392,6	1221,0	887,4	609,9	340,1	284,8	315,9	1100,3

Cuadro Nº 7-9 Recarga Neta al Acuífero (Caudales en m3/s)
Probabilidad de excedencia 50 %

	abr.	may	jun.	jul.	ago	sep	oct.	nov.	dic.	ene	feb.	mar	Anual
Entrada													
Precolación Sectores	40,3	171,6	259,7	157,1	80,6	18,0	9,6	18,2	19,6	18,3	17,2	11,0	68,7
Precolación Cauces	19,5	41,1	72,7	77,7	67,9	50,6	41,5	29,5	18,8	9,6	7,2	6,4	37,1
TOTAL	59,8	212,7	332,5	234,8	148,6	68,6	51,1	47,7	38,4	28,0	24,3	17,4	105,8
Salida													
Bombeo a Riego	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Otros Bombeos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Recarga Neta al Acuífero	**59,8**	**212,7**	**332,5**	**234,8**	**148,6**	**68,6**	**51,1**	**47,7**	**38,4**	**28,0**	**24,3**	**17,4**	**105,8**

8. MODELO HIDROGEOLÓGICO

8.1. Generalidades

El modelo hidrogeológico de la cuenca del río Bío-Bío fue desarrollado mediante el software Visual Modflow 4.2, el cual resuelve las ecuaciones que rigen el movimiento del agua subterránea en un medio poroso utilizando el método de diferencias finitas.

Visual Modflow requiere definir una malla de elementos que representa espacialmente el sistema a representar, así como una discretización temporal. El programa, a su vez, permite obtener la carga hidráulica dentro del medio para cualquier posición y tiempo del dominio definido, así como los flujos relevantes dentro del sistema.

Específicamente, el modelo fue desarrollado y calibrado en régimen permanente, debido principalmente a la ausencia de limnigramas de niveles freáticos sostenidos en el tiempo. El modelo fue calibrado considerando principalmente los niveles obtenidos mediante la campaña de terreno realizada durante los meses de Agosto y Septiembre del presente año (ver punto 6.2.2 anterior).

8.2. Definición del Dominio de Modelación

El dominio del modelo desarrollado fue definido por los siguientes límites (coordenadas sistema WGS 84):

- Límite Norte-Sur: 5.775.000 – 5.915.000 UTM Norte
- Límite Este-Oeste: 168.000 – 268.000 UTM Este

Estos límites definen un rectángulo de 100 Km. de ancho por 140 Km. de largo, y una superficie de 14.000 Km2. El tamaño de las celdas definido fue de 200 m x 280 m. La malla definitiva posee 500 filas y 500 columnas.

La superficie activa del modelo se definió en función de los límites del estrato acuífero identificado, lo que genera superficies a modelar menores a las presentadas anteriormente. Además, por motivos de convergencia numérica del modelo, se desactivaron aquellas zonas del acuífero asociadas a pequeñas quebradas afluentes a los cauces principales donde aflora el basamento rocoso y el espesor de las celdas tiende a su valor mínimo.

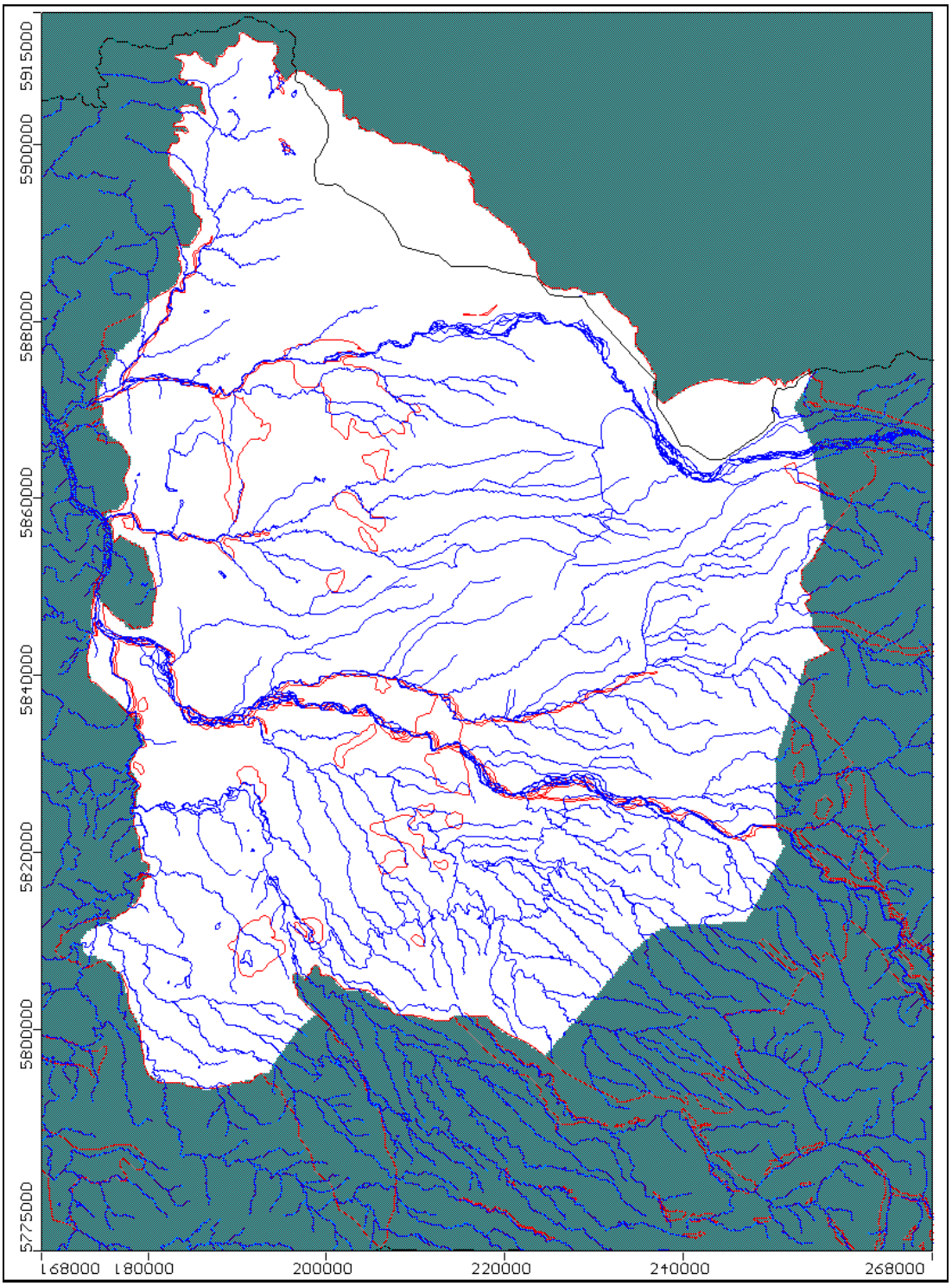
En sentido vertical, el acuífero fue representado con dos estratos. El primer estrato fue definido desde la superficie de terreno hasta una profundidad de 250 m, la cual corresponde aproximadamente a las máximas profundidades de los pozos con registros litológicos. El segundo estrato, por ende, fue definido desde la profundidad mencionada hasta el basamento rocoso.

El estrato superior es representativo de la unidad acuífera caracterizada hidrogeológicamente en el punto 6.4 anterior. El estrato inferior en tanto, si bien corresponde a la misma unidad acuífera, abarca un sector donde no se posee información hidrogeológica, por lo que se consideró adecuado representar de manera independiente el acuífero a partir de los 250 m de profundidad.

A continuación, en la Figura 8-1 se muestra el dominio definido, mientras que la Figura 8-2 presenta la malla de modelación definida.

Insertar Figura 8-1

Figura 8-2 Malla de Modelación
(Obtenida desde Visual Modflow)



8.3. Superficies de Terreno y Basamento Rocoso

La superficie de terreno fue definida a partir de los modelos ASTER-DEM (en el Anexo II SIG, se incluye el detalle de cómo se obtuvo el manto de la superficie para la cuenca en estudio). La información anterior permitió generar un manto de superficie a lo ancho de toda la cuenca del río Bío-Bío, desde el cual se obtuvo el nivel de terreno para cada celda de la malla de modelación definida.

Las cotas asociadas al basamento rocoso se obtuvieron directamente a partir de del plano isobático de profundidades de roca generado en el estudio gravimétrico desarrollado y presentado en el capitulo 5 del presente informe.

8.4. Condiciones de Borde Definidas

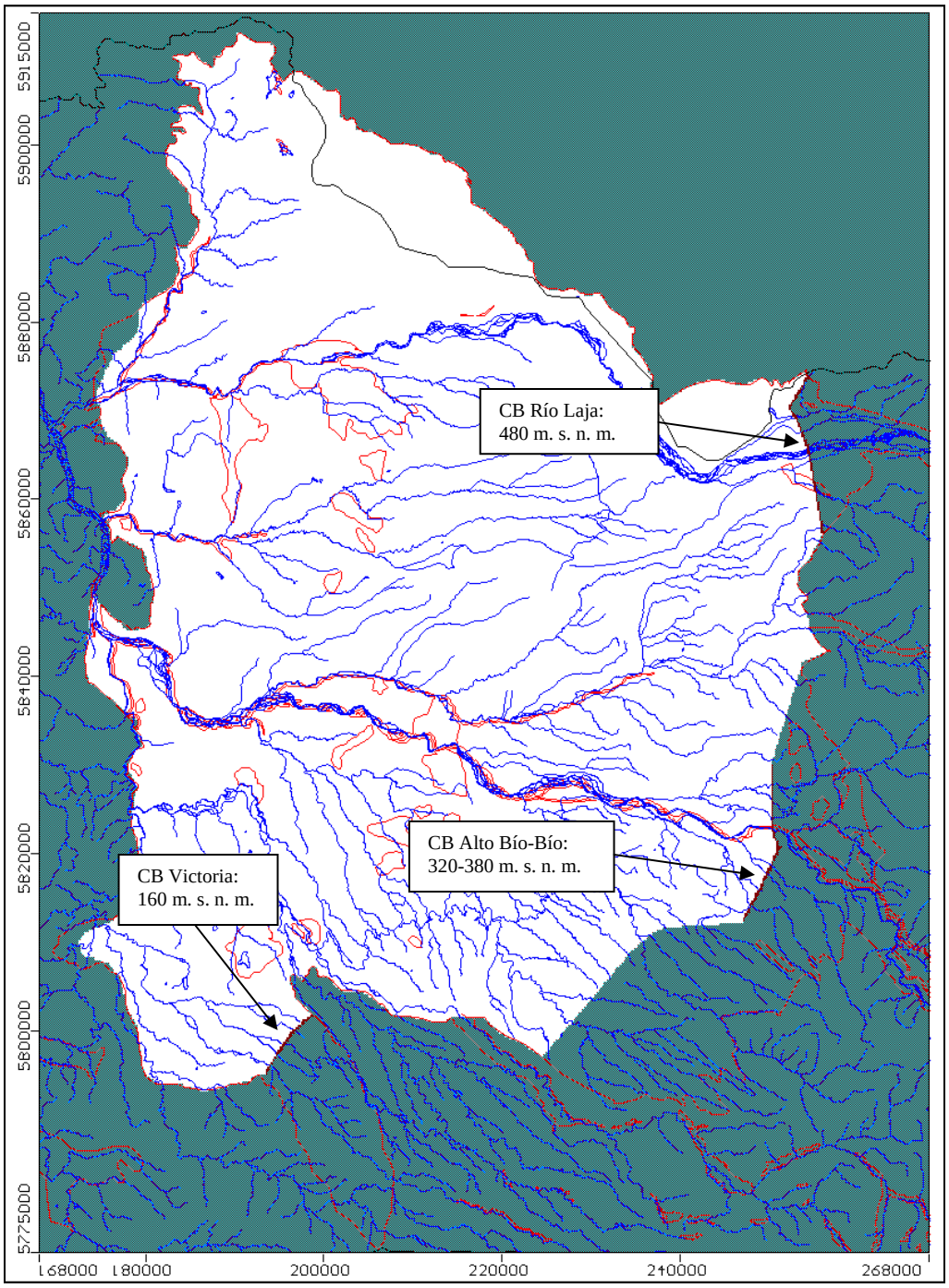
Las condiciones de borde incorporadas al modelo son de 2 tipos: de nivel constante y de río. A continuación de detallan cada una de éstas.

8.4.1. Condiciones de Borde de Nivel Constante

Se han definido condiciones de borde de nivel constante en aquellas zonas de entrada o salida de flujo subterráneo, y su valor fue obtenido de manera preliminar desde la información proporcionada por las curvas equipotenciales generadas en el presente estudio (medición nivel estático de 200 pozos, ver punto 6.5 anterior y plano 6-4).

A continuación, se presentan las condiciones de borde definidas en el modelo.

Figura 8-3. Condiciones de Borde Definidas en el Modelo.



La condición de borde “Victoria” fue necesaria para la convergencia numérica del modelo, pues el sector ubicado al sur de ella presentó dificultades para su representación producto del escaso espesor del acuífero en dicho sector.

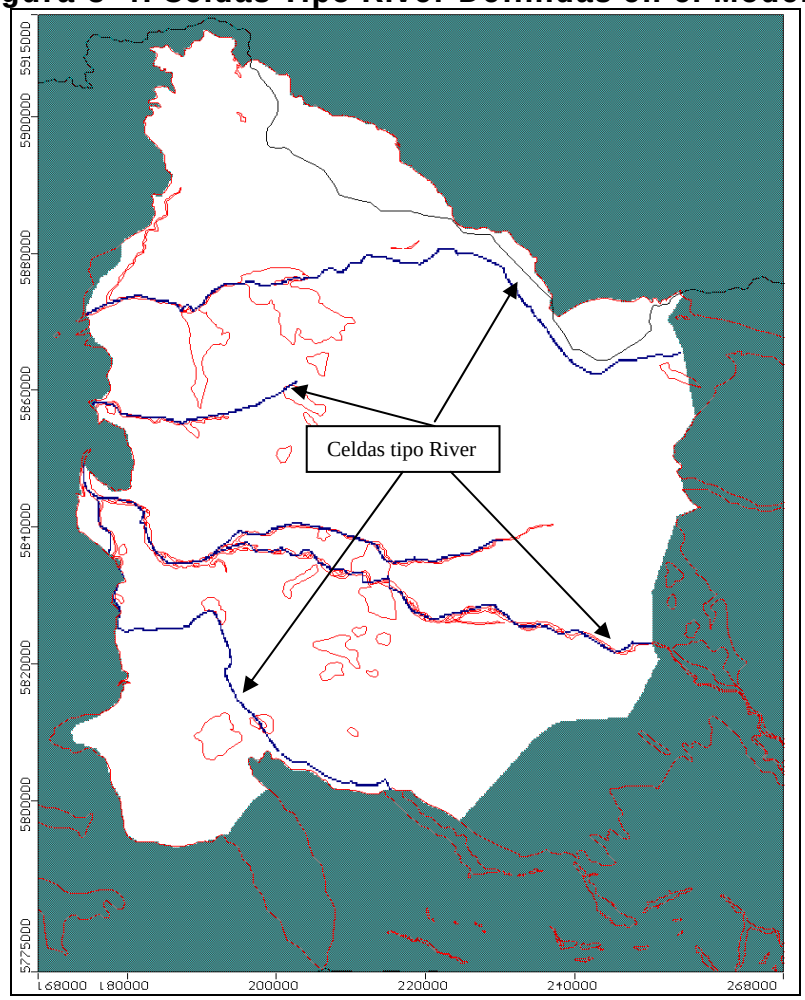
La condición de borde “Alto Bío-Bío” es variable espacialmente, de acuerdo con los valores de las curvas equipotenciales generadas.

Todas las condiciones de borde de nivel constante definidas representan flujos subterráneos de entrada al modelo; las únicas salidas de flujo están dadas por los afloramientos sobre los cauces naturales de la cuenca, cuya representación se explica a continuación.

8.4.2. Condiciones de Borde de Río

Se definieron mediante celdas tipo river los principales cauces superficiales de la zona, es decir, los ríos Bío-Bío, Laja, Renaico, Guaqui y Duqueco. De manera preliminar, a estas celdas se les asoció un nivel freático variable entre 3,0 y 5,0 m sobre el nivel de terreno en los cauces. Las conductancias fueron calibradas en función de los resultados de la modelación. A continuación, la Figura 8-4 presenta las celdas de río definidas en el modelo.

Figura 8-4. Celdas Tipo River Definidas en el Modelo



Cabe señalar que los cauces naturales anteriores fueron representados mediantes celdas con nivel constante, las cuales consideran, por definición, una conexión permanente entre el río y el acuífero.

Esta representación es válida en cauces con régimen pluvio-nival o nivo-pluvial que posean flujos constantes y estables a lo largo del año hidrológico, y por ende, mayor probabilidad de conexión entre el río y el acuífero modelado (tal es el caso de la cuenca del río Bío-Bío).

En el caso de cuencas netamente pluviales, esta conexión debe estar asociada a una representación en régimen transiente que desconecte las celdas river del acuífero en aquellos períodos donde los flujos en los cauces sean bajos o nulos.

8.5. Recarga Incorporada

Se incorporó al modelo la recarga sectorizada en las distintas zonas de riego definidas en la cuenca. A cada zona se le asoció una infiltración correspondiente a una precipitación anual de 85% de probabilidad de excedencia, más la infiltración efectiva producto de la actividad de riego estimada en cada una de ellas.

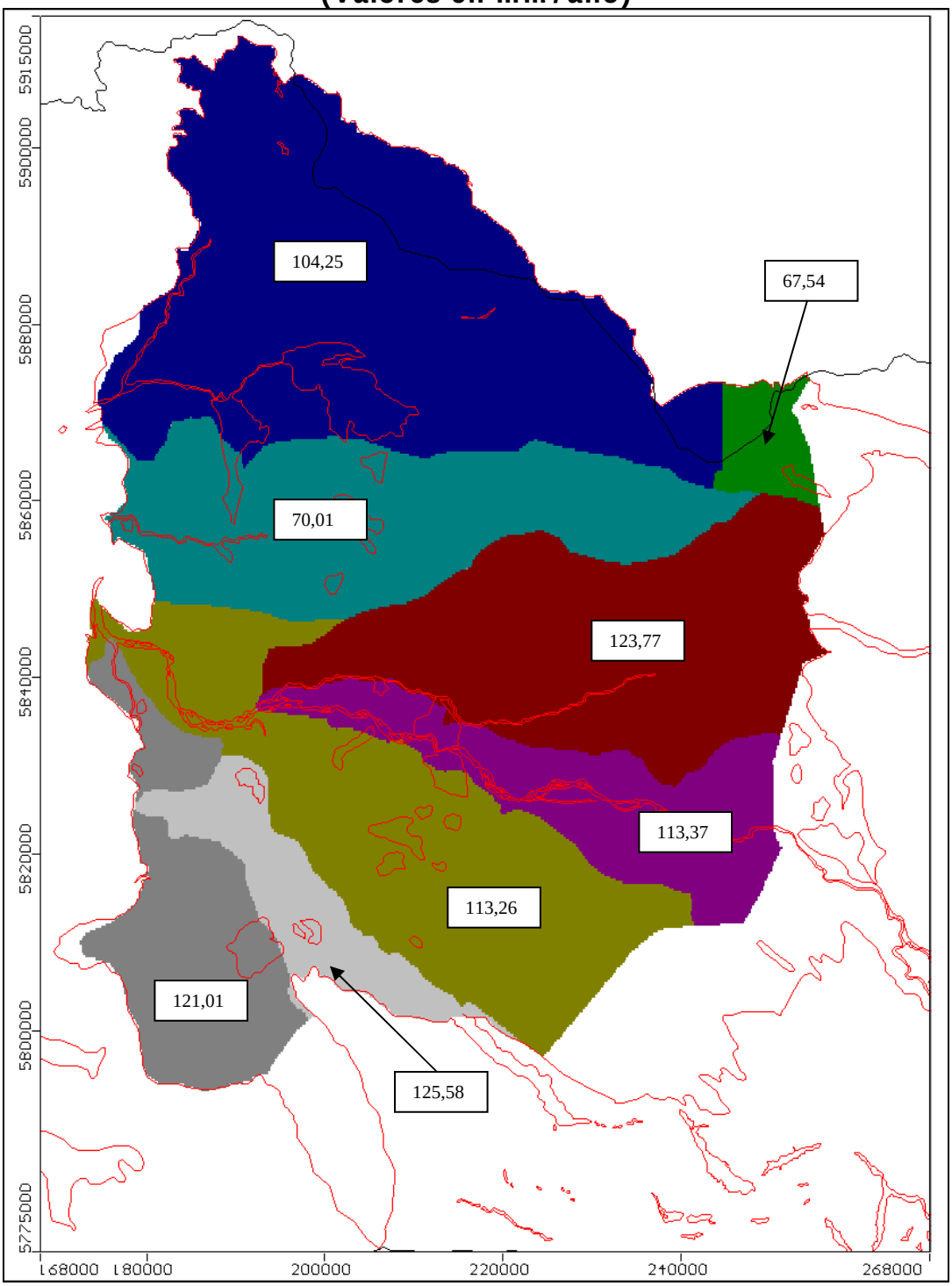
La incorporación de recargas asociadas a un 85% de probabilidad de excedencia obedece al hecho que los niveles estáticos observados en la cuenca, con los cuales se calibró el modelo, están asociados a un año hidrológico cercano al 85%.

Los valores de recarga utilizados se obtuvieron de la modelación superficial efectuada en el capitulo 7 del presente estudio.

No se incorporó al modelo la evapotranspiración local existente en las zonas de riego, pues ésta se incluyó de manera implícita en el cálculo de la recarga efectiva por los procesos de riego en la cuenca.

A continuación, la Figura 8-5 presenta las zonas de riego y los valores de recargas incorporados al modelo.

Figura 8-5. Zonas de Riego y Recargas Definidas en el Modelo (Valores en mm/año)



8.6. Explotación del Acuífero

Se incorporaron al modelo las captaciones (pozos, drenes, punteras, etc.) con derechos asignados dentro de la cuenca. Se consideró un caudal de bombeo igual a los derechos otorgados por la DGA, ponderados por un factor de uso representativo de la eficiencia del uso del recurso.

Los pozos y los caudales asociados se obtuvieron de la base de captaciones subterráneas conformada y presentada en el punto 6.2 y anexo 6-1 del presente informe.

8.7. Niveles Freáticos Observados

Se incorporaron directamente al modelo los pozos con nivel freático observado, cuya información fue determinada en el Catastro de medición de niveles efectuado (ver punto 6.2). Estos niveles fueron la base para el proceso de calibración de los modelos numéricos, el detalle de esta información se puede apreciar en el plano 6-4 y Anexo 6-4 (Fichas Encuestas pozos)

8.8. Parámetros Elásticos

Inicialmente, se incorporó la distribución espacial de permeabilidad determinada en la Caracterización Hidrogeológica de la cuenca, la cual fue incluida en el punto 6.6 del presente informe. Esta distribución fue posteriormente modificada, como parte del proceso de calibración de ambos modelos.

Cabe señalar que, como este modelo preliminar fue implementado en régimen permanente, no se consideró la incorporación de coeficientes de almacenamiento, puesto que este parámetro posee influencia únicamente en la representación transiente en el tiempo de un sistema hidrogeológico.

8.9. Calibración de los Modelos Numéricos

A continuación, en el Cuadro 8-1 se presentan los resultados del ajuste obtenido para los pozos considerados en el modelo. El Cuadro 8-2, en tanto, muestra los parámetros estadísticos de ajuste típicos que se obtuvieron luego del proceso de calibración. Además, el Gráfico 8-1 presenta los resultados de manera gráfica.

Cuadro 8-1. Resultados Niveles Observados y Calculados

Pozo	Niveles Freáticos (msnm)		Diferencia (m) Calc-Obs (Δ)
	Observado	Calculado	
59	88,3	78,1	-10,2
60	85,6	62,9	-22,6
2	277,6	233,5	-44,1
73	136,7	120,6	-16,2
24	312,4	289,6	-22,8
25	333,1	289,8	-43,3
26	128,0	117,0	-11,0
27	123,0	118,6	-4,4
28	125,5	125,2	-0,3
74	141,8	127,4	-14,4
75	197,6	190,2	-7,4
168	115,5	144,8	29,3
169	103,3	144,7	41,5
76	192,6	195,4	2,8
77	41,7	49,5	7,8
55	324,9	319,2	-5,7
79	290,8	309,0	18,2
30	181,8	169,7	-12,0
80	218,9	222,4	3,5
81	218,0	222,4	4,4
56	324,0	313,9	-10,1
158	65,6	62,0	-3,6
63	205,9	217,6	11,7
57	69,1	61,3	-7,8
83	66,9	71,3	4,4
31	111,2	137,0	25,8
32	118,5	124,5	6,0
33	88,8	97,7	8,8
84	75,5	63,5	-12,1
34	92,0	63,5	-28,5
35	84,6	58,4	-26,2
85	95,2	68,3	-26,9
64	210,3	218,3	8,0
37	87,7	73,9	-13,8
38	121,5	113,7	-7,8
86	257,8	223,2	-34,6
58	183,1	180,7	-2,4
39	467,5	432,7	-34,8
40	106,0	129,7	23,7
42	115,3	122,2	6,9
87	153,5	141,2	-12,3
43	124,7	111,8	-12,9
44	135,6	122,3	-13,2
88	158,5	136,4	-22,1
89	121,6	115,2	-6,4
90	164,4	148,2	-16,1
91	135,9	116,9	-19,0
149	166,2	173,9	7,8
106	96,2	102,3	6,1

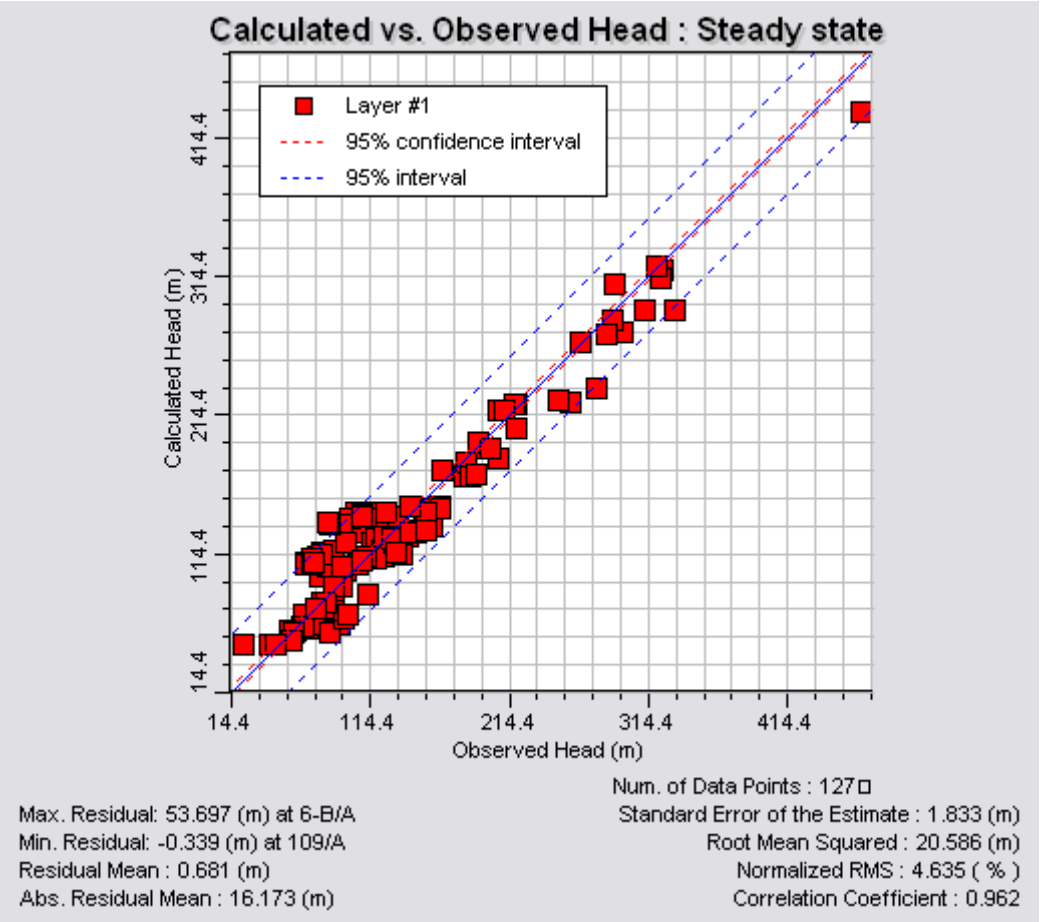
Pozo	Niveles Freáticos (msnm)		Diferencia (m) Calc-Obs (Δ)
	Observado	Calculado	
114	79,2	115,2	36,0
104	105,2	106,2	1,0
109	67,9	108,5	40,6
108	68,2	107,3	39,1
115	76,6	112,9	36,3
3	99,9	140,6	40,7
116	88,2	116,5	28,3
107	81,1	99,8	18,7
4	99,6	140,6	41,0
150	158,5	134,4	-24,1
151	118,2	125,7	7,5
101	78,5	98,7	20,3
102	84,3	105,3	21,1
100	81,4	75,3	-6,1
117	72,6	107,2	34,6
6	93,9	135,0	41,1
118	97,2	122,9	25,7
7	122,7	116,4	-6,3
8	126,9	121,4	-5,5
65	118,9	110,5	-8,4
9	119,8	139,4	19,6
10	126,1	139,3	13,2
11	158,5	147,9	-10,6
182	60,4	58,7	-1,7
12	133,9	121,5	-12,4
13	131,4	123,1	-8,4
14	124,7	127,5	2,8
61	321,0	321,5	0,5
15	296,5	274,5	-22,0
51	66,9	61,8	-5,1
16	93,5	104,3	10,8
17	133,0	121,1	-11,9
18	79,5	80,1	0,6
52	64,8	62,3	-2,6
140	84,7	136,2	51,5
144	83,0	136,7	53,7
19	288,8	282,5	-6,3
20	284,2	273,2	-11,0
66	94,3	90,3	-3,9
21	185,9	169,9	-16,0
22	88,0	90,4	2,4
53	81,9	79,5	-2,4
23	165,0	147,0	-18,0
67	206,0	183,8	-22,2
68	42,4	49,3	6,9
1	154,2	143,9	-10,2
69	66,9	62,2	-4,6
70	264,9	266,8	1,9
71	55,8	59,0	3,3
54	189,9	172,2	-17,7
72	75,7	75,0	-0,8
47	200,0	190,0	-10,0

Pozo	Niveles Freáticos (msnm)		Diferencia (m) Calc-Obs (Δ)
	Observado	Calculado	
93	129,2	125,9	-3,3
94	143,8	130,8	-12,9
95	111,0	113,1	2,1
96	107,5	110,2	2,7
97	23,3	48,5	25,3
98	113,1	85,6	-27,5
99	249,5	224,9	-24,6
141	137,5	114,4	-23,1
142	132,5	115,2	-17,3
105	93,1	105,6	12,5
111	79,5	114,5	35,0
112	71,9	111,3	39,4
113	73,1	107,8	34,7
152	134,5	141,6	7,1
153	142,9	149,4	6,5
154	146,5	130,4	-16,1
155	142,2	130,0	-12,2
156	155,1	131,3	-23,8
159	59,1	57,6	-1,5
160	57,5	51,4	-6,1
161	46,6	49,3	2,7
175	125,6	144,2	18,6
176	108,2	143,4	35,2
177	108,8	141,4	32,6
46	220,0	205,0	-15,0
45	97,5	70,7	-26,8

Cuadro 8-2. Parámetros Estadísticos Obtenidos Desde el ajuste Modelo Bío Bío.

Parámetro	Fórmula	Valor
Coeficiente de Correlación R	-	0,962
Coeficiente de Determinación R^2	-	0,926
Error Promedio	$(1/N)\ \Sigma\ (N_{CAL} - N_{OBS})$	0,68
Error Promedio Valor Abs.	$(1/N)\ \Sigma\|N_{CAL} - N_{OBS}\|$	16,17
Máximo Valor Abs. Δ	$Max(\|N_{CAL} - N_{OBS}\|)$	53,70
Mínimo Valor Abs. Δ	$Min(\|N_{CAL} - N_{OBS}\|)$	0,34
RMS	$\sqrt{\frac{((N_{CAL} - N_{OBS})^2}{N}}$	20,59
RMS Normalizado	$\frac{RMS}{MAX(N_{OBS}) - MIN(N_{OBS})}$	4,64%

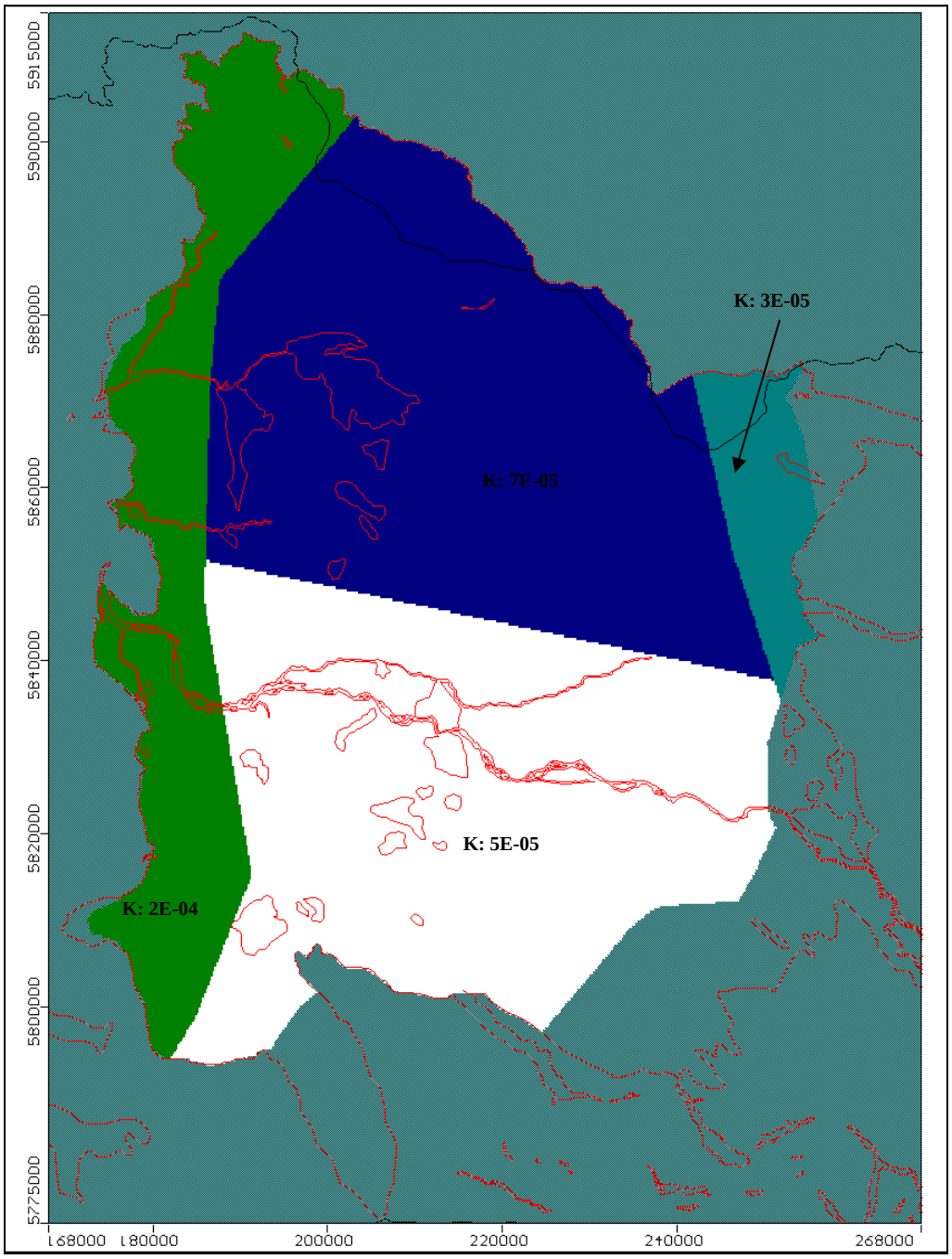
Grafico 8-1. Niveles Observados y Calculados Modelo Bío Bío



La distribución de permeabilidades ajustadas para el estrato superior se muestra en la siguiente figura. Los criterios para definir estas zonas se basan en los valores de permeabilidad observados en la cuenca, y en optimizar el ajuste numérico del modelo.

Para el estrato inferior, se ajustó un único valor, equivalente a 2E-05 m/s.

Figura 8-6. Distribución de Coeficientes de Permeabilidad Obtenida en el proceso de recalibración del modelo numérico. (Valores en m/s)



En el Anexo 8 se adjunta el respaldo magnético con los datos de entrada y resultados obtenidos del Modflow, en el proceso de calibración del Modelo aquí desarrollado.

9. RESULTADOS DEL MODELO

A partir de los modelos ya calibrados, se obtuvieron los siguientes resultados.

A continuación, en la Figura 9-1 se presentan las curvas equipotenciales obtenidas por el modelo Bío Bío ya calibrado.

Además, se determinaron balances hídricos asociados al estrato acuífero representado en el modelo. El Cuadro 9-1 muestra estos resultados, mientras que la Figura 9-2 los presenta de manera gráfica.

Cuadro 9-1. Balance Hídrico Obtenido Acuífero Bío-Bío

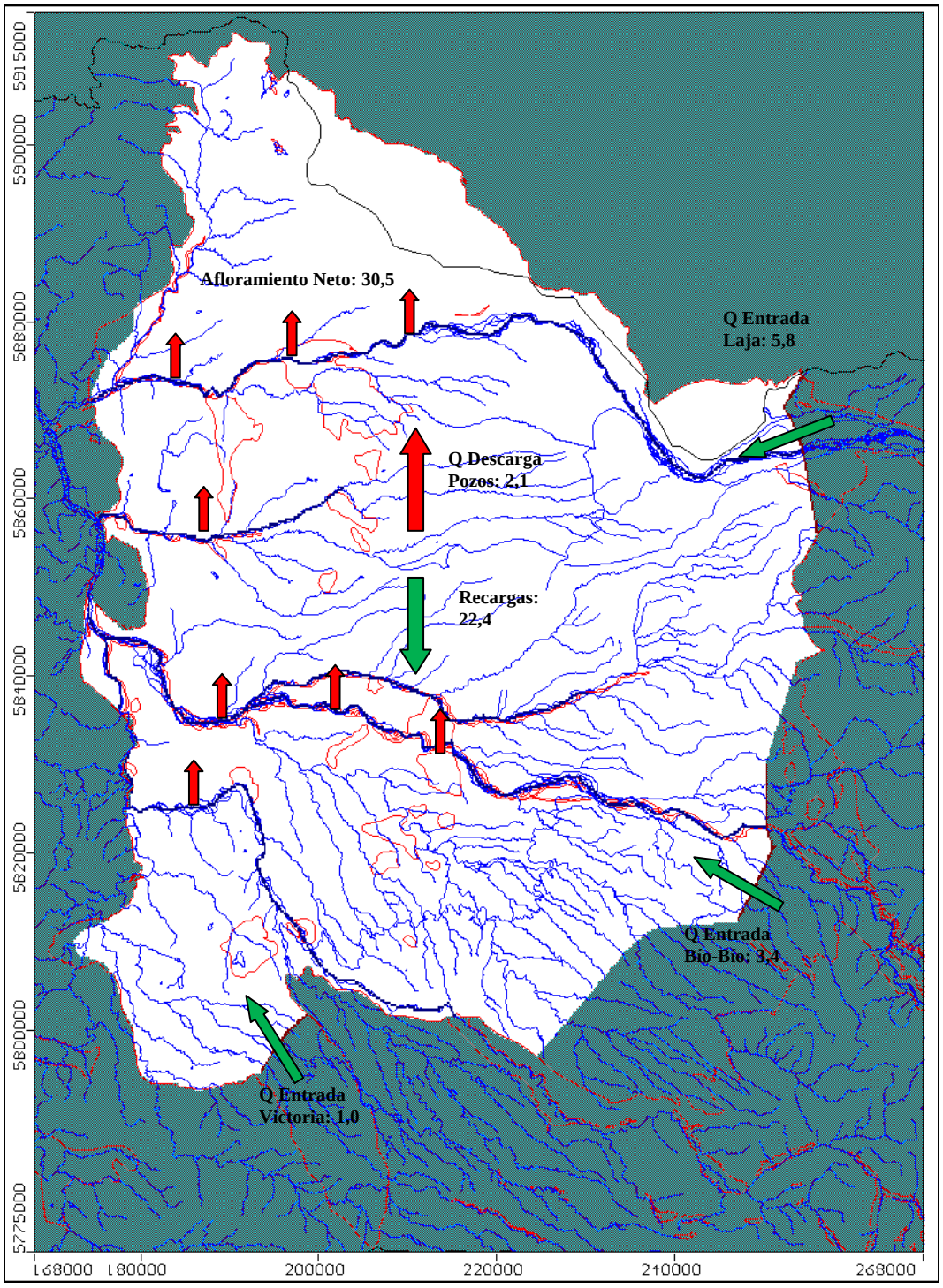
Entradas			**Salidas**		
Componente	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**	**Componente**	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**
Flujo Subterráneo Laja	501.950	5,8	Descarga Pozos	183.180	2,1
Flujo Subterráneo Bío-Bío	295.110	3,4	Afloramientos Río	4.423.700	51,2
Flujo Subterráneo Victoria	86.606	1,0			
Recarga Areal	1.935.100	22,4			
Recarga Río	1.788.200	20,7			
Total	**4.606.966**	**53,3**	**Total**	**4.606.880**	**53,3**
Error: -0,002%					

Se observa un afloramiento neto sobre los cauces de la cuenca de 30,5 m3/s.

Cabe señalar que los valores de entrada subterráneos del modelo se obtuvieron definiendo “zone budget” independientes en las zonas asociadas a condiciones de borde de nivel constante (ver Figura 8-3), para, de esta forma, obtener los flujos de manera diferenciada. Esta definición de “zone budget” no altera los resultados numéricos del modelo.

Figura 9-1 Curvas Equipotenciales Obtenidas por el Modelo Calibrado

Figura 9-2. Balance Hídrico Modelo Calibrado. (Valores en m3/s)



10. OPERACIÓN DEL MODELO

Con el modelo ya calibrado, se evaluó la dinámica de la cuenca bajo 2 escenarios que representan condiciones alternativas en su operación, respecto a las condiciones de recarga hidrológica por un lado, y a la demanda efectiva sobre el estrato acuífero por el otro. Específicamente, dichos escenarios son:

- **Escenario 1:** Aumento de las recargas de 85% a 50% de probabilidad de excedencia.
- **Escenario 2:** Incorporación de todas las captaciones catastradas, con y sin derechos asociados (y recarga de 85%).
- **Escenario 3:** Análisis de Sensibilidad Factores de Uso de Pozos de Bombeo

Una vez operado el modelo con los escenarios anteriores, se obtuvieron resultados de curvas equipotenciales y balances hídricos, los cuales se detallan a continuación.

10.1. Escenario 1: Recarga Asociada a Probabilidad de Excedencia 50%

Para este escenario, representativo de una condición hidrológica normal, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

La Figura 10-1 presenta las recargas incorporadas al modelo para este escenario. El Cuadro 10-1 presenta el balance hídrico obtenido, mientras que la Figura 10-2 presenta dichos balances de manera gráfica.

Cabe indicar que para este escenario se observaron, en los pozos de calibración, variaciones en promedio de 7,5 m por sobre los niveles calibrados. En el Cuadro 10-3 que se presenta más adelante, se muestran dichas variaciones.

Cabe indicar que las curvas equipotenciales obtenidas en este escenario presentan interesantes variaciones respecto a las obtenidas en el escenario de calibración. Se observa un ligero desplazamiento de las curvas hacia el oeste (de aproximadamente 2 km), producto del aumento de las recargas, y por ende, de los flujos subterráneos obtenidos. Esto se ratifica al observar las variaciones de nivel que se registraron en los pozos de calibración, las cuales fueron ligeramente apreciables (en promedio 7,5 m). Las mayores variaciones se observan en la frontera oeste del acuífero, principalmente hacia el norte de la cuenca. (ver Figura 10-3)

Por otro lado, se observa un importante aumento del afloramiento neto con respecto a lo obtenido en el escenario de calibración (30,5 a 44,2 m3/s), lo que indica la sensibilidad de la respuesta del acuífero frente a las variaciones de la recarga hidrológica.

Esta sensibilidad puede explicarse debido a la consideración de celdas de río de carga constante; en efecto, al existir una mayor recarga, la carga hidráulica entre el río y la napa disminuye, lo que se traduce en una menor recarga desde los cauces, y por ende, mayores afloramientos netos.

El resultado antes obtenido pone de manifiesto la necesidad de generar información que permita interpretar de mejor manera la interacción río-acuífero, y además, realizar modelaciones en régimen transiente que involucren las variaciones estacionales en los niveles de los cauces.

Cuadro 10-1. Balance Hídrico Obtenido Escenario 50% Pbb. de Excedencia

Entradas			**Salidas**		
Componente	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**	**Componente**	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**
Flujo Subterráneo Laja	475.180	5,5	Descarga Pozos	183.180	2,1
Flujo Subterráneo Bío-Bío	275.180	3,2	Afloramientos Río	5.328.900	61,7
Flujo Subterráneo Victoria	55.414	0,6			
Recarga Areal	3.195.100	37,0			
Recarga Río	1.511.200	17,5			
Total	**5.512.074**	**63,8**	**Total**	**5.512.080**	**63,8**
Error: 0,000%					

Se observa un afloramiento neto sobre los cauces de la subcuenca de 44,0 m3/s.

Figura 10-1 Recargas Escenario 50% Pbb. de excedencia Incorporadas al Modelo (Valores en mm/año)

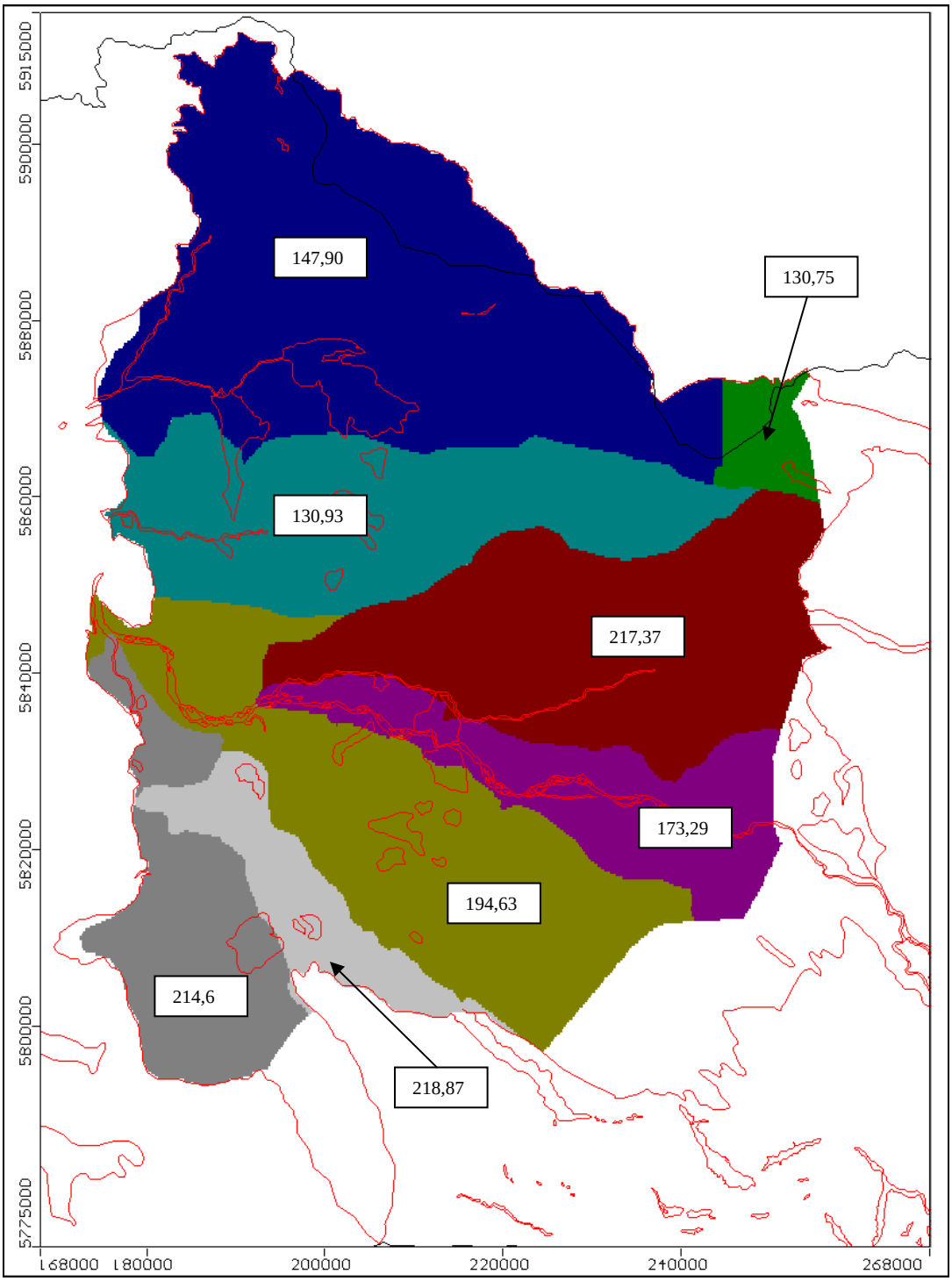
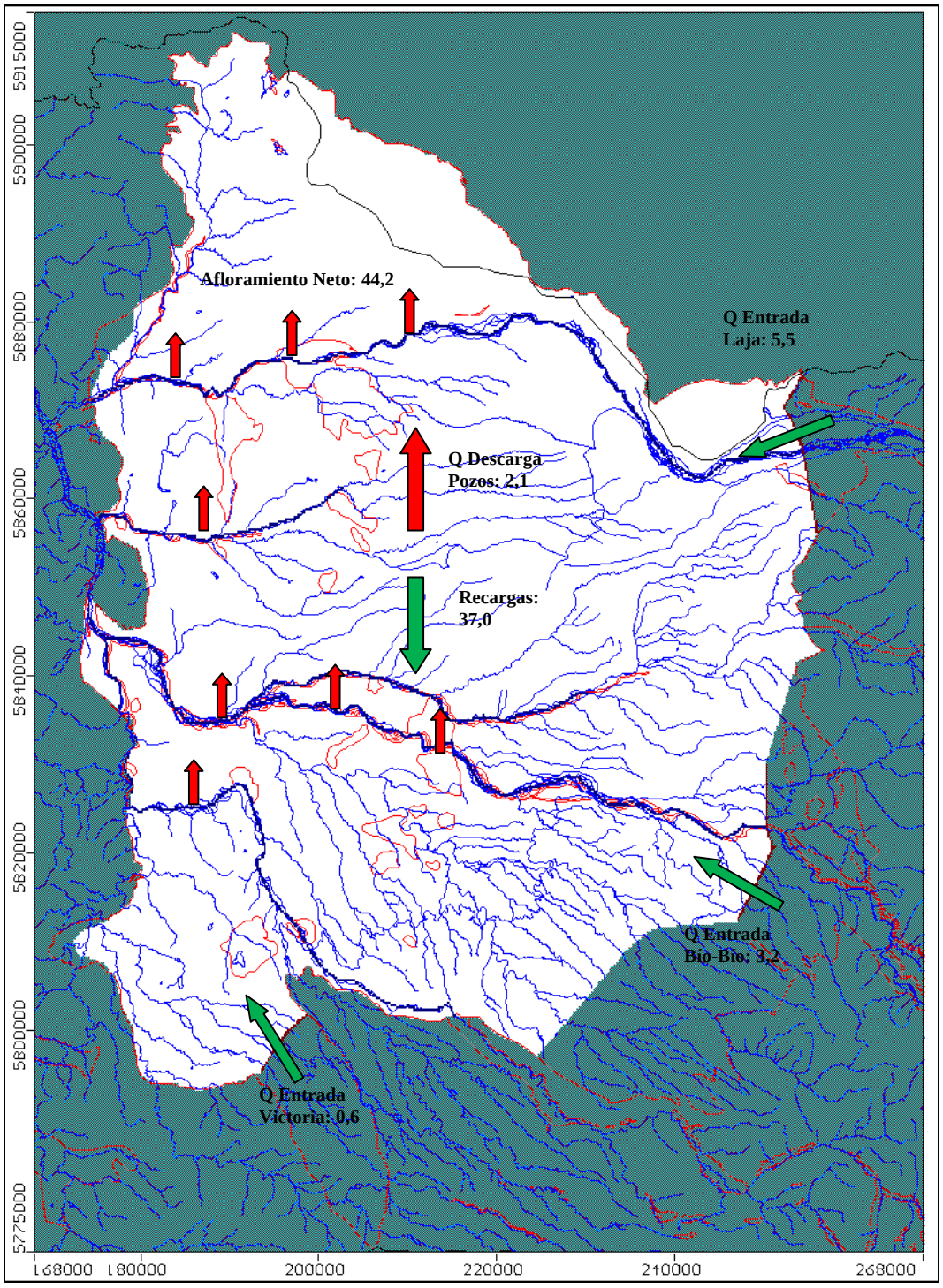


Figura 10-2. Balance Hídrico Acuífero Bío-Bío. Escenario Recarga 50% (Valores en m3/s).



Insertar Figura 10-3

10.2. Escenario 2: Total de las Captaciones Incorporadas al Modelo

Para este escenario, representativo de una condición máxima de explotación sobre el acuífero, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación. El Cuadro 10-2 presenta el balance hídrico respectivo, mientras que la Figura 10-4 presenta dichos balances de manera gráfica. En el Cuadro 10-3 se presentan los niveles en los pozos de calibración para este escenario de operación y su variación respecto del nivel en el escenario de calibración.

Cuadro 10-2. Balance Hídrico Obtenido Escenario Todas las Captaciones Incorporadas

Entradas			Salidas		
Componente	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**	**Componente**	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**
Flujo Subterráneo Laja	502.110	5,8	Descarga Pozos	281.090	3,3
Flujo Subterráneo Bío-Bío	295.440	3,4	Afloramientos Río	4.350.000	50,3
Flujo Subterráneo Victoria	87.208	1,0			
Recarga Areal	1.935.100	22,4			
Recarga Río	1.811.300	21,0			
Total	**4.631.158**	**53,6**	**Total**	**4.631.090**	**53,6**
Error: -0,001%					

Se observa un afloramiento neto sobre los cauces de la subcuenca de 29,4 m3/s.

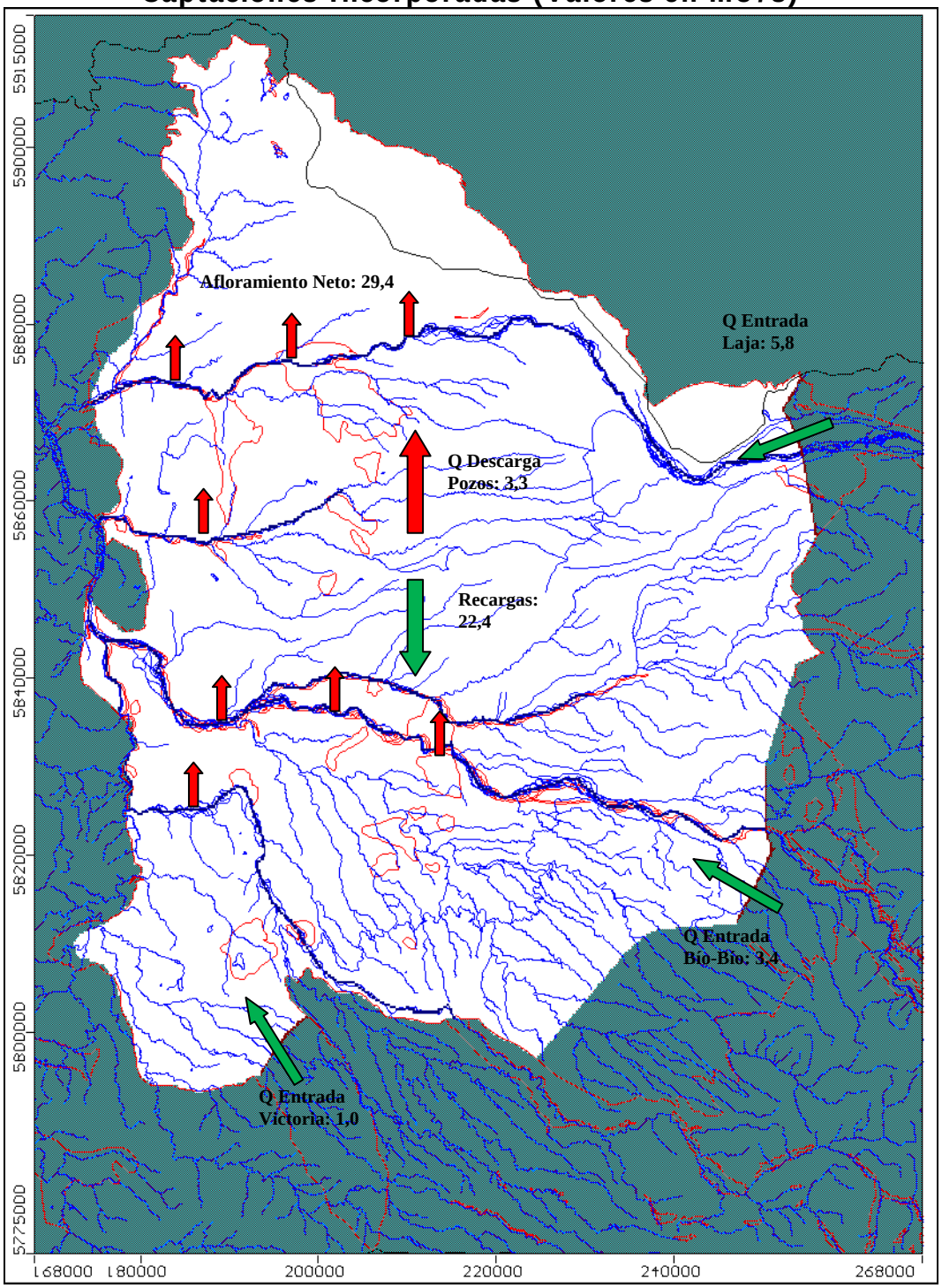
Cabe indicar que para este escenario se observaron, en los pozos de calibración, variaciones en promedio de 0,8 m bajo los niveles calibrados. En el Cuadro 10-3 mencionado, se muestran dichas variaciones, mientras que el Gráfico 10-1 muestra estos resultados de manera gráfica.

Las mayores variaciones se observan, al igual que en el escenario anterior, en el sector poniente del acuífero, principalmente en su frontera norte. Finalmente en el Anexo 8 se adjunta el respaldo magnético con los datos de entrada y resultados obtenidos del Modflow, en el proceso de operación de los dos escenarios antes detallados.

Cabe señalar que se observó una diferencia interesante entre los caudales de afloramiento obtenidos (30,5 m3/s en el modelo calibrado, 44,2 m3/s en el escenario 1 y 29,4 m3/s en el escenario 2), lo que muestra una respuesta importante frente a la recarga por precipitación, y una bastante menor frente al aumento de la explotación de los caudales (aumento de 45% frente a disminución de 3% respectivamente).

Esta diferencia se debe, como se mencionó anteriormente, a la importante sensibilidad de la representación de los ríos mediante niveles constantes frente a los aumentos de nivel freático del acuífero (producto del aumento de recargas), lo que se traduce en una disminución de la infiltración desde cauces naturales, y por ende, aumento de los afloramientos netos.

Figura 10-4. Balance Hídrico Acuífero Bío-Bío. Escenario Todas Las Captaciones Incorporadas (Valores en m3/s)



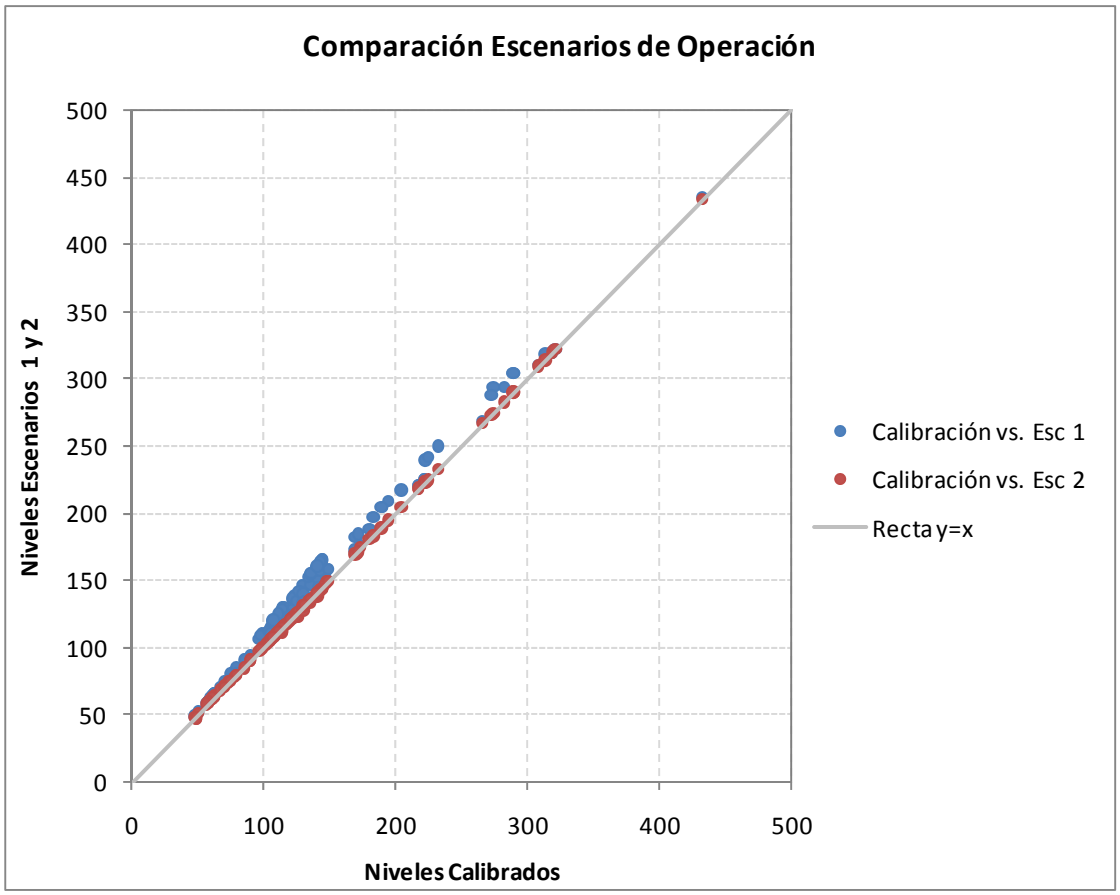
Cuadro 10-3 Niveles Pozos Calibración Escenario de Operación 1 y 2.

Pozo	Z Calculado			Variación Respecto Calibración	
	Calibración	Escenario 1	Escenario 2		
		Recarga 85%	Todas Capt.	Escenario 1	Escenario 2
59	78,1	82,3	77,3	4,2	-0,8
60	62,9	65,2	62,6	2,2	-0,3
2	233,5	249,2	232,5	15,8	-0,9
73	120,6	124,9	120,1	4,3	-0,4
24	289,6	303,9	289,2	14,2	-0,4
25	289,8	304,0	289,3	14,2	-0,4
26	117,0	120,1	116,3	3,1	-0,7
27	118,6	122,7	117,5	4,2	-1,0
28	125,2	130,2	124,8	5,0	-0,4
74	127,4	135,9	122,1	8,5	-5,3
75	190,2	203,5	188,8	13,3	-1,4
168	144,8	164,9	143,2	20,1	-1,5
169	144,7	164,8	143,2	20,1	-1,5
76	195,4	208,7	194,1	13,3	-1,3
77	49,5	49,8	47,6	0,4	-1,9
55	319,2	319,2	319,2	0,0	0,0
79	309,0	309,3	309,0	0,3	0,0
30	169,7	171,9	169,7	2,2	-0,1
80	222,4	224,5	222,4	2,1	0,0
81	222,4	224,5	222,3	2,2	0,0
56	313,9	317,8	313,5	3,9	-0,4
158	62,0	63,1	61,9	1,2	-0,1
63	217,6	219,6	217,6	2,0	0,0
57	61,3	63,1	60,9	1,8	-0,3
83	71,3	73,9	70,9	2,6	-0,4
31	137,0	153,6	135,4	16,6	-1,6
32	124,5	138,6	123,3	14,1	-1,2
33	97,7	105,7	96,5	8,1	-1,1
84	63,5	65,6	63,2	2,1	-0,3
34	63,5	65,2	63,4	1,8	0,0
35	58,4	59,7	58,3	1,3	0,0
85	68,3	70,3	68,2	2,0	-0,1
64	218,3	220,4	218,3	2,0	0,0
37	73,9	74,9	73,9	1,0	0,0
38	113,7	116,6	113,4	2,9	-0,3
86	223,2	238,7	221,8	15,5	-1,4
58	180,7	187,6	180,2	6,9	-0,5
39	432,7	434,2	432,7	1,6	0,0
40	129,7	145,6	128,5	15,8	-1,3
42	122,2	136,0	121,0	13,8	-1,2
87	141,2	150,8	137,8	9,6	-3,4
43	111,8	113,2	111,8	1,4	-0,1
44	122,3	123,6	122,3	1,3	-0,1
88	136,4	145,7	132,1	9,3	-4,2
89	115,2	117,3	114,8	2,1	-0,4
90	148,2	150,4	148,1	2,2	-0,1
91	116,9	119,6	116,5	2,7	-0,3
149	173,9	175,8	173,9	1,9	0,0
106	102,3	105,1	102,1	2,8	-0,1
114	115,2	128,7	114,7	13,5	-0,4
104	106,2	111,2	105,5	5,0	-0,7
109	108,5	121,1	108,1	12,6	-0,4
108	107,3	119,7	106,9	12,4	-0,4
115	112,9	125,9	112,5	13,1	-0,4
3	140,6	159,6	139,2	19,0	-1,4
116	116,5	129,5	116,2	13,0	-0,4
107	99,8	110,2	99,5	10,3	-0,4

Pozo	Z Calculado			Variación Respecto Calibración	
	Calibración	Escenario 1	Escenario 2		
		Recarga 85%	Todas Capt.	Escenario 1	Escenario 2
4	140,6	159,6	139,2	19,0	-1,4
150	134,4	136,0	134,2	1,5	-0,2
151	125,7	126,7	125,5	1,0	-0,2
101	98,7	108,5	98,4	9,8	-0,4
102	105,3	113,8	105,0	8,5	-0,4
100	75,3	80,0	75,0	4,7	-0,3
117	107,2	119,1	106,8	11,9	-0,4
6	135,0	152,3	133,6	17,3	-1,3
118	122,9	136,2	122,6	13,3	-0,3
7	116,4	121,9	116,0	5,5	-0,4
8	121,4	127,1	121,0	5,7	-0,4
65	110,5	114,4	110,3	3,9	-0,3
9	139,4	156,7	136,9	17,3	-2,4
10	139,3	156,6	136,9	17,3	-2,4
11	147,9	156,4	147,4	8,5	-0,5
182	58,7	59,6	58,5	0,9	-0,2
12	121,5	126,1	121,1	4,6	-0,5
13	123,1	127,8	122,6	4,7	-0,5
14	127,5	141,1	126,4	13,7	-1,1
61	321,5	321,5	321,5	0,0	0,0
15	274,5	293,3	274,0	18,8	-0,5
51	61,8	62,6	61,7	0,8	-0,1
16	104,3	111,8	103,7	7,5	-0,6
17	121,1	122,9	121,0	1,8	-0,1
18	80,1	84,8	79,6	4,8	-0,5
52	62,3	63,7	62,1	1,5	-0,1
140	136,2	154,0	134,9	17,7	-1,4
144	136,7	154,6	135,4	17,9	-1,4
19	282,5	293,3	282,1	10,8	-0,4
20	273,2	287,4	272,6	14,2	-0,5
66	90,3	93,2	90,3	2,9	-0,1
21	169,9	181,6	168,1	11,7	-1,8
22	90,4	92,4	90,2	2,0	-0,1
53	79,5	80,1	79,4	0,6	-0,1
23	147,0	156,7	146,3	9,7	-0,7
67	183,8	197,0	182,3	13,3	-1,5
68	49,3	49,7	46,8	0,4	-2,4
1	143,9	156,5	142,9	12,5	-1,0
69	62,2	63,4	62,1	1,2	-0,1
70	266,8	267,9	266,8	1,1	0,0
71	59,0	60,1	58,9	1,1	-0,1
54	172,2	184,1	170,5	11,9	-1,7
72	75,0	76,3	74,9	1,4	0,0
47	190,0	204,1	188,4	14,1	-1,6
93	125,9	133,9	122,3	8,0	-3,5
94	130,8	139,4	127,3	8,5	-3,5
95	113,1	123,0	112,3	9,9	-0,8
96	110,2	119,9	109,4	9,6	-0,8
97	48,5	48,8	48,1	0,3	-0,5
98	85,6	90,3	84,2	4,7	-1,4
99	224,9	240,7	224,1	15,8	-0,8
141	114,4	120,1	111,3	5,7	-3,2
142	115,2	121,0	112,0	5,8	-3,2
105	105,6	109,9	105,2	4,3	-0,4
111	114,5	128,0	114,0	13,4	-0,5
112	111,3	124,3	110,9	12,9	-0,4
113	107,8	120,0	107,4	12,2	-0,4
152	141,6	145,0	141,4	3,4	-0,2
153	149,4	157,4	149,1	8,1	-0,3
154	130,4	132,7	130,2	2,4	-0,2

Pozo	Z Calculado			Variación Respecto Calibración	
	Calibración	Escenario 1	Escenario 2		
		Recarga 85%	Todas Capt.	Escenario 1	Escenario 2
155	130,0	132,1	129,8	2,0	-0,2
156	131,3	134,4	131,2	3,1	-0,1
159	57,6	58,4	57,4	0,8	-0,2
160	51,4	51,8	50,7	0,5	-0,7
161	49,3	49,7	47,1	0,4	-2,2
175	144,2	164,3	142,8	20,0	-1,5
176	143,4	162,9	141,9	19,6	-1,5
177	141,4	160,1	139,9	18,7	-1,5
46	205,0	216,6	204,4	11,7	-0,6
45	70,7	71,9	70,6	1,2	-0,1
			Promedio	**7,5**	**-0,8**

Gráfico 10-1 Comparación Niveles Escenarios de Operación vs. Niveles Calibrados



10.3. Escenario 3: Análisis de Sensibilidad Factores de Uso en Pozos de Bombeo

Para este escenario fueron aumentados los factores de uso considerados inicialmente, lo cual permitió definir 3 subescenarios, representados a continuación:

- Escenario 3a: Multiplicación de los factores por 1,5.
- Escenario 3b: Multiplicación de los factores por 3,0.
- Escenario 3c: Factores iguales a 1,0.

Evidentemente, si producto de la ponderación un factor aumenta a un valor mayor que 1,0, se consideró dicho factor igual a 1,0.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada subescenario, y una comparación entre ellos y el resto de los escenarios presentados anteriormente.

Subescenario 3a

Cuadro 10-4. Balance Hídrico Obtenido Modelo Bío-Bío

Entradas			Salidas		
Componente	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**	**Componente**	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**
Flujo Subterráneo Laja	502.450	5,8	Descarga Pozos	255.850	3,0
Flujo Subterráneo Bío-Bío	296.140	3,4	Afloramientos Río	4.371.200	50,6
Flujo Subterráneo Victoria	87.139	1,0			
Recarga Areal	1.935.100	22,4			
Recarga Río	1.806.200	20,9			
Total	**4.627.029**	**53,6**	**Total**	**4.627.050**	**53,6**
Error: 0,000%					

Subescenario 3b

Cuadro 10-5. Balance Hídrico Obtenido Modelo Bío-Bío

Entradas			Salidas		
Componente	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**	**Componente**	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**
Flujo Subterráneo Laja	503.500	5,8	Descarga Pozos	350.110	4,1
Flujo Subterráneo Bío-Bío	299.000	3,5	Afloramientos Río	4.306.800	49,8
Flujo Subterráneo Victoria	87.916	1,0			
Recarga Areal	1.935.100	22,4			
Recarga Río	1.831.400	21,2			
Total	**4.656.916**	**53,9**	**Total**	**4.656.910**	**53,9**
Error: 0,000%					

Subescenario 3c

Cuadro 10-6. Balance Hídrico Obtenido Modelo Bío-Bío

Entradas			Salidas		
Componente	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**	**Componente**	**Q (m3/d)**	**Q (m3/s)**
Flujo Subterráneo Laja	88.233	1,0	Descarga Pozos	386.030	4,5
Flujo Subterráneo Bío-Bío	302.500	3,5	Afloramientos Río	4.284.200	49,6
Flujo Subterráneo Victoria	504.520	5,8			
Recarga Areal	1.935.100	22,4			
Recarga Río	1.839.900	21,3			
Total	**4.670.253**	**54,1**	**Total**	**4.670.230**	**54,1**
Error: 0,000%					

Comparación Subescenarios

A continuación, se comparan los resultados obtenidos entre los 3subescenarios, y en particular, se evalúa la relación entre el caudal explotado y la variación de los niveles en los pozos de observación respecto a los niveles calibrados.

El Anexo 10 presenta los resultados de manera general, considerando todos los escenarios de explotación analizados en la modelación (Escenarios 0 – correspondiente al escenario de calibración-, 2, 3a, 3b y 3c). Estos resultados

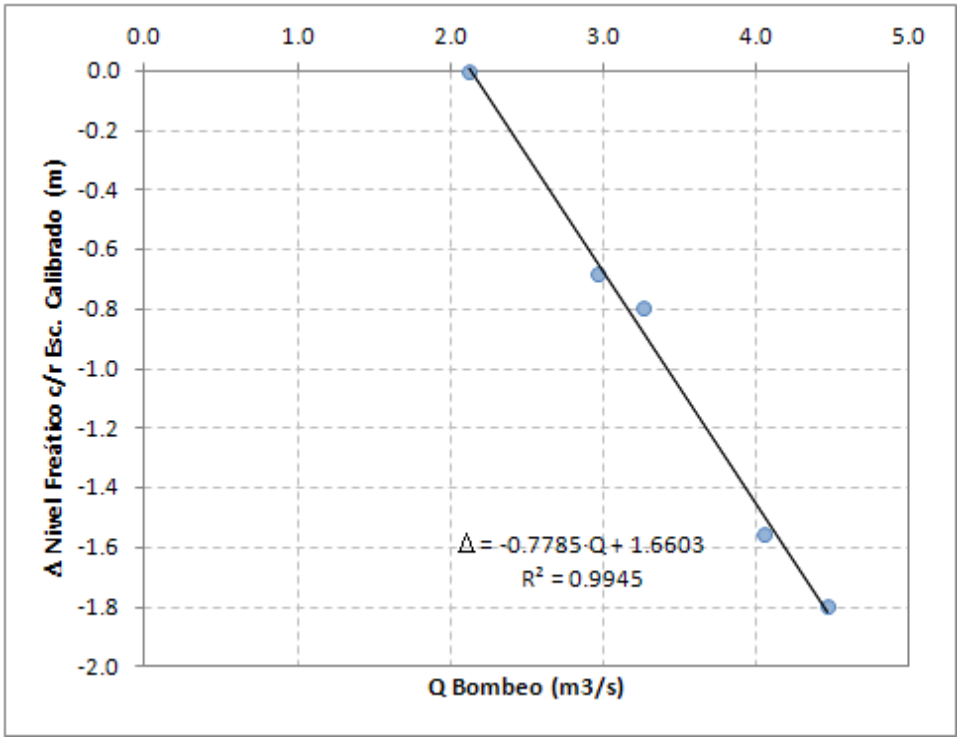
se muestran de manera gráfica en el Gráfico 10-2. Las comparaciones incluyen todo el dominio de modelación.

El Cuadro 10-6 en tanto, muestran los resultados obtenidos para cada pozos de observación.

Cuadro 10-6 Comparación Descenso Niveles vs. Caudales de Explotación

Escenario	Q Bombeo	Descenso c/r Calibración
	[m3/s]	[m]
0	2,1	0,0
2	3,3	-0,8
3a	3,0	-0,7
3b	4,1	-1,6
3c	4,5	-1,8

Gráfico 10-2. Descenso Niveles vs. Caudales de Explotación



Finalmente, se estimó la variación del volumen del acuífero factible de explotar, el cual fue definido por el estrato 1. Cabe recordar que dicho estrato fue definido hasta la máxima profundidad observada en los pozos de bombeo

(250 m). Esta variación fue determinada entre el Escenario 1 (asociado a mayor recarga), y el Escenario 3c (asociado a la mayor explotación factible).

Considerando lo anterior, se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 10-7. Comparación Variación Volumen Acuífero vs. Caudales de Explotación

Escenario	Volumen Acuífero (Estrato 1) [m3]	Volumen Acuífero (Estrato 2) [m3]	Q Bombeo [m3/s]
1	1,513E+12	3,846E+12	2,1
3c	1,450E+12	3,844E+12	4,5
Δ	4,14%	0,05%	-

Como referencia, el caudal de explotación total, tal que la variación del volumen del acuífero sea de 5%, es de 5,0 m3/s.

10.4. Análisis Resultados y Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios para los cuales se operó el modelo hidrogeológico, se concluye lo siguiente:

- La explotación del acuífero considerada en el escenario de calibración, incluyó las captaciones que tienen sus derechos constituidos actualmente, este valor asciende a 2,1 m^3/s (cifra ponderada por los respectivos factores de uso). Si no se considera factores de uso, el caudal teóricamente explotable ascendería a 4,5 m^3/s.

- El modelo se operó para los siguientes escenarios:

  i. Escenario 1: Aumento de las recargas. En el proceso de calibración se consideró una recarga asociada al 85 % de Pbb. de excedencia, en el escenario 1 se adopto una recarga vinculada a un 50 % Pbb. de excedencia, manteniendo la extracción de recursos del escenario de calibración (solo captaciones con derechos constituidos).

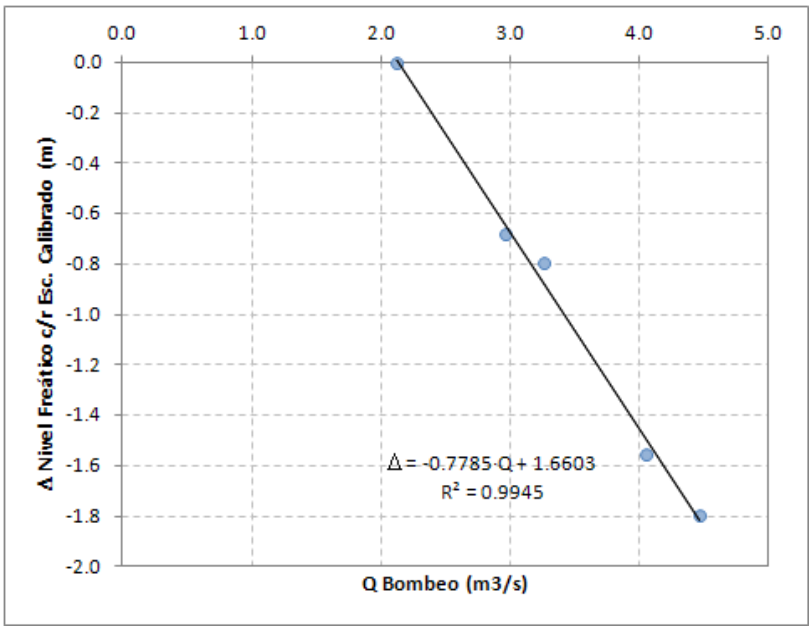
  ii. Escenario 2: Recarga asociada al 85 % de Pbb. de excedencia y explotación del acuífero incluyendo todas las captaciones catastradas (con y sin derechos constituidos). El valor de explotación en este escenario asciende a 3,3 m3/s (cifra ponderada por los factores de uso respectivos).

iii. Escenario 3: Análisis sensibilidad factores de uso caudales de explotación captaciones del escenario de calibración, es decir, aumento del factor de uso hasta llegar a 1 (caudal extracción igual a los derechos constituidos). Esta sensibilidad se dividió en 3 sub escenarios: ponderación factor de uso en 1,5 - 3 y factor igual a 1.

- Los escenarios antes mencionados arrojaron en promedio, en los pozos de calibración, las siguientes variaciones de nivel respecto al escenario de calibración.

Escenario	Q Bombeo	Descenso c/r Calibración
	[m3/s]	[m]
0	2,1	0,0
1	2,1	7,5
2	3,3	-0,8
3a	3,0	-0,7
3b	4,1	-1,6
3c	4,5	-1,8

- Los resultados anteriores permitieron establecer una relación de tipo lineal entre caudal de explotación y el descenso del nivel estático. En el grafico siguiente se aprecia dicha correlación.



- Se analizó los sectores del acuífero más sensible a las variaciones de nivel, en cada uno de los escenarios de operación modelados. Específicamente se detectaron dos sectores:

  i. El primero ubicado al norte del acuífero, en la subcuenca del Laja Bajo, (cercano a las localidades de : Yumbel, Cabrero, Monte Águila).

  ii. El segundo ubicado en la parte central del acuífero, en la subcuenca del Río Duqueco y subcuenca del Río Bio-Bío entre Río Vergara y Río Laja (cercano a las localidades de Los Ángeles, Quilleco)

En la Figura 10-5 siguiente se aprecian delimitan los sectores antes señalados.

Sector Acuifero que presentan mayor variación de NE, frente a diferentes escenarios de operacion del Modelo Hidrogeológico

SubCuencas con Zona Sensibilidad	
Código	**Nombre SubCuenca**
0832	Río Duqueco
0836	Río Bio-Bío entre Río Vergara y Río Laja
0838	Laja Baja

Simbología

- Pozos Utilizados en la Calibracion del Modelo (127)
- Zonas Sensibles

Acuíferos
- Subacuifero 1
- Subacuifero 2
- Subacuifero 3

Límite Cuencas
- Cuenca del Río Bio-Bío
- SubCuencas Río Bio-Bío

Hidrografía
- Río
- Lagos

Limites Administrativos
- Límite Internacional
- Límite Regional
- Límite Costero

Datos Cartográficos y Geodésicos:
Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM)
Huso 19 Sur

Sistema de Referencia Geodésico: WGS-84

Nota: Trazado de límites aproximado.

0 5 10 20 Km

REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

CONSULTOR: AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA

PROYECTO: ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA DEL RÍO MATAQUITO

ESCALA	FIGURA	FECHA	TÍTULO
GRÁFICA	10 - 5	DICIEMBRE 2012	Pozos de Calibración Zonas de Sensibilidad

- Se estimó el volumen del acuífero, en dos escenarios extremos (escenario 1 y 3c), con el objeto de establecer un rango de valores que permitan conocer su fluctuación y de este modo poder estimar un caudal de explotación asociado a una variación de volumen igual al 5 %. En el Cuadro siguiente se presenta los resultados obtenidos.

Escenario	Volumen Acuífero (Estrato 1) [m3]	Volumen Acuífero (Estrato 2) [m3]	Q Bombeo [m3/s]
1	1,513E+12	3,846E+12	2,1
3c	1,450E+12	3,844E+12	4,5
Δ	4,14%	0,05%	-

Finalmente se estableció que un caudal de explotación aprox. de 5 m3/s produciría una variación de volumen del acuífero en torno al 5 %.

- Cabe recordar que todos los resultados y conclusiones obtenidas, en el presente estudio, se basan y apoyan en la modelación del acuífero en régimen permanente, motivo por el cual al momento de su aplicación debe tenerse en cuenta este hecho. Por otro lado una modelación en régimen transiente, entrega resultados que representan mejor el comportamiento del acuífero en el tiempo.

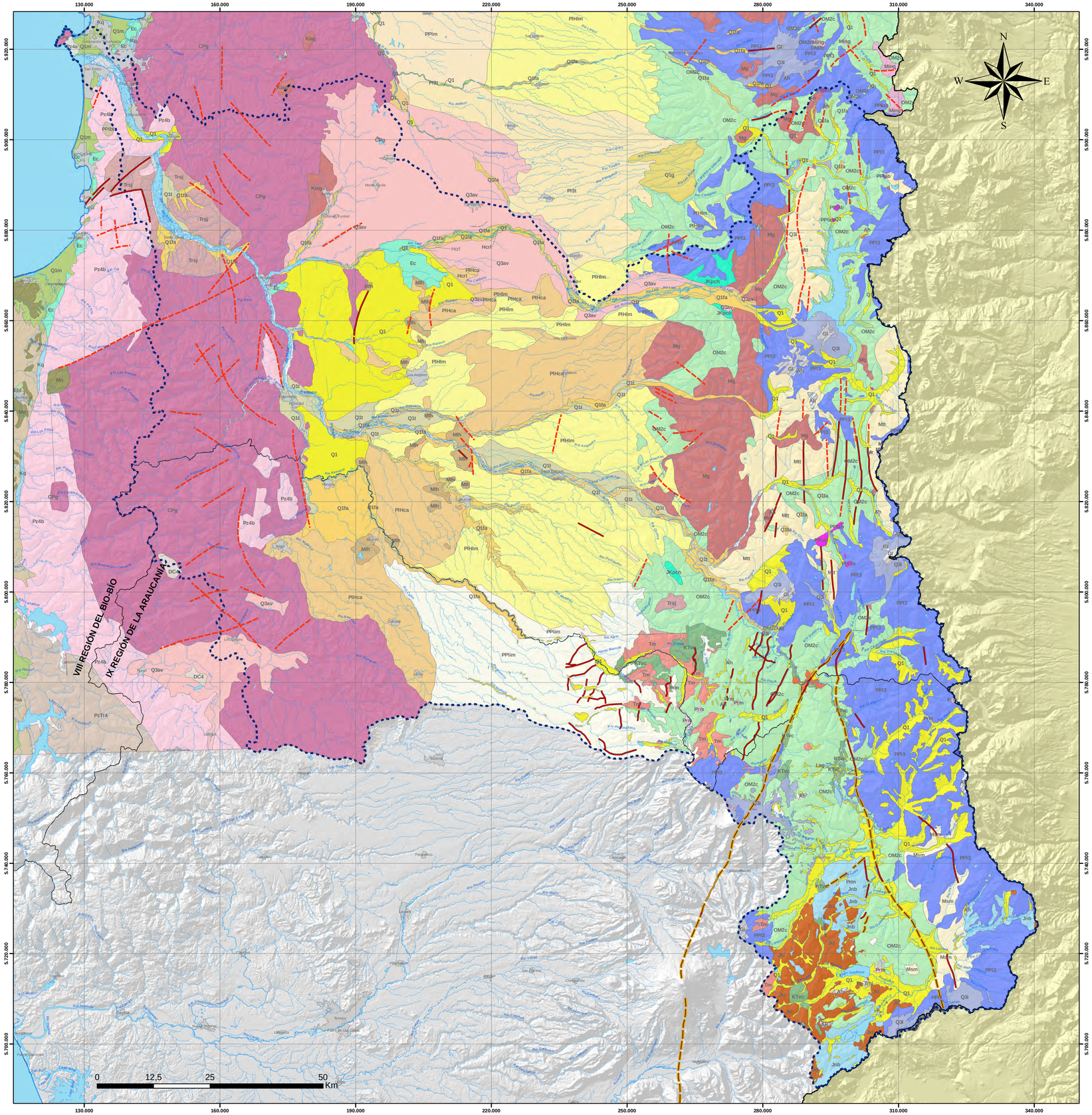
- Con el objetivo de seguir avanzando y profundizando en la caracterización y conocimiento del comportamiento del acuífero asociado a la cuenca del río Bío Bío, se propone elaborar estudios tendientes a conocer y evaluar las siguientes variables:

  i. Mejorar la estimación y/o evaluación de las recargas al sistema subterráneo, en base a antecedentes actualizados (Modelación del sistema superficial).

  ii. Identificación y cuantificación (campañas de terreno) de sectores de afloramiento y recuperación.

  iii. Implementación red de medición de niveles.

  iv. Mejorar y/o precisar el conocimiento de los caudales subterráneos efectivamente explotados.



SIMBOLOGÍA

- Límite Costero
- Límite Internacional
- Límite Regional
- Ciudades y Pueblos
- Cuenca Río Itata
- Red Hidrográfica

Fallas Geológicas Cuenca Biobío

- Falla
- Falla Cubierta
- Falla Invertida
- Falla Inferida o Lineamiento Geológico

Cenozoico

Cuaternario

- Q1 — Depósitos fluvio-aluviales. Sedimentos de valles actuales
- Q1fa — Depósitos Fluvio-Aluviales
- Q1t — Sedimentos de terrazas fluviales. Gravas, arenas y sedimentos finos
- Hcrl — Depósitos del cono fluvial del Río Laja. Arenas basálticas
- PlHca — Sedimentos Glacio-lacustres. Arcillolitas, arenas y conglomerados
- PlHlm — Formación La Montaña. Sedimentos morrénicos y glací-lacustres
- Q3av — Depósitos de avalancha volcánica. Asociados a colapso parcial de edificios volcánicos
- Q3i — Estratovolcanes y complejos volcánicos. Lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos
- Pl3t — Depósitos piroclásticos. Principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso
- PPl3 — Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados. Lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas yconglomerados
- PPlim — Formación Malleco. Brechas, tobas, lavas andesítico-basálticas y flujos piroclásticos
- Msm — Formación Mitruquén. Conglomerados, ignimbritas y lavas andesíticas
- Mtt — Formación Trapa-Trapa. Aglomerados volcánicos, lavas andesíticas y conglomerados
- OM2c — Secuencias volcanosedimentarias. Lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas a piroclásticas
- Ec — Formación Curanilahue. Areniscas y arcillas con mantos de carbón
- Mlh — Lavas de Huelehueico. Secuencia de lavas andesíticas piroxenas a basálticas
- KTvc — Complejo Vizcacha-Cumilao. Lavas andesíticas macizas y subordinadamente basálticas
- Ah — Alteración hidrotermal
- Gl — Glaciares
- PPlab — Intrusivos Orientales. Andesita-basalto
- Prm — Intrusivos hipabisales del río Renalco y Cerro Mocho. Diques, filones-mantos y cuerpos intrusivos irregulares de andesita, basaltos y gabros
- Mr — Stocks de riodacitas. Cuerpos y filones riodacíticos de color blanco-amarilento
- Mg — Intrusivos Miocénicos. Granodioritas, dioritas y tonalitas
- Tm — Grupo plutónico Melipeuco. Tonalitas y granodioritas
- Tl — Stock Lolco. Monzogranitos y sienogranitos de color rosado, sin inclusiones
- Kiag — Intrusivos Cretácicos. Dioritas, Monzodioritas, Granodioritas y Monzogranitos indiferenciados
- JKl — Grupo plutónico Gualletué. Monzogranitos, dioritas cuarcíferas y tonalitas

Neógeno

Paleógeno

Cretácico

Mesozoico

Jurásico

- JKpch — Estratos de Polcura-Cholguan. Sedimentitas clásticas continentales con intercalaciones volcánicas
- Jnb — Formación Nacientes del Biobío. Rocas sedimentarias clásticas, carbonatadas y lavas basálticas marinas y lavas continentales

Triásico

- Trsj — Formación Santa Juana. Secuencias continentales y marina, lutitas, areniscas, lavas y brechas andesíticas

Paleozoico

Devónico-Carbonífero

- DC4 — Metareniscas y filitas. Devónico-Carbonífero. Metareniscas, filitas, marmoles, cherts, metabasaltos, metaconglomerados y metaturbiditas

Silúrico-Devónico-Carbonífero

- Pz-Trhi — Estratos de Huinucal Ivante. Metasedimentitas foliadas, lutitas y metareniscas
- Pz4a — Serie Occidental. Micaesquistos y metacherts
- Pz4b — Serie Oriental. Basamento metamórfico, Pizarras, filitas y metareniscas
- CPg — Intrusivos Carboníferos-Pérmicos. Tonalitas y granodioritas indiferenciadas

Datos Cartográficos y Geodésicos:
Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM)
Huso 19 Sur

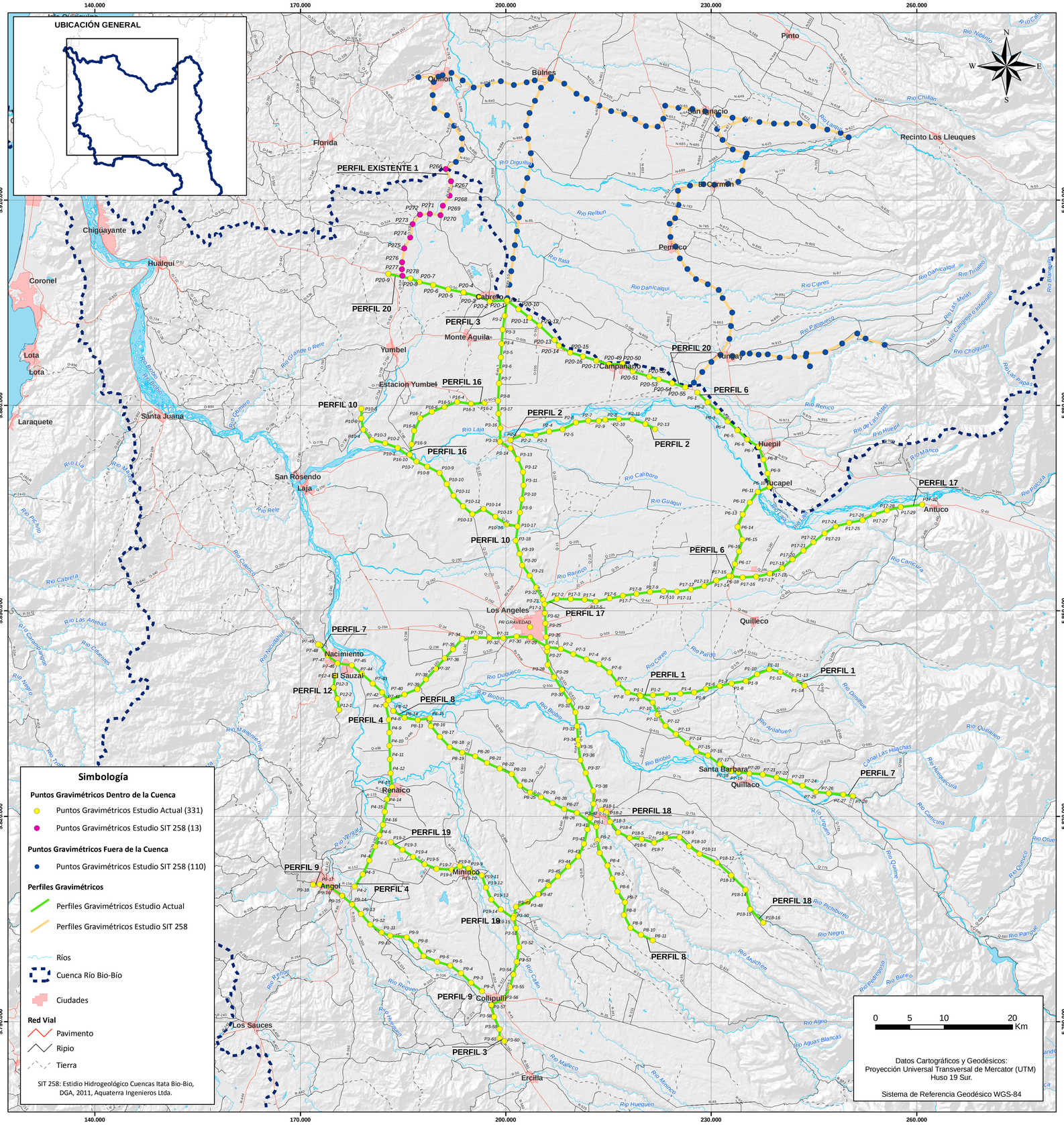
Sistema de Referencia Geodésico: WGS-84

Nota: Trazado de límites aproximado.

REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

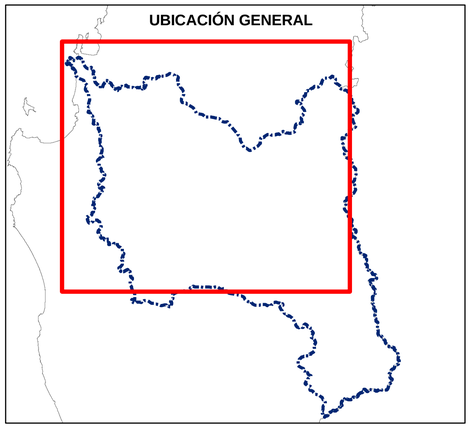
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

CONSULTOR	PROYECTO	
AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA BIO BÍO	
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS: Matías Desmadryl L.	JEFE DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN: Adrián Lillo	INSPECCIÓN FISCAL: Miguel Ángel Caro
ESCALA: 1:450.000	PLANO: 4 - 1	FECHA: DICIEMBRE 2012
		TÍTULO: Geología Cuenca Río Bio-Bío


UBICACIÓN GENERAL
140.000
170.000
200.000
230.000
260.000
5.910.000
5.880.000
5.850.000
5.820.000
5.790.000
N
S
W
E
Quilon
Bulnes
Pinto
San Ignacio
Florida
Recinto Los Lleuques
El Carmen
Pemuco
Chiguayante
Hualqui
Coronel
Lota
Lota
Yumbel
Monte Aguila
Cabrero
Estacion Yumbel
Santa Juana
Laraquete
Tucapel
Huepil
Antuco
Quilleco
San Rosendo
Laja
Los Angeles
Nacimiento
El Sauzal
Renaico
Santa Barbara
Quillaco
Mulchen
Angol
Mininco
Collipulli
Los Sauces
Ercilla
PERFIL EXISTENTE 1
PERFIL 1
PERFIL 2
PERFIL 3
PERFIL 4
PERFIL 6
PERFIL 7
PERFIL 8
PERFIL 9
PERFIL 10
PERFIL 12
PERFIL 16
PERFIL 17
PERFIL 18
PERFIL 19
PERFIL 20
Río Laja
Río Duqueco
Río Biobío
Río Bureo
Río Malleco
Río Renaico
Río Vergara
Río Rahue
Río Rehue
Río Picoiquén
Río Quillaileo
Río Quino
Río Pichibureo
Río Negro
Río Mulchen
Río Agrio
Río Aguas Blancas
Río Huequen
Río Polcura
Río Caliboro
Río Guaqui
Río Renico
Río Huepil
Río Manco
Río Chillan
Río Nuble
Río Diguillin
Río Relbun
Río Itata
Río Cipres
Río Pangueco
Río Danicalqui
Río Tinguiririca
Río Las Mulas
Río Chollguan
Río Cancura
Río Queuco
Río Lonquimay
Río Curacautin
Río Cautin
Río Cabrera
Río Las Animas
Río Cautinito
Río Negro
Río Malleco
Río Pichillo
Río Trongol
Río Mininco
Río Huequen
Río Rahue
Río Rehue
Río Picoiquén
Río Quino
Río Pichibureo
Río Agrio
Río Aguas Blancas
Río Bureo
Río Pangue

Traslape Modelo Isobático Estudio SIT 258

UBICACIÓN GENERAL



Simbología

Estaciones Gravimétricas Dentro de la Cuenca

- Estaciones Estudio Bio-Bio
- Estaciones Estudio SIT 258

Estaciones Gravimétricas Fuera de la Cuenca

- Estaciones Estudio SIT 258

Curvas Isobáticas

- Curvas Isoprofundidad (cada 100m)
- Curvas Índice (cada 200m)

Rango Profundidades (m)

- -300 a 0
- -600 a -300
- -900 a -600
- -1.200 a -900
- -1.500 a -1.200
- < -1.500

- Límite Cuenca Río Bio-Bío
- Ríos
- Lagos
- Ciudades

Límites Administrativos

- Límite Costero
- Límite Regional
- Límite Internacional

SIT 258: Estudio Hidrogeológico Cuencas Itata y Bio-Bío, DGA, 2011, Aquaterra Ingenieros Ltda.

Datos Cartográficos y Geodésicos:
Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM)
Huso 19 Sur

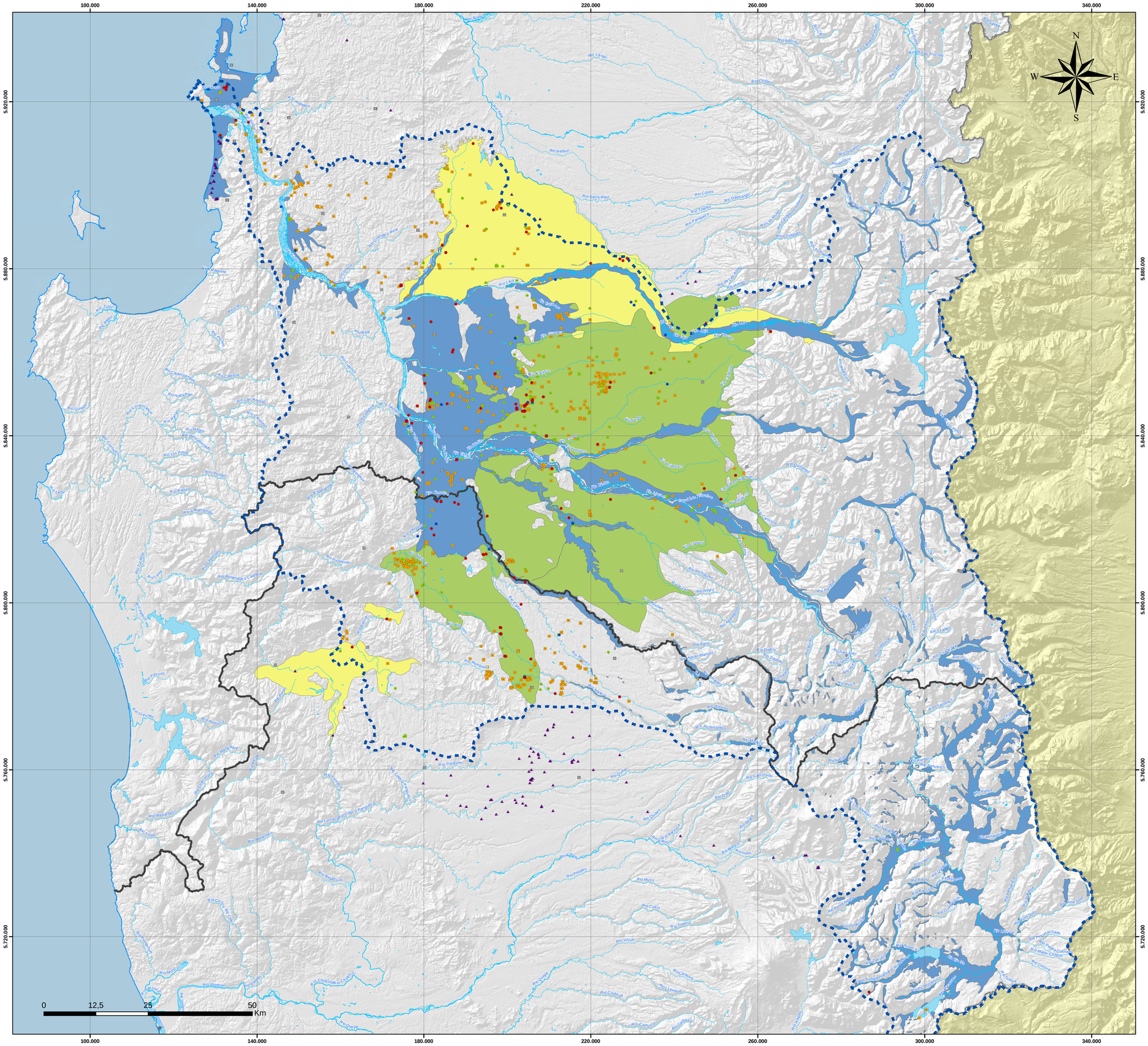
Sistema de Referencia Geodésico: WGS-84

Nota: Trazado de límites aproximado

0 5 10 20 Km

REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

CONSULTOR	PROYECTO		
AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA DEL RÍO BIO-BIO		
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS: Matías Desmadryl L.	JEFE D.E.P.: Adrian Lillo Zenteno	INSPECCIÓN FISCAL: Miguel Ángel Caro	
ESCALA: 1:300.000	Nº PLANO: 5 - 2	FECHA: DICIEMBRE 2012	TÍTULO: Plano Isobático Cuenca del Bio-Bío (Valle Central)



Simbología

Captaciones Subterráneas Bio Bío

Captaciones dentro de la Cuenca

- Pozos - Derecho Aprobado
- Pozos - Con Número de Expediente
- Pozos - Sin Información de Derecho
- Otras Captaciones - Derecho Aprobado

Captaciones fuera de la Cuenca

- Pozos - Con Número de Expediente

Captaciones sin Coordenadas

- Pozos - Con Número de Expediente

Acuífero Bio Bío

- Subacuífero 1, Unid. Geológica Q3av
- Subacuífero 2, Unid. Geológica Q1, Q1fa, Q1m, Q1t, Hcrl
- Subacuífero 3, Unid. Geológica PlHca, PlHlm
- Cuenca Río Bio Bío
- Río
- Lagos, Lagunas, Embalses

Límites Administrativos

- Límite Internacional
- Límite Regional
- Límite Costero

RESUMEN CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS

	Captación	Derecho	Cantidad
Dentro de la Cuenca	Pozo	Aprobado	172
	Pozo	Sin Información	123
	Pozo	Núm. Expediente	25
	Otras Captaciones (1)	Aprobado	620
	Sub-Total		**940**
Fuera de la Cuenca	Pozo	Núm. Expediente	117
	Sub-Total		**117**
Sin Coordenadas (2)	Captaciones	Aprobado	200
	Sub-Total		**200**
Total			**1257**

(1) Incluye captaciones sin identificación de tipo obra (pudiendo ser pozo, noria, dren o puntera)

(2) Captaciones asociadas al centroide de la Comuna a la que pertenecen.

Fuente: CPA, Estudio Hidrogeológico Cuenca Bio Bio e Itata

Datos Cartográficos y Geodésicos:
Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM)
Huso 19 Sur

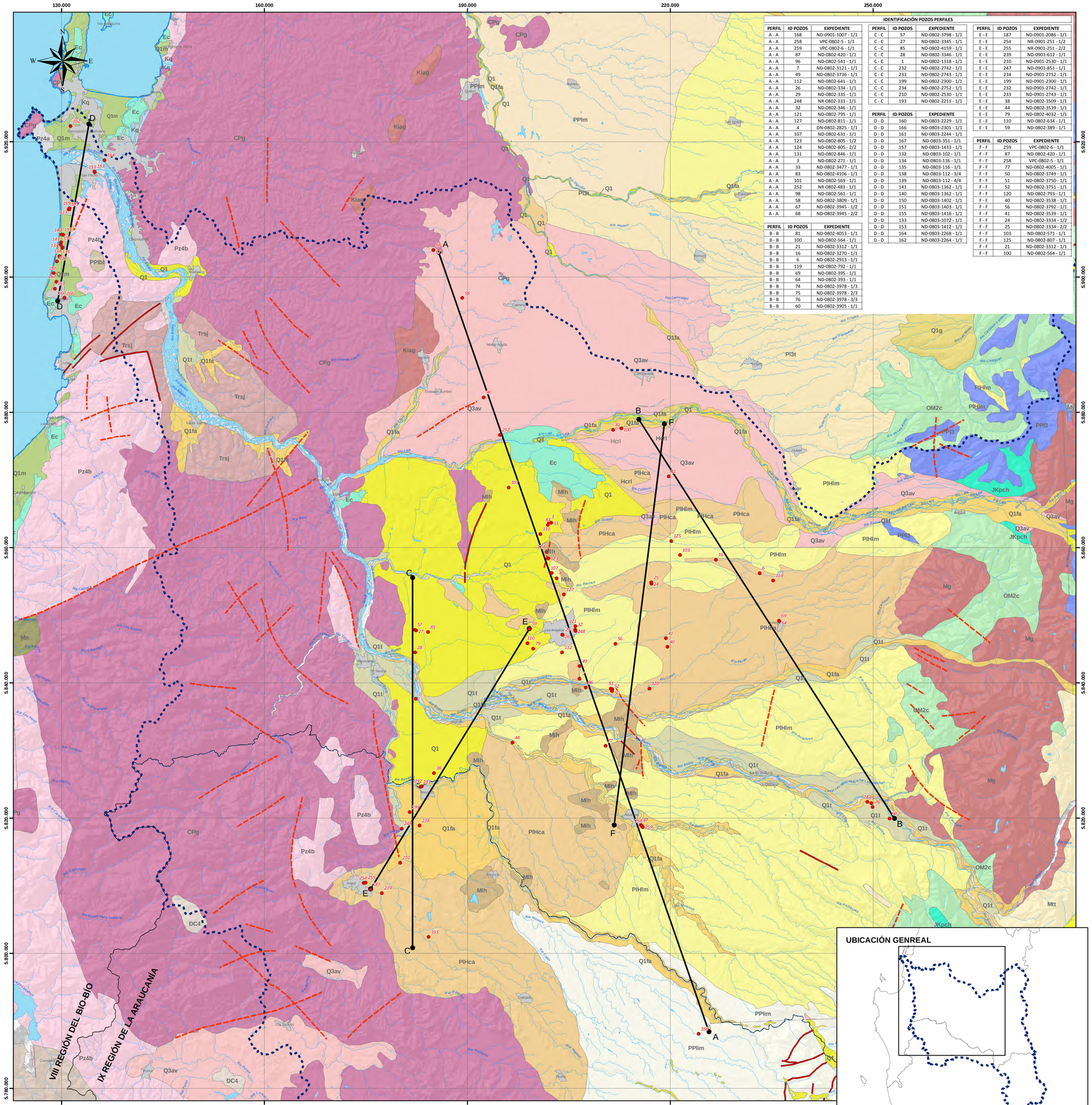
Sistema de Referencia Geodésico: WGS-84

Nota: Trazado de límites aproximado.

REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

CONSULTOR	PROYECTO	
AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA BIO BÍO	
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS Matías Desmadryl L.	JEFE DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN Adrián Lillo	INSPECCIÓN FISCAL Miguel Ángel Caro
ESCALA 1:450.000	PLANO 6 - 1	FECHA DICIEMBRE 2012
TÍTULO Acuífero Cuenca Río Bio-Bío y Captaciones Subterráneas		



IDENTIFICACIÓN POZOS PERFILES

PERFIL	ID POZOS	EXPEDIENTE
A - A	168	ND-0901-1007 - 1/1
A - A	258	VPC-0802-5 - 1/1
A - A	259	VPC-0802-6 - 1/1
A - A	87	ND-0802-420 - 1/1
A - A	96	ND-0802-541 - 1/1
A - A	7	ND-0802-3121 - 1/1
A - A	49	ND-0802-3736 - 1/1
A - A	112	ND-0802-641 - 1/1
A - A	26	ND-0802-334 - 1/1
A - A	29	ND-0802-335 - 1/1
A - A	248	NR-0802-333 - 1/1
A - A	32	ND-0802-346 - 1/1
A - A	121	ND-0802-795 - 1/1
A - A	127	ND-0802-811 - 1/1
A - A	4	DN-0802-2825 - 1/1
A - A	107	ND-0802-631 - 1/1
A - A	123	ND-0802-805 - 1/2
A - A	124	ND-0802-805 - 2/2
A - A	131	ND-0802-846 - 1/1
A - A	3	ND-0802-271 - 1/1
A - A	33	ND-0802-3477 - 1/1
A - A	83	ND-0802-4106 - 1/1
A - A	101	ND-0802-569 - 1/1
A - A	252	NR-0802-483 - 1/1
A - A	98	ND-0802-561 - 1/1
A - A	58	ND-0802-3809 - 1/1
A - A	67	ND-0802-3945 - 1/2
A - A	68	ND-0802-3945 - 2/2
B - B	81	ND-0802-4053 - 1/1
B - B	100	ND-0802-564 - 1/1
B - B	21	ND-0802-3312 - 1/1
B - B	16	ND-0802-3270 - 1/1
B - B	6	ND-0802-2913 - 1/1
B - B	119	ND-0802-792 - 1/1
B - B	69	ND-0802-395 - 1/1
B - B	64	ND-0802-393 - 1/1
B - B	74	ND-0802-3978 - 1/3
B - B	75	ND-0802-3978 - 2/3
B - B	76	ND-0802-3978 - 3/3
B - B	60	ND-0802-3905 - 1/1
C - C	57	ND-0802-3798 - 1/1
C - C	27	ND-0802-3345 - 1/1
C - C	85	ND-0802-4159 - 1/1
C - C	28	ND-0802-3346 - 1/1
C - C	1	ND-0802-1318 - 1/1
C - C	232	ND-0802-2742 - 1/1
C - C	233	ND-0802-2743 - 1/1
C - C	199	ND-0802-2300 - 1/1
C - C	234	ND-0802-2752 - 1/1
C - C	210	ND-0802-2530 - 1/1
C - C	193	ND-0802-2211 - 1/1
D - D	160	ND-0803-2229 - 1/1
D - D	166	ND-0803-2301 - 1/1
D - D	161	ND-0803-2244 - 1/1
D - D	167	ND-0803-351 - 1/1
D - D	157	ND-0803-1433 - 1/1
D - D	132	ND-0803-102 - 1/1
D - D	134	ND-0803-116 - 1/1
D - D	135	ND-0803-116 - 1/1
D - D	138	ND-0803-112 - 3/4
D - D	139	ND-0803-112 - 4/4
D - D	141	ND-0803-1362 - 1/1
D - D	140	ND-0803-1362 - 1/1
D - D	150	ND-0803-1402 - 1/1
D - D	151	ND-0803-1403 - 1/1
D - D	155	ND-0803-1416 - 1/1
D - D	133	ND-0803-1072 - 1/1
D - D	153	ND-0803-1412 - 1/1
D - D	164	ND-0803-2268 - 1/1
D - D	162	ND-0803-2264 - 1/1
E - E	187	ND-0901-2086 - 1/1
E - E	254	NR-0901-251 - 1/2
E - E	255	NR-0901-251 - 2/2
E - E	239	ND-0901-612 - 1/1
E - E	210	ND-0901-2530 - 1/1
E - E	247	ND-0901-851 - 1/1
E - E	234	ND-0901-2752 - 1/1
E - E	199	ND-0901-2300 - 1/1
E - E	232	ND-0901-2742 - 1/1
E - E	233	ND-0901-2743 - 1/1
E - E	38	ND-0802-3509 - 1/1
E - E	44	ND-0802-3539 - 1/1
E - E	79	ND-0802-4032 - 1/1
E - E	110	ND-0802-634 - 1/1
E - E	59	ND-0802-389 - 1/1
F - F	259	VPC-0802-6 - 1/1
F - F	87	ND-0802-420 - 1/1
F - F	258	VPC-0802-5 - 1/1
F - F	77	ND-0802-4005 - 1/1
F - F	50	ND-0802-3749 - 1/1
F - F	51	ND-0802-3750 - 1/1
F - F	52	ND-0802-3751 - 1/1
F - F	120	ND-0802-793 - 1/1
F - F	40	ND-0802-3538 - 1/1
F - F	56	ND-0802-3792 - 1/1
F - F	41	ND-0802-3539 - 1/1
F - F	24	ND-0802-3334 - 1/2
F - F	25	ND-0802-3334 - 2/2
F - F	103	ND-0802-571 - 1/1
F - F	125	ND-0802-807 - 1/1
F - F	21	ND-0802-3312 - 1/1
F - F	100	ND-0802-564 - 1/1

UBICACIÓN GENREAL

SIMBOLOGÍA

- Límite Costero
- Límite Internacional
- Límite Regional
- Ciudades y Pueblos
- Cuenca Río Itata
- Red Hidrográfica

Fallas Geológicas Cuenca Biobío

- Falla
- Falla Cubierta
- Falla Invertida
- Falla Inferida o Lineamiento Geológico

Estatigrafía

- Pozos utilizados en Confección de Perfiles Estratigráficos
- Punto Inicio / Fin Perfiles
- Perfiles Estratigráficos Bio-Bío

Unidades Geológicas

Cenozoico

Cuaternario

- Q1 — Depósitos fluvio-aluviales; Sedimentos de valles actuales
- Q1fa — Depósitos Fluvio-Aluviales
- Q1t — Sedimentos de terrazas fluviales; Gravas, arenas y sedimentos finos
- Hcrl — Depósitos del cono fluvial del Río Laja; Arenas basálticas
- PlHca — Sedimentos Glacio-lacustres; Arcillolitas, arenas y conglomerados
- PlHlm — Formación La Montaña; Sedimentos morrénicos y glaci-lacustres
- Q3av — Depósitos de avalancha volcánica; Asociados a colapso parcial de edificios volcánicos
- Q3i — Estratovolcanes y complejos volcánicos; Lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos
- Pl3t — Depósitos piroclásticos; Principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso
- PPl3 — Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados; Lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas yconglomerados
- PPlim — Formación Malleco; Brechas, tobas, lavas andesítico-basálticas y flujos piroclásticos
- Mlh — Lavas de Huelehueico; Secuencia de lavas andesíticas piroxenas a basálticas
- Ah — Alteración hidrotermal
- Gl — Glaciares

Neógeno

- Msm — Formación Mitruquén; Conglomerados, ignimbritas y lavas andesíticas
- Mtt — Formación Trapa-Trapa; Aglomerados volcánicos, lavas andesíticas y conglomerados
- OM2c — Secuencias volcanosedimentarias; Lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas a piroclásticas
- Ec — Formación Curanilahue; Areniscas y arcillas con mantos de carbón
- PPlab — Intrusivos Orientales; Andesita-basalto
- Prm — Intrusivos hipabisales del río Renalco y Cerro Mocho; Diques, filones-mantos y cuerpos intrusivos irregulares de andesita, basaltos y gabros
- Mr — Stocks de riodacitas; Cuerpos y filones riodacíticos de color blanco-amarillento
- Mg — Intrusivos Miocénicos; Granodioritas, dioritas y tonalitas
- Tm — Grupo plutónico Melipeuco; Tonalitas y granodioritas
- Tl — Stock Lolco; Monzogranitos y sienogranitos de color rosado, sin inclusiones

Paleógeno

- KTvc — Complejo Vizcacha-Cumilao; Lavas andesíticas macizas y subordinadamente basálticas

Cretásico

- Kiag — Intrusivos Cretácicos; Dioritas, Monzodioritas, Granodioritas y Monzogranitos indiferenciados
- JKl — Grupo plutónico Gualletué; Monzogranitos, dioritas cuarcíferas y tonalitas

Mesozoico

Jurásico

- JKpch — Estratos de Polcura-Cholguan; Sedimentitas clásticas continentales con intercalaciones volcánicas
- Jnb — Formación Nacientes del Biobío; Rocas sedimentarias clásticas, carbonatadas y lavas basálticas marinas y lavas continentales

Triásico

- Pz-Trfri — Estratos de Huinucal Ivante; Metasedimentitas foliadas, lutitas y metareniscas
- Trsj — Formación Santa Juana; Secuencias continentales y marina, lutitas, areniscas, lavas y brechas andesíticas

Paleozoico

Silúrico-Devónico-Carbonífero

- DC4 — Metareniscas y filitas. Devónico-Carbonífero; Metareniscas, filitas, marmoles, cherts, metabasaltos, metaconglomerados y metaturbiditas
- Pz4a — Serie Occidental; Micaesquistos y metacherts
- Pz4b — Serie Oriental; Basamento metamórfico, Pizarras, filitas y metareniscas
- CPg — Intrusivos Carboníferos-Pérmicos; Tonalitas y granodioritas indiferenciadas

0 5 10 20 Km

Datos Cartográficos y Geodésicos:
Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM)
Huso 19 Sur

Sistema de Referencia Geodésico: WGS-84

Nota: Trazado de límites aproximado.

REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

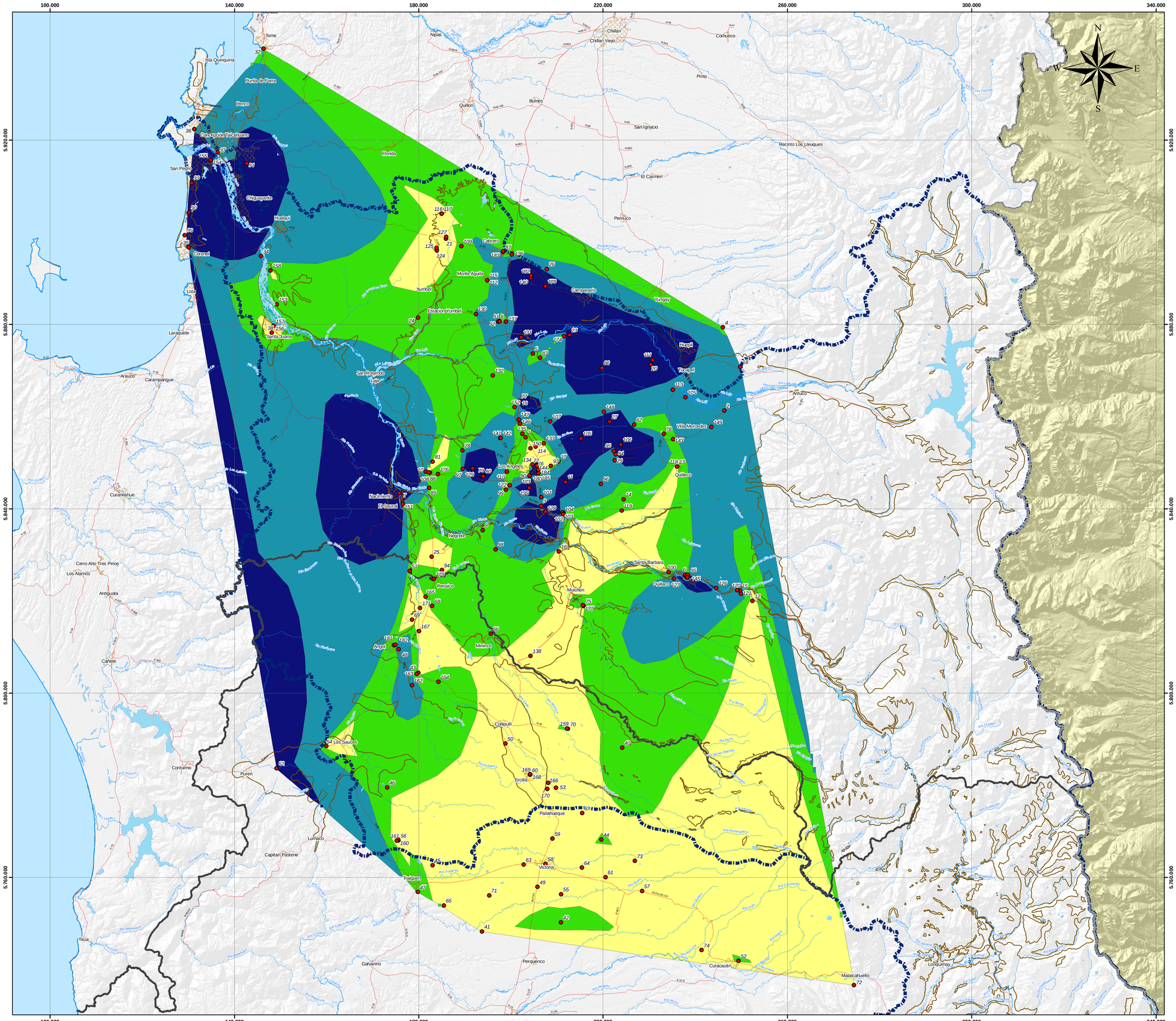
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

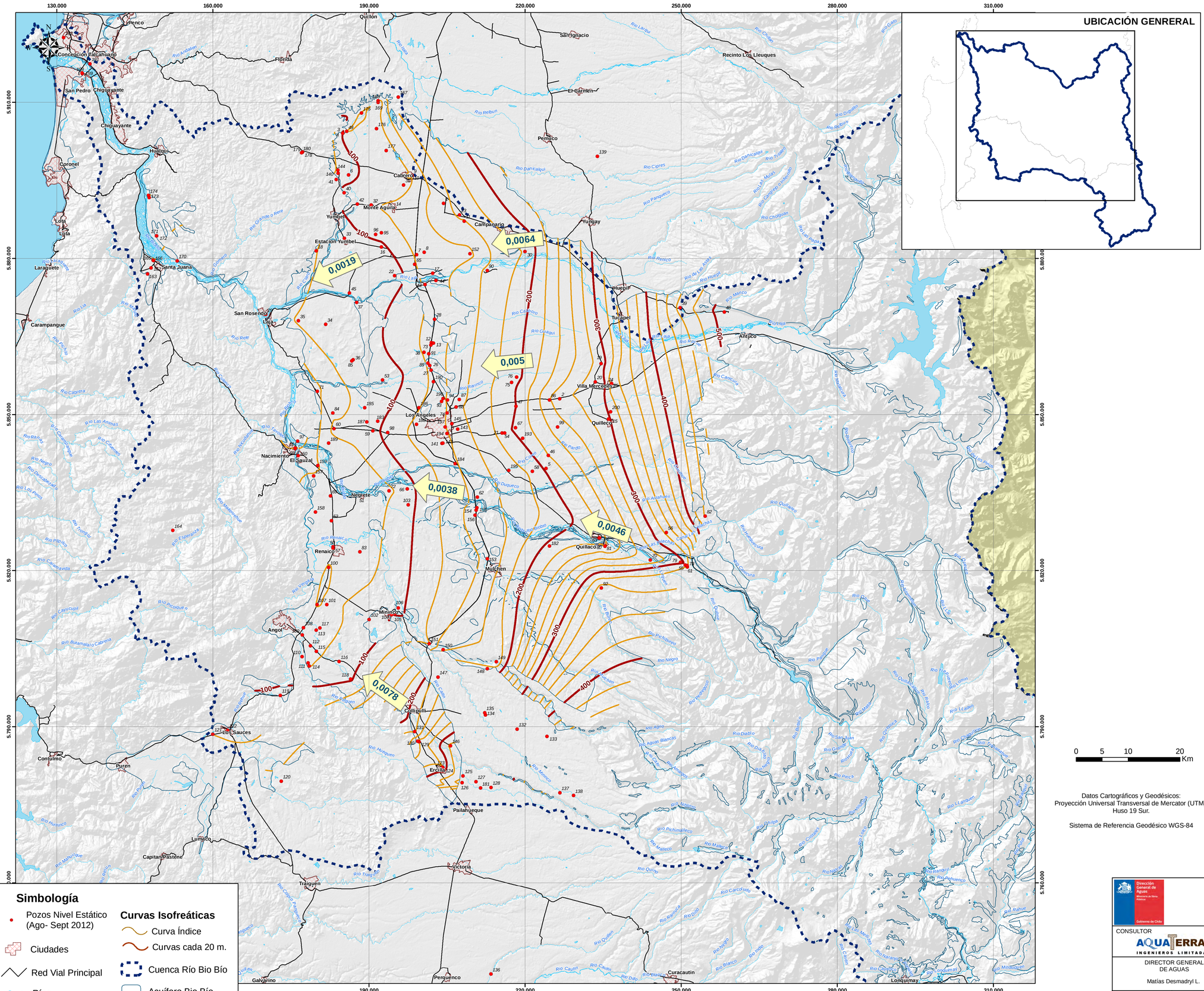
CONSULTOR: AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA

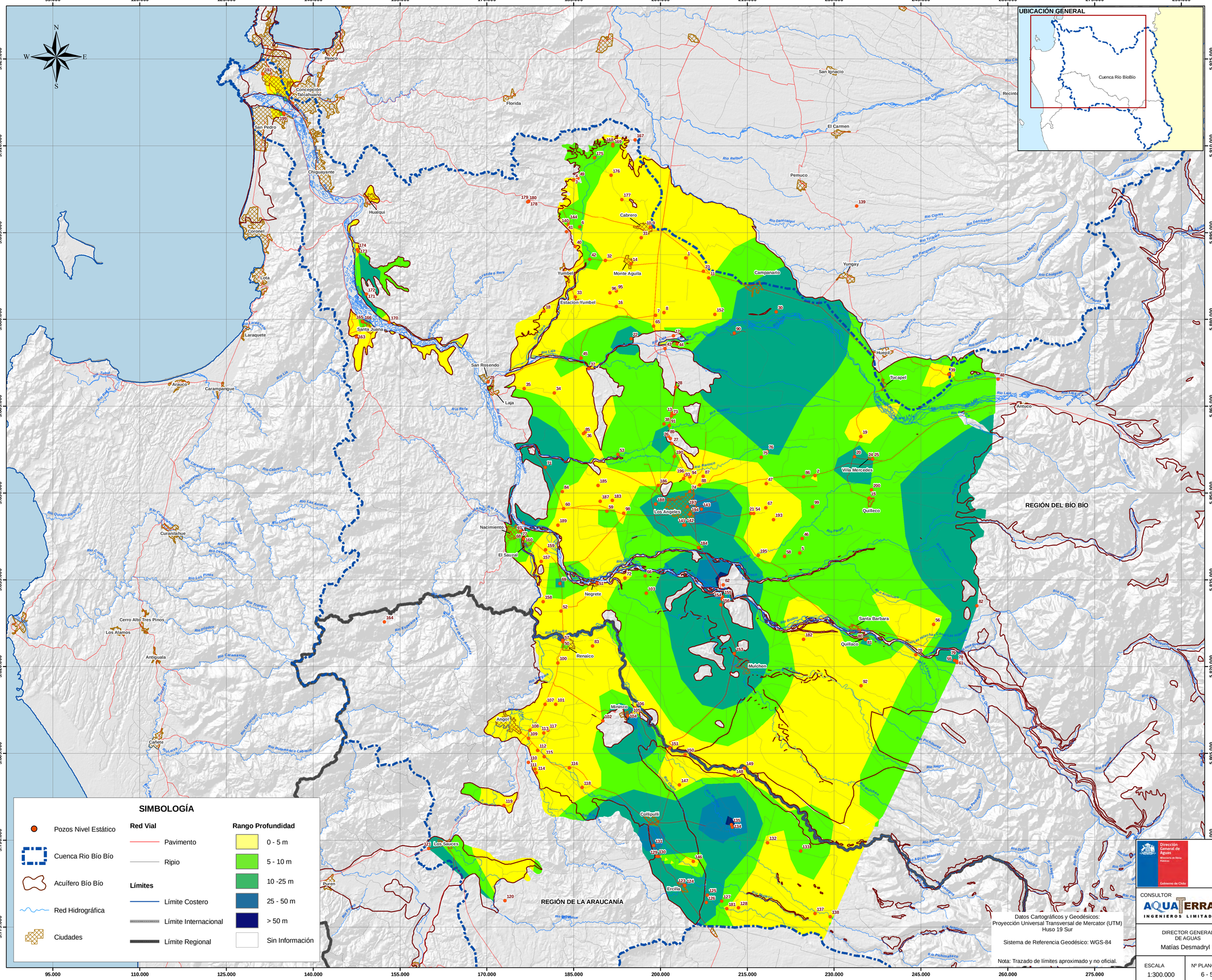
PROYECTO: ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA BIO BÍO

DIRECTOR GENERAL DE AGUAS	JEFE DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN	INSPECCIÓN FISCAL
Matías Desmadryl L.	Adrián Lillo	Miguel Ángel Caro

ESCALA	PLANO	FECHA	TÍTULO
1:450.000	6 - 2	DICIEMBRE 2012	Geología Cuenca Río Bio-Bío Trazado Perfiles Estratigráficos


100.000
140.000
180.000
220.000
260.000
300.000
340.000
5.920.000
5.880.000
5.840.000
5.800.000
5.760.000
N
S
E
W
Tome
Isla Quiriquina
Punta de Parra
Puerto
Concepción Talcahuano
San Pedro
Chiguayante
Hualqui
Coronel
Lota
Laraquete
Arauco
Carampangue
Curanilahue
Cerro Alto Tres Pinos
Los Alamos
Antiquala
Cañete
Contulmo
Puren
Lumaco
Capitan Pastene
Traiguen
Tirua
Galvarino
Perquenco
Lonquimay
Malalcahuello
Nipas
Chillan
Chillan Viejo
Coihueco
Pinto
Quillon
Bulnes
San Ignacio
Recinto Los Lleuques
El Carmen
Pemuco
Florida
Yumbel
Estacion Yumbel
Monte Aguila
Cabrero
Yungay
Campanario
San Rosendo
Laja
Santa Juana
Los Angeles
Nacimiento
El Sauzal
Negrete
Rinconada
Mulchen
Santa Barbara
Quilleco
Angol
Renaico
Collipulli
Los Sauces
Ercilla
Pailahueque
Victoria
Curacautin
Vilcun
Temuco
Padre Las Casas
Labranza
Freire
Pitrufquen
Gorbea
Loncoche
Villarrica
Pucon
Curarrehue
Panguipulli
Lanco
Mafil
Los Lagos
Valdivia
Corral
Mariquina
Paillaco
La Union
Rio Bueno
Osorno
Puerto Octay
Purranque
Puerto Varas
Llanquihue
Frutillar
Fresia
Los Muermos
Calbuco
Maullin
Ancud
Castro
Chonchi
Dalcahue
Quemchi
Quellon
Chaiten
Futaleufu
Palena
Hualaihue
Puerto Montt
Puerto Natales
Rio Bio-Bio
Rio Laja
Rio Duqueco
Rio Lebu
Rio Tucapel
Rio Vergara
Rio Quino
Rio Huequecura
Rio Renaico
Rio Malleco
Rio Cautin
Rio Quepe
Rio Imperial
Rio Toltén
Rio Allipen
Rio Pillanleufu
Rio Cruces
Rio Calle Calle
Rio Valdivia
Rio Bueno
Rio Rahue
Rio Pilmaiquen
Rio Maullin
Rio Petrohue
Rio Puelo
Rio Futaleufu
Rio Yelcho
Rio Palena
Rio Corcovado
Rio Negro
Rio Chaiten
Rio Blanco
Rio Pescado
Rio Cisnes
Rio Aysen
Rio Baker
Rio Pascua
Rio Tranquilo
Rio Ibanez
Rio Simpson
Rio Coyhaique
Rio Mañihuales
Rio Claro
Rio Ñuble
Rio Diguillin
Rio Chillan
Rio Itata
Rio Cato
Rio Perquilauquen
Rio Longavi
Rio Achibueno
Rio Lontue
Rio Teno
Rio Claro
Rio Mataquito
Rio Lontue
Rio Maule
Rio Loncomilla
Rio Melado
Rio Huenchullami
Rio Claro
Rio Lircay
Rio Guaiquillo
Rio Piduco
Rio Tinguiririca
Rio Cachapoal
Rio Rapel
Rio Maipo
Rio Mapocho
Rio Colorado
Rio Volcan
Rio Yeso
Rio Olivar
Rio Angostura
Rio Claro
Rio Cachapoal
Rio Tinguiririca


UBICACIÓN GENRERAL
0,0064
0,0019
0,005
0,0038
0,0046
0,0078
100
200
300
400
500
Concepción Talcahuano
Penco
Quillón
Florida
Santa Juana
Laraquete
Coronel
Lota
Carampangue
Arauco
Curanilahue
Los Alamos
Cañete
Contulmo
Purén
Lumaco
Capitán Pastene
Traiguén
Galvarino
Angol
Renaico
Nacimiento
Los Angeles
Mulchén
Negrete
El Sauzal
Monte Aguila
Cabrero
Yumbel
Estación Yumbel
San Rosendo
Laja
Los Sauces
Collipulli
Ercilla
Victoria
Pailahueque
Perquenco
Curacautin
Lonquimay
Villa Mercedes
Quilleco
Quillaco
Huepil
Tucapel
Antuco
Yungay
Campanario
Pemuco
El Carmen
Recinto Los Lleuques
Santa Ignacio
San Pedro
Chiguayante
Hualqui
Cabrero
Río Biobío
Río Laja
Río Duqueco
Río Renaico
Río Quino
Río Reinaco
Río Bureo
Río Malleco
Río Vergara
Río Renaico
Río Quillaco
Río Polcura
Río Huequi
Río Lonquimay
Río Curacautín
Río Cautín
Río Quillén
Río Quino
Río Carcolhue
Río Pichilleo
Río Malleco
Río Quino
Río Renaico
Río Dillo
Río Quillén
Río Blanco
Río Indo
Río Cautín
Río Dillo
Río Blanco
Río Lonquimay
Río Mininquen
Río Rahue
Río Pehuenco
Río Huanqui
Río Carcolhue
Río Quino
Río Malleco
Río Pichilleo
Río Lumaco
Río Huanaco
Río Huequi
Río Agrio
Río Aguas Blancas
Río Diablo
Río Queuco
Río Blanco
Río Trapa Trapa
Río Trapa


95.000
110.000
125.000
140.000
155.000
170.000
185.000
200.000
215.000
230.000
245.000
260.000
275.000
290.000
5.925.000
5.910.000
5.895.000
5.880.000
5.865.000
5.850.000
5.835.000
5.820.000
5.805.000
5.790.000
5.775.000
N
S
W
E
UBICACIÓN GENERAL
Cuenca Río BíoBío
Pinto
Concepción
Talcahuano
San Pedro
Chiguayante
Florida
San Ignacio
El Carmen
Pemuco
Yungay
Hualqui
Coronel
Lota
Laraquete
Santa Juana
Yumbel
Monte Aguila
Estacion Yumbel
Cabrero
Campanario
Huepil
Tucapel
Antuco
San Rosendo
Laja
Arauco
Carampangue
Villa Mercedes
Los Angeles
Quilleco
Nacimiento
El Sauzal
Negrete
Santa Barbara
Quillaco
Mulchen
Renaico
Mininco
Angol
Collipulli
Ercilla
Los Sauces
Puren
Curanilahue
Cerro Alto Tres Pinos
Los Alamos
Antiquala
Cañete
REGIÓN DEL BÍO BÍO
REGIÓN DE LA ARAUCANÍA
Río Bío Bío
Río Laja
Río Duqueco
Río Polcura
Río Rere
Río Lebu
Río Tabul
Río Carampangue
Río Cholguan
Río Quillaileo
Río Quepe
Río Quiapo
Río Vergara
Río Cayucupil
Río Cautin
Río Quino
Río Huequecura
Río Malleco
Río Quillem
Río Quepuca Negro
Río Quepuca Blanco
Río Pichilleuque
Río Pichilleuque Norte
Río Pichilleuque Sur
Río Pangue
Río Negro
Río Pangueco
Río Polcura
Río Huepil
Río Las Lajas
Río Las Lajas Norte
Río Las Lajas Sur
Río Huepil
Río Duqueco
Río Polcura