



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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXOS**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

### **Ministro de Obras Públicas**

Sr. Juan Carlos García Pérez de Arce, Arquitecto

### **Director General de Aguas**

Sr. Rodrigo Sanhueza Bravo, Ingeniero Civil

### **Jefe (S) División de Estudios y Planificación**

Sra. Andrea Osses Vargas, Ingeniera Civil

### **Inspector Fiscal**

Sra. Andrea Osses Vargas, Ingeniera Civil

### **Inspectores Fiscales Subrogantes**

Sr. Oscar López Arenas, Ingeniero Civil

Sr. Ignacio Cofré Henríquez, Ingeniero Civil

### **Consultora**

#### **Jefe de Proyecto**

Sr. Claudio Reyes Hurtado, Ingeniero Forestal

#### **Especialistas y Profesionales**

Sr. Eugenio Celedón Cariola, Ingeniero Civil

Sr. Eugenio Celedón Correa, Ingeniero Civil

Sr. Alejandro Rodríguez Lazcano, Ingeniero Civil

Sra. Vanessa Mancisidor Univaso, Periodista

Sr. Víctor Gómez Coa, Geógrafo

Sra. Karina Aguilera Casanueva, Bióloga MSc

Sra. Virginia Carter Gamberini, Geógrafa PhD

Sr. Marcial Valenzuela Celis, Ingeniero Forestal

Sr. Diego Carpentier Nazal, Ingeniero Civil

Sr. Diego Niklitschek Flores, Ingeniero Civil

Sr. Sebastián Carvajal Marambio, Geólogo

Sra. Dominique Coumerme González, Ingeniera Civil

Sr. Carlos Gasca Guíñez, Geógrafo

Sr. Sebastián Núñez Labrín, Ingeniero Civil

Sr. Cristián Jordán Díaz, Ingeniero Forestal PhD

Sra. Carolina Varas Valiente, Relacionadora Pública

Sr. Simón France Lanás, Sociólogo





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO A ABREVIATURAS**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



<b>SIGLA</b>	<b>Referencia completa</b>
<b>AFC</b>	Agricultura Familiar Campesina
<b>AGRIMED</b>	Centro de Agricultura y Medio Ambiente
<b>AGROMET</b>	Red Agroclimática Nacional
<b>APR</b>	Agua potable Rural
<b>APU</b>	Agua Potable Urbana
<b>AQT</b>	Aquaterra
<b>ASICENT</b>	Asociación de Industriales del Centro
<b>BNA</b>	Banco Nacional del Agua
<b>CA</b>	Código de Aguas
<b>CAS</b>	Comunidades de Aguas Subterráneas
<b>CCD</b>	Con Contacto Directo
<b>CIREN</b>	Centro de Información de Recursos Naturales
<b>CITRA</b>	Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología
<b>CNR</b>	Comisión Nacional de Riego
<b>CO2</b>	Dióxido de Carbono
<b>CODEFF</b>	Comité Nacional Pro-Defensa de la Flora y Fauna
<b>CODELCO</b>	Corporación Nacional del Cobre
<b>CONAF</b>	Corporación Nacional Forestal
<b>COOP</b>	Cooperativa
<b>CORFO</b>	Corporación de Fomento de la Producción
<b>CPA</b>	Catastro Público de Aguas
<b>CR2</b>	Center for Climate and Resilience Research
<b>DAA</b>	Derechos de Aprovechamiento de Aguas
<b>DARH</b>	Departamento de Administración de Recursos Hídricos
<b>DB</b>	Demanda bruta
<b>DB</b>	Demanda Bruta de riego
<b>DGA</b>	Dirección General de Aguas
<b>DH</b>	Demanda hídrica
<b>DIA</b>	Declaraciones de Impacto Ambiental
<b>DN</b>	Demanda neta
<b>DOH</b>	Dirección de Obras Hidráulicas
<b>Dw</b>	Capacidad de agua en zona profunda
<b>EIA</b>	Estudios de Impacto Ambiental
<b>ERCB</b>	Energy Resource Conservation Board
<b>ERNC</b>	Energías Renovables no Convencionales
<b>ET</b>	Evapotranspiración anual
<b>ETO</b>	Evapotranspiración de referencia
<b>Etc</b>	Evapotranspiración de cultivo
<b>f</b>	Fracción de cobertura forestal / Coeficiente de preferencia de dirección de flujo

<b>SIGLA</b>	<b>Referencia completa</b>
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization
<b>FNDR</b>	Fondo Nacional de Desarrollo Regional
<b>GIRH</b>	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
<b>GORE</b>	Gobierno Regional
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>IEB</b>	Instituto de Ecología y Biodiversidad
<b>INE</b>	Instituto Nacional de Estadísticas
<b>IPCC</b>	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
<b>JDV</b>	Junta de Vigilancia
<b>Kc</b>	Coeficiente de cultivo
<b>Kd</b>	Conductividad de la zona profunda
<b>Ks</b>	Conductividad de la zona de raíces
<b>MBN</b>	Ministerio de Bienes Nacionales
<b>MCG</b>	Modelo de Circulación General
<b>MMA</b>	Ministerio del Medio Ambiente
<b>MOP</b>	Ministerio de Obras Públicas
<b>NMP</b>	Número más Probable
<b>NO</b>	<b>Noroeste</b>
<b>OCDE</b>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
<b>ODEPA</b>	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias
<b>OMM</b>	Organización Mundial de Meteorología
<b>OUAs</b>	Organizaciones de Usuarios del Agua
<b>P</b>	Precipitación media anual
<b>pH</b>	Potencial de Hidrógeno
<b>PIB</b>	Producto Interno Bruto
<b>Pp</b>	Precipitación
<b>PRI</b>	Plan Regulador Intercomunal
<b>PRICOST</b>	Plan Regulador Intercomunal Costero
<b>Q</b>	Caudal
<b>RAPP</b>	Red de Áreas Protegidas Privadas
<b>RCA</b>	Resolución de Calificación Ambiental
<b>RETC</b>	Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes
<b>RN</b>	Reserva Nacional
<b>RRF</b>	Factor de Resistencia a la Escorrentía
<b>SAG</b>	Servicio Agrícola y Ganadero
<b>SCD</b>	Sin Contacto Directo
<b>SEA</b>	Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental
<b>SEIA</b>	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
<b>SERNAGEOMIN</b>	Servicio Nacional de Geología y Minería

<b>SIGLA</b>	<b>Referencia completa</b>
<b>SERNATUR</b>	Servicio Nacional de Turismo
<b>SH</b>	Seguridad Hídrica
<b>SHAC</b>	Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común
<b>SIFAC</b>	Sistema Informático de Facturación y Contabilidad
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica
<b>SINIA</b>	Sistema Nacional de Información Ambiental
<b>SISS</b>	Superintendencia de Servicios Sanitarios
<b>SIMEF</b>	Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos de Chile
<b>SMA</b>	Superintendencia del Medio Ambiente
<b>SNAP</b>	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
<b>SNASPE</b>	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado
<b>SNIA</b>	Sistema Nacional de Información del Agua
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission
<b>SSR</b>	Servicio Sanitario Rural
<b>SUBDERE</b>	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo
<b>Sw</b>	Capacidad de agua en zona de raíces
<b>UNDRR</b>	Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres
<b>UTM</b>	Unidad Tributaria Mensual
<b>VMF</b>	Visual Modflow Flez 6.1
<b>WEAP</b>	Water Evaluation and Planning System
<b>WWF</b>	Worldwide Fund for Nature
<b>ZOITs</b>	Zonas de Interés Turístico
<b>ZR</b>	Zona de Riego





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO B REFERENCIAS**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

# Índice General

1. Artículos, Informes y Estudios Técnicos .....	4
2. Catastros y Bases de datos .....	8
3. Presentaciones .....	9
4. Normativa .....	10



---

## 1. Artículos, Informes y Estudios Técnicos

- 4C Consultores en Ingeniería Civil Ltda. (2020). Estudio Hidrológico Localidad de Tomé.
- Aldunce, P., & Gonzalez, M. (2009). Desastres asociados al clima en la agricultura y medio rural en Chile. Santiago de Chile: Fundación para la Innovación Agraria, FIA Ministerio de Agricultura.
- Alegría Calvo, M. A. (2013). Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y Región del Bío-Bío.
- Asociación Internacional de Participación Pública – IAP2 (2019). Spectrum of Public Participation
- Baldwin, D.J.B., Weaver, K., Schneckenger, F. y Perera, A.J. (2004): "Sensitivity of landscape indices to input data characteristics on real landscapes: implications for their use in natural disturbance emulation", *Landscape Ecology*, 19, 3, pp. 255-271
- Börgel (1983). Geografía de Chile, Tomo II: Geomorfología. Instituto Geográfico Militar.
- Brown, R. H. et al. (1963). Estimating the transmissibility of an artesian aquifer from the specific capacity of a well, en *Methods of Determining Permeability, Transmissibility, and Drawdown*. United States Geological Survey Water Supply Paper 1536-1 (1963), p. 336-338.
- BRS, 2011. La lectoescritura inicial en América Latina y el Caribe: mapeo y análisis de actores clave. United States Agency for International Development, USAID.
- CEDEUS-DGA (2020). Implementation of SDG Indicator 6.3.2 en Chile: Proportion of Bodies of Water with Good Ambient Water Quality. CEDEUS Technical Report, Santiago, Chile.
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.
- Centro de Información de los Recursos Naturales, CIREN (1999). Materiales y Símbolos, Estudio Agrológico VIII Región. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).
- Centro de Información de los Recursos Naturales, CIREN (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. (Pub. CIREN N°139)
- Centro de Información de los Recursos Naturales, CIREN (2012). Diagnóstico de la Desertificación en Chile y sus efectos en el Desarrollo Sustentable. Documento técnico desarrollado como parte de la Consultoría "Alineación de los contenidos del actual Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación, con los de la Estrategia Decenal de la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD)
- Centro de Información de los Recursos Naturales, CIREN (2019). Sistema de información territorial Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).
- Corporación Nacional Forestal, CONAF (2016) Actualización a escala nacional de los mapas de Desertificación, Degradación de las Tierras y Sequía (DDTS) de Chile. Nota informativa 05. ENCCRV
- Coduto, D. (1999). *Geotechnical Engineering: Principles and Practice*. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, Nueva Jersey.
- Comisión Económica para América Latina y El Caribe, CEPAL (2014). Manual para la Evaluación de Desastres.

- 
- Comisión Nacional de Riego, CNR (2015). Manual Técnico de presentación de proyectos de obras de tecnificación de riego, Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile.
  - Comisión Nacional de Riego (2017). Diagnóstico para Desarrollar Plan de Riego en Cuenca del Biobío. Comisión Nacional de Riego, CNR. Everis Chile S.A. e Infraestructura y Ecología S.A
  - Common International Classification of Ecosystem Services, CICES (2018). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES( V5.1. Guidance on the Application of the Revised Structure.
  - Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). Hidrología subterránea (corr.). Barcelona: Ed. Omega.
  - Dirección General de Aguas, DGA (1986). Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000. Disponible en <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/24243>.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2003). Diagnóstico Actual del Riego y Drenaje en Chile y su Proyección. Diagnóstico del Riego y Drenaje en la VIII Región. Comisión Nacional de Riego CNR. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. y Ac Ingenieros Consultores Ltda.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Andalién. Dirección General de Aguas.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2010). Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía. Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación
  - Dirección General de Aguas, DGA (2013). Levantamiento Hidrogeológico en Cuencas Pluviales Costeras en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región del Bío-Bío. Dirección General de Aguas. Aqualogy Medioambiente Chile S.A.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2014). Levantamiento Hidrogeológico en Cuencas Pluviales Costeras en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, del Maule y del Bío-Bío, Etapa 2. Dirección General de Aguas. Aqualogy Medioambiente Chile S.A.
  - Dirección General de Aguas, DGA DARH (2014). Estimación Preliminar de las Recargas de agua subterránea y Determinación de Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común en las Cuencas de las regiones de Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2016). Actualización Informe Evaluación de los Recursos Hídricos superficiales de la cuenca del Río Maule Región del Maule.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2017a). Actualización del Balance Hídrico Nacional/ Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Realizado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2017b) Estimación de la demanda actual y futura, y proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, DEP, SIT 419, Santiago, Chile, 2017.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2018). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro. Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.
-

- 
- Dirección General de Aguas, DGA DCPRH (2019). Diagnóstico de la Calidad de las Aguas Subterráneas de las Regiones de Ñuble y del Biobío, Dirección General de Aguas. Informe Técnico SDT N°418
  - Dirección General de Aguas, DGA (2019a). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Austral. Universidad de Chile.
  - Dirección General de Aguas, DGA (2020). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca del Maule.
  - Dirección de Obras Hidráulicas, DOH (2019). Manual de proyectos de agua potable rural, versión 2019. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas.
  - Dirección Meteorológica de Chile, DMC (2019). Boletín Eventos Extremos.
  - ESSBIO 2018. Actualización de planes de desarrollo localidades de: Concepción, Dichato, Rafael, Talcahuano, Penco-Lirquén, Chiguayante, Florida, Hualqui, Coelemu, Tomé.
  - ESSBIO (2021). Memoria Anual. Comisión para el Mercado Financiero. Información de Fiscalizados y otras instituciones registradas.
  - ESSBIO (2022a). Registros del Sistema de Facturación Clientes Regulados, Clientes no regulados (52 BIS) y Coberturas (SIFAC II). [Revisado Febrero 2022]
  - ESSBIO (2022b). Archivos digitales de captación, PTAP, derechos de agua [Revisado Febrero 2022]
  - ESSBIO (2022c). Producción de agua de las fuentes, formulario PR018001. [Revisado Febrero 2022]
  - FAO, 2006. Publicación FAO, boletín 56 para la determinación de las necesidades de riego: Coeficiente de cultivo por grupo de cultivo
  - Fernández, B., & Gironás, J. (2021). Droughts. In B. Fernández & J. Gironás (Eds.), *Water Resources of Chile* (pp. 173-187). Cham: Springer International Publishing.
  - Fundación Chile (2018). Radiografía del Agua. Brecha y Riesgo Hídrico en Chile. Resumen Estratégico.
  - Gajardo (1994). La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica
  - Gálvez, N., Infante, J., Fernández, A., Díaz, J. y Petracca, L. (2021). Land use intensification coupled with free-roaming dogs as potential defaunation drivers of mesocarnivores in agricultural landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 2021;00:1–13. DOI: 10.1111/1365-2664.14026
  - Haltenhoff, F.E. (2021). Río Andalién y descontrol territorial: Sequías, inundaciones, incendios y rellenos sanitarios. DIARIO DIGITAL RESUMEN.
  - Hossain, S.; Hewa, G.A.; Wella-Hewage, S. A. (2019). Comparison of Continuous and Event-Based Rainfall–Runoff (RR) Modelling Using EPA-SWMM. *Water* 2019, 11, 611. <https://doi.org/10.3390/w11030611>
  - Hunink, J. et al. (2017). Hydrological Modelling using Satellite-Based Crop Coefficients: A Comparison of Methods at the Basin Scale. *Remote Sensing*. 9. 174. 10.3390/rs9020174.
  - Inversiones GNL Talcahuano SpA (2016). Caracterización ecológica de humedales de la zona semiárida en Chile Central. Inversiones GNL Talcahuano Spa.
  - Inversiones León Zavala Ltda. (2021). Declaración de Impacto Ambiental (DIA) Extracción y Procesamiento de Áridos Cantera El Pellín, Penco.

- 
- Ke, K.-C.; Huang, M.-S. (2020) Quality Prediction for Injection Molding by Using a Multilayer Perceptron Neural Network. *Polymers* **2020**, *12*, 1812. <https://doi.org/10.3390/polym12081812>
  - Kun-Cheng, K.; y Ming-Shyan, H. (2020). Quality Prediction for Injection Molding by Using a Multilayer Perceptron Neural Network. *Polymers* *12*, 1812.
  - Lübert y Pliscoff (2017). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile
  - Mateucci, S. D. y M. Silva (2005): "Selección de métricas de configuración espacial para la regionalización de un territorio antropizado", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 180-202. ISSN: 1578-5157
  - McFarland, M. L., & Dozier, M. C. (2004). Problemas del agua potable: El hierro y el manganeso. Cooperative de Texas Extensión, El Sistema Universitario Texas A & M.
  - Ministerio de Medio Ambiente, MMA (2010a). Ficha técnica sitios priorizados región del Biobío: Fundo Nonguén.
  - Ministerio de Medio Ambiente, MMA (2010b). Registro Nacional de Áreas Protegidas. Gef-SRAPP 2010/RAPP
  - Ministerio de Medio Ambiente, MMA (2016). Clasificación de ecosistemas marinos chilenos de la zona económica exclusiva. Rovira, J y J. Herreros.
  - Ministerio de Medio Ambiente, MMA (2020). Tercer Informe de Estado del Medioambiente
  - Ministerio de Medio Ambiente -MMA, MINAGRI y CONAF(2021). Plan Nacional de Restauración de Paisajes 2021-2030.
  - Ministerio de Obras Públicas, MOP (2013). Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Obra de Regulación y Retención de Sedimentos en Río Andalién, Región del Biobío. CONAMA.
  - Ministerio de Obras Públicas, MOP (2018). Guía para la Gestión de la Participación Ciudadana
  - Muñoz-Cristi (1956). Chile 1956 Sociedad América de Geología
  - Núñez, T. y Yajure, J.A. (2022). Parcelaciones de terreno: un fenómeno al alza que amenaza los ecosistemas rurales del sur de Chile. <https://laderasur.com/articulo/parcelaciones-de-terreno-un-fenomeno-al-alza-que-amenaza-los-ecosistemas-rurales-del-sur-de-chile/>
  - Osorio, M. y N. Oyarce (2010). Análisis socioeconómico de la desertificación en la Región de Coquimbo. *RIAT Revista Interamericana de Ambiente Y Turismo*. Volumen 6, Número 1, pp 45-52.
  - Peña, E.; Pauchard, A. ; Hidalgo, M.; SanMartín, M. y A. Maturana (2004). Evidencias de invasión de especies arbóreas exóticas en Chile. Segundo Congreso Chileno de Ciencias Forestales. Valdivia. noviembre de 2004. 11 p.
  - Pliscoff, P. (2020). Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres, asociados a dos cuencas en Chile Central: Maipo y Maule. Estudio realizado para Escenarios Hídricos 20230.
  - Raddatz, D. (2011). Efecto del Cambio climático en la Seguridad hidrológica de Obras Hidráulicas. Análisis en Cuencas Pluviales de la Zona Central de Chile para el Escenario. Universidad de Chile.
  - Salvatierra, C. (2008). Determinación de la incertidumbre en la aplicación del modelo de simulación hidrológica GR4J, en cuencas pluviales no controladas en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
  - Sernageomin. (2003). Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería.
-

- 
- Stolpe (2011). Suelos de la VIII Región de Chile 2011 Neal B. Stolpe. Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción.
  - Tischendorf, L. (2001): "Can landscape indices predict ecological processes consistently?", *Landscape Ecology*, 16, 3, pp. 235-254
  - U.S. Environmental Protection Agency (1984). Health Effects Assessment for Iron (and compounds). EPA-540-1-86-054.
  - U.S. Environmental Protection Agency (2004). Drinking Water Health Advisory for Manganese. EPA-822-R-04-003.
  - Villagrán-Mella et al. (2006). Relación entre características del hábitat y estructura del ensamble de insectos en humedales palustres urbanos del centro-sur de Chile. Villagrán-Mella, R., Aguayo, M., Parra, L., y A. González Villagrán-Mella et al. Villagrán-Mella, R., Aguayo, M., Parra, L., y A. González.
  - Wilson AM, Jetz W (2016). Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. <https://doi:10.1371/journal.pbio.1002415>.
  - Wu, J. (2004): "Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations", *Landscape Ecology*, 19, 2, pp. 125-138.
  - Wu, J., She, W., Sun, W. y Tueller, P.T. (2002): "Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics", *Landscape Ecology*, 17, 8, pp. 761-782.
  - Zambrano-Bigiarini (2019). "Sequía y escasez hídrica en Chile: parecidas, pero no iguales". columna de opinion revisada en <https://www.cr2.cl/sequia-y-escasez-hidrica-en-chile-parecidas-pero-no-iguales-por-mauricio-zambrano-bigiarini/>

## 2. Catastros y Bases de datos

- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (2019). Productos grillados. Disponible en [www.cr2.cl](http://www.cr2.cl)
- Centro de Información de los Recursos Naturales, CIREN (2021). Inventario de Erosión Nacional. Revisado en <https://inventarioerosion.ciren.cl/>
- Comisión Nacional de Riego, CNR (2022). Base de datos de proyectos pagados por Ley 18.450, 2007/22.
- CONADI, 2020. Estadísticas sociales indígenas. Unidad de Estudios
- Corporación Nacional Forestal, CONAF (2016). Catastro de Uso de Suelo y Vegetación. Infraestructura de Uso de Suelo y Vegetación. Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal
- Corporación Nacional Forestal, CONAF (2019). Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos. Revisado en <https://simef.minagri.gob.cl/>
- Datos Gob (2021). Listado de Sistemas de Agua Potable Rural en Chile. Repositorio de datos abiertos centralizado del Estado
- Dirección General de Aguas, DGA (2021). Información del Catastro Público de Aguas, en el Registro Público de DAA y el Registro Público de Organización de Usuarios. Dirección General de Aguas DGA.

- 
- Dirección Meteorológica de Chile, DMC (2021). Servicios Climáticos. Estación Carriel Sur, Concepción Ap. Revisado en <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosHistoricosEma/360019>
  - Dirección de Obras Hidráulicas, DOH (2021). Datos de Sistemas de Saneamiento Rural para las comunas de la cuenca en estudio.
  - Dirección de Obras Hidráulicas, DOH (2022). Catastro de SSR formulario PR039001 [Revisado Febrero 2022]
  - ESSBIO (2021). Plan de Desarrollo Concepción, Talcahuano, Penco, Florida. Información regulatoria generada por ESSBIO para la SISS.
  - Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP (2022). Base de datos de subsidios para proyectos de riego.
  - Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP (2022). Base de datos de apoyos frente a emergencias agrícolas por sequía.
  - Instituto Nacional de Estadísticas, INE (1976). V Censo Agropecuario y Forestal, Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.
  - Instituto Nacional de Estadísticas, INE (1992). XVII Censo Población y Vivienda
  - Instituto Nacional de Estadísticas, INE (1997). VI Censo Agropecuario y Forestal, Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.
  - Instituto Nacional de Estadísticas, INE (2002). XVIII Censo Población y Vivienda
  - Instituto Nacional de Estadísticas, INE (2007). VII Censo Agropecuario y Forestal, Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.
  - Instituto Nacional de Estadísticas, INE (2017). XIX Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda o Censo de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.
  - Ministerio de Medio Ambiente, MMA 2022. Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC). URL <https://retc.mma.gob.cl/> [Revisado Febrero 2022]
  - Oficina de Planificación Agraria, ODEPA 2016. Catastro frutícola de la Región del Biobío
  - Servicio Agrícola y Ganadero, SAG (2019). Catastro Vitícola Nacional. Servicio Agrícola y Ganadero.
  - Superintendencia de Servicios Sanitarios, SISS (2020). Informe de Gestión del Sector Sanitario 2020.
  - Superintendencia de Servicios Sanitarios, SISS (2021). Informe de Gestión del Sector Sanitario 2021.

### **3. Presentaciones**

- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (s,f). Clima y vegetación Región del Biobío.
- Dirección General De Aeronáutica Civil Dirección Meteorológica de Chile, Servicios Climáticos (s.f). Índices de Cambio Climático. Dirección General De Aeronáutica Civil Dirección Meteorológica de Chile.

---

#### **4. Normativa**

- Dirección General de Aguas, DGA (2022). Resolución 1.331 Exenta, deja sin efecto la resolución D.G.A. N° 1.674 (exenta), de 12 de Junio de 2012, y establece criterios que determinan el carácter de severa sequía, de conformidad a lo dispuesto en el artículo 314 del código de aguas.
- Ministerio de Agricultura, MINAGRI (2021). Resolución Exenta 309 de 2021. Aprueba Plan Nacional Operativo de Emergencia del Ministerio de Agricultura.





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO C GLOSARIO**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

## Glosario

**Acuífero:** Un acuífero es el conjunto de rocas que permiten la permeabilidad del agua y la pueden acumular en sus poros o grietas. A esta agua retenida en las estructuras rocosas se la conoce como agua subterránea y puede llegar a presentar manifestaciones de hasta dos millones de kilómetros cuadrados de tamaño.

**Área Silvestre Protegida:** Según la UICN, un área protegida es “un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados”. Según la legislación chilena, corresponde al ambiente natural, terrestre, o acuático perteneciente al Estado y que éste protege y maneja conforme a las siguientes categorías: Reservas de Regiones Vírgenes, Parques Nacionales, Monumentos Naturales y Reservas Nacionales.

**Cambio climático:** Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1 define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

**Conductividad Eléctrica:** La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo para conducir una corriente eléctrica. La conductividad eléctrica mide la capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica a través de éste y es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica del material. Es lo contrario a la resistencia eléctrica.

**Cuenca:** Es el área o superficie drenada por un río principal y sus afluentes. Se expresa en km<sup>2</sup>.

**Demanda Bruta:** Coeficiente entre la demanda neta del cultivo y la eficiencia de riego.

**Demanda Hídrica:** Cantidad de agua que requiere un cultivo para producir los rendimientos esperados.

**Demanda Neta:** Cantidad de agua que requiere un cultivo para producir los rendimientos esperados, luego de descontar la precipitación efectiva.

**Distrito Censal:** División administrativa utilizada en el censo agropecuario del 2007.

**Eficiencia de Riego:** Relación entre el volumen de agua captado por las raíces de las plantas y el volumen aplicado en el riego.

---

**Encuesta Nacional de Empleo:** La Encuesta Nacional de Empleo es un instrumento que permite conocer la situación de trabajo que tienen las personas que viven en Chile, por ejemplo: cuántas personas están trabajando actualmente, cuántas están desocupadas, etc. El resultado principal de la encuesta es la tasa de desocupación del país.

**Escasez Hídrica:** La escasez hídrica es un término complejo porque involucra procesos hidrológicos, meteorológicos y también los usos que se le da al agua (Zambrano-Bigiarini, 2019). Para determinar si una zona está afectada por escasez hídrica, es necesario conocer el funcionamiento de los principales procesos hidrológicos que ocurren a nivel de las cuencas, y cuantificar la oferta y la demanda de agua dulce.

**Feldespatos:** Los feldespatos son un grupo de minerales formados por silicatos dobles de aluminio y de calcio, sodio, potasio, algunas veces de bario o mezclas de esas bases. Es de la familia de los tectosilicatos.

**Gases de Efecto Invernadero:** Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. Además, la atmósfera contiene cierto número de gases de efecto invernadero enteramente antropógeno, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, y contemplados en el Protocolo de Montreal. Además del CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, el Protocolo de Kyoto contempla los gases de efecto invernadero hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

**Geofísica:** La geofísica es una ciencia derivada de la geología que trata del estudio de las propiedades físicas de la Tierra. Comprende aspectos como la investigación de la composición interna del planeta, el flujo de calor proveniente del interior de la Tierra, la fuerza de la gravedad que forma el campo gravitacional, la fuerza magnética de atracción, ejercida por un magneto ideal en el interior de la Tierra que crea el campo geomagnético, y la propagación de las ondas sísmicas a través de las rocas de la corteza terrestre. La geofísica contribuye a una ubicación adecuada de obras civiles y en la prevención de desastres naturales, asimismo permite optimizar procesos de exploración y extracción de minerales, agua y energía.

**Glacis:** Un glacis es un plano inclinado de débil pendiente, menor a 10°, y recubierto por material detrítico. En su parte superior ocurren procesos de arroyada en surcos del tipo rill wash, y en su parte media e inferior arroyada en manto del tipo sheet flood. Los glacis son excelentes acuíferos naturales, como en la Pampa del Tamarugal en la cual hubo comunidades agrícolas en la época prehispánica cuya base cultural era la distribución de agua mediante canales y acequias. Un pedimento o glacis rocoso, es un plano inclinado labrado directamente en la roca fundamental de tipo cristalino, y que está ligeramente cubierto de material disgregado.

**Gravimetría:** Método de análisis cuantitativo que permite saber la cantidad de un componente en una sustancia haciendo que éste reaccione con un reactivo y obtenga un compuesto estable, generalmente mediante la formación de un precipitado. Se filtra, se

---

seca y finalmente se pesa, para después determinar el porcentaje del componente en la sustancia inicial.

**Inundaciones:** Las grandes precipitaciones elevan el nivel de los ríos hasta superar la capacidad del cauce, provocando inundaciones que afectan la infraestructura urbana, agrícola y vial. En la sierra predominan las inundaciones rápidas por desborde de ríos andinos caracterizados por fuertes pendientes y flujos hiper concentrados. Se ha observado una fuerte vinculación entre el fenómeno El Niño y las inundaciones. El incremento del nivel de los ríos se produce en el último trimestre del año y alcanza su valor máximo a mediados del primer trimestre. Las inundaciones, pueden producirse por la reducción de la sección transversal del río, por colmatación, cambios abruptos en la dirección del flujo de las aguas e invasión de la llanura de inundación del río.

**Lixiviación:** Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se provoca la disolución de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en etapas posteriores mediante electrólisis. Este proceso se aplica a las rocas que contienen minerales oxidados, ya que éstos son fácilmente atacables por los ácidos.

**Llanura Deposicional:** Llanuras deposicionales, formadas por la deposición de materiales dejados por agentes como el viento, ríos, olas y glaciares. Su fertilidad y relevancia económica depende principalmente del tipo de sedimentos depositados.

**Materias Primas:** Una materia prima es todo bien que es transformado durante un proceso de producción hasta convertirse en un bien de consumo.

**Modelo Hidrológico:** En un modelo matemático que representa una 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. Estos modelos ayudan a tomar decisiones en materia de hidrología. Se requieren información de entrada (inputs). Las salidas (outputs), dependerán de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, mientras que otros están diseñados para ver a las tormentas individuales. El resultado más común es el hidrograma o hidrograma de escurrimiento

**Modelo Hidrogeológico:** Modelo que permite definir las principales características de un acuífero. Su elaboración requiere de una revisión detallada de la información disponible, labores de terreno y estudios básicos. Sus resultados se resumen en: la geometría del/los acuíferos, caracterización geológica del sistema, caracterización hidrológica del área, las unidades hidrogeológicas más importantes, el tipo de acuífero o acuíferos, los parámetros hidrogeológicos fundamentales del sistema, la piezometría (sentido del flujo), la hidro química, las entradas y salidas de agua del sistema, balance hídrico general.

**Neógeno:** Período geológico que es el segundo y último de la era cenozoica y sigue al período paleógeno; se extiende desde hace unos 25 millones de años hasta hace unos 2 millones de años.

**Nodo:** Punto de control correspondiente al cierre de la subcuenca.

**Pediplano:** es una planicie que resulta de la yuxtaposición de varios pedimentos. La formación de un pedimento se debe a procesos de erosión y transporte de materiales en manto o sheet flood, por el cual la lámina de agua se esparce como un flujo turbulento. A

---

esto se agrega la arroyada difusa del tipo rill wash, a través de pequeños canalículos anastomosados. También la coalescencia de grandes conos de deyección contribuye a la formación de glaciares y pedimentos.

**Piso Vegetacional:** El concepto de Piso de Vegetación se define como espacios caracterizados por un conjunto de comunidades vegetales con una fisionomía y unas especies dominantes asociadas a un piso bioclimático específico.

**Plan Regulador Comunal:** Es un instrumento de planificación territorial que contiene un conjunto de disposiciones sobre adecuadas condiciones de edificación, y espacios urbanos y de comodidad en la relación funcional entre las zonas habitacionales, de trabajo, equipamiento y esparcimiento (Artículo 41 LGUC).

**Planta Desaladora:** Una planta desaladora o planta desalinizadora es una instalación que convierte el agua salada del mar (o salobre) en agua apta para el consumo humano, así como para usos industriales y de riego.

**Precipitación Efectiva:** Parte de las precipitaciones que se infiltra en el suelo y permanece a disposición de las raíces de las plantas.

**Proceso de Consulta Indígena:** La consulta a los pueblos indígenas es un mecanismo de participación basado en el Diálogo entre el Estado y los pueblos indígenas; ante todo es un derecho de los pueblos indígenas y un deber del Estado que proviene del Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) sobre Pueblos Indígenas y Tribales en Países Independientes, que surge cada vez que se adoptan medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarlos directamente.

**Régimen Fluvial:** Es la alimentación de un río, la fuente de alimentación puede ser de origen pluvial, si se abastece de las lluvias; de régimen nivoso, por derretimiento de las nieves; o de régimen mixto, lluvia y derretimiento de nieve.

**Regresión Lineal:** El objetivo de un modelo de regresión es tratar de explicar la relación que existe entre una variable dependiente (variable respuesta) Y un conjunto de variables independientes (variables explicativas). La regresión lineal es un campo de estudio que enfatiza la relación estadística entre dos variables continuas conocidas como variables de predicción y respuesta.

**Remociones en Masa (deslizamientos):** Pueden producirse a causa de diversos factores como inestabilidad de taludes, sismo y deforestación, pero en la mayoría de los casos están combinados con la presencia de agua, producida por las precipitaciones de agua que saturan los suelos y debilitan su resistencia, lo cual, si se encuentran condiciones estructurales favorables, como pendientes fuertes o deforestación, pueden dar lugar al deslizamiento del terreno. Los deslizamientos producen catástrofes, pero sus consecuencias pueden ser muy graves si se ve afectada la población, o bien, si los daños se producen en las infraestructuras hidráulicas, en la infraestructura vial, o, si se produce la pérdida de cultivos y terrenos agrícolas. (Hauser, 1993 y 2000).

**Rocas Intrusivas:** Cuando la solidificación del magma se produce en el seno de la litósfera, la roca resultante se denomina plutónica o intrusiva; si el enfriamiento se produce, al menos en parte, en la superficie o a escasa profundidad, la roca resultante se denomina

---

volcánica o extrusiva y estos, a su vez, se subdividen en familias a partir de las diferentes texturas, asociaciones minerales y modo de ocurrencia. Las formas que adoptan los cuerpos ígneos durante su cristalización delimitan diferentes estructuras ígneas.

**Rocas Metamórficas:** Las rocas metamórficas (del griego meta, cambio, y morphe, forma, "cambio de forma") resultan de la transformación de rocas preexistentes que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones físicas o químicas, o una combinación de ambas, como son la temperatura, la presión y/o la actividad química de los fluidos agentes del metamorfismo. Estos ajustes, impuestos comúnmente bajo la superficie, transforman la roca original sin que pierda su estado sólido generando una roca metamórfica. La roca generada depende de la composición y textura de la roca original, de los agentes del metamorfismo, así como del tiempo en que la roca original estuvo sometida a los efectos del llamado proceso metamórfico. Por la naturaleza de su origen puede haber una gradación completa entre las rocas metamórficas y las ígneas o sedimentarias de las que se formaron. El estudio de estas rocas provee información muy valiosa acerca de procesos geológicos que ocurrieron dentro de la Tierra y sobre su variación a través del tiempo.

**Rocas Sedimentarias:** Las rocas sedimentarias (del latín sedimentum, asentamiento) se forman por la precipitación y acumulación de materia mineral de una solución o por la compactación de restos vegetales y/o animales que se consolidan en rocas duras. Los sedimentos son depositados, una capa sobre la otra, en la superficie de la litósfera a temperaturas y presiones relativamente bajas y pueden estar integrados por fragmentos de roca preexistentes de diferentes tamaños, minerales resistentes, restos de organismos y productos de reacciones químicas o de evaporación.

**Sequías:** Con carácter general, se puede considerar como la insuficiente disponibilidad de agua en una región, por un periodo prolongado, para satisfacer las necesidades del recurso hídrico en la zona. No obstante, puede enfocarse desde distintos aspectos y así se puede considerar la sequía meteorológica, agronómica o hidrológica, según la duración y efectos de ésta. La sequía produce importantes efectos para la salud pública, el medio ambiente y los sistemas productivos dependientes del agua y ha causado la pérdida de vidas humanas, el deterioro ambiental, incrementando incluso la posibilidad de incendios forestales y la destrucción de campos y cultivos, además de reducirse la producción hidroeléctrica.

**Servicios Ecosistémicos:** Corresponden a aquellos servicios que resultan del propio funcionamiento de los ecosistemas y que son de utilidad para el bienestar de la sociedad. Son ejemplos de ello la producción de agua limpia, la formación de suelo, la regulación del clima por parte de los bosques, la polinización, etc.

**Shapefile:** Formato que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas.

**Stakeholders:** Público o grupo de interés.

**Tranque de Relave:** El agua que se ha utilizado en el proceso de concentración de cobre y, en general, en todo el proceso productivo, no puede ser vertida a las corrientes naturales porque tiene contaminantes. Esta agua industrial se lleva a los tranques de relave donde

---

lentamente los contaminantes se van depositando en el fondo y el agua se va limpiando hasta hacerla utilizable por los seres vivos.

**Surgencia:** Ascenso a la superficie de masas de agua profundas -que son frías y ricas en nutrientes-, debido al movimiento de aguas superficiales mar adentro.

**TEM:** Es un método que emplea la inducción de un campo electromagnético para poder estimar propiedades eléctricas del subsuelo.

**Tundra:** Terreno abierto y llano, de clima muy frío y subsuelo helado, falto de vegetación arbórea, con suelo cubierto de musgos y líquenes y pantanoso en muchos sitios.

**Unidad Hidrogeológica:** Por unidad hidrogeológica se entiende uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua.

**Zona de Riego:** Zonificación que representa las áreas de riego en el programa WEAP.



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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO D FIGURAS**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

## Apéndices

En la versión digital de este informe se pueden encontrar adjuntas las carpetas:

- **Carpeta: Informe Final.** Detalle de figuras. Formato digital
- **Carpeta: Anexo H.** Detalle de figuras. Formato digital
- **Carpeta: Anexo I.** Detalle de figuras. Formato digital

---

## **1 Antecedentes generales**

En este Anexo se presentan las figuras incluidas en el informe final y en los anexos I y H.

Las figuras se incluyen en formato digital (.JPEG) en carpetas específicas.



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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO E ANTECEDENTES RECOPIRADOS**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

## Listado de Fichas

A continuación, se listan las fichas de los antecedentes recopilados. En la versión digital de este informe se pueden encontrar adjuntas cada una de las fichas.

- Ficha 1: MUÑOZ-CRISTI (1956). Handbook of South American Geology, Sociedad Americana de Geología
- Ficha 2: BÖRGEL (1983). Geografía de Chile, Tomo II: Geomorfología , Reinaldo Börgel Olivares
- Ficha 3: GAJARDO (1994). La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica, Gajardo
- Ficha 4: CIREN (1999). Materiales y Símbolos, Estudio Agrológico VIII Región, Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)
- Ficha 5: DGA (2003). Diagnóstico Actual del Riego y Drenaje en Chile y su Proyección. Diagnóstico del Riego y Drenaje en la VIII Región, Comisión Nacional de Riego
- Ficha 6: SERNAGEOMIN (2003). MAPA GEOLOGICO DE CHILE: VERSION DIGITAL, Servicio Nacional de Geología y Minería
- Ficha 7: DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Andalién, Dirección General de Aguas (DGA)
- Ficha 8: VILLAGRÁN-MELLA ET AL. (2006). Relación entre características del hábitat y estructura del ensamble de insectos en humedales palustres urbanos del centro-sur de Chile, Villagrán-Mella, R., Aguayo, M., Parra, L., y A. González
- Ficha 9: INE (2007). VII Censo Agropecuario y Forestal, Instituto Nacional de Estadísticas de Chile
- Ficha 10: DGA (2010). Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía., Dirección General de Aguas
- Ficha 11: MMA (2010). Ficha técnica sitios priorizados región del Biobío: Fundo Nonguén, Ministerio del Medio Ambiente
- Ficha 12: BRS (2011). La lectoescritura inicial en América Latina y el Caribe: mapeo y análisis de actores clave, United States Agency for International Development, USAID
- Ficha 13: RADDATZ, D. (2011). Efecto del Cambio climático en la Seguridad hidrológica de Obras Hidráulicas. Análisis en Cuencas Pluviales de la Zona Central de Chile para el Escenario A2, Daniela Raddatz
- Ficha 14: STOLPE (2011). Suelos de la VIII Región de Chile, Neal B. Stolpe
- Ficha 15: DGA (2013). Levantamiento Hidrogeológico en Cuencas Pluviales Costeras

- 
- en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región del Bío-Bío, Dirección General de Aguas
- Ficha 16: MOP (2013). Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Obra de Regulación y Retención de Sedimentos en Río Andalién, Región del Biobío, CONAMA
  - Ficha 17: DGA (2014). Levantamiento Hidrogeológico en Cuencas Pluviales Costeras en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Del Maule y del Bío-Bío, Etapa 2, Dirección General de Aguas
  - Ficha 18: IDE (2016). Catastros de Uso de Suelo y Vegetación, Infraestructura de Uso de Suelo y Vegetación
  - Ficha 19: INVERSIONES GNL TALCAHUANO SPA 2016. Caracterización ecológica de humedales de la zona semiárida en Chile Central, Inversiones GNL Talcahuano SpA
  - Ficha 20: MMA (2016). Clasificación de ecosistemas marinos chilenos de la zona económica exclusiva, Rovira, J y J. Herreros
  - Ficha 21: DGA (2017). Diagnóstico para Desarrollar Plan de Riego en Cuenca del Biobío, Comisión Nacional de Riego
  - Ficha 22: DGA (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional/ Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Realizado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile, SIT-417 2017, Dirección General de Aguas
  - Ficha 23: INE (2017). XIX Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda o Censo de Población y Vivienda 2017, Instituto Nacional de Estadísticas de Chile
  - Ficha 24: LUEBERT Y PLISCOFF 2017. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile, Lüebert y Pliscoff
  - Ficha 25: CIREN (2019). Sistema de información territorial, Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)
  - Ficha 26: DGA (2019). DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LAS REGIONES DE ÑUBLE Y DEL BIOBÍO, Dirección General de Aguas
  - Ficha 27: DGA (2019). Diagnóstico de la Calidad de las Aguas Subterráneas de las Regiones de Ñuble y del Biobío, Dirección General de Aguas
  - Ficha 28: DGA (2019). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Austral, Realizado por Universidad de Chile, SIT-441 2019, Dirección General de Aguas
  - Ficha 29: SAG (2019). Catastro vitícola nacional, SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO
  - Ficha 30: CONADI (2020). Estadísticas sociales indígenas, CORPORACIÓN NACIONAL INDIGENA
-

- 
- Ficha 31: DATOS GOB (2021). Listado de Sistemas de Agua Potable Rural en Chile, Repositorio de datos abiertos centralizado del Estado
  - Ficha 32: DGA (2021). Información del Catastro Público de Aguas, en el Registro Público de DAA y el Registro Público de Organización de Usuarios, Dirección General de Aguas
  - Ficha 33: ESTEBAN FLORES HALTENHOFF (2021). Río Andalién y descontrol territorial: Sequías, inundaciones, incendios y rellenos sanitarios, Esteban Flores Haltenhoff
  - Ficha 34: INVERSIONES LEON ZAVALA LTDA (2021). Declaración de Impacto Ambiental (DIA) Extracción y Procesamiento de Áridos Cantera El Pellín, Penco, Inversiones León Zavala Ltda.
  - Ficha 35: DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE, SERVICIOS CLIMÁTICOS (S.F). Índices de Cambio Climático, Dirección General De Aeronáutica Civil Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos
  - Ficha 36: BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE (S,F). Clima y vegetación Región del Biobío, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO F METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE DEMANDAS**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

# Apéndices

En la versión digital de este informe se pueden encontrar las siguientes carpetas adjuntas:

- Carpeta: **F1 Estimación Demanda**. Calculo de las Demandas: Agua Potable Urbana (APU) y Rural (SSR), Agrícola (AGR), Forestal (FOR) y Minería (MIN)
- Carpeta: **F2 Escenarios de Gestión**



---

# Índice General

	Página
<u>1. CONSUMO DE AGUA POTABLE URBANA .....</u>	<u>1-7</u>
1.1. Fuentes utilizadas .....	1-7
1.2. Población adoptada .....	1-7
1.3. Consumo y producción.....	1-8
1.4. Validación de la estimación .....	1-8
1.5. Restitución por tratamiento .....	1-9
1.6. Resultados Consumo de Agua Potable Urbana.....	1-9
<u>2. CONSUMO DE AGUA POTABLE RURAL.....</u>	<u>2-9</u>
2.1. Fuentes utilizadas .....	2-9
2.2. Población adoptada .....	2-10
2.3. Consumo y producción.....	2-10
2.4. Resultados Consumo de Agua Potable rural .....	2-11
<u>3. CONSUMO DE AGUA POR USO AGRÍCOLA .....</u>	<u>3-11</u>
3.1. Antecedentes y fuentes.....	3-11
3.2. Metodología cálculo de la superficie .....	3-11
3.3. Resultados Consumo de Agua por uso Agrícola .....	3-15
<u>4. CONSUMO DE AGUA POR USO INDUSTRIAL .....</u>	<u>4-15</u>
4.1. Fuentes utilizadas .....	4-15
4.2. Metodología demanda actual .....	4-16
4.3. Metodología demanda futura .....	4-17
4.4. Estimación de reservas ambiental, turismo y caudal ecológico .....	4-18



---

## 1. CONSUMO DE AGUA POTABLE URBANA

En Chile, el 99,7% de la población está cubierto por empresas sanitarias (SISS, 2020). En las Cuencas de estudio existe 1 empresa sanitaria abasteciendo centros urbanos: ESSBIO. Según el último Censo de Población y Vivienda (INE, 2017) la tendencia muestra un aumento de la población urbana respecto a la población rural (INE, 2020), considerando este criterio como tendencia de consumo. Según indicó la OECD en 2012, que los países en desarrollo como Chile tengan un aumento demográfico y económico repercutiría directamente en el consumo de agua potable urbana.

En este apartado se especifica el cálculo de la **demanda de agua potable urbana** suministrada por las concesionarias dentro del área del estudio, dejando el consumo de agua potable rural para el siguiente apartado.

### 1.1. Fuentes utilizadas

La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) es la institución normativa y fiscalizadora de las empresas sanitarias que prestan los servicios de agua potable y alcantarillado. Estas empresas son entidades de servicio en formato de concesionaria por un período de tiempo estipulado. Por otra parte, la SISS tiene atribuciones respecto al servicio de agua potable en: otorgar concesión de servicios sanitarios, fijación de tarifas por los servicios (agua potable y alcantarillado) y fiscalización de la normativa vigente.

En relación con lo anterior, se dispone de la siguiente información de la SISS:

- Planes de desarrollo de concesiones vigentes y anexos., en adelante "PD".
- Ficha de antecedentes técnicos (FAT)
- Georreferenciación de plantas sondajes y otros
- PR027001- Registros del Sistema de Facturación Clientes Regulados, Clientes no regulados (52 BIS) y Coberturas (SIFAC II),
- PR018001. Producción de agua de las fuentes

Adicionalmente, la empresa concesionaria. puso a disposición la siguiente información:

- Ubicación y naturaleza de la captación
- Volúmenes históricos captadas por localidad 2009-2020
- Porcentajes de pérdidas por localidad
- Volumen facturado por localidad
- Volumen tratado y *bypass*
- Registro histórico de niveles

Por último, se consideran los datos de Población del INE para los años 1992, 2002, 2017, en adelante "Censos".

### 1.2. Población adoptada

La demanda para consumo humano está directamente relacionada la población abastecida. Para la estimación de la demanda de agua potable urbana en el presente estudio se fijó la

---

---

población actual al año 2021 y se estimó la población histórica y a futura. En los PD de cada sistema se presenta la población abastecida, y la estimación del crecimiento de la población a abastecer hasta 2032. Adicionalmente el INE presenta el censo de los años 1992, 2002, 2017 por localidad. Con estos antecedentes se realiza un escenario de población base de 1985-2060, cuyo año base, 2021, está definido por el PD. Para completar el periodo histórico y proyectado se hacen las siguientes consideraciones:

**Periodo histórico:** se considera la tendencia lineal definida por los Censos 1992, 2002, 2017

**Periodo proyectado:** Para la población proyectada se realizan dos escenarios a evaluar, el primero considera la tendencia de los Censos y la segundo la tendencia incluida por el PD. Finalmente se adoptará como escenario base el más desfavorable para asegurar el abastecimiento, es decir aquel con mayor tasa de crecimiento.

### 1.3. Consumo y producción

Con una población fijada desde 1985-2060, se consideran los factores de dotación (l/hab/día) y porcentaje de pérdidas según los datos ofrecidos por los PD.

$$\text{Consumo APU}_{\text{año } n} = \text{Población}_{\text{año } n} \times \text{Dotación} \times \frac{365}{10^9}$$

$$\text{Producción APU}_{\text{año } n} = \frac{\text{Consumo}_{\text{año } n}}{1 - \text{ANF}}$$

Donde;

Producción APU, producción en hm<sup>3</sup>/año

Consumo APU, consumo en hm<sup>3</sup>/año

Población, en Número de habitantes

Dotación, en l/habitante/día

ANF, Porcentaje de Agua no factura (%)

### 1.4. Validación de la estimación

El **SIFAC II**<sup>1</sup> concentra la información que entregan las empresas sanitarias a la SISS respecto a los clientes regulados, clientes no regulados (52 Bis 2) y otros. Dentro de esa información, se entrega el **volumen consumido (m<sup>3</sup>/mes)**, y **volumen producido (m<sup>3</sup>/mes)** por localidad y fecha.

---

<sup>1</sup> Formulario SISS PR027001

---

Las sanitarias tienen clientes de tipo **residencial, industrial, comercial, institucional y otros**. Por lo tanto, los resultados de esta demanda consideran aquellos usos de agua que estén registrados en la red urbana. Dicha información se consolida para obtener un volumen consumido y producido por localidad anual (**m<sup>3</sup>/año**).

Dichos antecedentes son comparados con la estimación considerará para cada sistema. En el caso que los datos tengan un error alto, se reconsidera la estimación poblacional base.

### **1.5. Restitución por tratamiento**

La restitución de agua post tratamiento de aguas servidas según los Planes de Desarrollo de las empresas sanitarias está definido en un 80% respecto al agua consumida.

### **1.6. Resultados Consumo de Agua Potable Urbana**

Para visualizar los resultados ver Anexo F1 / APU.

## **2. CONSUMO DE AGUA POTABLE RURAL**

En este apartado se calcula la estimación de la demanda hídrica para el consumo de agua en el sector rural por sistemas de agua potable rural (APR) ahora denominados Sistemas de Saneamiento Rural (SSR) por la Ley N°20.998 de Servicios Sanitarios Rurales, que entró en vigor el 20 de noviembre del 2021. Por lo tanto, ahora los APR serán Servicios Sanitarios Rurales e, independientemente de su origen, estarán bajo la tutela del Ministerio de Obras Públicas.

### **2.1. Fuentes utilizadas**

Los sistemas de SSR son comités o cooperativas rurales gestionados por la propia comunidad para prestar servicios de agua potable y saneamiento rural en zonas declaradas no urbanas y fuera del área de concesionarias sanitarias.

Estos sistemas, en general, funcionan en base a financiamiento público a través de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), gobiernos regionales o municipios. Principalmente, están dentro del programa APR de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), y por lo tanto disponen de asesoramiento técnico.

Las Direcciones de Obras Hidráulicas en cada región disponen de un catastro de SSR con información básica que los caracteriza. Esta información dispone de los siguientes contenidos:

- ID APR -SSR
- Región, provincia y comuna
- Coordenadas UTM
- Tipo de servicio (comité o cooperativa)
- Nombre APR
- N° de arranques
- Tipo de APR (concentrada o semiconcentrado)

- Tipo de Fuente
- Beneficiarios/as estimado/as
- Producción de la captación (l/s)
- Niveles estáticos y dinámicos
- Otros

Esta información es sistematizada por las sanitarias y entregada a la SISS mediante el formulario PR039001.

Finalmente, se considera la información de los censos de población y vivienda realizados por el INE en los años 1992, 2002 y 2017, para el cálculo de la proyección de la demanda.

A continuación, se presenta la metodología utilizada para el cálculo.

## 2.2. Población adoptada

Según los antecedentes recibidos, para cada SSR se fija un número de arranques, una densidad de habitantes por cada arranque y finalmente una población abastecida. Por lo tanto, con dicha información se fija el año base (2021) para la estimación de la población histórica y a futuro. Para completar el periodo histórico y proyectado se hacen las siguientes consideraciones:

**Periodo histórico:** La tasa decrecimiento anual es definida por los Censos 1992,2002, 2017 para población rural por comuna.

**Periodo proyectado:** Para calcular la seria poblacional hasta 2060 se considera una tasa de crecimiento según los censos 2002 y 2017, sin embargo, si dicha tasa es <1% se mantiene en dicho porcentaje según Manual de proyectos de Agua Potable Rural (DOH, 2019).

## 2.3. Consumo y producción

Para el cálculo se realiza las siguientes consideraciones:

- La dotación es de 140 l/hab/día (DOH, 2019) en los años de funcionamiento del SSR, los años anteriores se considera 50 l/habitante/día (OMS).
- Se considera un porcentaje de pérdidas de 20% (DOH, 2019)
- 

La **demanda bruta de SSR** se determina como el volumen registrado de consumo, año 2019, multiplicado por el coeficiente de pérdidas del sistema.

$$Producción \ o \ Demanda \ bruta \ SSR = \frac{Consumo \ SSR}{1 - Pérdidas(\%)} = \frac{Población \times \ Dotación}{1 - Pérdidas(\%)}$$

Donde;

Población: Serie de población

Pérdidas=20%

Dotación =140 l/Hab/día

---

## 2.4. Resultados Consumo de Agua Potable rural

Para visualizar los resultados ver Anexo F1 / SSR

## 3. CONSUMO DE AGUA POR USO AGRÍCOLA

### 3.1. Antecedentes y fuentes

Las demandas hídricas del sector agrícola son obtenidas en base a los datos y antecedentes disponibles:

- Censo agropecuario (1976, 1997 y 2007), Instituto Nacional de Estadística (INE, 1976-1997-2007): Superficie agrícola por distrito y grupo de cultivo perteneciente a la cuenca, para los años 1976, 1997 y 2007.
- Catastro frutícola CIREN, proyecciones en base a estadísticas de ODEPA. Superficie agrícola proyectada a los años 2015, 2020, 2030 y 2040.
- Publicación FAO, boletín 56 (FAO, 2006) para la determinación de las necesidades de riego: Coeficiente de cultivo por grupo de cultivo
- Manual Técnico de presentación de proyectos de obras de tecnificación de riego, Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile, 2015 (CNR, 2015): Eficiencias de riego estimadas para los años 2015, 2020, 2030 y 2040.
- Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras, y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile, S.I.T.419, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, 2017. (DGA, 2017a): Metodologías y resultados.
- Entrevistas con usuarios del agua de la cuenca
- Adicionalmente, los datos de precipitación real mensual son presentados para cada distrito censal, es decir, para cada división administrativa utilizada en el censo agropecuario del 2007, esto debido a que los cultivos y superficie de riego son calculados de acuerdo a esa división. La precipitación real es presentada desde 1985 al 2018, y obtenida desde *Center for Climate and Resilience Research* (CR2).

La precipitación por distrito para el periodo histórico y futuro (1985-2050), es calculada a partir de la precipitación obtenida en el modelo de cambio climático CCSM4 (modelo de cambio climático más favorable).

### 3.2. Metodología cálculo de la superficie

Los últimos datos censales de la superficie de riego son del año 2007, esta información es complementada con el catastro frutícola de ODEPA (OCEPA, 2016), y recientemente la DGA realizó un estudio denominado "Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile" en el año 2017. Finalmente,

---

como fuente de información, se considera la experiencia de las Juntas de Vigilancia y otros usuarios de la cuenca.

### **Censo agropecuario del año 2007 (INE, 2007)**

El censo agropecuario señala la superficie bajo riego a nivel censal para toda la cuenca para cada año por tipo de cultivo.

### **Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile (DGA, 2017)**

Este estudio realizado por la Dirección General de Aguas en el año 2017 determinó la demanda de riego sobre la base de los antecedentes aportados por el Censo Agropecuario y Forestal del año 2007, considerando los cultivos declarados por los usuarios en las preguntas 23 a la 83 del cuestionario. Es así como para el año 2007, se consideró una superficie regada y destinó el resto de los cultivos a secano, estimando una demanda agrícola por este concepto.

En este caso, se considera solo aquellas superficies con una seguridad de riego mayor, sin incluir aquellos cultivos o siembras con seguridades de riego variables.

### **Demanda Neta y Bruta**

La demanda hídrica es obtenida a partir de la multiplicación entre la evapotranspiración de referencia (disponible para cada distrito) y el coeficiente de cultivo para cada grupo de cultivos, obteniéndose un resultado en mm/mes, el cual finalmente lo expresaremos en m<sup>3</sup>/ha. Este procedimiento se hace para cada mes, año y grupo de cultivo.

$$ETc \left( \frac{mm}{mes} \right) = ETo \left( \frac{mm}{mes} \right) \times Kc$$
$$ETc \left( \frac{m^3}{ha} \text{ mensual} \right) = ETc \left( \frac{L}{m^2} \right) \times \frac{10000}{1000}$$

Donde:

ETc= Evapotranspiración de cultivo

ETo= Evapotranspiración de referencia

Kc= Coeficiente de cultivo

Luego, la demanda hídrica de cada mes es obtenida al considerar la superficie ocupada por cada grupo de cultivo en el respectivo distrito:

$$DH (m^3 \text{ mensuales}) = ETc \left( \frac{m^3}{ha} \text{ mensual} \right) \times \text{superficie (ha)}$$

Donde:

DH= Demanda Hídrica

La precipitación efectiva es calculada según la precipitación mensual acumulada, usando la fórmula de la metodología de Blaney y Criddle modificada por Horacio Merlet y Fernando

---

---

Santibáñez el año 1986. Es en base a los tres modelos de precipitación que se están trabajando, que para cada año hay tres escenarios de demanda.

$$Pp\text{ efectiva } \left(\frac{mm}{mes}\right) = -0,0015 \times (pp\text{ real } \left(\frac{mm}{mes}\right))^2 + 0,9981 \times pp\text{ real } \left(\frac{mm}{mes}\right) - 4,4574$$

Donde:

Pp= Precipitación (CR2)

Para el cálculo de la demanda neta mensual, se le resta la precipitación efectiva a la demanda hídrica mensual (igualando las unidades en metros cúbicos):

$$DN\ (m^3\ mensuales) = DH\ (m^3\ mensuales) - Pp\text{ efectiva } \left(\frac{mm}{mes}\right) \times 10 \times superficie\ (ha)$$

Donde:

DN= Demanda Neta

DH= Demanda Hídrica

Pp= Precipitación

La demanda bruta es obtenida al dividir la demanda neta por el porcentaje de eficiencia de riego para cada año y distrito:

$$DB\ (m^3\ mensuales) = \frac{DN\ (m^3\ mensuales)}{\% \text{ eficiencia de riego}}$$

Donde:

DB= Demanda Bruta

DN= Demanda Neta

Finalmente, la demanda también se representó en hm<sup>3</sup>.

$$Demanda\ (hm^3\ mensuales) = \frac{Demanda\ (m^3\ mensuales)}{1.000.000}$$

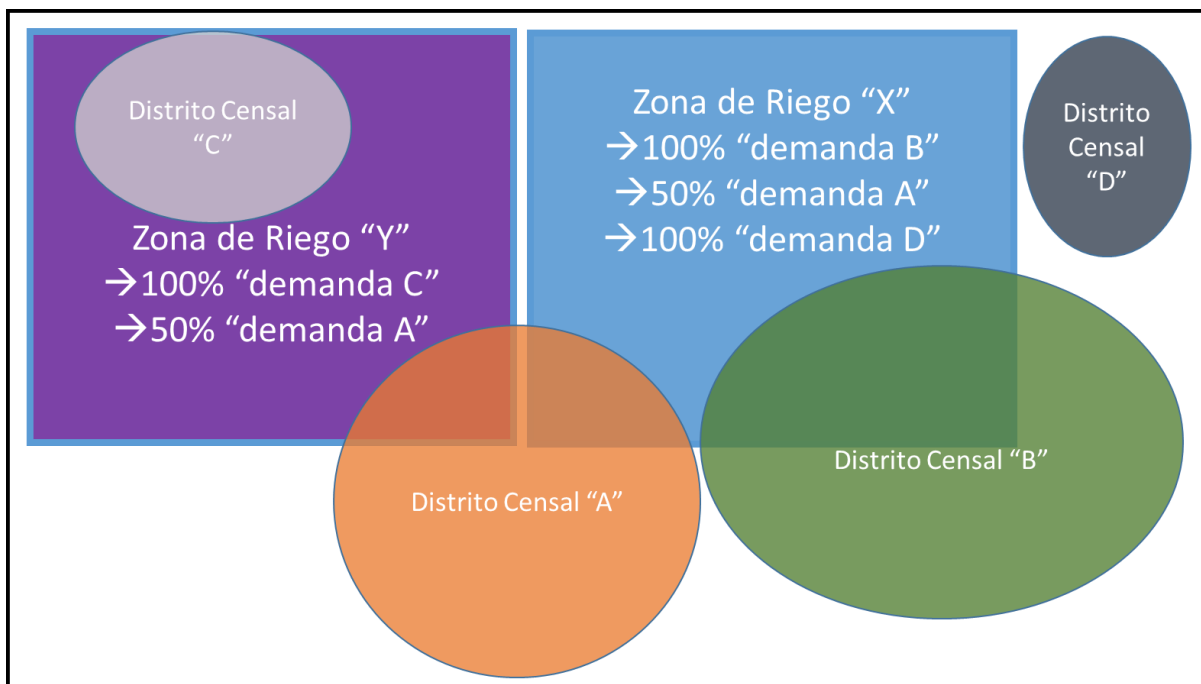
Para representar la demanda agrícola en las **Zonas de Riego (ZR)** que representan el área bajo riego en el programa WEAP, se utiliza la demanda neta en m<sup>3</sup>. Por lo tanto, para distribuir dicha demanda se hace el cruce de la capa de distritos censales con la capa de Zonas de Riego, para así obtener el porcentaje que ocupan los distritos en las zonas de riego y pasar la información desde una unidad a la otra, sin que quede alguna fracción de la demanda fuera de las ZR (Ver Anexo H).

A partir de ello, como resultado final se obtiene la **Estimación de la demanda de agua para Riego en las Zonas de Riego para cada mes y año (1985-2018)**. Este cálculo se hace de igual forma para los escenarios de cambio climático comentados para un período de años entre 1985-2050.

Del mismo modo, las eficiencias de riego son calculadas con la información levantada del registro del Censo Agrícola (INE, 1997, 2007) generando una tendencia lineal entre dichos

años. Para el período 2008-2020, se realizó una tendencia respecto a los proyectos tecnificado por Ley de Riego (Apéndice F1).

La demanda calculada (por WEAP) para los distritos censales es traspasada a las Zonas de Riego (ZR) de acuerdo al porcentaje del distrito que está dentro de la ZR. Para los casos en que parte del distrito no coincide con ZR, la demanda es dividida proporcionalmente en la o las ZR que sí coinciden con el distrito. Si es que el distrito no coincide con ninguna ZR, la demanda es traspasada a la ZR más cercana.



Fuente: Elaboración propia, de acuerdo a metodología de Zonas de Riego.

**Figura 3-1 Representación Distrito Censal a Zona de Riego**

De acuerdo a la figura anterior, el distrito censal "A" ocupa dos porciones iguales en las ZR "X" e "Y", por lo que una mitad de la demanda va a la "ZR X" y la otra a la "ZR Y". El distrito censal "C" está ubicado en su totalidad en la "ZR Y", por lo que la totalidad de su demanda es traspasada a esta ZR. En cuanto al distrito censal "B", solo una porción está ubicada en la ZR "X", y el resto del distrito no interseca ninguna ZR, por lo tanto la totalidad de la demanda va a la ZR "X". Por último, el distrito censal "D" no se interseca con ZR, por lo que la totalidad de su demanda es traspasada a la ZR más cercana, es decir, a la "ZR X".

La eficiencia de riego se calcula según los datos del Censo 2007 ya actualizado al 2020 según los datos superficies bonificadas por ley de Riego (Datos Abiertos CNR<sup>2</sup>). Con la

<sup>2</sup> <https://datos.cnr.gob.cl/>

superficie por método de riego y la Tabla 3-1 de eficiencia según método de aplicación de riego, se calcula de eficiencia para las zonas de riego.

**Tabla 3-1. Eficiencia de Riego por método de riego**

<b>Método de riego</b>	<b>Eficiencia de riego</b>	<b>Eficiencia considerada en PEGH</b>
Tendido	35%	40%
Surco	45%	
Otro tradicional	60%	
Aspersión	75%	75%
Carrete o pivote	75%	
Micro aspersión y microjet	85%	90%
Goteo o cinta	90%	
Rural 4.0	--	95%

Fuente: CNR, 2015.

### **3.3. Resultados Consumo de Agua por uso Agrícola**

Para visualizar los resultados ver Anexo F1 / AGR.

## **4. CONSUMO DE AGUA POR USO INDUSTRIAL**

La demanda industrial no permite hacer cálculos directos de una fuente concreta, esta metodología aborda un cálculo indirecto según otros parámetros como el caudal reportado en los riles de las plantas.

### **4.1. Fuentes utilizadas**

Para determinar la demanda por uso industrial se utiliza principalmente los antecedentes disponibles en el estudio "Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. S.I.T. N° 419 (DGA, 2017b), y se actualizó la base de datos necesaria:

- SIFAC II (SISS, 2020)
- Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC)
- PIB industria manufacturera a nivel regional

El SIFAC nos permite conocer la facturación (m<sup>3</sup>/año) del agua potable urbana y aguas servidas de los clientes conectados. Como la demanda de las industrias suministrada por las sanitarias se calculó en el apartado de Consumo de Agua Potable Urbana, esta demanda

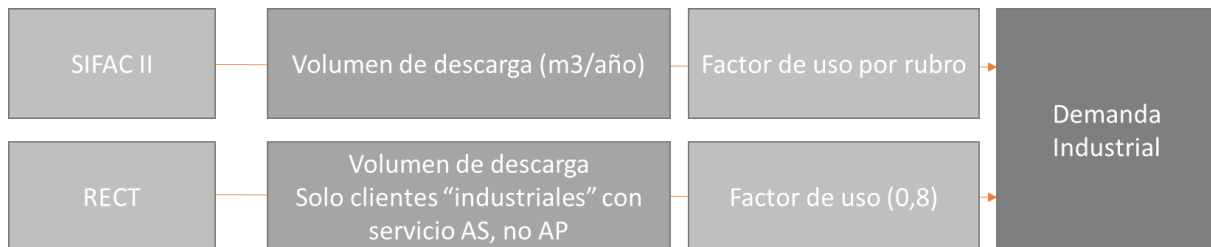
---

no se considera en el presente punto, es decir solo se considerarán las empresas conectadas únicamente al servicio de alcantarillado.

Por otra parte el RECT proporciona el caudal ( $m^3/s$ ) reportado en este seguimiento de la SMA.

#### 4.2. Metodología demanda actual

En concordancia con lo anterior, se tomarán dos fuentes de información para el cálculo de la demanda, según el siguiente flujo.



#### RETC:

Se calculan los afluentes a escala anual desde el caudal ( $m^3/día$ ) aportado en el RETC. El dato original es caudal diario por cada mes, por lo tanto se considera un valor de 22 de producción para todos los meses del año, si no se reporta alguna fecha se toma el promedio de los datos consolidados.

Finalmente, para obtener la demanda se multiplica el volumen desechado por un factor de uso (DGA, 2017). Este factor viendo dado según el tipo de actividad, los cuales se presentan en la **Tabla 4-1**.

**Tabla 4-1 Factor de uso (Efluente/demanda). Consumo Industrial**

<b>Sector Industrial</b>	<b>Factor de uso (Efluente/Demanda)</b>
Comida	0,902
Bebidas y tabaco	0,735
Fábricas textiles	0,941
Productos textiles	0,857
Madera	0,664
Papel	0,969
Petróleo y carbón	0,900
Productos químicos	0,705
Plásticos y gomas	0,835
Minerales no metálicos	0,655
Metales primarios	0,842
Metales fabricados	0,972
Maquinaria	0,938
Equipo de transporte	0,938
Misceláneo	0,714
Otros	0,750

Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. S.I.T. N° 419

#### **SIFAC II:**

Como se ha comentado anteriormente, se tomarán los valores de volumen reportados de aquellos clientes que están conectados a la red sanitaria, pero no se abastecen de agua potable urbana.

Este valor se multiplicará por un factor de 0,8 para obtener el valor del volumen demandado para este tipo de clientes.

#### **4.3. Metodología demanda futura**

En base a la metodología presentada en el informe "Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile", S.I.T. N° 419, se aplica la metodología para estimar la demanda futura industrial.

Se proyectó la demanda según la estimación del PIB de 2020-2050, es decir la evolución de la demanda hídrica sectorial varía interanualmente de forma proporcional al PIB, según lo proyectado (DGA, 2017c).

---

## 4.4. Estimación de reservas ambiental, turismo y caudal ecológico

### a) Caudal ecológico

La metodología utilizada para calcular caudal ecológico se obtiene de la revisión de fuentes de información generadas y validadas por DGA. Destaca la revisión del estudio "Actualización Informe Evaluación de los Recursos Hídricos superficiales de la cuenca del Río Maule Región del Maule" (DGA, 2016). Este documento utilizó algunos criterios que se deben precisar: para aquellos cauces donde se constituyeron derechos con un caudal ecológico mínimo, considerando como fórmula de cálculo el criterio del diez por ciento del caudal medio anual, se considerará el cincuenta por ciento del caudal de probabilidad de excedencia de noventa y cinco por ciento, para cada mes, con las restricciones siguientes:

- i. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es menor al diez por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo para ese mes será el diez por ciento del caudal medio anual.
- ii. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es mayor al diez por ciento del caudal medio anual y menor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo será el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia.
- iii. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es mayor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo será el veinte por ciento del caudal medio anual."

Para determinar los caudales medios en fuentes sin registros fluviométricos, se utilizó la siguiente fórmula:

$$Q_1 = \frac{A_1}{A_2} \times Q_2$$

Donde:

Q1 = Caudal medio de la cuenca en estudio.

Q2 = Caudal medio de la cuenca base.

A1 = Área de la cuenca en estudio.

A2 = Área de la cuenca base.

Para lo anterior las cuencas vecinas deben tener características similares.

Así, los caudales ecológicos determinados en este estudio, es decir, que no estaban determinados previamente, se obtuvieron mediante uno de los siguientes criterios (el más limitante):

- Caudal ecológico = 10% del caudal medio anual
- Caudal ecológico = 50% del caudal mínimo del estiaje del año (con 95% de probabilidad de excedencia)

Sus resultados se presentan en el Anexo F1 / AMB.

---

## **b) Reservas ambientales**

Para obtener el consumo ambiental o de protección ambiental, se toma en consideración lo expuesto en DGA (2017c), SIT N°419, estudio denominado "Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile.

En Chile, se definen tres medios de protección ambiental:

- ✓ Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE).
- ✓ Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica.
- ✓ Sitios Ramsar

El citado estudio revisó y analizó las siguientes fuentes documentales:

- La base de información utilizada para identificar las áreas de protección SNASPE, Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica y Sitios Ramsar, en todas las regiones del país, corresponde a:
  - ✓ Mapoteca de la DGA, Unidad SIG, actualizada al año 2016.
  - ✓ Ministerio del Medio Ambiente, División de Recursos Naturales y de Biodiversidad.
- Las estadísticas de caudales medios mensuales fueron obtenidas de las estaciones fluviométricas de la web de la DGA.

Se agrega también que el estudio referido consideró estudios e iniciativas de la División de Estudios y Planificación (en conjunto con las Direcciones Regionales, y el Departamento de Administración de Recursos Hídricos) que durante los años 2009 y 2010 realizaron una serie de informes técnicos con el objetivo de proponer y analizar técnicamente los procedimientos y mecanismos para la aplicación de la Norma de Reserva por Interés Nacional (Artículo 147 Bis Inciso 3º del Código de Aguas) relacionado con la conservación ambiental y el desarrollo local de determinadas cuencas.

En estos documentos, se utilizan los siguientes principios:

- Se busca encontrar un caudal de conservación (protección) ambiental, definido por la suma del caudal ecológico más el de reserva por interés nacional, que es el tramo comprendido entre el caudal ecológico y el 20% de probabilidad de excedencia. Esto permitirá mantener la mayor parte del tiempo, en su condición natural, la distribución de caudales en la cuenca, y de esta manera mantener prácticamente inalterada la magnitud, frecuencia y duración del régimen hídrico.
- Caudal para protección ambiental:

### **Qprotección ambiental= Qprob. de excedencia 20% – Qecológico**

Este cálculo se aplica a las zonas de protección (SNASPE, Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica y Sitios Ramsar) existentes, identificando una estación fluviométrica de referencia de la red hidrométrica de la DGA en cada caso.





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

**ANEXO G  
SIG**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

# Índice General

	Página
1.1. PRESENTACIÓN.....	4
1.2. CONSIDERACIONES GENERALES Y ALCANCES DEL SIG.....	4
1.2.1. SOFTWARE Y VERSIÓN UTILIZADA .....	5
1.2.2. OBJETIVOS Y MODO DE USO DEL SOFTWARE .....	5
ESTRUCTURA DE LA INFORMACIÓN PRESENTADA.....	6
1.2.3. FUENTE PROCEDENCIA DE ARCHIVOS .....	6
1.2.4. SALIDA DE LA INFORMACIÓN: CREACIÓN DE MAPAS, CARTAS Y FIGURAS .....	6
1.3. ESQUEMA DE PRESENTACIÓN DEL PROYECTO .....	7
1.3.1. ARCHIVOS GDB.....	7
1.4. RUTA ACCESO AL DIRECTORIO SIG.....	9

---

# Sistema de Información Geográfica (SIG)

## 1.1. Presentación

El siguiente documento comprende la descripción de todos los productos y procesos cartográficos propios de un SIG, asociados a los resultados obtenidos del análisis de información hídrica de la cuenca del área de estudio, en el marco del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la Cuencas entre Río Itata y Río Biobío, de la Dirección General de Aguas (DGA).

En específico el Proyecto SIG, contiene los resultados del diagnóstico y procesamiento de información hídrica de toda la cuenca: aguas superficiales y aguas subterráneas; además de la caracterización de variables como zonas de protección ambiental, subcuencas, entre otras. El fin es lograr un análisis acabado entre las diferentes unidades territoriales y las variables asociadas a la gestión hídrica.

Finalmente, para llegar a una representación más simplificada se realiza la elaboración de *Infografías*, representación cartográfica que permite la visualización simple de aquello que se quiera mostrar al lector sin la complejidad cartográfica.

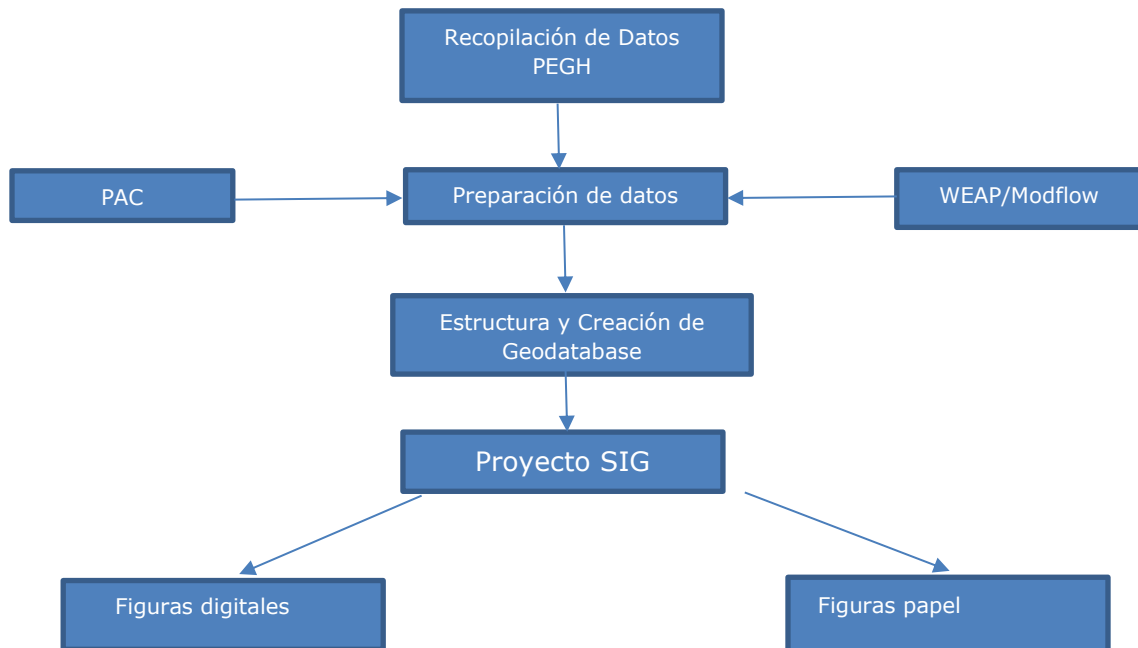
## 1.2. Consideraciones Generales y Alcances del SIG

El Estudio SIG considera las siguientes etapas:

- Reuniones de coordinación a nivel Consultoría interna, como también, con la contraparte técnica de la Dirección General de Aguas, con el fin de definir los alcances y recomendaciones.
- Recopilación y sistematización de los resultados del proyecto.
- Creación de árbol de directorios y ordenamiento de los resultados obtenidos desde las diferentes áreas.
- Estructuración del proyecto SIG para compatibilidad con ArcGIS v10.2 y la generación de geodatabases.
- Creación de los formatos \*.mxd propios de proyectos ArcGIS, elaboración de cartografía en tamaño carta, además de sus formatos de salida y visualización \*.jpg y \*.pdf.
- Presentación de resultados en formato digital y formato impreso (si es requerido por el mandante) para el proyecto.
- Creación de infografías para el Plan Estratégico.

---

La siguiente figura esquematiza los procedimientos SIG detallados anteriormente.



*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-.1.  
**Procedimientos SIG utilizados en el Estudio**

### 1.2.1. Software y versión utilizada

Por requerimiento de la DGA, los trabajos son realizados en ArcGIS versión 10.2. La generación, análisis y entrega de la información corresponden "feature class" insertos dentro de cada "Datasets" estructurando toda la información geográfica recopilada al interior de la geodatabase.

### 1.2.2. Objetivos y modo de uso del Software

La información espacial generada cumple la labor de acompañar gráficamente los informes para una mejor comprensión del lector.

Los usuarios tendrán acceso a la información de esta consultoría a partir de la Base de Datos Espacial entregada y clasificada en temáticas (Carta Base, DGA, Plan) y las Cartografías en formato PDF Y JPG.

---

## **Sistema de Referencia Espacial**

Todos los "feature class" pertenecientes a la geodatabase, son homogeneizados y transformados al sistema de proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), Datum WGS 84, Huso 18.

## **Estructura de la información presentada**

La base de datos SIG está organizada en un sistema de carpetas temáticas o data sets, la información se almacena de acuerdo con categorías. El detalle con la estructura del directorio, subdirectorio y "feature class" se define en el punto 1.2.3.

### **1.2.3. Fuente procedencia de archivos**

Los archivos utilizados para la generación de información territorial dentro del proyecto tienen distintas fuentes de origen.

En Dataset Carta Base, corresponden "feature class" de límites regionales, provinciales, comunales y división político-administrativa pertenecientes generalmente a información cartográfica del IGM.

En Dataset DGA, los archivos allí colocados corresponden a la Dirección General de Aguas.

En Dataset PLAN, contiene toda la información nueva generada para el estudio.

Hay que indicar que los archivos Raster en su mayoría son producidos a partir de elaboraciones del consultor.

### **1.2.4. Salida de la Información: creación de mapas, cartas y figuras**

Todos estos archivos *Feature Class* dentro de la Geodatabase, son editados y normalizados para su óptimo despliegue cartográfico por el equipo DGA.

Los elementos anexos de un mapa, ya sean tablas, gráficos u otros, son utilizados con el fin de complementar la información entregada en este estudio, su diseño será revisado con el fin de evitar algún tipo de saturación en el layout.

La configuración del tamaño de salida de mapas y figuras derivados de los archivos \*.mxd y layouts correspondientes se entregan en los siguientes tamaños:

- Carta o tamaño menor, para mapas o figuras insertos en el informe

Todos los mapas y figuras de salida entregados en este estudio tendrán una resolución de 300 DPI.

---

### 1.3. Esquema de Presentación del Proyecto

Se consideró una carpeta SIG, la cual organiza la información con el fin de acceder a todos los contenidos sin que el usuario se confunda, considerando la gran variedad de tópicos que involucra la generación de resultados.

A continuación, se describen aquellos elementos SIG, los cuales permiten organizar la información de manera correcta:

1. **Proyectos:** se encuentran en archivos **\*.mxd** asociados a las distintas variables dentro del área de estudio, las figuras se dividen en 3 grupos:
  - a. Figuras resumen Ejecutivo
  - b. Modelo Subterráneo y Superficial (Modelación WEAP)
  - c. PAC
  - d. Iniciativas del Plan
  
2. **Mapas, Planos y/o Figuras:** Exportaciones en formato \*.jpg, y \*.pdf de los proyectos \*.mxd, presentando la misma estructura que el punto anterior:
  - a. Figuras resumen Ejecutivo
  - b. Modelo Subterráneo y Superficial (Modelación WEAP)
  - c. PAC
  - d. Iniciativas del Plan
  
3. **Archivos GBD:** Geodatabase o Base de datos espacial contiene los archivos vectoriales asociados al proyecto SIG, será la información que el usuario final podrá manejar y representar cartográficamente. Se presentan 7 datasets temáticos que agrupan diversos feature class para el correcto entendimiento y representación. En el numeral 1.3.1, se presenta el detalle de esta información.
  
4. **Diccionario de capas:** Adicionalmente se adjunta un archivo en formato Excel, registro que entrega información detallada de la estructura de la GDB, como también de cada una de las capas de información (Feature Class) contenidas en esta base datos SIG.

---

### 1.3.1. Archivos GDB

El proyecto se presenta en una Geodatabase organizada en tres Dataset (



), donde se distribuye la información geoespacial, tanto para el desarrollo de la cartografía, cartas y figuras, como así también el almacenamiento de los archivos necesarios para la creación de los proyectos mxd. La organización de la Geodatabase se muestra en la siguiente figura.

Todas las coberturas utilizadas para la elaboración del componente SIG presentan el sistema de referencia UTM WGS84 Huso 18 sur.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura** iError! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2. Estructura Geodatabase



Fuente: Elaboración propia

**Figura** iError! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3 **Estructura de la Carpeta SIG**

**1.4. Ruta acceso al Directorio SIG**

La ruta acceso del directorio SIG utilizado en el proyecto está en la carpeta **3\_GDB\PLAN\_.gdb** incluida en la versión digital del Anexo G.

Como recomendación es necesario alojar las carpetas; 1. Proyectos MXD, 2. Figuras y 3. GDB, en el directorio "C:\" de la computadora de destino, de esta forma los proyectos MXD no perderán las rutas de conexión a cada feature Class alojados en la GDB. Es decir:

- C:\PEGH\_RIO ITATA\_RIO BIOBIO\1\_Proyectos mxd
- C:\PEGH\_RIO ITATA\_RIO BIOBIO\2\_Figuras
- C:\PEGH\_RIO ITATA\_RIO BIOBIO\3\_GDB





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO H MODELOS HIDROLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**





## ANEXOS

- **Anexo H-1.** Caracterización Hidrogeológica – Modelo Hidrogeológico conceptual en Visual Modflow Flex
- **Anexo H-2.** Modelo numérico WEAP
- **Anexo H-3.** Material de la Transferencia de Capacidades en Modelación Hidrológica

Nota: Estos anexos pueden ser encontrados solo en la versión digital del informe.



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

---



---

# Índice General

	<b>Página</b>
1. INTRODUCCIÓN	6
2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA ZONA DE ESTUDIO	7
3. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA	14
3.1. Modelo Hidrológico Conceptual Superficial	14
3.2. Modelo Hidrológico Conceptual Subterráneo	15
3.2.1. Capa Límite de Relleno Sedimentario	19
3.2.2. Campañas Geofísicas	21
3.2.3. Basamento	25
3.2.4. Pozos y Captaciones	26
3.2.5. Unidades Hidrogeológicas	28
3.2.6. Sectores Acuíferos	32
3.2.7. Tasas de Recarga	33
3.2.8. Propiedades Hidrogeológicas	35
3.2.9. Nivel Estático de las Aguas Subterráneas	38
3.2.10. Condiciones de Borde	39
3.2.11. Comentarios Adicionales sobre Dinámica Regional	43
3.2.12. Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos	44
3.2.13. Modelo MODFLOW	45
3.2.14. Modelo Conceptual Numérico Integrado	49
4. MODELO HIDROLÓGICO NUMÉRICO DE LA CUENCA	52
4.1. Cauces Superficiales	52
4.2. Subcuencas Superficiales	53
4.3. Forzantes Meteorológicas	56
4.3.1. Forzantes Meteorológicas para el Periodo Histórico	57
4.3.1.1. Fuentes de Obtención de Forzantes Meteorológicas para el Periodo Histórico	57
4.3.1.2. Validación de Modelos Meteorológicos de Precipitación y Temperatura	58
4.3.2. Forzantes Meteorológicas para el Periodo Proyectado	62

---



---

4.3.3.	Procesamiento de la Información Meteorológica	64
4.4.	Demanda de Agua Potable Urbana	65
4.5.	Demanda de Servicio Sanitario Rural	66
4.6.	Demanda de Agua para Uso Agrícola	67
4.7.	Demanda de Agua para Uso Industrial	67
4.8.	Embalses	67
4.9.	Centrales Hidroeléctricas	67
4.10.	Sectores Acuíferos	67
4.11.	Resumen Esquemático Modelo WEAP	68
4.12.	Parámetros y Factores de Ajuste	69
4.13.	Calibración del Modelo	73
4.14.	Balance Hídrico	81
4.14.1.	Balance de Aguas Superficiales	81
4.14.2.	Balance de Aguas Subterráneas	83
4.15.	Escenarios de Gestión	85
4.15.1.	Escenario de Gestión de Cambios de Uso del Suelo	85
4.15.2.	Escenario de Gestión de Aumento Poblacional	86
4.15.3.	Escenario de Gestión de Trasvase mediante Acueducto Litoral Biobío Norte	87
5.	BRECHAS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA	88

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente anexo se detalla todo lo referente a la modelación superficial y subterránea de la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío, tanto en el ámbito conceptual como en el numérico.

El modelo conceptual superficial se presenta de manera simple, mencionando las principales localidades de la cuenca y los cauces más importantes, correspondientes al río Andalién y río Pingüeral. Además de estos ríos principales, en la zona se encuentran muchos esteros de menor importancia y escaso caudal, que desembocan en el océano Pacífico.

Por su parte, el modelo conceptual subterráneo se divide en una serie de subcapítulos, con el fin de individualizar y explicar en detalle cada una de las propiedades hidrogeológicas y geográficas que lo componen, y que podrían ser incluidas en un futuro modelo numérico subterráneo. Tales propiedades corresponden a niveles estáticos, sectorización de los acuíferos, profundidad del basamento, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, entre otras.

El modelo numérico se desarrolla en la plataforma WEAP (*Water Evaluation And Planning System*). Este software permite la modelación tanto superficial como subterránea de la cuenca, aunque se especializa en la componente superficial. Se ha estructurado el modelo considerando las subcuencas superficiales delimitadas mediante herramientas SIG y subdivididas en bandas de elevación y usos de suelo, además de los principales cauces. Para la información de entrada al modelo WEAP, se seleccionaron distintos modelos para la extracción de series de tiempo de forzantes meteorológicas, los cuales, en el caso de la precipitación y temperatura, fueron validados con observaciones de estaciones cercanas.

WEAP es una plataforma que se caracteriza por entregar una gran variedad de herramientas que permiten evaluar medidas para la gestión de recursos hídricos en la cuenca, considerando no solo aquellos aspectos que corresponden a la representación de la hidrología natural en la cuenca, sino que también aquellas actividades antrópicas llevadas a cabo por los actores presentes en la zona y que corresponden a un aspecto importante en el balance hídrico de la zona de estudio; actividades tales como consumo sanitario en localidades y labores industriales. Una vez representada la cuenca en estudio en WEAP, tanto en su componente superficial como subterránea, y mediante la utilización de proyecciones de forzantes meteorológicas que consideran efectos de cambio climático (resultados de modelos de circulación general, MCG), es posible evaluar la situación de la cuenca con un horizonte temporal hasta el año 2060, que permita cuantificar y dimensionar las necesidades hídricas a futuro y proponer medidas para su mitigación.

---

## 2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se recopilan algunos estudios realizados en la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío y que pueden ser de utilidad para el desarrollo del modelo numérico superficial.

Cabe destacar que se ha encontrado un único estudio anterior de modelación superficial en la zona del presente plan, el cual fue realizado el año 2010 por la DGA bajo el nombre de **“Aplicación de Modelación Superficial en Cuencas Pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía”**. Este estudio utilizó el modelo de precipitación – escorrentía SIMED en las cuencas de río Pingueral y río Andalién, representando los procesos de evapotranspiración, infiltración, almacenamiento de humedad, generación de escorrentía directa, percolación profunda y flujo base de las cuencas. Como resultado de la modelación se obtuvieron caudales mensuales medios para distintas probabilidades de excedencia. Dentro de la información del modelo SIMED que puede ser de utilidad para el modelo a desarrollar en WEAP, se pueden considerar los 11 parámetros calibrados, que incluyen conductividad hidráulica, porosidad del suelo, capacidad de campo, coeficiente de precipitación y poder evaporante de la atmósfera, entre otros.

A pesar de que este plan solo contempla la modelación de las aguas subterráneas a través de las herramientas que proporciona WEAP, la que más bien es una plataforma orientada a la modelación de aguas superficiales, sí se realizará un modelo conceptual hidrogeológico, para el cual serán de utilidad los estudios hidrogeológicos anteriores en la cuenca, como el modelo MODFLOW desarrollado por Aqualogy Medioambiente Chile S.A en el acuífero de Talcahuano para el proyecto **“Levantamiento Hidrogeológico en Cuencas Pluviales Costeras en la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins, Del Maule y del Bío-Bío, Etapa 2”** del año 2013. De este estudio podría ser útil la información relacionada a la geometría y sectorización del acuífero, sus valores de recarga y flujos, entre otros datos.

Sin perjuicio de lo anterior, a continuación, se presenta una descripción resumida de los estudios previos realizados en el área de interés, que han sido recopilados para ser revisados y analizados en detalle, y así obtener información de utilidad para desarrollar los planes de cuencas del presente estudio. Los estudios se presentan ordenados, a criterio de este consultor, según su grado de utilidad para el estudio a realizar y en todos los casos la información que se obtenga de ellos deberá ser revisada, completada y actualizada por este consultor.

---

**Aplicación de Modelación Superficial en Cuencas Pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía, Dirección General de Aguas; Realizado por División de Estudios y Planificación, S.D.T. N° 302, septiembre de 2010.**

Debido a la creciente demanda por recursos hídricos, se hace imperante el avance en la determinación de la oferta hídrica. En este contexto, la DGA ha desarrollado un modelo de escorrentía diaria llamado SIMED, diseñado para cuencas pluviales. El objetivo de este estudio fue implementar el modelo anterior en 26 cuencas pluviales de tres regiones del país, para la generación de los caudales superficiales mensuales de distintas probabilidades de excedencia; información de utilidad para establecer la oferta en estas cuencas y además ser referencia para otras cuencas similares.

Entre las 26 cuencas escogidas para el estudio se encuentran las asociadas a las estaciones fluviométricas de río Andalién camino a Penco y la de río Pingüeral en Dichato. El modelo de precipitación - escorrentía SIMED ha sido utilizado por la DGA en varias cuencas del país y tiene la ventaja de necesitar menos parámetros para su implementación y calibración que otros modelos. Usa como datos de entrada la lluvia diaria y la evaporación mensual de la cuenca, los que son llevados a escala horaria, además de otros parámetros relacionados a características del suelo.

**Levantamiento Hidrogeológico en Cuencas Pluviales Costeras en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región del Bío-Bío, Dirección General de Aguas; Realizado por Aqualogy Medioambiente Chile S.A. Informe final S.I.T. N° 318, noviembre 2013.**

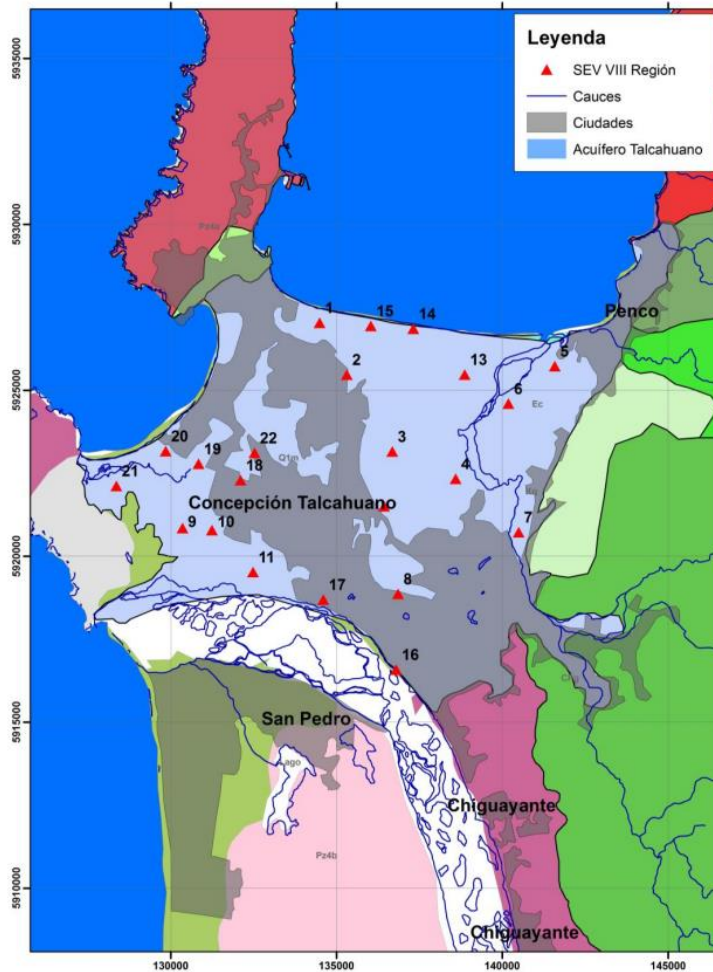
El año 2013 finalizó este estudio desarrollado por Aqualogy Medioambiente Chile S.A., que consistió en un levantamiento hidrogeológico para conceptualizar nueve acuíferos ubicados en las cuencas costeras de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y la Región del Biobío. Además, se realizó posteriormente una modelación matemática de dos de los acuíferos, siendo uno de ellos el acuífero de Talcahuano ubicado en la cuenca costera entre río Itata y Biobío. Los objetivos específicos definidos en este estudio fueron los siguientes:

- Generación de la geometría de los acuíferos.
- Sectorización de acuíferos que representen fuentes o unidades de aprovechamiento común.
- Catastrar y estimar de la demanda agrícola, sanitaria e industrial.
- Estudio de prospección geofísica para determinar la geometría del acuífero.
- Campaña de terreno para identificar y/o verificar las principales zonas de recarga y descarga.
- Estimación del volumen almacenado y de los flujos subterráneos.
- Estimación de recargas de precipitación, ríos y recargas agrícolas al sistema acuífero.
- Desarrollo de una herramienta SIG acorde las necesidades de visualización regional y local.
- Formulación de modelos conceptuales que representen el funcionamiento del acuífero.

- 
- Implementación y calibración de modelos numéricos de aguas subterráneas en régimen permanente, desarrollado en Visual Modflow Premium.
  - Proposición de una red de monitoreo de niveles y de calidad de aguas subterráneas en el acuífero.

El método de prospección geofísica utilizado en este estudio fue el de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), la ubicación de las estaciones en el acuífero de Talcahuano se observa en la **Figura 2-1**. Algunas conclusiones del estudio con respecto al acuífero de Talcahuano son:

- Aun explotando la totalidad de los derechos constituidos, se tiene un comportamiento similar al de régimen natural, incluso, los caudales de explotación podrían incrementarse en un 550% respecto del total actual, además de poder crear nuevas zonas de explotación de pequeña entidad.
- Presenta riesgo de intrusión salina en caso de querer incrementar la demanda en la zona. Motivo por el cual se recomienda realizar un seguimiento de esta variable de forma más o menos continuada.
- Se recomienda obtener un registro continuo de los niveles en los acuíferos (medidas mensuales o cada dos meses) en distintos puntos de los acuíferos, para lo cual se ha propuesto una red de medición en cada uno de ellos, además de una cuantificación de las explotaciones a nivel mensual para su posterior calibración en régimen transiente.
- Asimismo, para el mejor ajuste y fiabilidad del modelo se recomienda la obtención de una topografía a escala 1:5.000 y una campaña de medición topográfica de precisión en los puntos de nivel observados.



Fuente: DGA (2013)

**Figura 2-1 Ubicación de mediciones SEV en el acuífero de Talcahuano.**

**Levantamiento Hidrogeológico en Cuencas Pluviales Costeras en la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins, Del Maule y del Biobío, Etapa 2, Dirección General de Aguas; Realizado por Aqualogy Medioambiente Chile S.A. Informe final S.I.T. N° 346, noviembre 2014.**

Aqualogy Medioambiente Chile S.A. finalizó este estudio el 2014, que abarcó la definición hidrogeológica conceptual de 13 acuíferos ubicados en cuencas costeras de las regiones del Libertador General Bernardo O’Higgins, del Maule y del Biobío. Dentro de la zona de estudio se consideraron dos cuencas costeras entre río Itata y Biobío: la cuenca entre río Itata y río Pingüeral (incluido) y la cuenca del río Andalién.

El producto principal fue un modelo conceptual de cada acuífero y el desarrollo de una herramienta de gestión que integra los modelos conceptuales y balances hídricos, sirviendo ésta para conocer la disponibilidad hídrica en cada acuífero y/o cuenca de estudio. Adicionalmente, se desarrolló un modelo numérico aluvial en entorno MODFLOW del

---

acuífero Biobío bajo, integrado con los acuíferos de San Pedro de la Paz y Talcahuano, el cual es una herramienta de gestión más completa y que integra los distintos componentes del sistema hidrogeológico.

Como parte del estudio se incluyó una campaña de terreno en la cual se obtuvo como resultado el catastro de captaciones y demanda hídrica, medida de niveles estáticos y prospección geofísica con método Electromagnético y Gravimétrico. Estos resultados junto con los modelos desarrollados pueden ser de utilidad para el presente plan.

**Diagnóstico Actual del Riego y Drenaje en Chile y su Proyección. Diagnóstico del Riego y Drenaje en la VIII Región, Comisión Nacional de Riego; Realizado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. y Ac Ingenieros Consultores Ltda., febrero de 2003.**

Este trabajo fue parte del estudio "Diagnóstico Actual de Riego y Drenaje en Chile y su Proyección", enfocado en la Región del Biobío. Sus objetivos fueron: presentar una síntesis del estado actual de la actividad agrícola, señalar los problemas y causas que afectan u obstaculizan el desarrollo de esta y actualizar la información de áreas regadas y regables en la región.

Debido a la falta de antecedentes de la cuenca costera entre Itata y Biobío, solo se caracterizó la zona de la cuenca del río Andalién. Al respecto, se señala que, en la localidad de Florida, existe un estrato acuífero de un espesor medio de 10 m, transmisibilidades de sólo 50 m<sup>2</sup>/día y napa freática a nivel superficial. A orillas del río Andalién en las cercanías de Concepción, es posible apreciar un nuevo acuífero compuesto por material sedimentario tipo arena media, de espesores entre 6 y 10 m, ubicado a profundidades entre los 2 y 16 m. Los niveles de la napa varían entre 0,8 y 4,0 m de profundidad. En la desembocadura del río, aparece un estrato acuífero muy superficial, compuesto en gran parte de material fino, por lo que presenta transmisibilidades menores, del orden de los 50 m<sup>2</sup>/día. Finalmente, en las cercanías de Talcahuano y Hualpencillo, el acuífero presenta estratos alternados de arenas y arcillas de espesores variables entre 2 y 10 m, con transmisibilidades de 60 m<sup>2</sup>/día.

---

**Efecto del Cambio Climático en la Seguridad Hidrológica de Obras Hidráulicas. Análisis en Cuencas Pluviales de la Zona Central de Chile para el Escenario A2, Daniela Raddatz. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile, abril 2011.**

Esta memoria de título tuvo como objetivo principal estudiar la variación de la seguridad hidrológica de obras hidráulicas ubicadas en cuencas pluviales de la zona central de Chile, para el escenario de emisiones A2 en el periodo 2070-2100. Entre los objetivos específicos se encontraron:

- Cuantificar la variación de los caudales de diseño de obras hidráulicas en el periodo actual y futuro.
- Verificar la validez de las relaciones Geomorfológicas propuestas por Salvatierra (2008).
- Verificar la aplicabilidad del modelo GR4J en las cuencas de estudio.

El estudio considero nueve cuencas puramente pluviales en la Región del Biobío, de las cuales dos de ellas pertenecen a la cuenca costeras entre río Itata y Biobío: Río Pingueral en Dichato y Río Andalién camino a Penco. El modelo CR4J es un modelo conceptual de precipitación – escorrentía que necesita dos parámetros de entrada, precipitación y evaporación. Los resultados en ambas cuencas indican importantes disminuciones en los caudales medios diarios máximos en el escenario futuro, lo que implicaría un aumento en la seguridad hidrológica de las obras.

**Actualización del Balance Hídrico Nacional, Dirección General de Aguas; Realizado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. Informe Final, octubre de 2017.**

La actualización del Balance Hídrico Nacional nace de la necesidad de incorporar 30 años de nuevos registros y nuevas fuentes de información in situ y remota. El objetivo del proyecto fue definir y aplicar una metodología para el balance hídrico a nivel nacional, considerando proyecciones por cambio climático y que pueda usarse como línea base para estudios hidrológicos posteriores.

El proyecto se desarrolló en 4 etapas, logrando cubrir todo el territorio nacional. En esta primera etapa se aplicó la metodología a cinco cuencas piloto de las distintas macrozonas del país: Loa, Choapa, Maipo, Imperial y Aysén. La caracterización de las zonas de estudio y los inputs del modelo en VIC se obtuvieron de fuentes de información como estaciones hidrometeorológicas, datos de percepción remota, reanálisis atmosférico, mediciones en terreno y otros. Además, se desarrolló el CR2-Met, un producto grillado de 0,05°x0,05° y resolución temporal de tres horas, con información de precipitación y temperaturas máxima y mínimas, entre los años 1985 y 2015.

---

**Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral, Dirección General de Aguas; Realizado por la Universidad de Chile, SIT-441 2019**

El objetivo de este estudio fue aplicar la metodología de la Actualización del Balance Hídrico (DGA, 2017b) a las cuencas entre la Región de Ñuble y parte norte de la Región de Aysén, donde se incluye a las cuencas costeras entre los ríos Itata y Biobío.

Este estudio utilizó la metodología corregida en la actualización del balance hídrico para macrozonas norte y centro (DGA, 2018), que incluyó automatizar la calibración de parámetros, incorporar métodos de transferencia de parámetros para píxeles en cuencas muy intervenidas y considerar el aporte glaciar a la estimación de caudales. Además, en esta etapa se añadieron nuevas correcciones a las ya nombradas y se actualizó el producto CR2-Met de precipitaciones. Por otro lado, se obtuvieron forzantes asociadas a cuatro GCM en el escenario RCP 8.5, entre los años 2030 y 2060. Estos últimos resultados, junto con los flujos estimados por VIC para las cuencas costeras entre río Itata y Biobío pueden ser un insumo de gran utilidad para el presente plan.

---

### 3. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA

El modelo conceptual de la cuenca se concibe como una caracterización de las fracciones superficial y subterránea de la zona de estudio, identificando sus componentes principales, las interacciones existentes entre ambos componentes de la cuenca, descripción de las entradas y salidas de agua, entre otras características.

#### 3.1. Modelo Hidrológico Conceptual Superficial

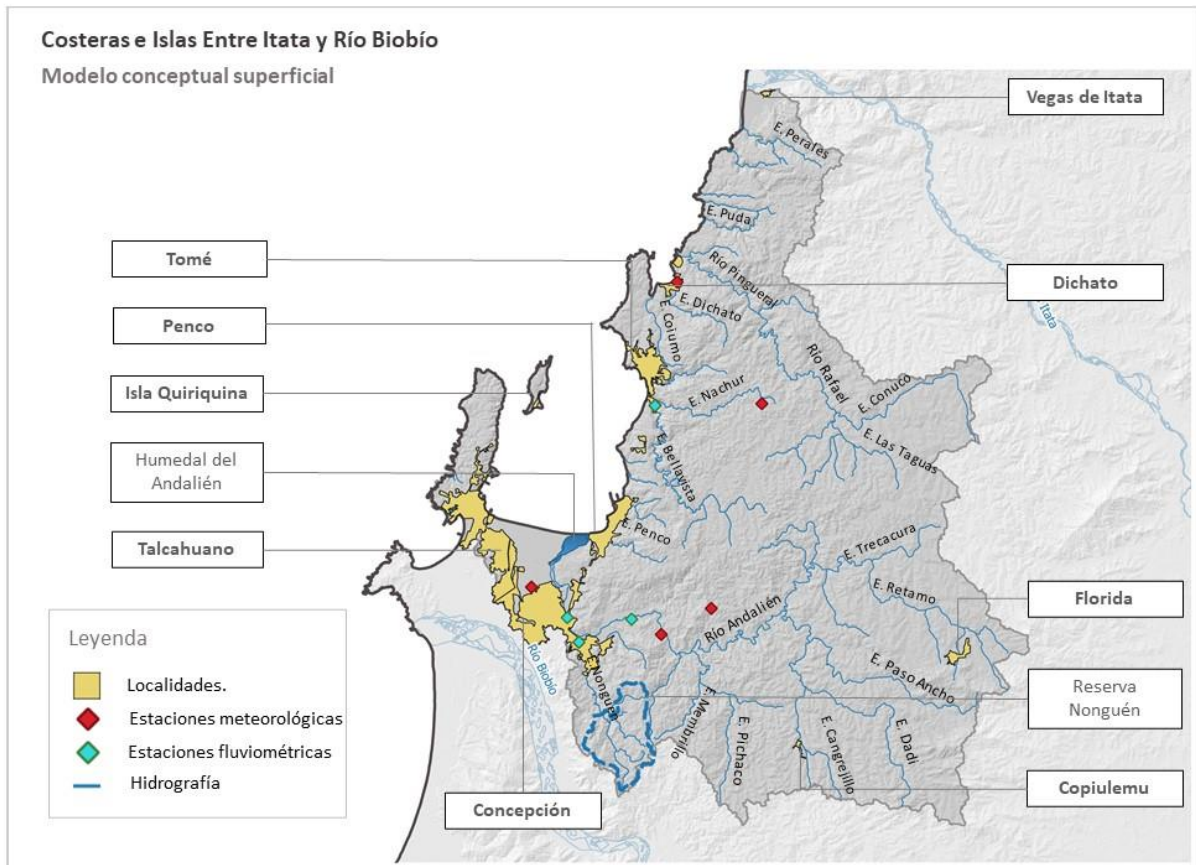
Las cuencas costeras e islas entre río Itata y río Biobío se encuentran en la zona norte de la Región del Biobío y parte de la Región del Ñuble, con una extensión cercana a los 1500 km<sup>2</sup>, drenan gran parte de la zona costera entre Vegas del Itata y la parte norte de Talcahuano. Debido a su ubicación costera y a las bajas altitudes de su topografía, las cuencas presentan un régimen puramente pluvial y son exorreicas. Se extienden desde la cordillera de la Costa, pasando por planicies litorales, hasta los llanos de sedimentación fluvial que se desarrollan contiguos al curso distal del río Biobío. Al norte limitan con la cuenca del río Itata y al sur con la cuenca del río Biobío.

El clima de la zona está marcado por la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que se desarrollan inmediatamente al sur del río Biobío. En la zona costera y este de la cordillera de la Costa se presenta un clima templado cálido con lluvias invernales, además la costa se caracteriza por una gran humedad atmosférica. Se presentan lluvias todo el año, donde la precipitación del mes más seco en verano podría ser inferior a un tercio de la del mes más lluvioso de invierno. Los principales cauces de la cuenca, presentados en la **Figura 3-1**, son el río Andalién, río Rafael y río Pingueral. Los otros cauces corresponden en su mayoría a esteros y quebradas de caudal esporádico, asociados a eventos de precipitación importante.

Los asentamientos urbanos se concentran mayoritariamente en la parte suroeste de la cuenca; el área metropolitana del Gran Concepción, que incluye localidades como Concepción, Talcahuano y Penco, es el segundo conglomerado urbano de Chile. En general, gran parte de la población se abastece de agua de fuentes superficiales, sin embargo, el recurso subterráneo cobra cada vez más relevancia y es extraído para su uso en riego, industrias, actividad forestal, entre otras. La empresa que presta los servicios de agua potable y saneamiento en la cuenca es Essbio S.A.

Existe gran diversificación de actividades económicas en la cuenca, entre las que destacan la actividad forestal, pesquera e industrial. No existe actividad agrícola relevante para incluir en la modelación.

La red de monitoreo de la DGA cuenta con 5 estaciones meteorológicas y 4 fluviométricas vigentes en la cuenca. Estas estaciones se pueden observar, junto con lo detallado en párrafos anteriores, en la **Figura 3-1**.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-1 Modelo conceptual superficial de la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío**

### 3.2. Modelo Hidrológico Conceptual Subterráneo

En este apartado se presenta el modelo conceptual subterráneo de las cuencas costeras entre ríos Itata y Biobío, cuyo propósito es representar fielmente el comportamiento hidrogeológico de esta zona. Lo anterior se realiza por medio de estudios en la zona que identifican características de agua subterránea, como también, complementando información con los resultados de las campañas geofísicas en terreno que son parte del desarrollo de este estudio (ver Documentos de apoyo en los apéndices del Anexo H-1).

La modelación hidrológica subterránea comprende la simulación de las características del recurso hídrico de los acuíferos en la cuenca, la cual se lleva a cabo identificando la interacción de estos recursos con los diferentes componentes de recarga y descarga de agua repartidos espacialmente en unidades hidrogeológicas del modelo. De esta manera, se intenta representar lo mejor posible los flujos subterráneos de la cuenca costeras entre los ríos Itata y Biobío, cuyo objetivo es incluir el mayor porcentaje de la cuenca que tenga un relleno significativo para obtener un resultado.

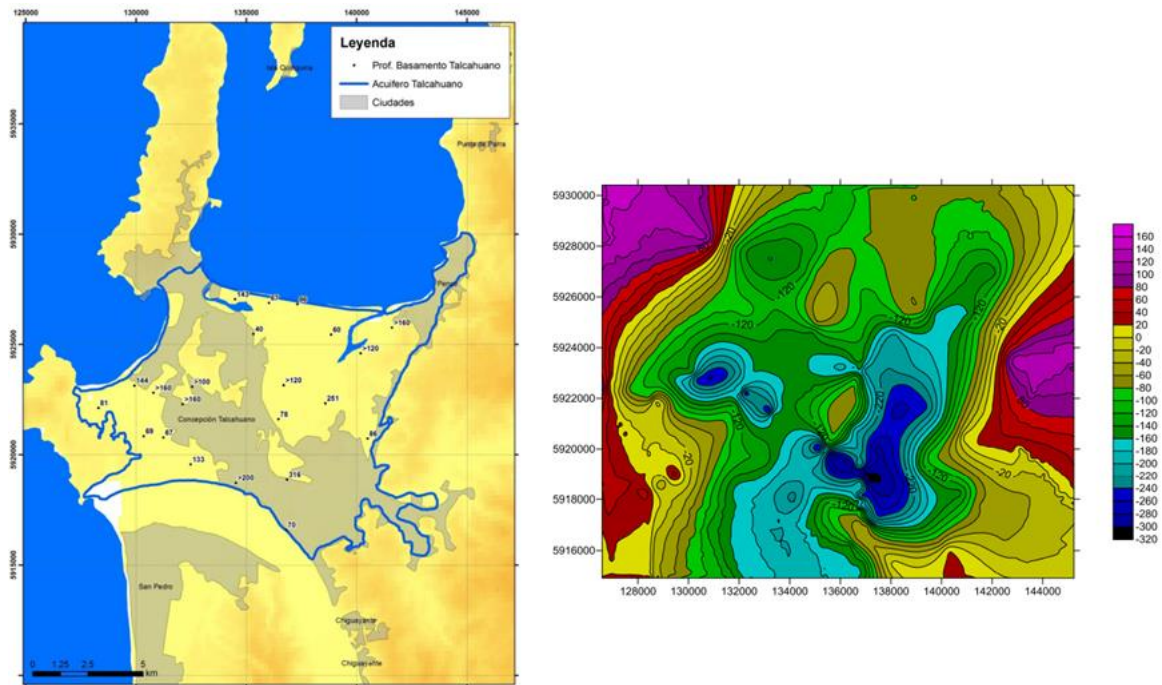
---

La zona de modelación comprende desde las coordenadas UTM 662738 E 5970638 N hasta 709795 E 5915993 N (datum WGS84 huso 19S). La cuenca al estar en la zona costera, sus principales acuíferos se distribuyen en la zona litoral y algunos sectores de la cordillera de la Costa. En la zona litoral, en la ciudad de Concepción y Talcahuano, se concentran unidades geológicas conformadas por sedimentos de arena y grava de deposición fluvial desde el río Biobío principalmente. En la zona de la cordillera de la Costa, existen rellenos sedimentarios de carácter fluvial asociados a quebradas naturales de escurrimiento de evacuación de lluvias. Estas últimas unidades de la zona cordillera de la Costa representan quebradas muy estrechas, de no más de 300 m de ancho, cuyas profundidades también van en el orden de 10 m en promedio, lo que genera que todos estos sectores de quebrada fueron considerados como una única unidad hidrogeológica. Pese a lo anterior, estas fueron incluidas para comprender conceptualmente la mayor extensión de zonas que poseen propiedades de almacenamiento de agua subterránea pese a sus limitadas características y no solo mostrar las propiedades que existen en el acuífero principal ubicado debajo de la ciudad de Concepción y Talcahuano.

Como se señaló en el capítulo 2, existe un único estudio anterior (DGA, 2014) que contempla modelación subterránea en la cuenca, específicamente en el acuífero de Talcahuano. Este acuífero es el de mayor interés hidrogeológico en la cuenca y se clasifica como un cuerpo detrítico de comportamiento libre. Está relacionado a los ríos Andalién y Biobío, y muy ligado a las descargas subterráneas al mar.

Como parte del levantamiento hidrogeológico del estudio del 2014, se realizó una campaña geofísica con el método SEV, que permitió estimar la profundidad del basamento en distintos puntos de acuífero. Los resultados de la campaña y las profundidades del basamento ingresadas en el modelo MODFLOW se muestran en la **Figura 3-2**. Se pueden observar importantes profundidades, que van desde los 40 m, hasta superar los 300 m en la zona suroeste del acuífero.

En este mismo antecedente mencionado anteriormente se pudo identificar los valores asociados a la permeabilidad (conductividad eléctrica) en el acuífero, los que indican un mayor tiempo de residencia del agua en la roca que en la parte media y alta de la cuenca, pero de agua de baja mineralización. En la zona costera noroeste se han registrado conductividades superiores a 20.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que genera una importante salina en el borde del acuífero, que se corroboró con campañas geofísicas en esa zona (ver acápite 3.2.2).



Fuente: DGA (2014)

**Figura 3-2 Profundidades de basamento según resultados de campaña geofísica en acuífero de Talcahuano**

Otro antecedente que se consideró para identificar y conocer distintas unidades hidrogeológicas del acuífero fue la carta geológica de Sernageomin (2003), presentada en la **Figura 3-3**. Principalmente se identifican 8 principales unidades geológicas dentro del área de estudio las cuales se pueden agrupar en 4 zonas de norte a sur.

En el sector norte, con el límite del río Itata, en la zona costera existen secuencias sedimentarias provocadas por depósitos fluviales de grava, arena y limo del periodo Pleistoceno – Holoceno. Estas últimas limitan al sur con una formación costera de la cordillera de la Costa que se compone principalmente por roca metamórfica (pizarras, filitas y metareniscas) con un metamorfismo de bajo gradiente.

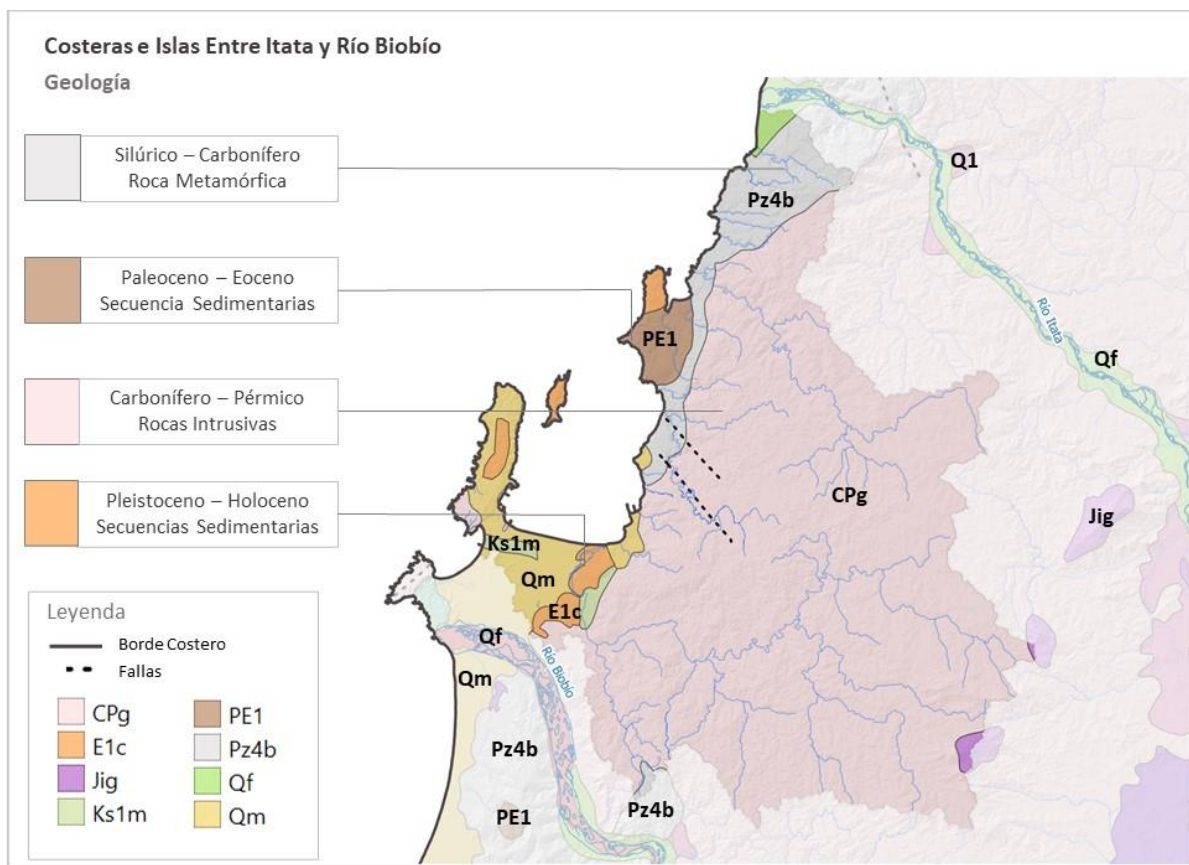
Luego, en la zona media del sector costero, se genera una pequeña bahía en la localidad de Dichato, con propiedades geológicas compuesta por sedimentos marinos y transicionales de areniscas, limolitas calcáreas y mantos de carbón provenientes de la cordillera de la Costa de la época del Paleoceno-Eoceno Inferior.

Detrás de la sección de la cordillera de la Costa que limita con el océano Pacífico hay una gran extensión de una única unidad geológica donde se ubican los sectores de acuíferos más angostos en las quebradas de río. Esta gran extensión es principalmente roca intrusiva compuesta de granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, del periodo Carbonífero-Pérmico.

Finalmente, al sur de la cuenca, limitando con el río Biobío, existe una formación geológica compuesta principalmente de depósitos litorales arenas y gravas de playas de playas

actuales, es decir, durante el periodo del Pleistoceno – Holoceno, la cual alberga la principal fuente de agua subterránea en toda el área de estudio.

Con relación a fallas en la tectónica en la zona, se visualizan dos fallas en la cuenca, de orientación noroeste, ubicadas cerca de la costa y al sur de la ciudad de Tomé, las cuales no serían de gran importancia y no se encontrarían activas según la información provista por la base de datos del sitio <https://fallasactivas.cl/>.



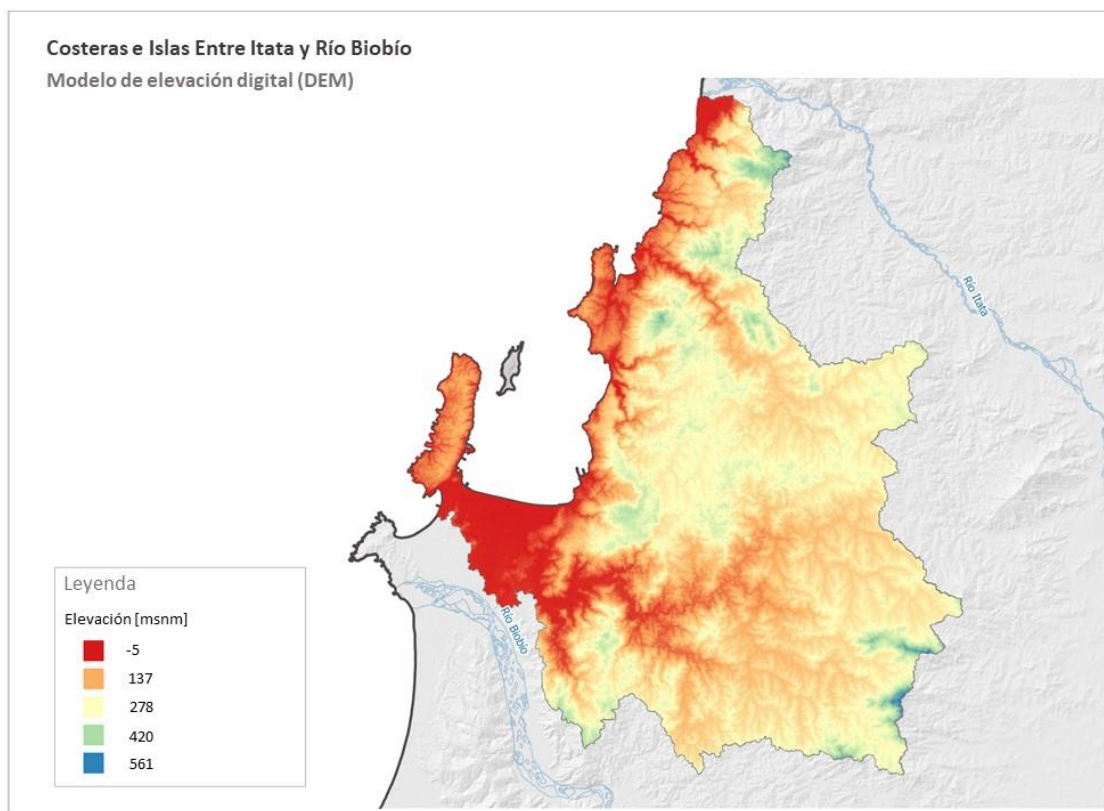
Fuente: Elaboración propia a partir de Sernageomin (2003)

**Figura 3-3 Mapa geológico de la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío**

Teniendo en consideración estos antecedentes descritos, continua describir el detalle de las campañas y procesos que permitieron la obtención del modelo conceptual subterráneo de la cuenca, así como el detalle de las capas que lo conforman.

### 3.2.1. Capa Límite de Relleno Sedimentario

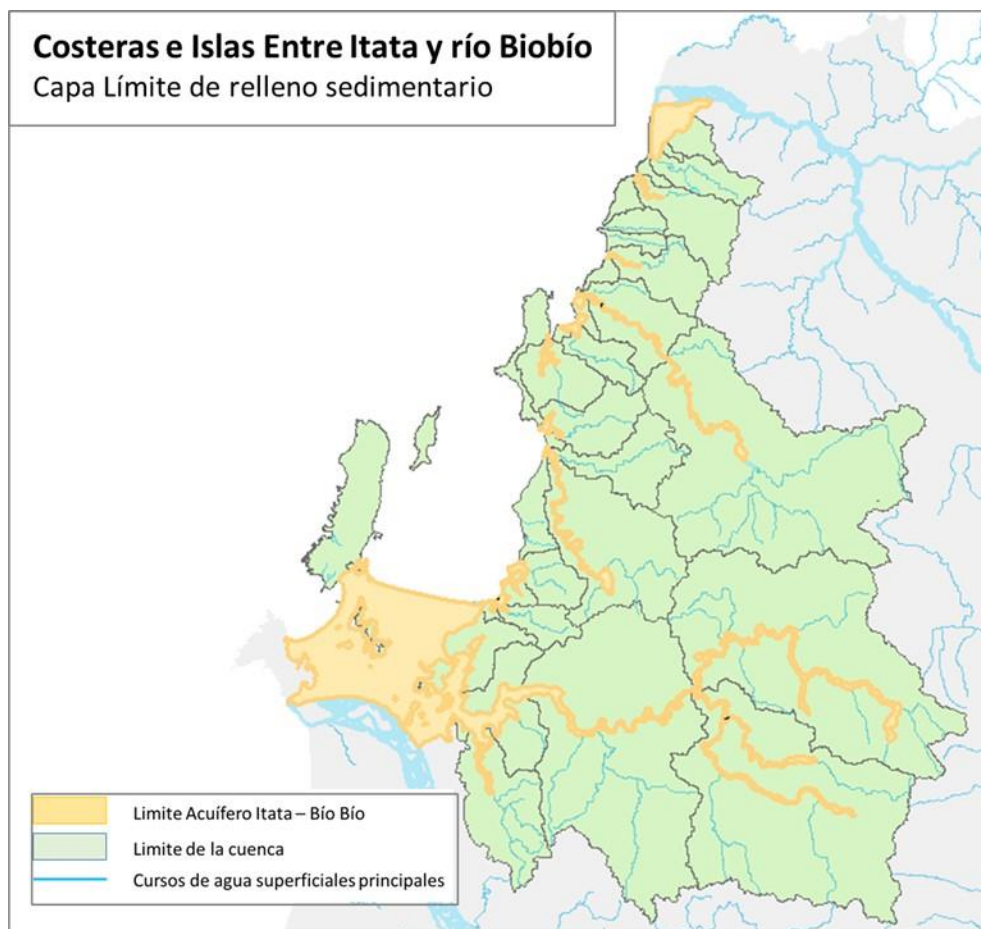
Para identificar y determinar el límite del acuífero fueron considerados dos principales fuentes de información. La primera es el estudio realizado por DGA (2014), que corresponde al único antecedente del área acuífera en la cuenca. En segundo lugar, fue seguir los cauces de los ríos, considerando el relieve mostrado en Google Earth y el modelo de elevación digital DEM ASTER Global Digital Elevation Model V003 de la NASA, presentado en la **Figura 3-4**, en este se observa que las elevaciones aumentan paulatinamente en dirección Este y alcanzan un máximo de 561 m.s.n.m.



Fuente: Elaboración propia a partir de DEM ASTER Global Digital Elevation Model V003

**Figura 3-4 DEM cuenca costera entre ríos Itata y Biobío**

Como resultado de lo anterior, el límite entre la zona de relleno sedimentario que compone la principal zona de acuífero de la cuenca se presenta en la **Figura 3-5**.



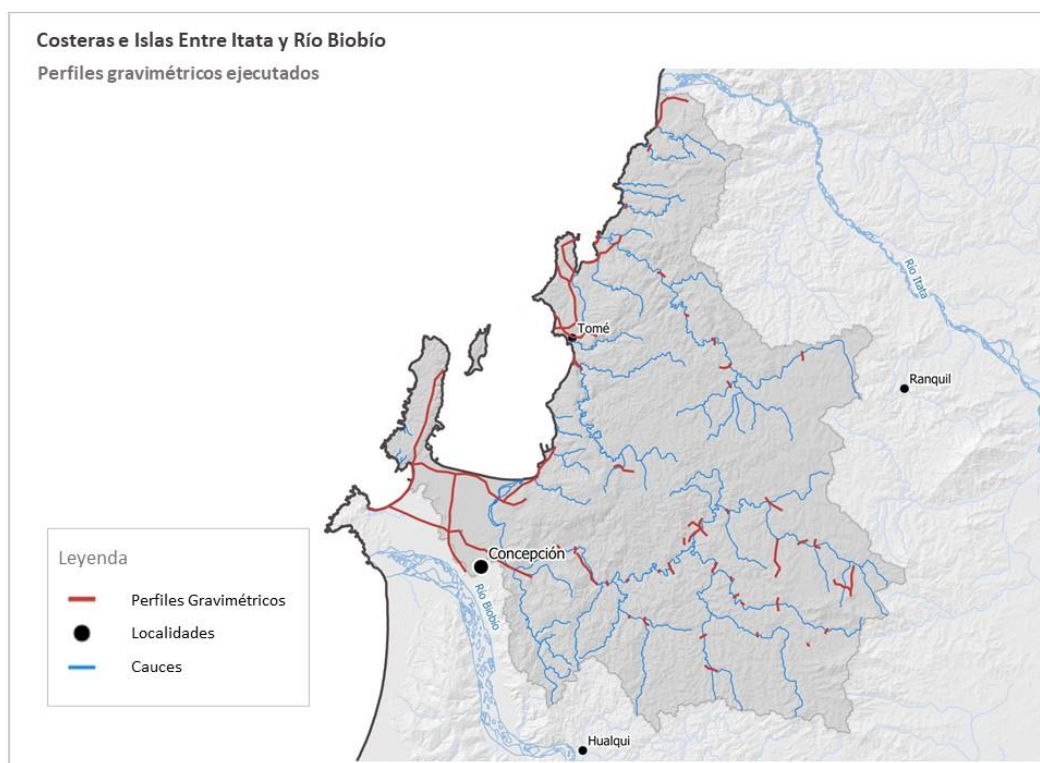
Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-5 Capa límite de relleno sedimentario**

### 3.2.2. Campañas Geofísicas

La campaña de levantamiento geofísico realizada para este plan comprende dos etapas: gravimetría y prospección TEM. Esta campaña tiene por objetivo determinar la geometría de los embalses subterráneos, la composición y constantes elásticas de las unidades hidrogeológicas, además de la presencia de agua (piezometría) en la cuenca de estudio.

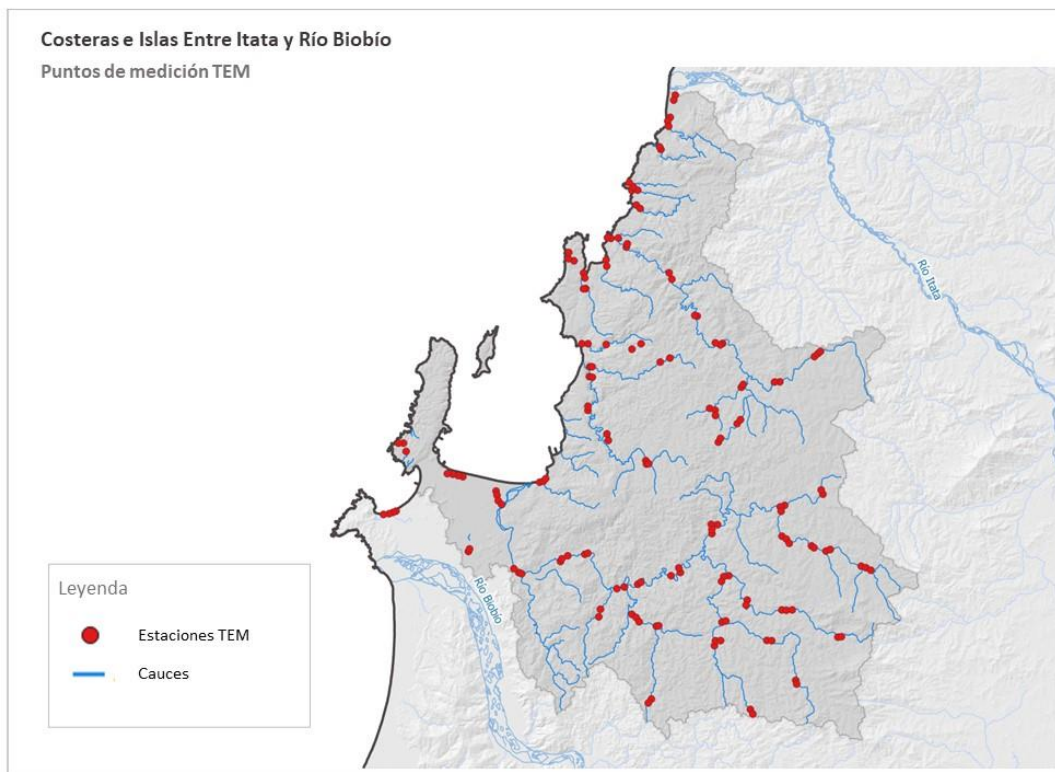
La campaña gravimétrica consiste en medir la gravedad en distintos puntos de la superficie del terreno, con el objetivo de visualizar en un mapa la distribución de la morfología gravitatoria del área estudiada, para identificar los **límites del relleno sedimentario** de la cuenca. En este levantamiento se determina la variación de la gravedad (positiva o negativa) en distintas estaciones con respecto a una estación de referencia. En la **Figura 3-6** se observan las 303 estaciones gravimétricas realizadas, las cuales se distribuyeron en 51 perfiles. Mayor detalle de los resultados de la campaña gravimétrica puede ser consultado en el Anexo H-1.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-6 Campaña gravimétrica realizada en la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío**

La campaña de prospección TEM permite representar la geometría y constantes elásticas de los estratos presentes en los acuíferos asociados al área de estudio. Esta se realiza con el método de transiente electromagnético (TEM), que consiste en la emisión de un pulso de corriente de frecuencia variable a través del subsuelo, en diferentes estaciones TEM. Con esto se determina la estratigrafía, la presencia de agua en el acuífero y a qué profundidad aproximada se encuentra. La campaña ejecutada incluye 150 estaciones repartidos en 61 perfiles, como se observa en la **Figura 3-7**.



Fuente: Elaboración propia

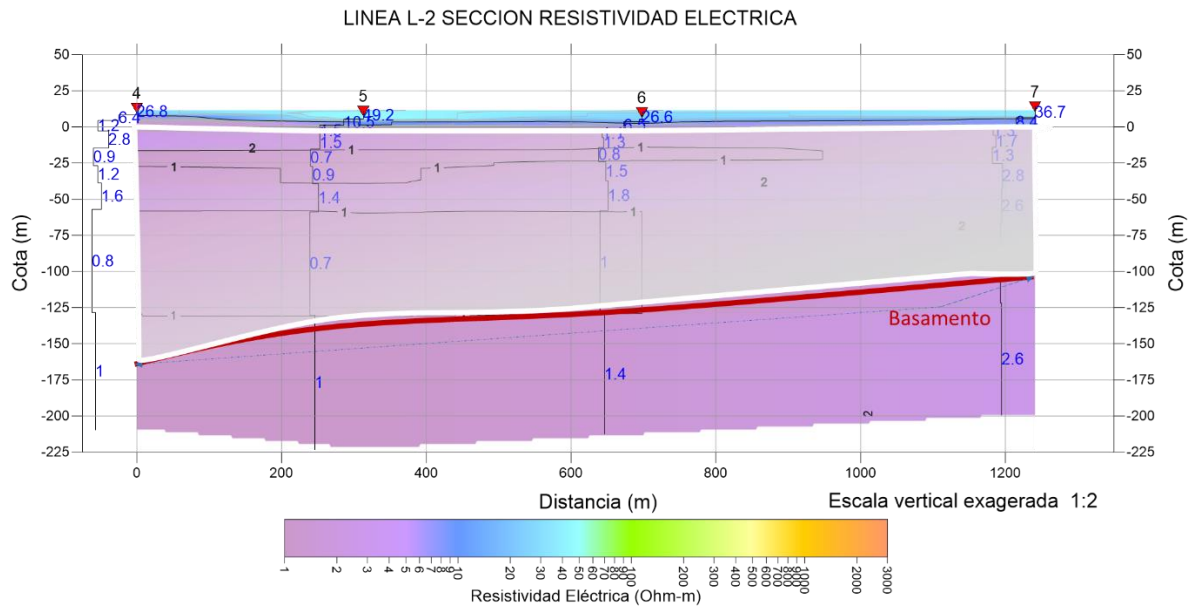
**Figura 3-7 Estaciones TEM ejecutadas en campaña**

---

Los informes de resultados y mediciones de las campañas pueden ser consultados en las carpetas *Campaña Gravimétrica* y *Campaña TEM* de los Documentos de Apoyo en el Anexo H-1. También en Documentos de Apoyo se encuentran las minutas de ambas campañas, que incluyen su diseño preliminar, el cual es levemente distinto a la campaña realizada producto de algunos obstáculos encontrados durante el terreno, como problemas de acceso o cercanía a tendidos eléctricos.

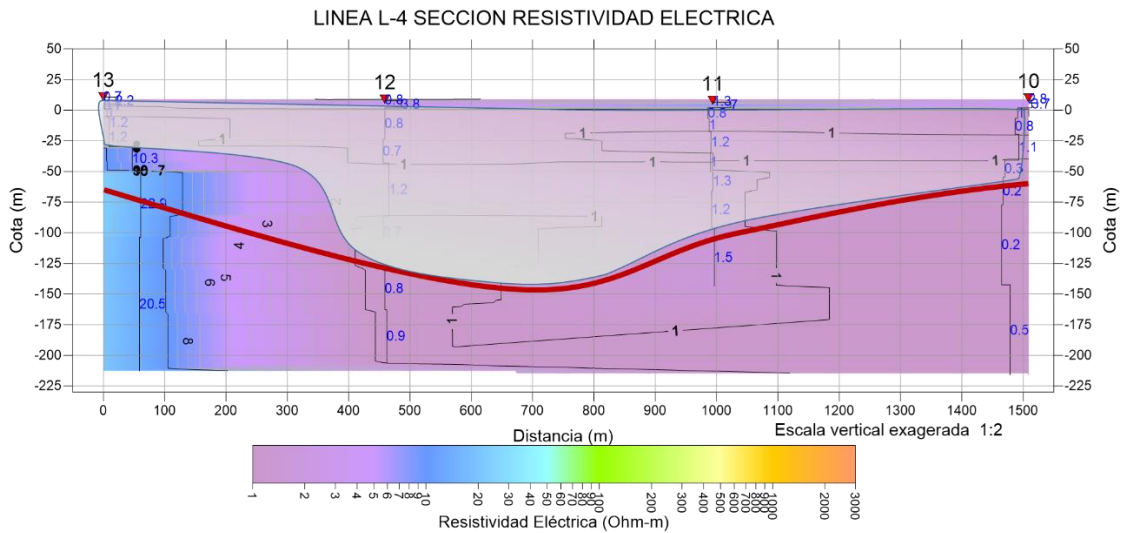
La interpretación inicial de los resultados obtenidos indica que las mayores profundidades de basamento se encuentran en el acuífero de Talcahuano, obteniéndose profundidades promedio de entre 175 y 160 m desde la superficie. Por otro lado, la zona costera de Penco y Dichato también entregan profundidades de basamento destacables alcanzando valores de profundidades cercanos a los 155 m en algunos puntos de medición.

Es importante destacar que en este acuífero (asociado al sector costero) se encuentran muchos humedales, por lo que además de poseer las mayores profundidades de relleno sedimentario, los niveles estáticos de agua subterránea también se encuentran muy cerca de la superficie lo que genera que las resistencias obtenidas en los resultados generen mal interpretación de los tipos de suelo que conforman el acuífero. También dada la ubicación en el límite costero de los TEM dentro del sector de Talcahuano - Concepción exista la presencia de cuñas salinas como se muestra en la **Figura 3-8** y **Figura 3-9** donde la zona degradada corresponde a la cuña salina, limitada por el basamento. El mayor detalle de interpretación de los TEM se adjunta en carpeta Anexo H-1/Documentos de apoyo/Campaña TEM, archivo "Interpretación de TEM y UGH.pptx".



Fuente: Elaboración propia en base a Terra Pacific Solutions SpA, 2022

**Figura 3-8 Perfil TEM n°2, zona costera noroeste de localidades Talcahuano – Concepción**

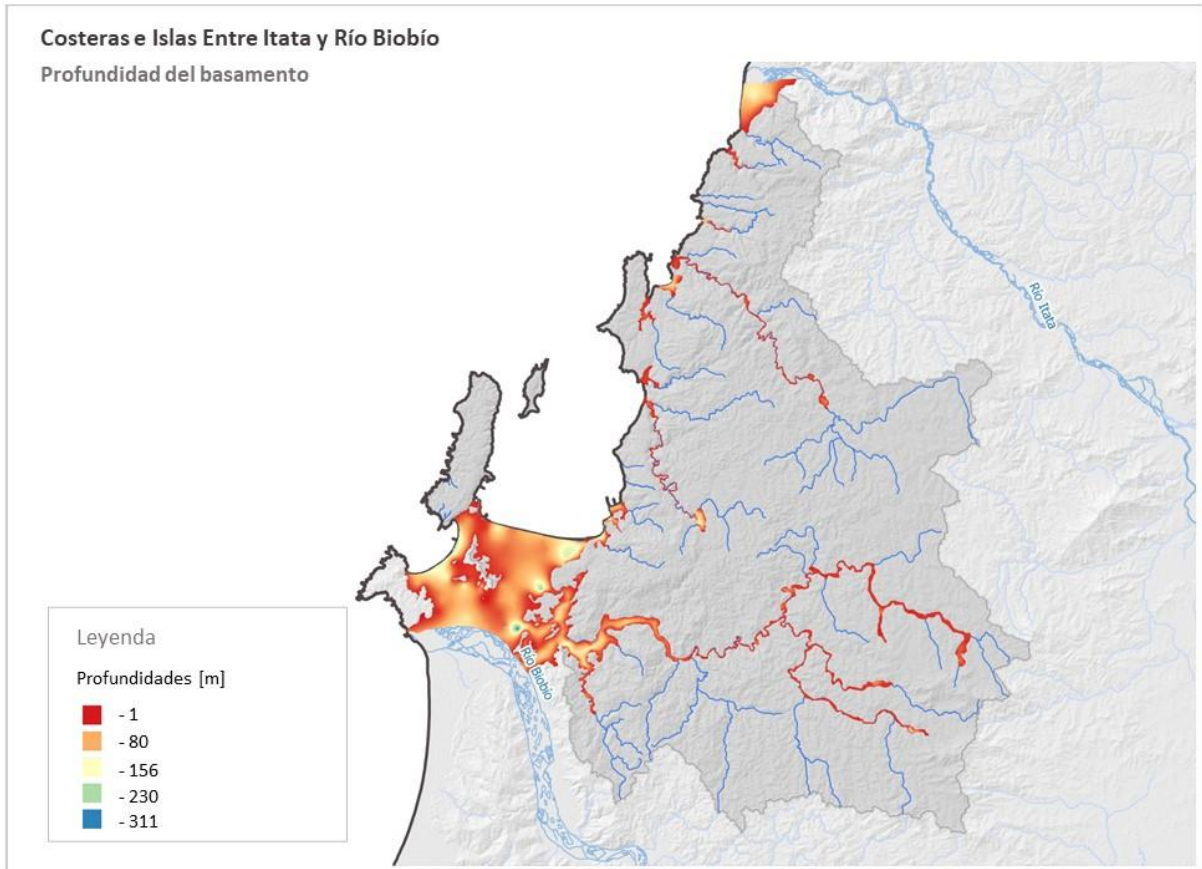


Fuente: Elaboración propia en base a Terra Pacific Solutions SpA, 2022

**Figura 3-9 Perfil TEM n°4, zona costera noreste de localidades Talcahuano – Concepción**

### 3.2.3. Basamento

La profundidad del basamento se estima a partir de las mediciones de las campañas geofísicas ejecutadas, también considerando datos de estudios anteriores y expedientes de pozos con sus estratigrafías. Los valores son interpolados con el método Kriging, calculando de esta forma el volumen y los límites en el espacio del acuífero. En la **Figura 3-10** se muestran las profundidades del basamento obtenidas, que comparada con los resultados del Informe S.I.T. N° 318 (DGA, 2013) son completamente correspondientes en sus valores determinados (ver **Figura 3-11**).



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-10 Profundidad del basamento**

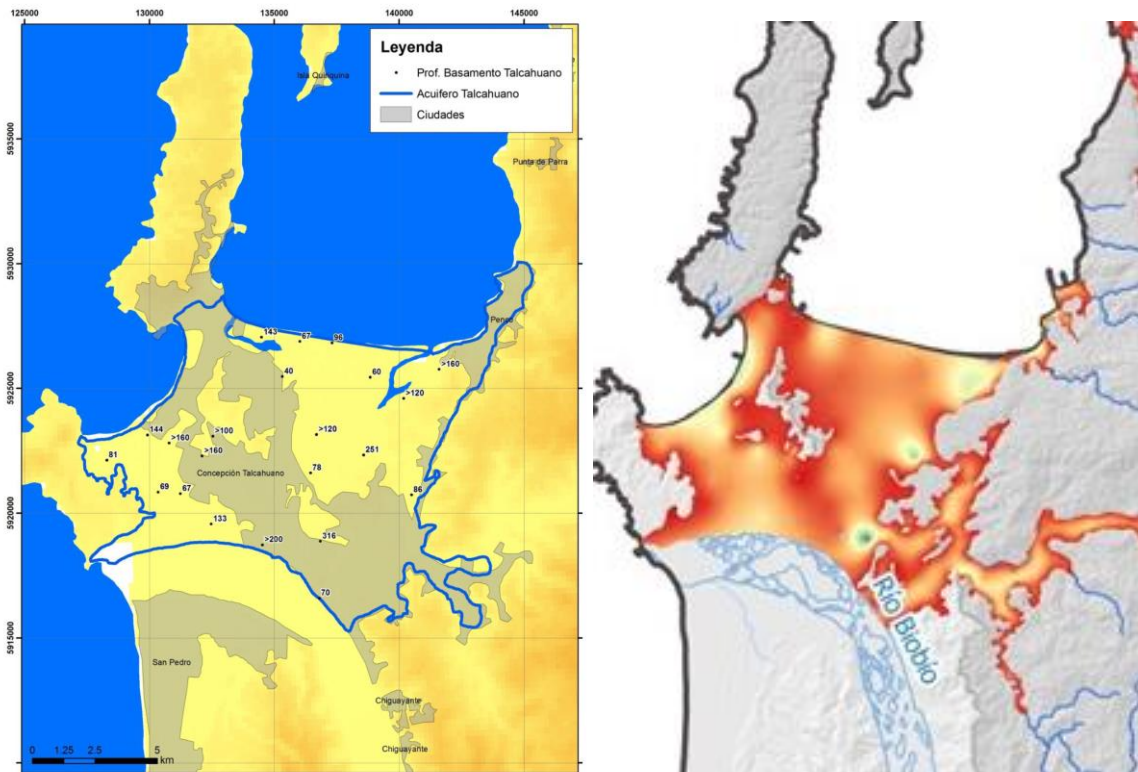


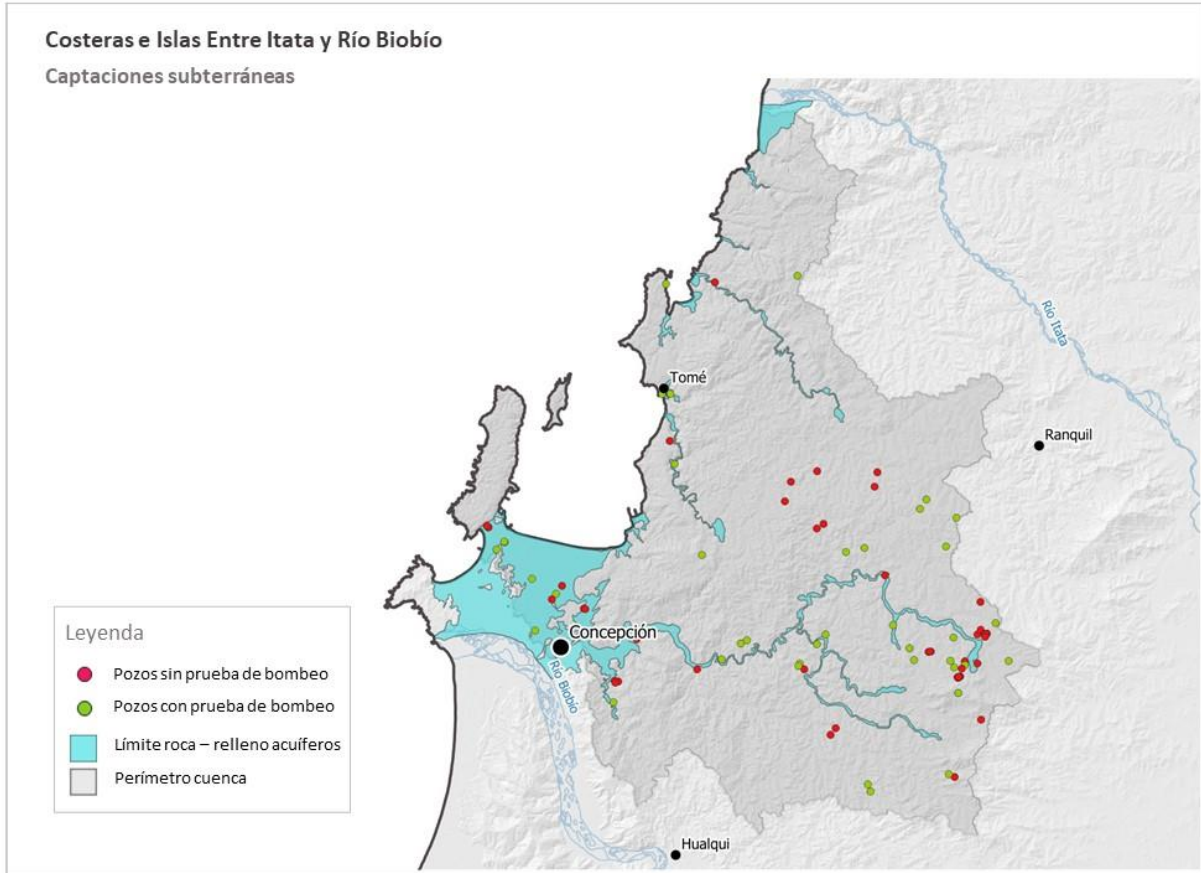
Figura 36. Profundidad del basamento según resultados de la geofísica en el acuífero de Talcahuano

Fuente: Elaboración propia

### Figura 3-11 Comparación profundidad del basamento con informe DGA 2013

#### 3.2.4. Pozos y Captaciones

Según la información de derechos de agua concedidos por la DGA, en la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío existen cerca de 90 derechos subterráneos con caudales asociados mayores a 1 L/s. La ubicación de estas extracciones se muestra en la **Figura 3-12**.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-12 Captaciones subterráneas en la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío**

Gran parte de los derechos (51) se encuentran inscritos a nombre de personas naturales, para uso en riego o bebida/uso doméstico/saneamiento. Los otros se dividen entre APRs, forestales, sociedades agrícolas, empresas bencineras, la armada, Essbio y otras industrias.

De la revisión de los expedientes se extrae que 45 de los 90 derechos incluyen prueba de bombeo, la que es de utilidad para estimar algunos parámetros hidrogeológicos de importancia, como la conductividad hidráulica; 22 expedientes tienen el perfil estratigráfico del suelo y 8 de esos indican que el pozo llega a roca. Otra información útil es el nivel estático del pozo, el cual sirve para complementar el análisis de las mediciones de TEM, este dato se tiene para 45 extracciones. Toda la información anteriormente descrita de los expedientes de derechos se puede consultar en el archivo "Información expedientes derechos subterráneos" del Anexo H-1/Documentos de apoyo/Catastro derechos subterráneos.

Con respecto a los caudales extraídos, se puede decir que en general son valores bajos, teniendo el 83% de los derechos un caudal asociado menor a 5 L/s. En total, los 90 derechos suman un caudal de 322 L/s.

---

### 3.2.5. Unidades Hidrogeológicas

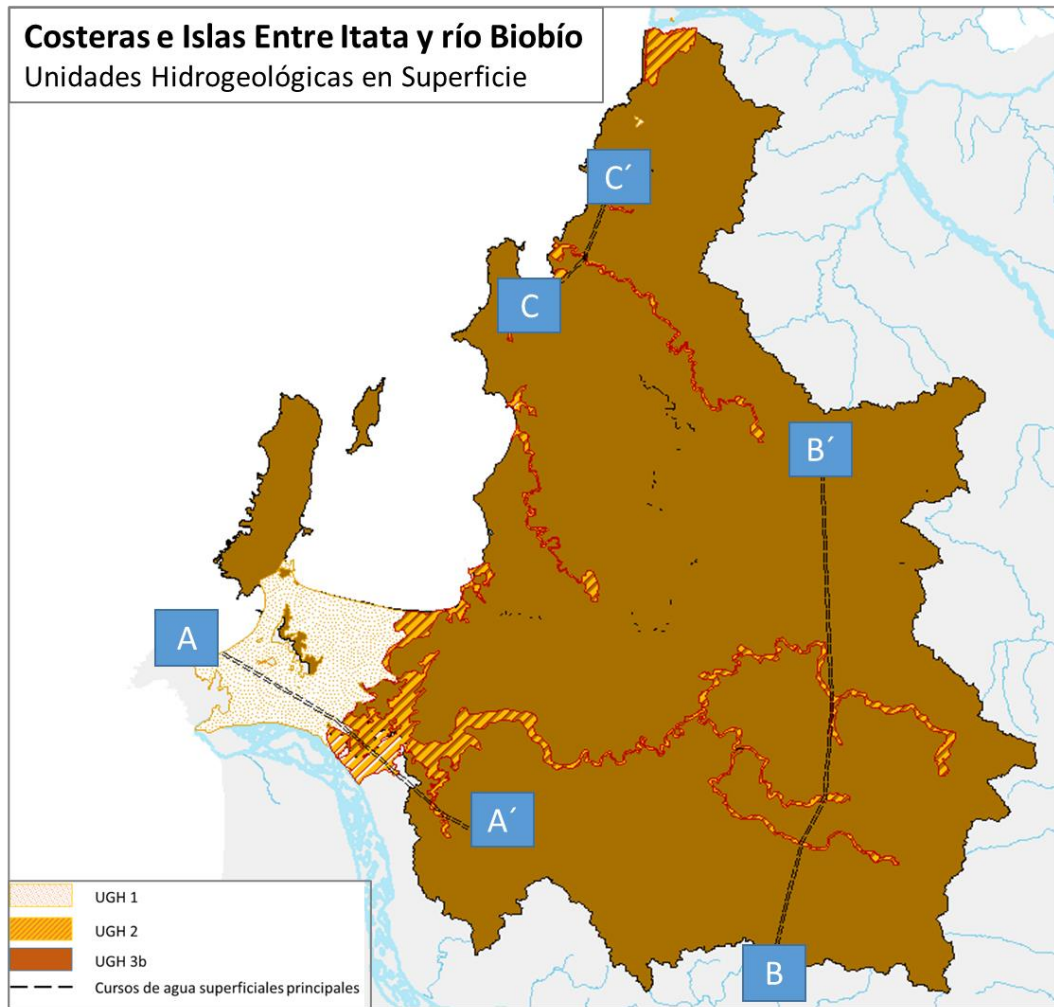
A partir de antecedentes descritos anteriormente, tales como geología del área de estudio, límite de relleno sedimentario, campaña geofísica en terreno utilizando el método TEM e información de pozos con documentación estratigráfica del suelo se buscó definir distintas unidades hidrogeológicas en el acuífero de la cuenca. Es importante recalcar que los resultados TEM poseen un nivel de incertidumbre considerable en zonas con una significativa presencia de agua, provocando que las resistividades en los resultados no logren identificar correctamente las distintas granulometrías y texturas del suelo.

En base a lo anterior se definieron principalmente 4 unidades hidrogeológicas, cuyas características principales son las siguientes:

- UGH 1: Corresponde principalmente a la zona del plano de la ciudad de Concepción, la cual está formada por deposición fluvial de las distintas descargas históricas de la desembocadura del río Biobío al mar. Los suelos en esta unidad presentan texturas de arena gruesa, media y fina, con escaso limo y arcilla, principalmente ubicados en los entornos de los cordones de cerro dentro de esta área. Además, no existe una compactación considerable y mantienen una permeabilidad alta a media, es decir, valores entre 0,1 a 1 cm/s, y una resistividad en torno a los 150 y 250 Ohm-m.
- UGH 2: Representa sectores con rellenos sedimentarios de carácter fluvial asociados a quebradas naturales de escurrimiento de evacuación de lluvias. Los suelos poseen texturas de arenas medias, gravas y arcillas con una compactación media. La permeabilidad y resistividad en sus suelos es moderada ( $1 \times 10^{-5}$  a  $1 \times 10^{-2}$  cm/s) (10 a 100 Ohm-m) variable según el desarrollo de los cauces.
- UGH 3a: Representa suelos semi impermeables correspondientes a materiales erosionados de rocas intrusivas, de poco espesor y con predominancia de texturas arcillo-limosas y arenas finas. Se ubican principalmente en zonas de contacto roca relleno con presencia de maicillo o roca meteorizada. Mantienen permeabilidades y resistividades bajas ( $1 \times 10^{-10}$  hasta  $1 \times 10^{-4}$ ) (1 a 4 Ohm-m).
- UGH 3b: Representan suelos impermeables con presencia principalmente de rocas intrusivas del Carbonífero, constituidas principalmente por granitos.

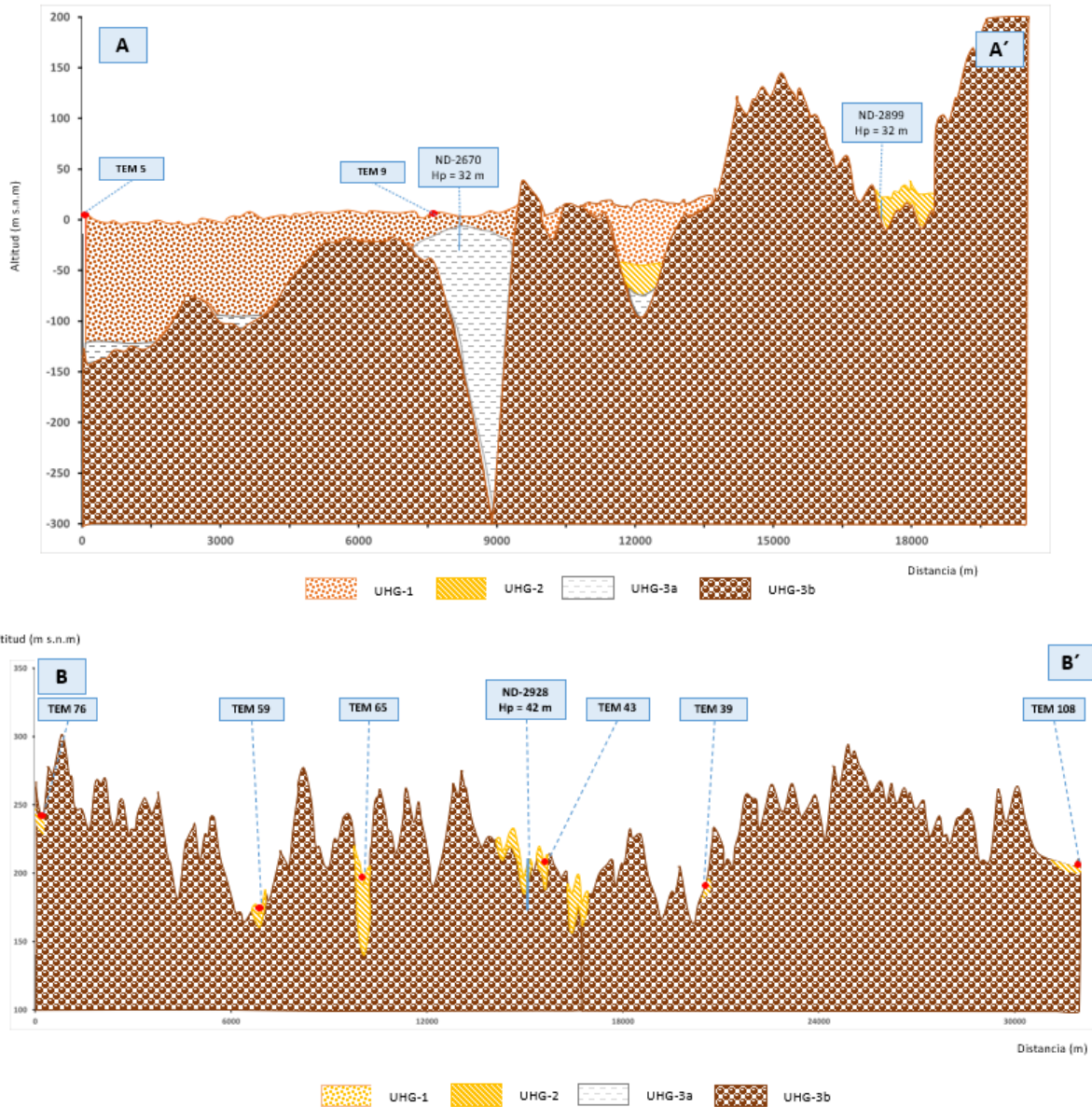
Su representación espacial a nivel horizontal se muestra en la **Figura 3-13**. Además, en la misma figura se muestra la ubicación de los principales perfiles transversales representados, los cuales se muestran en la **Figura 3-14**.

Es importante dar hincapié en que la representación de las distintas unidades hidrogeológicas en profundidad forma parte de una interpretación en base a información actualmente disponible, pero que requiere un estudio en mayor detalle para precisar la información del área de estudio. Esto último se demuestra en la interpretación de perfiles TEM realizados en las campañas al identificar la estratigrafía a partir de los datos de resistividad del suelo y los límites que existen en el basamento, los cuales se encuentran adjuntos en el Anexo H-1.



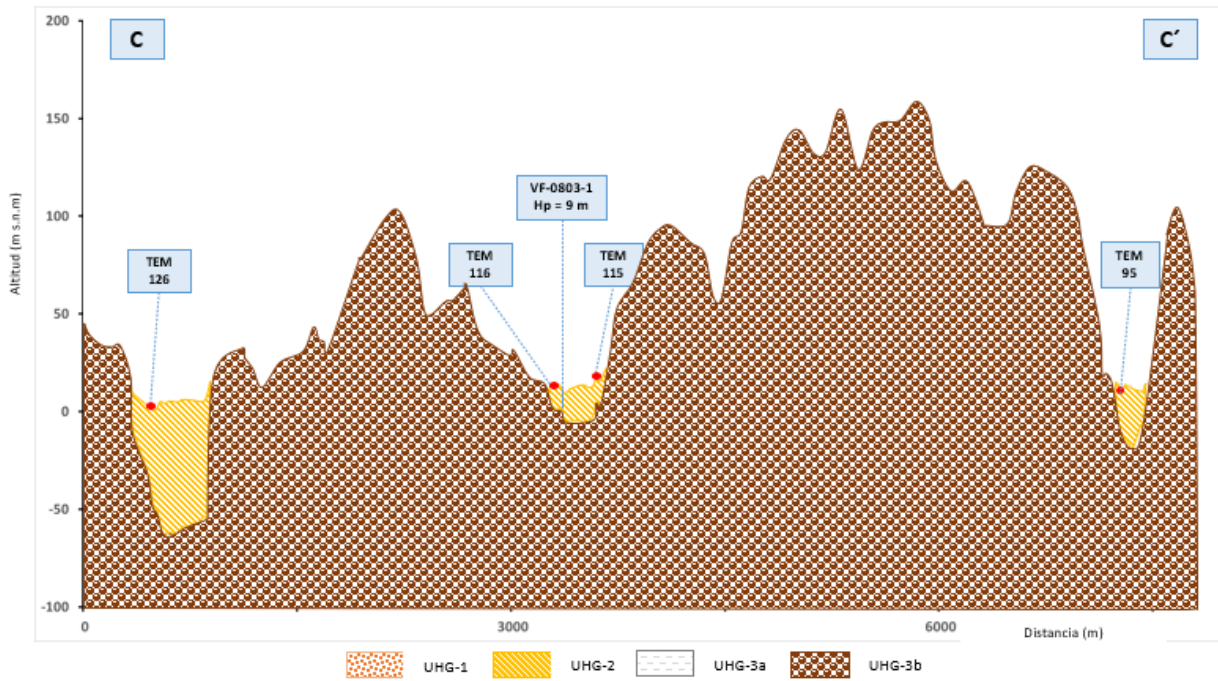
Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-13 Distribución espacial de Unidades hidrogeológicas en cuenca Itata – Biobío**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-14 (a) Perfiles transversales en la cuenca costera entre Itata y Biobío para la identificación de unidades hidrogeológicas**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-14 (b) Perfiles transversales en la cuenca costeras entre Itata y Biobío para la identificación de unidades hidrogeológicas**

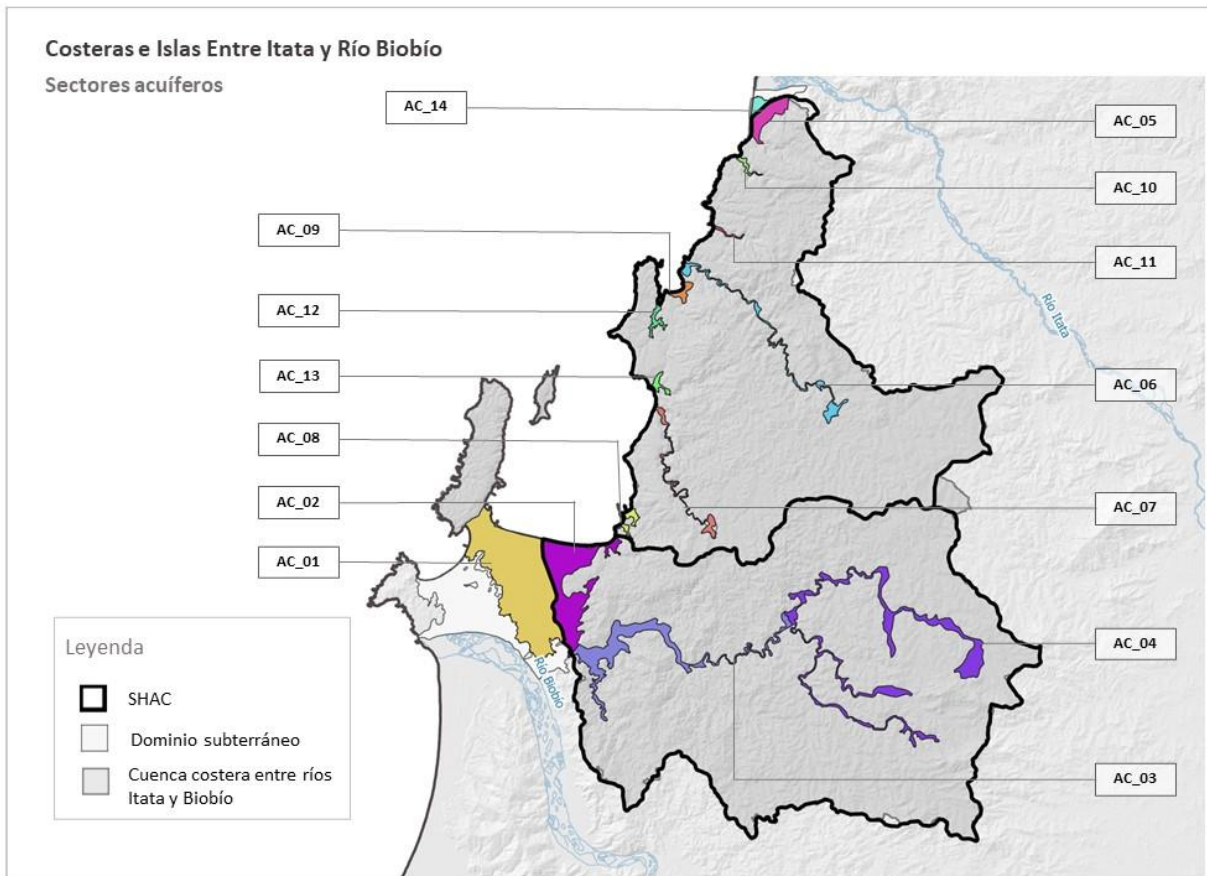
---

### 3.2.6. Sectores Acuíferos

La estructura espacial de la cuenca costera Itata-Biobío está compuesta principalmente por una formación de roca intrusiva que constituye la cordillera de la Costa. La erosión producida a lo largo del tiempo por la evacuación natural de las aguas lluvias y su escurrimiento ha formado quebradas y cauces naturales, la mayoría de ellos de escurrimientos discontinuos, que han generado procesos de erosión y depositación en el tiempo formando paleocauces asociados a los valles estrechos con sus rellenos sedimentarios donde percola parte de los escurrimientos superficiales de evacuación hacia el mar y que saturan el relleno sedimentario formando acuíferos localizados asociados a esas formaciones.

Un caso particular y de otra magnitud corresponde a la zona del plano de la desembocadura del río Biobío, donde se emplaza la zona urbana y la ciudad de Concepción, que es parcialmente parte de esta cuenca, cuya formación de relleno sedimentario ha sido generada por el efecto de ese gran cauce superficial y su escurrimiento, donde históricamente ha mutado a tres grandes zonas de desembocadura, la más antigua dirigida hacia el norte con descarga a la bahía de Talcahuano, la posterior de dirección poniente con descarga a la zona costera de Huachipato, y la actual desembocadura del río y su cauce. Este relleno corresponde a la deposición de materiales de arrastre de este escurrimiento fluvial en el encuentro con la masa de agua del océano Pacífico produciendo una barra de desembocadura, constituida por materiales granulares del tipo arenas de diversas granulometrías y compactación variada. Esta zona del plano costero constituye un acuífero de características similares y gran capacidad de almacenamiento y potencial productivo, que se conecta con el *paleocauce* y el acuífero asociado al río Andalién.

En base a la descripción hidrogeológica conceptual realizada en los párrafos anteriores, se ha definido el dominio subterráneo de la cuenca, siendo dividido en distintos sectores acuíferos asociados a cada uno de los paleocauces individuales de la zona de cordillera de la Costa y sumados a la zona del plano urbano de la ciudad de Concepción. Para este efecto, se utilizaron una serie de criterios: el límite de la cuenca y las unidades geográficamente separadas, asociadas al límite de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) establecidos por la DGA, donde el acuífero del plano urbano y el del paleocauce del río Andalién están en el SHAC Río Andalién y los paleocauces de las otras quebradas principales quedan dentro del SHAC Pingueral. Esta delimitación dio como resultado 14 unidades acuíferas, que se muestran en la **Figura 3-15**.



Fuente: Elaboración propia

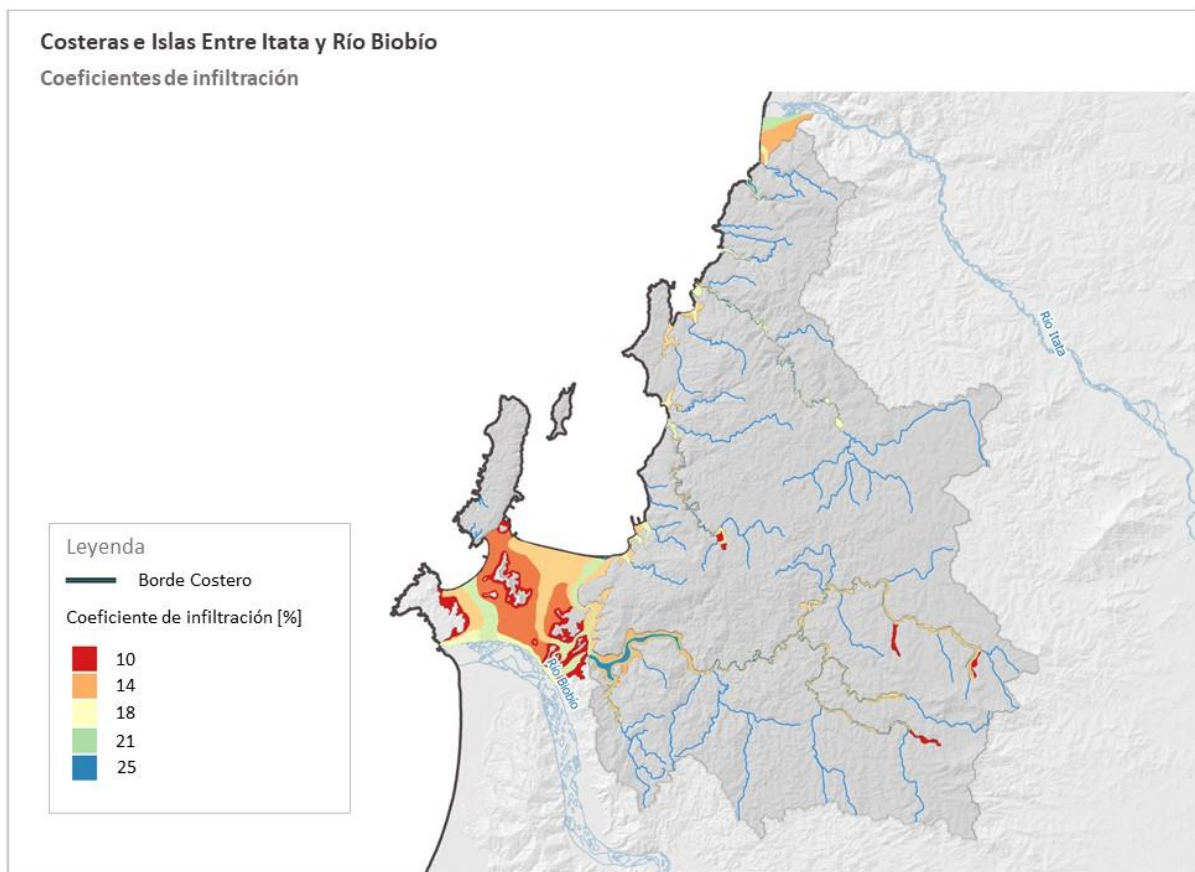
**Figura 3-15 Sectores acuíferos**

### 3.2.7. Tasas de Recarga

Para la cuenca de estudio la recarga proviene únicamente de la precipitación, ya que el riego es despreciable por la baja presencia de terrenos agrícolas. Para estimar la recarga por precipitación se usa como base los datos del producto climático CR2MET v2.0. Este producto climático incluye capas grilladas con datos de precipitación mensual por cada mes, desde el año 1979 hasta 2019. A partir de este producto se obtienen valores medios anuales de precipitación para la zona acuífera, los cuales se multiplican por la capa de coeficientes de infiltración, obteniendo valores de recarga en mm/año.

Los valores de coeficiente de infiltración son estimados a partir de la capa de conductividades hidráulicas de los primeros metros donde tiene lugar la infiltración, las propiedades del suelo asociados a la información de la geología local, la geomorfología de la zona y pendientes locales, que son las variables que impactan principalmente la relación precipitación – escorrentía y definen los valores relativos del coeficiente de infiltración y que se utilizan al aplicar el Método Racional para la determinación de la recarga. Paralelamente, se ha considerado las características del lecho filtrante asociado a cada sector acuífero, para lo cual se realiza una regresión lineal donde al valor más alto de

permeabilidad se le asigna el máximo coeficiente de infiltración (0,25) y al menor valor de permeabilidad se le asigna el mínimo coeficiente de infiltración estipulado para la cuenca (0,10). En la **Figura 3-16** se presenta la distribución del coeficiente de infiltración elaborada para la cuenca.

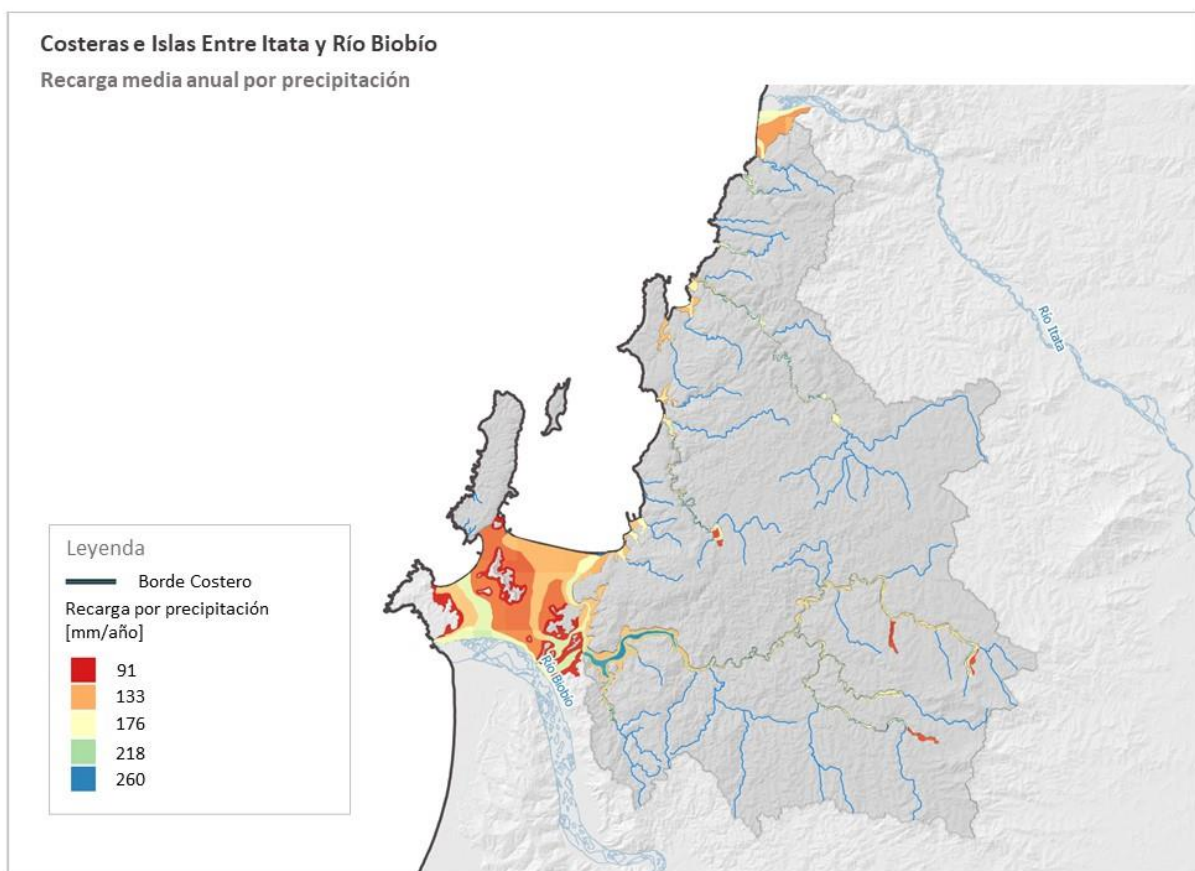


Nota: Valores más altos indican que una mayor cantidad del agua no usada por la planta es infiltrada al acuífero y viceversa.

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-16 Coeficientes de infiltración**

A continuación, en la **Figura 3-17** se presenta la recarga por precipitación en mm/año.

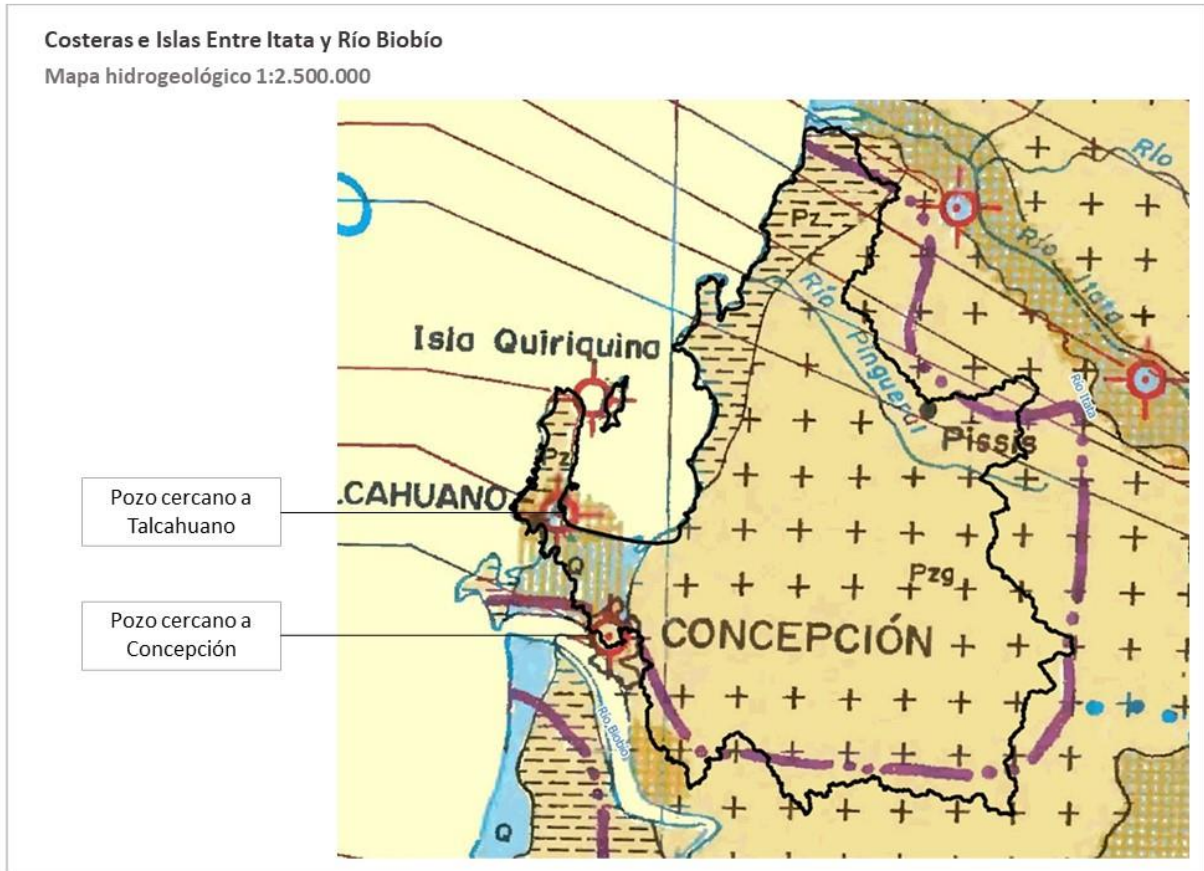


Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-17 Recarga media anual por precipitación en el área acuífera, periodo abril 1985 – marzo 2019**

### 3.2.8. Propiedades Hidrogeológicas

Como antecedente del rendimiento de las unidades hidrogeológicas, se tienen los valores de productividad de pozos del Mapa Hidrogeológico a escala 1:2.500.000 (DGA, 1986). En la **Figura 3-18** se muestran los pozos que contienen dicha información dentro de la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío. En la **Tabla 3-1** se muestran los datos de los dos pozos representativos no surgentes ubicados en la cuenca, la productividad del pozo cercano a Concepción clasifica como muy elevada y la del pozo cercano a Talcahuano como elevada.



Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (1986)

**Figura 3-18 Mapa hidrogeológico**

**Tabla 3-1 Productividad de pozos**

Pozo	Profundidad del pozo (m)	Profundidad del nivel estático (m)	Productividad (m <sup>3</sup> /h/m)
Concepción	46	2,5	127
Talcahuano	80	4,0	4,3

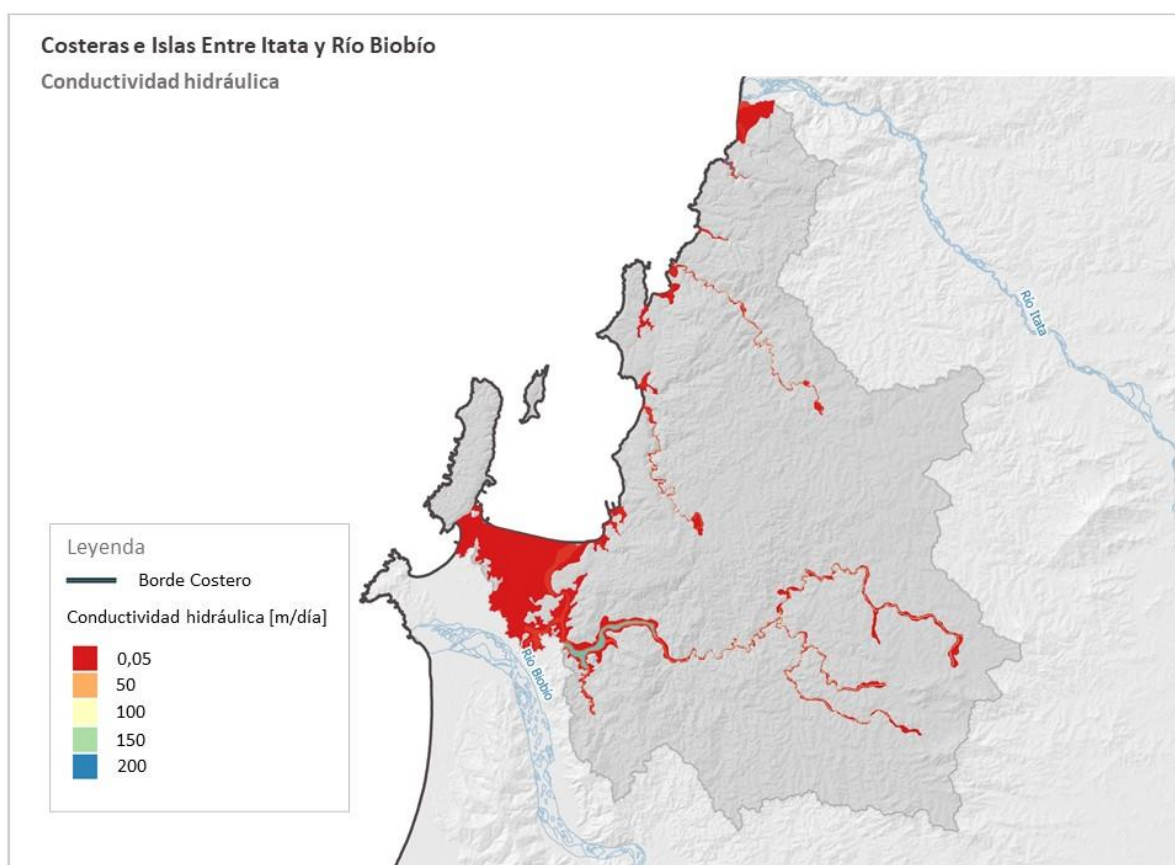
Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (1986)

- **Conductividad hidráulica (Permeabilidad)**

A partir del análisis de pozos existentes en la zona (pruebas de bombeo y estratigrafía) y de los resultados de la campaña TEM, se estiman valores de conductividad hidráulica para la zona acuífera, cuyos valores están incluidos en el documento "información expedientes derechos subterráneos.xlsx" que se ofreció como producto adicional. Considerando la existencia de muy pocos pozos profundos representativos de la espacialidad de los acuíferos locales, esta información se complementó con la interpretación de los resultados de los TEM de las campañas geofísicas realizadas, calibrados con los valores de permeabilidad obtenidos de pozos cercanos a ellos, para lo cual se desarrolló la metodología que se describe en el párrafo siguiente.

Primero, se asocian los valores de resistividad de cada TEM con valores de permeabilidad según Coduto (1999) (ver **Tabla 3-2**). Luego, usando la distribución de resistividades mostradas en los perfiles se hace una regresión lineal, asignando un valor promedio para todo el espesor del acuífero bajo el perfil correspondiente. A partir de estos valores se hace una interpolación usando método Kriging en el programa Surfer, la que ha sido refinada con puntos auxiliares entre las estaciones TEM y valores extraídos de permeabilidad de pozos, que permiten suavizar los resultados.

En la Figura 3-19 se muestran los resultados del trabajo descrito, los mayores valores de conductividad se encuentran en la zona acuífera encajonada que acompaña los esteros. Mientras que las menores permeabilidades se observan en la zona costera, en particular en la zona acuífera de Concepción, demostrando que grandes profundidades no se asocian necesariamente a altas permeabilidades.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-19 Conductividades hidráulicas**

**Tabla 3-2** Asociación entre resistividad y valores típicos de conductividad hidráulica

<b>Material (saturados)</b>	<b>Resistividad (Ohm-m)</b>	<b>Permeabilidad (cm/s)</b>
Arenas gruesas y/o Gravas	250,1 a 500	1 a 10
Arenas medias	150,1 a 250	0,1 a 1
Arenas finas	100,1 a 150	1e-2 a 0,1
Arenas muy finas	40,1 a 100	1e-4 a 1e-2
Limos	10,1 a 40	1e-6 a 1e-4
Arcillas	1 a 10	1e-10 a 1e-6

Fuente: Coduto (1999)

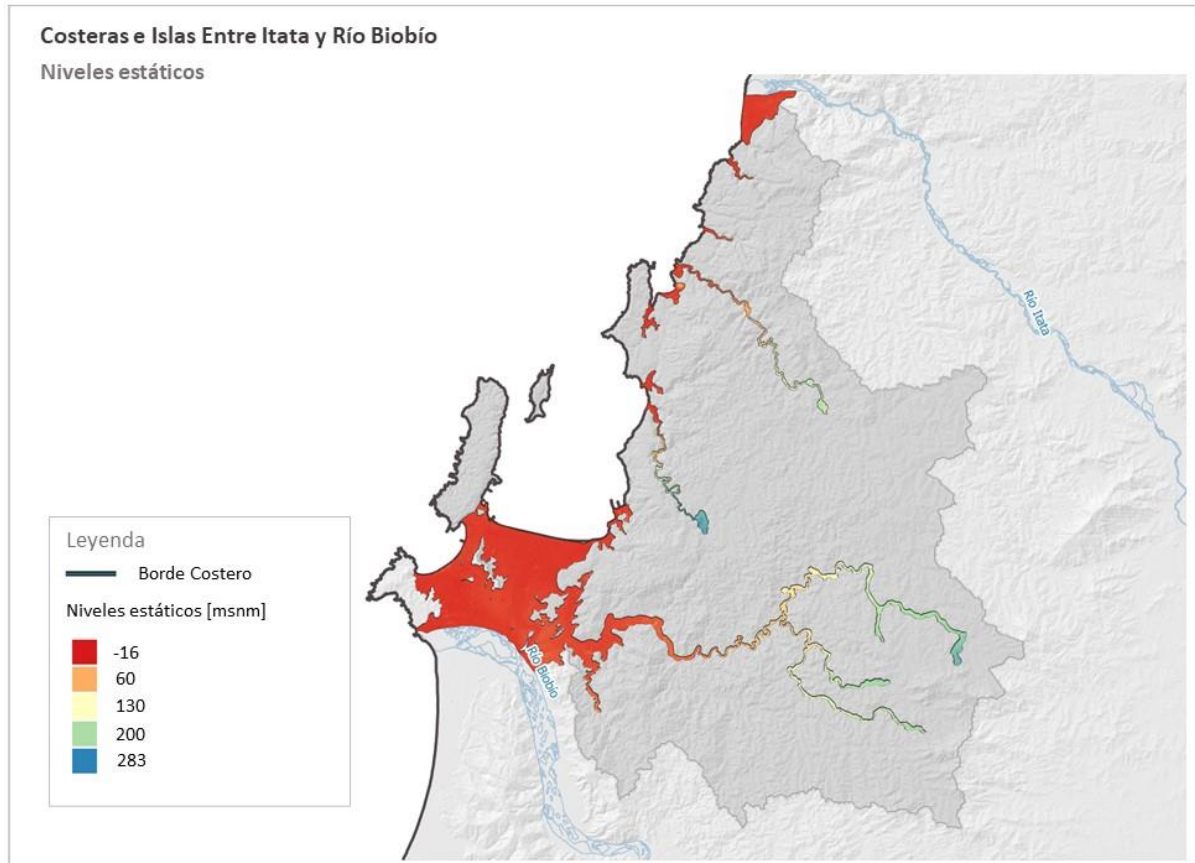
Un dato importante que es considerado para validar los resultados anteriores es la permeabilidad que arrojan los cálculos de los parámetros que ofrecen expedientes de pozos que indican pruebas de bombeo para un nivel constante (en la cuenca existen 45 pozos que poseen pruebas de bombeo y 14 de ellos se encuentran cercanos a estaciones TEM). Para ello se ha ocupado la metodología del cálculo de transmisividad de Meyer (Brown R.H. et al., 1963), estos cálculos se adjuntan en Anexo H-1\Documentos de apoyo\Campaña TEM\Interpretación expedientes.

### **3.2.9. Nivel Estático de las Aguas Subterráneas**

El nivel estático es un dato de entrada importante para la modelación, porque nos permite conocer el estado inicial del agua en el acuífero y estimar el volumen disponible del recurso. Para su aproximación, se utilizan los valores de resistividad entregados en la campaña TEM, ya que existe una correlación entre el valor de este parámetro y la saturación del suelo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los valores interpretados no son tan confiables como una medición del nivel in situ. Por esta razón, la interpretación de los perfiles TEM es complementada y validada con la estratigrafía y valores de niveles estáticos incluidos en los expedientes de derechos subterráneos de la cuenca, cuya información está recopilada en el archivo "Información expedientes derechos subterráneos" del Anexo H-1/Documentos de apoyo/Catastro derechos subterráneos.

Para más detalle de la metodología de interpretación de estaciones TEM revisar en carpeta Anexo H-1/Documentos de apoyo/Campaña TEM, archivo "Interpretación de TEM y UGH.pptx".

En la **Figura 3-20** se entregan los valores interpolados de niveles estáticos, usando el método Kriging.



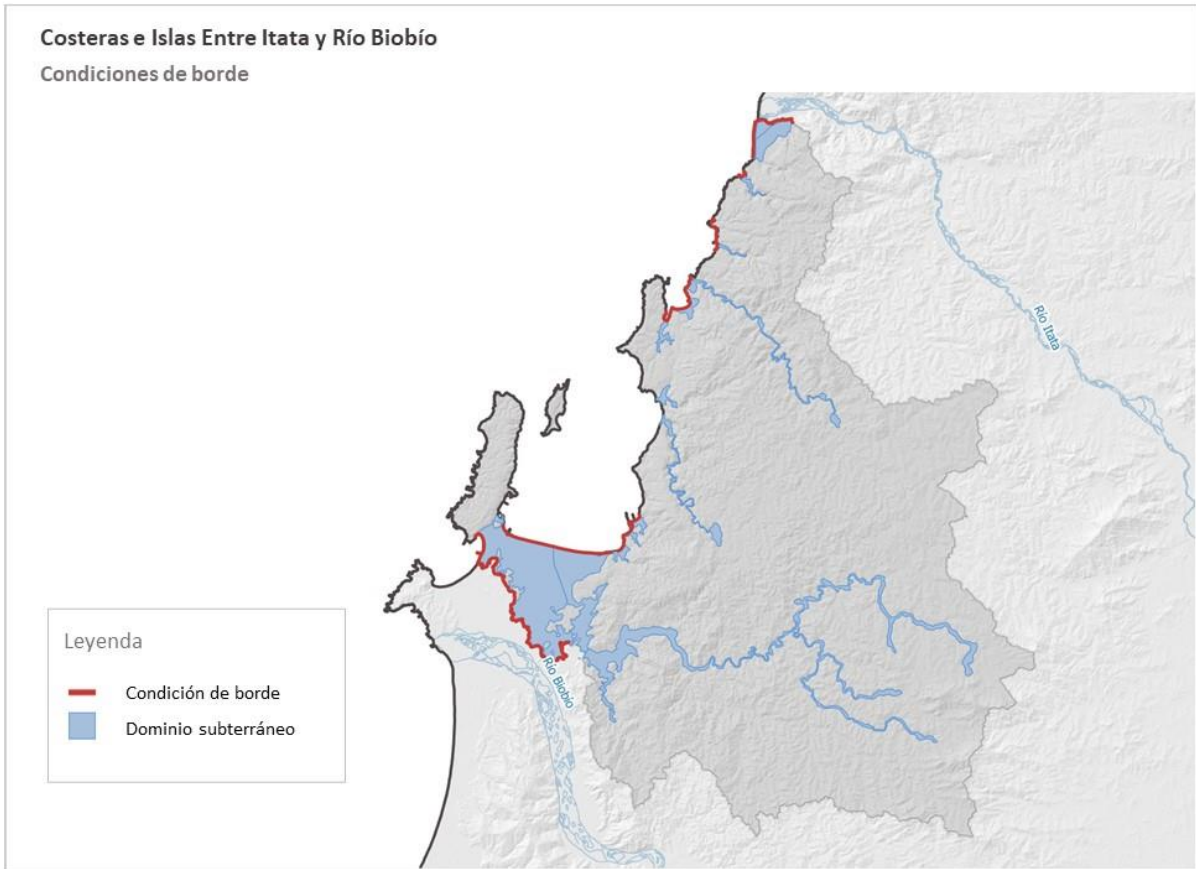
Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-20 Niveles estáticos**

### 3.2.10. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde del modelo están determinadas por dos tipos de interacciones: la del acuífero con el mar y la del acuífero con acuíferos limítrofes en los extremos norte y sur de la cuenca. Estas condiciones representan flujos de entrada o salida o un valor de nivel conocido que se impone en el modelo. En el caso de la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío, los valores de flujo fueron estimados a partir de los niveles estáticos que derivan de la interpretación de la campaña TEM.

Las condiciones de borde mencionadas se pueden observar en la **Figura 3-21**.

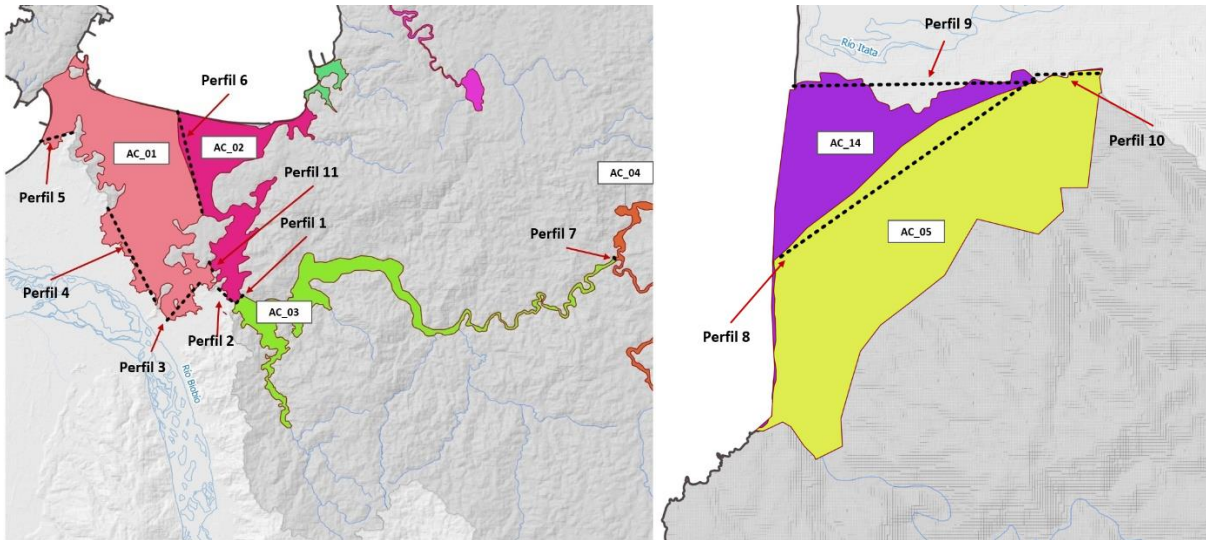


Fuente: Elaboración propia

### **Figura 3-21 Condiciones de borde del modelo conceptual subterráneo**

De las condiciones de borde mostradas, es posible identificar 11 perfiles correspondientes a límites entre distintos sectores acuíferos o entre un sector acuífero (ver **Figura 3-22**) y la cuenca del río Itata o Biobío, y 13 perfiles de límites entre acuíferos y el mar. En cada una de las condiciones de borde mencionadas, fueron calculados los valores de flujos entre sectores.

Para estimar los caudales entre los perfiles mencionados en el párrafo anterior, estos se dibujan en QGIS y con la herramienta Terrain profile se extrae, dentro del perfil seleccionado, los datos de las capas ráster de profundidad de basamento, cotas del modelo de elevación digital DEM, cota de nivel estático y permeabilidad.



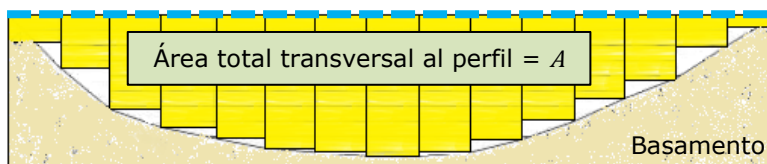
**Figura 3-22 Perfiles utilizados para la estimación de flujo entre sectores acuíferos**

Para aquellos perfiles en donde es factible el cálculo de caudal, los flujos entre sectores acuíferos fueron obtenidos de acuerdo con la ley de Darcy:

$$Q = -A \cdot k \cdot \frac{(h - h_0)}{L}$$

donde:

- $Q$  : caudal entre sectores acuíferos (m<sup>3</sup>/d).
- $A$  : área total transversal al perfil (m<sup>2</sup>) (ver **Figura 3-23**).
- $k$  : permeabilidad promedio del perfil (m/d).
- $h_0$  : cota de nivel estático mayor (m).
- $h$  : cota de nivel estático menor (m).
- $L$  : largo de sección paralela al flujo (m).

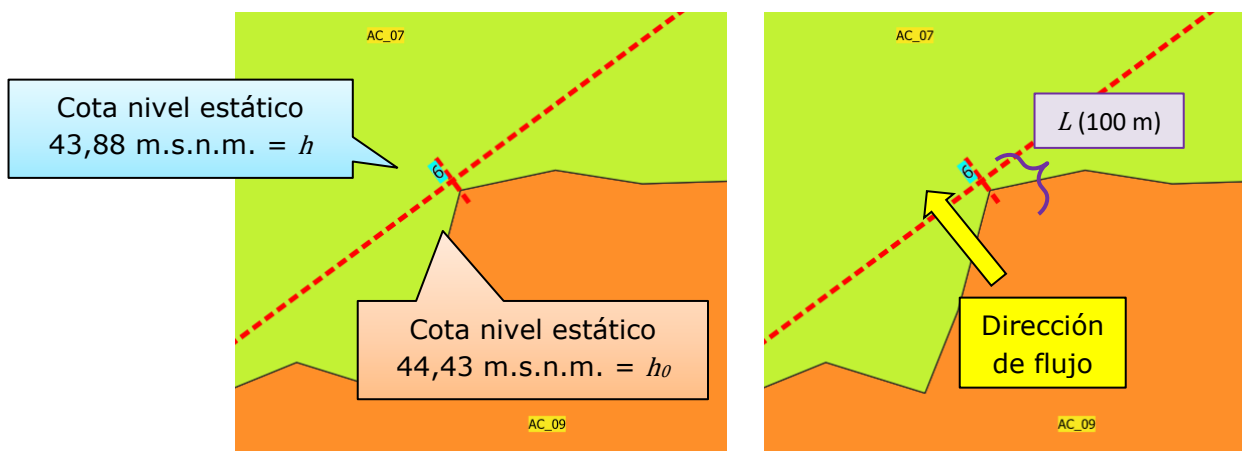


Nota: la línea azul punteada representa el emplazamiento del nivel estático bajo un perfil trazado para hacer el cálculo del caudal. El área total transversal al perfil es todo aquel sector entre el basamento y el nivel estático, que correspondería al sector donde fluye el agua subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-23. Representación de área transversal del flujo pasante por un perfil**

El sentido del flujo se obtiene al comparar las cotas de nivel estático: el flujo se dirigirá hacia la cota de nivel estático menor ( $h_0 \rightarrow h$ ), como se observa en la **Figura 3-24**.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-24. Ejemplo de definición de sentido de flujo entre dos sectores acuíferos. El flujo se dirige hacia el sector con menor cota de nivel estático**

---

Finalmente, los flujos obtenidos en L/s se muestran en la **Tabla 3-3**.

**Tabla 3-3 Caudales obtenidos con Ley de Darcy**

N° Perfil	Sector que divide	Caudal (L/s)
1	AC_03 y AC_02	383,6
2	AC_02 y acuífero Biobío	7,3
3	AC_01 y acuífero Biobío	76,4
4	AC_01 y acuífero Biobío	3,4
5	AC_01 y acuífero Biobío	2,4
6	AC_01 y AC_02	3,8
7	AC_03 y AC_04	16,5
8	AC_05 y AC_14	1,8
9	AC_14 y acuífero Itata	71,6
10	AC_05 y acuífero Itata	1,9
11	AC_01 y AC_02	2,5
12	AC_01 y mar (Oeste)	16,4
13	AC_01 y mar (Norte)	77,6
14	AC_02 y mar	202,2
15	AC_05 y mar	73,3
16	AC_06 y mar	8,0
17	AC_07 y mar	7,4
18	AC_01 y mar	17,6
19	AC_09 y mar	215,2
20	AC_10 y mar	65,6
21	AC_11 y mar	31,3
22	AC_12 y mar	2,0
23	AC_13 y mar	2,7
24	AC_14 y mar	334,1

Fuente: Elaboración propia.

### **3.2.11. Comentarios Adicionales sobre Dinámica Regional**

A continuación, se describe a grandes rasgos el funcionamiento de la cuenca, del cual se logra un mayor entendimiento una vez creados los modelos conceptuales.

Las cuencas costeras entre ríos Itata y Biobío tienen un régimen pluvial y sus acuíferos se recargan por precipitaciones durante todo el año. Debido a que la geología es principalmente de tipo rocoso, a excepción de la zona costera que tiene unidades de secuencias sedimentarias, los acuíferos se presentan encajonados acompañando el curso de los distintos ríos y esteros de la cuenca.

Sin embargo, existe una zona acuífera más extensa en la parte costera bajo el Gran Concepción, la cual está vinculada a los ríos Biobío y Andalién y presenta profundidades que superan los 200 m. Por esta razón, se considera que este es el sector de mayor valor hidrogeológico de la cuenca.

En cuanto a los niveles de agua, estos son más bien someros, encontrándose en general a menos de 5 m de la superficie. Por último, es importante destacar la conexión subterránea al norte y sur con las cuencas vecinas del Itata y Biobío.

---

### **3.2.12. Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos**

En general, los criterios de sustentabilidad de acuíferos definidos por la Dirección General de Aguas tienen como objetivo establecer caudales máximos de explotación posibles para cada sector acuífero, a partir de la evaluación de los descensos de nivel de estos, cambios en la interferencia río-acuífero (relacionado a los recursos superficiales ya comprometidos), el grado de satisfacción de la demanda de agua subterránea y la existencia y cantidad de pozos secos. En esta línea, el uso de estos criterios está sujeto a la evaluación de recursos hídricos mediante modelos numéricos.

De esta manera, a juicio del consultor, para evaluar adecuadamente los criterios de sustentabilidad del acuífero se requiere un modelo que, apoyado en información hídrica observada en terreno de manera prolongada y sistemática, permita realizar simulaciones de la evolución temporal de los volúmenes de stock en el acuífero y también de los niveles de las aguas subterráneas a lo largo y ancho de la zona de estudio. Adicionalmente, se requiere de un modelo que simule de forma apropiada la dinámica de la interacción entre ríos y acuíferos. De esta forma, se requiere de un modelo integrado que simule aguas superficiales, aguas subterráneas y la interacción entre ellas, considerando para ello un modelo distribuido de aguas subterráneas, como podría ser MODFLOW, que de paso a la evaluación de los puntos antes mencionados.

De esta forma, dado que en el desarrollo del actual PEGH se ha construido un modelo hidrológico en WEAP orientado principalmente a la modelación de aguas superficiales, se propone la construcción a futuro de un modelo integrado WEAP-MODFLOW que entregará la capacidad de modelación de aquellos aspectos subterráneos mencionados (evolución del stock de agua en el acuífero, evolución de los niveles de aguas subterráneas en el espacio y evaluación de la interacción río-acuífero). Sin embargo, para la construcción acertada de este modelo integrado primero es necesario robustecer la cantidad de información hídrica disponible observada en la cuenca; en particular con pozos de observación, que no existen en la actualidad en la zona. Sin esta información hidrométrica no será posible darle un sentido de realidad al modelo integrado elaborado y no se podrá verificar si el modelo reproduce la realidad de la cuenca y su balance hídrico.

En síntesis, para la correcta evaluación de los criterios de sustentabilidad es necesaria la construcción de un modelo integrado de aguas superficiales y subterráneas, que considere un modelo hidrogeológico distribuido y para lo cual podría ser considerado un modelo acoplado WEAP-MODFLOW. Sin embargo, para la construcción de este modelo es necesario contar también con información hidrométrica en la cuenca, con estadísticas de estaciones fluviométricas en los cauces superficiales y pozos de observación de niveles estáticos. Esta estadística hidrométrica debe ser lo más sistemática y continua posible, y debe abarcar una extensión temporal mínima de 5 años (idealmente 10 años o más) con estaciones estratégicamente situadas en la cuenca. A esta información hidrométrica también se le podría sumar la estimación de constantes elásticas del acuífero obtenidas en pruebas de bombeo, que podrían dar un apoyo más firme para la caracterización del acuífero en la modelación numérica subterránea.

---

### 3.2.13. Modelo MODFLOW

El modelo conceptual subterráneo de las cuencas costeras e islas entre el río Itata y río Biobío es representado en el software *Visual Modflow Flex*. Su utilización requiere el uso de licencia. Visual MODFLOW Flex es un programa de modelamiento 3D de aguas subterráneas, trabajando bajo una expresión de diferencias finitas de aproximación. Este programa puede simular flujos en estado transitorio y estacionario, utilizando para ello diversas capas.

Para la creación de un modelo en *Visual Modflow Flex*, se requiere una serie de parámetros esenciales para la representación del modelo subterráneo. Entre ellos están:

- Geometría del acuífero.
- Superficie del terreno (DEM) (m.s.n.m.).
- Profundidad de basamento (m.s.n.m.).
- Nivel estático (m.s.n.m.).
- Conductividad hidráulica en sector de acuífero (permeabilidad).
- Coeficientes de almacenamiento e infiltración.
- Condiciones de borde (límite con el océano, ríos, recarga).

Es importante tener en consideración que todos los archivos de tipo ráster deben convertirse a la extensión Golden Software ASCII Grid (\*.grd, GRD).

A continuación, para la construcción del modelo conceptual del sector de acuífero de la cuenca costera Itata – río Biobío se describen una serie de pasos iniciales sin los cuales no es posible continuar la creación del modelo.

#### **Proceso de creación del modelo conceptual**

- **Creación del proyecto, preparación de las capas y delimitación de la superficie a modelar**

El primer paso por realizar es crear un nuevo proyecto, donde se defina el sistema de coordenadas del área de estudio, que en este caso se utilizó WGS84 Datum 19S. Seguidamente se comienza el proceso de importar datos de acuerdo con el tipo (archivos vectoriales de formato *shapefile* o capas en grillas (ráster) en formato GRD).

En el área de estudio, los archivos vectoriales son el límite del acuífero, red hidrográfica y las condiciones de borde con el mar. Por otra parte, las distintas superficies a distintas cotas de elevación, tales como el basamento y DEM, se definen como superficie.

---

- **Definición de horizontes en el modelo**

La estructura del modelo se define añadiendo la cantidad de horizontes que concuerden con las capas subterráneas cargadas.

Para el modelo numérico conceptual de la cuenca se consideraron tres capas de tipo ráster comenzando con la capa de la superficie o *DEM*, seguido la cota del nivel estático y finalmente la cota del basamento.

Se procede a cambiar los nombres de las capas y el tipo en la columna derecha. Cuando resultan 2 horizontes en la estructura del modelo, la capa superior se clasifica como erosional porque está en superficie, la capa intermedia se ha definido *conformable* y el basamento rocoso o capa más profunda se clasifica como base.

- **Propiedades hidrogeológicas de zonas estructurales**

Posteriormente se definieron las propiedades de las zonas estructurales del modelo. Estas son: conductividad (permeabilidad), almacenamiento y niveles iniciales. Para el área de estudio se cuenta con las capas de permeabilidad, coeficiente de almacenamiento ( $S_y$  – rendimiento específico) y almacenamiento específico ( $S_s$ ), y para los niveles iniciales se han considerado 10 m.

- **Condiciones de borde**

Ya definida las propiedades hidrogeológicas del acuífero de la cuenca se agregaron tres condiciones de borde: límite con el océano, hidrología principal, recarga desde la superficie y pozos de bombeo.

La condición de borde **“mar”** se clasifico como *nivel constante*, con cota de 0 m.s.n.m. conectando con el dominio del modelo *“top”* Se le indico su nombre y luego se seleccionó su respectiva data asociada, que en este caso el *shapefile* con la condición de borde del mar.

La condición de los **“ríos”**, fueron cargados con la clasificación del mismo nombre, se le indico su nombre, también fue conectado al dominio como *“top”* y fue seleccionada a la capa shape asociada.

Es importante mencionar que para esta condición de borde se requieren datos del *stage* del río ( esta se genera con la calculadora ráster, restando el ráster *DEM* – 0,02 m y se convierte a grid como los demás ráster), el *bottom* (se refiere al lecho del río, con calculadora ráster se indica *DEM*–1 m y convertir a grid), espesor del lecho del río (*riverbed thickness*) se indica 0,5; el ancho del río (*river width*) se impone como 10, la conductividad del lecho del río (*riverbed conductivity*) se indica 1. Estos valores fueron definidos y establecidos a partir de la experiencia del equipo consultor, ya que no se cuenta con la información de la cuenca.

La condición de borde **“recarga”** requiere la obtención de un ráster que represente el comportamiento del coeficiente de infiltración en los cauces, lagos y terrazas, como parte de la zona acuífera. Para obtener esta información se multiplico la capa ráster del coeficiente de infiltración por la capa de precipitaciones promedios en toda la cuenca

---

(información extraída de un NETCDF donde se registran las precipitaciones históricas de todo el territorio). Obtenida la capa de recarga de tipo ráster, fue definido el nombre, dominio del modelo "top" y se carga la superficie obtenida anteriormente. Se dejó por defecto la profundidad de estanqueidad (*ponding depth*).

La última condición de borde son los "pozos de bombeo". Para la cuenca se elaboró un archivo .csv donde se incluyen columnas con los distintos datos requeridos para definir los pozos de bombeo. De esa información se agregó al modelo el identificador de pantalla (*screen ID*), donde se indica 1 a todos los pozos del archivo, las coordenadas, número del pozo, elevación (*Z* (m.s.n.m.)), *well bottom* (que es la diferencia entre la elevación y la profundidad del pozo), la profundidad del pozo, el identificador de la superficie (*Screen top Z*), el identificador de la profundidad del pozo con respecto a la superficie (*Screen bottom Z*), la tasa de bombeo (*Pumping rate* (m<sup>3</sup>/s)) que siempre se pone como valor negativo entendiendo que es un caudal que se extrae del pozo, y las fechas de comienzo y finalización de la prueba de bombeo (pueden indicarse la cantidad de días que demoró la prueba de bombeo o indicar la fecha de inicio y fin de la prueba de bombeo).

Importante es no dejar ninguna celda sin datos, para que el archivo pueda cargarlo completamente el software.

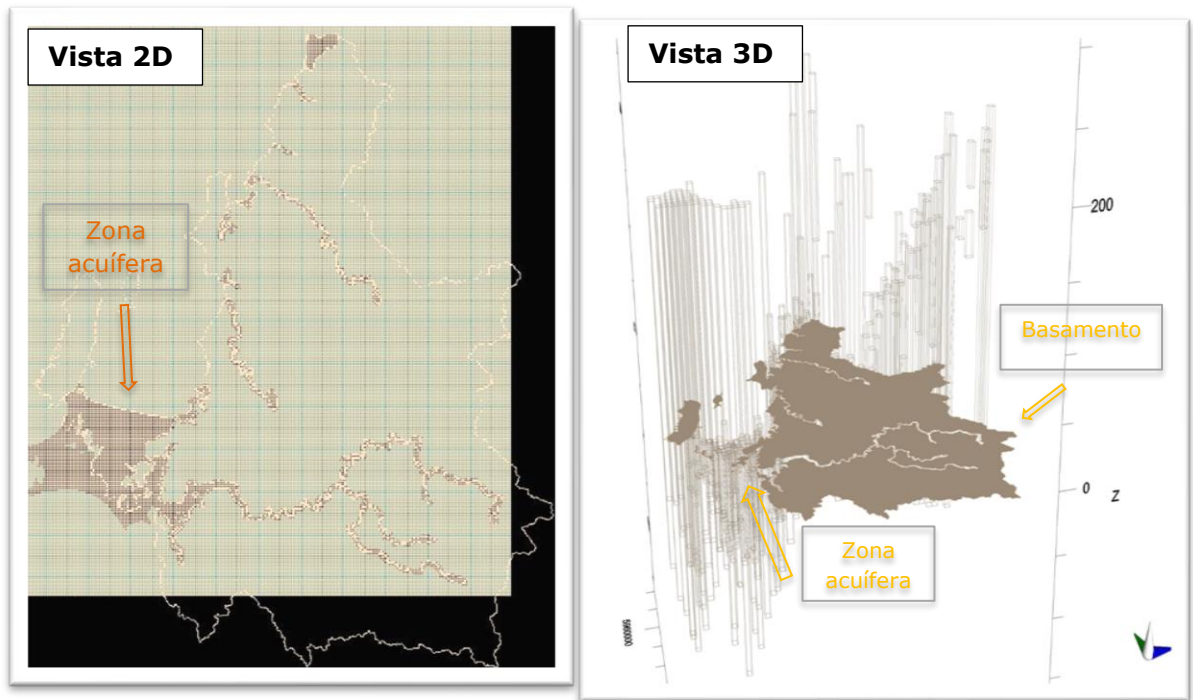
- **Definición de la Grilla**

Para la cuenca de Itata - Biobío, se definió una celda regular denominada conceptualmente como "grilla con diferencias finitas". El tamaño de las celdas fue de 200 x 200 m para toda la cuenca.

Es importante mencionar que, debido a existir sectores muy angostos del acuífero por haber suavizada su capa, que se ubican principalmente en la cordillera de la Costa, se requirió incluir el basamento para que pudiese ser reconocido por el Modflow. Para descartar esas zonas se considera la capa vectorial de la zona de basamento, que fue importada inicialmente, y se van desactivando individualmente, por líneas o polígonos las áreas que no son acuíferas.

La construcción resumida del modelo conceptual subterráneo en las cuencas costeras entre los ríos Itata y Biobío se muestra en la **Figura 3-25**, el cual finaliza con una grilla numérica del área que está conectada (área color café) que permite visualizar la forma de la cuenca en su vista 2D. En 3D (imagen derecha) se destaca la zona acuífera en forma de grilla con celdas homogéneas, y en color amarillo lo que constituye el basamento.

En el caso estudiado, los sectores acuíferos están separados, y para poder ingresar al modelo hubo que realizar una conexión que abarcara toda el área suavizada de las zonas acuíferas. Al construir la grilla, se ha precedido a dejar inactivas todas las celdas que forman parte del basamento.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-25 Grilla numérica con celdas 200x200 obtenida en Visual Modflow Flex para el área de estudio**

---

### 3.2.14. Modelo Conceptual Numérico Integrado

Finalmente, con todas las capas anteriormente descritas se genera el modelo conceptual subterráneo de la cuenca, en el que se reflejan las variables más importantes tanto hidrogeológicas como secundarias. En la **Figura 3-27** se presenta el modelo conceptual subterráneo en su representación 3D y cartográfica que incluye la delimitación del área acuífera con las profundidades del basamento, las captaciones subterráneas, las condiciones de bordes y la dirección de flujo en la cuenca.

Las entradas de la cuenca se producen por infiltración de la precipitación directa en el acuífero y entradas laterales por escorrentía subsuperficial. En cuanto a las salidas, se identifican los bombeos, salidas subterráneas hacia el mar, subterráneas hacia el Biobío y afloramientos al sistema superficial.

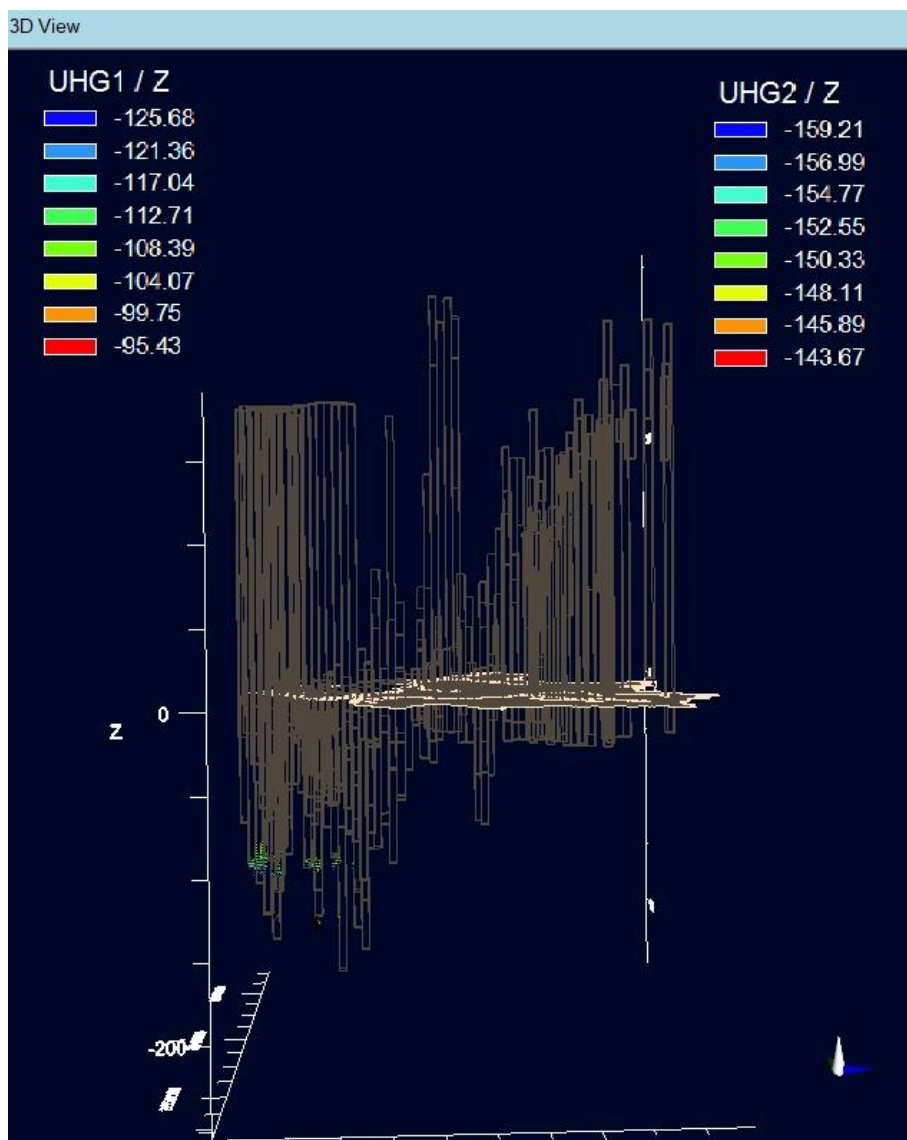
Además, los flujos poseen una dirección este-oeste producto de la pendiente de la cuenca, siendo principalmente depositados o almacenados en el sector de la ciudad de Concepción, cuya zona costera con orientación al norte representa la principal salida al mar desde el acuífero. Más al norte, las quebradas que provienen de la cordillera de la Costa generan una desembocadura subterránea al mar, pero con una menor magnitud con relación al intercambio de agua dulce y salada que ocurren en la zona costera de Concepción. Esto puede representar que las comunidades ubicadas al norte de la cuenca se vean más amenazadas a la falta de disponibilidad hídrica dado que los suministros de los sectores de acuífero son bajos, generando una mayor dependencia del recurso superficial.

En adición a lo anterior, las unidades hidrogeológicas identificadas también poseen una relevancia importante en este flujo subterráneo debido a que los sectores con una alta permeabilidad solo se distribuyen por las ciudades de Concepción y Talcahuano. A una mayor altitud el escurrimiento de agua en los acuíferos no tiene la capacidad de almacenarse debido a que las características de los suelos son dinámicas al flujo de agua que escurre por quebradas, que además no permiten depositarse debido a una angosta área y una pendiente más pronunciada en esas zonas, las cuales también limitan directamente con rocas intrusivas.

Estas características definidas en las distintas unidades hidrogeológicas también muestran que existen distintas composiciones químicas en las aguas. Por ejemplo, las concentraciones de Hierro se encuentran sobre la norma establecida en sectores de mayor altitud, las que desembocan en la zona norte de la cuenca. En cambio, en una zona con mayor deposición de sedimentos las concentraciones de hierro tienden a estar dentro de la norma.

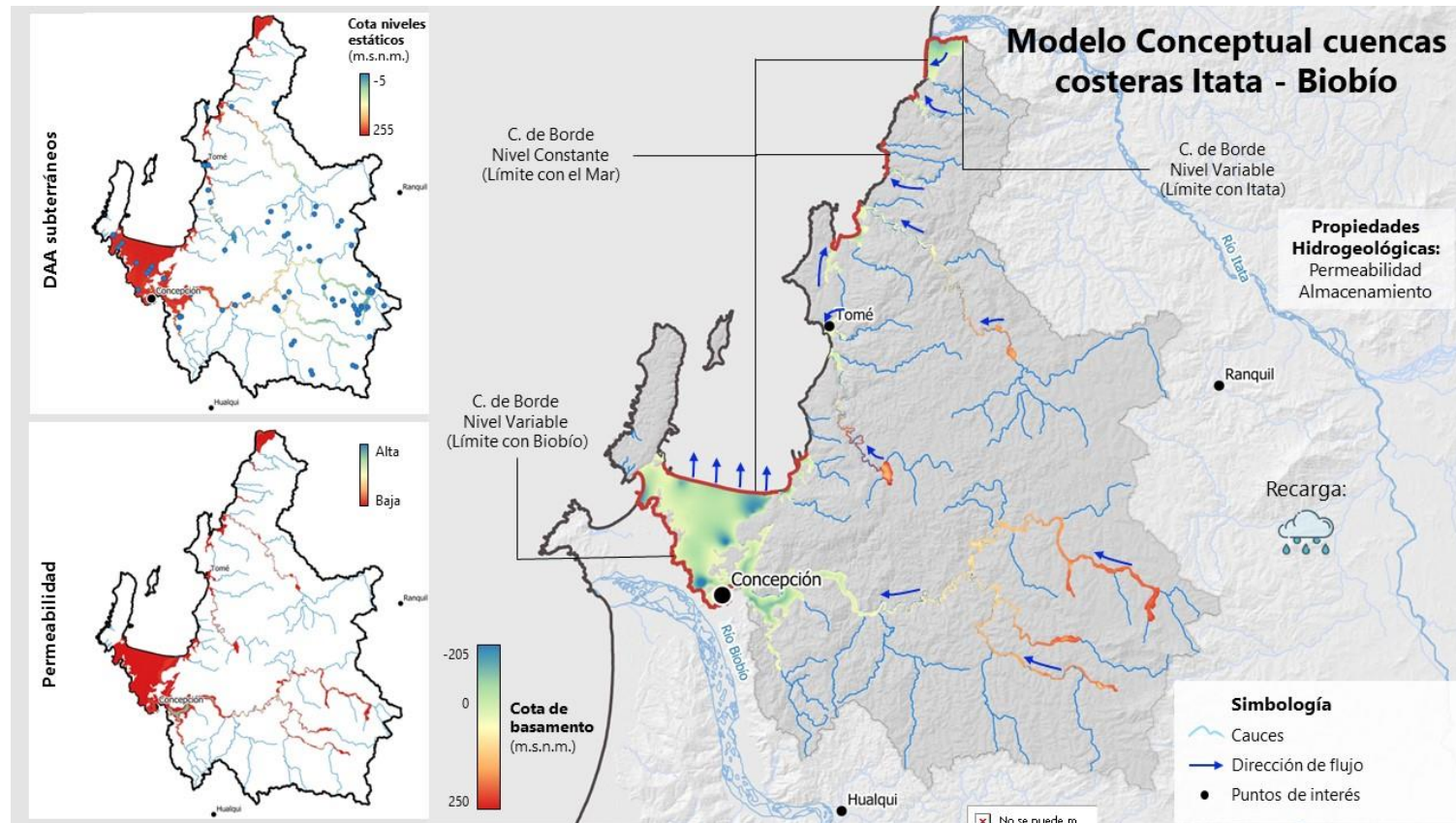
Dentro de la distribución espacial de la hidroquímica ocurre un orden inverso al mencionado con anterioridad al observar las durezas de las aguas. Estas se concentran mayoritariamente en zonas de deposición de sedimentos, siendo la ciudad de Concepción y Talcahuano las más afectadas, mientras que en el sector norte de la cuenca tal situación no ocurre, considerando que son aguas blandas. Sin embargo, para efectos prácticos, estas aguas provocan que cambios en el sabor de aguas dulces y mayor concentración de sarro, no así una mayor concentración de Hierro en las aguas ya que esta afecta principalmente

a plantas. Por último, el análisis completo de la hidroquímica de las aguas de la cuenca del Itata-Biobío se adjunta en el Anexo H-1.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-26 Vista en 3D en Visual Modflow Flex para el área de estudio**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-27 Modelo conceptual subterráneo de la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío**

#### 4. MODELO HIDROLÓGICO NUMÉRICO DE LA CUENCA

En el presente capítulo se detalla el desarrollo del modelo numérico en WEAP (*Water Evaluation And Planning System*) para la cuenca de estudio. El software WEAP está orientado a la modelación del recurso hídrico superficial y su gestión, pudiendo incluir la parte subterránea con algunas limitaciones. Adicionalmente a lo comentado en estos capítulos, en el Anexo H-3 se incluye el material asociado a la Transferencia de Capacidades en Modelación Hidrológica desarrollada en el marco de este estudio.

##### 4.1. Cauces Superficiales

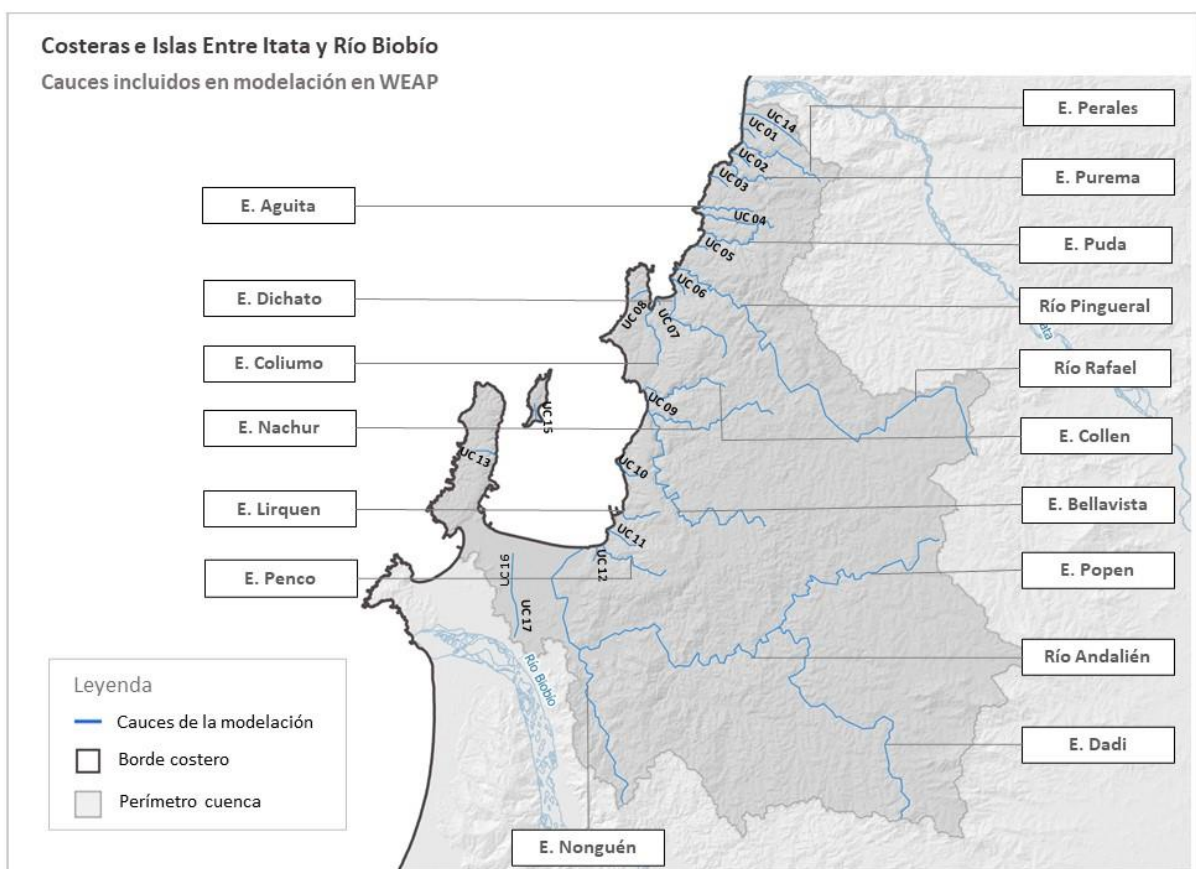
Los cauces principales en la cuenca corresponden a los ríos Andalién, Rafael y Pingueral. Cabe mencionar que en las zonas colindantes con el mar existen una serie de pequeñas quebradas, cuyas cuencas asociadas tienen tamaños pocos relevantes para el alcance de este plan, por esta razón se decide agruparlas y representar su cauce con un elemento denominado "Unificación Costeras".

**Tabla 4-1 Cauces superficiales del modelo en WEAP**

Nombre cauces superficiales			
1	Río Andalién	19	Estero Quebrada Honda
2	Río Pingueral	20	Unificación Costeras 1
3	Río Rafael	21	Unificación Costeras 2
4	Estero Agüita de Los Leones	22	Unificación Costeras 3
5	Estero Bellavista	23	Unificación Costeras 4
6	Estero Coliumo	24	Unificación Costeras 5
7	Estero Collen	25	Unificación Costeras 6
8	Estero Conuco	26	Unificación Costeras 7
9	Estero Dadi	27	Unificación Costeras 8
10	Estero Dichato	28	Unificación Costeras 9
11	Estero Lirquén	29	Unificación Costeras 10
12	Estero Nachur	30	Unificación Costeras 11
13	Estero Nonguén	31	Unificación Costeras 12
14	Estero Penco	32	Unificación Costeras 13
15	Estero Perales	33	Unificación Costeras 14
16	Estero Popen	34	Unificación Costeras 15
17	Estero Pudá	35	Unificación Costeras 16
18	Estero Purema	36	Unificación Costeras 17

Fuente: Elaboración propia

Los cauces se ingresan al modelo WEAP como un elemento "Río", que corresponde a un elemento lineal al que se realizan aportes y extracciones de caudal desde otros elementos de WEAP. Los 36 cauces considerados en la modelación se identifican con los nombres de la **Tabla 4-1** y se observan espacialmente en la **Figura 4-1**.

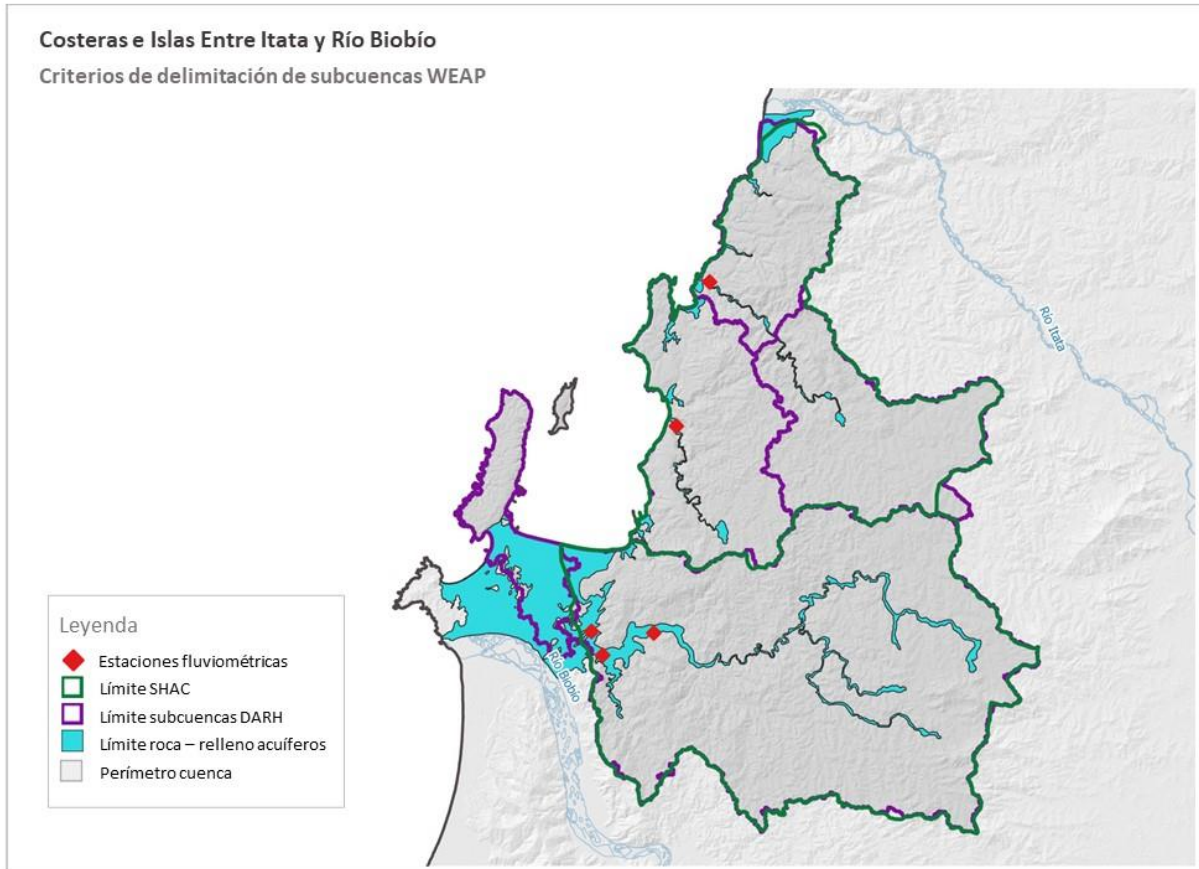


Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-1 Cauces considerados en el modelo WEAP**

#### 4.2. Subcuencas Superficiales

La cuenca de estudio es dividida en subcuencas con el fin de lograr mayor detalle y precisión en el modelo. Para estas subdivisiones se ha tomado como base la delimitación de subcuencas del Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) de la Dirección General de Aguas, también se consideran los límites de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), la presencia de estaciones fluviométricas y la existencia de humedales u otras zonas de importancia hidrológica. Todos estos criterios se resumen en la **Figura 4-2**.



Nota: El límite roca – relleno ha sido establecido durante la realización de este estudio en el proceso de realización del modelo hidrogeológico conceptual.

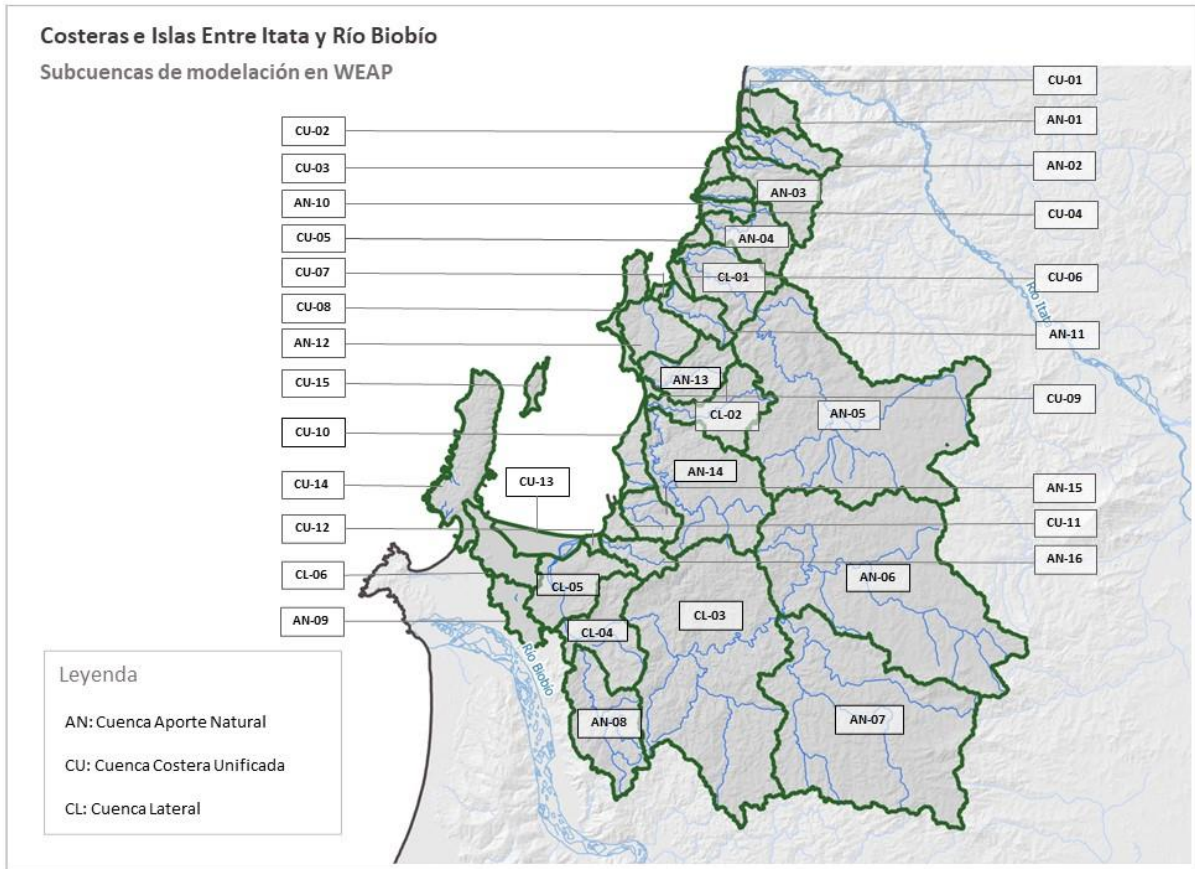
Fuente: Elaboración propia

#### **Figura 4-2 Criterios utilizados para delimitar subcuencas WEAP**

El proceso de delimitación de las subcuencas se ha realizado por medio de herramientas SIG a través de procesamiento de modelos digitales de elevación (DEM, por sus siglas en inglés).

Al tratarse de cuencas costeras que desembocan en el mar, existen algunas de pequeño tamaño y baja relevancia para un plan de gestión hídrica, estas se han agrupado espacialmente en unidades denominadas cuencas costeras unificadas o **“CU”**. Las otras cuencas se clasifican como: **“AN”**, de aporte natural, que corresponden a las cuencas de cabecera que no reciben aportes desde otras cuencas y **“CL”**, de cuencas laterales, las cuales reciben caudal desde otras cuencas.

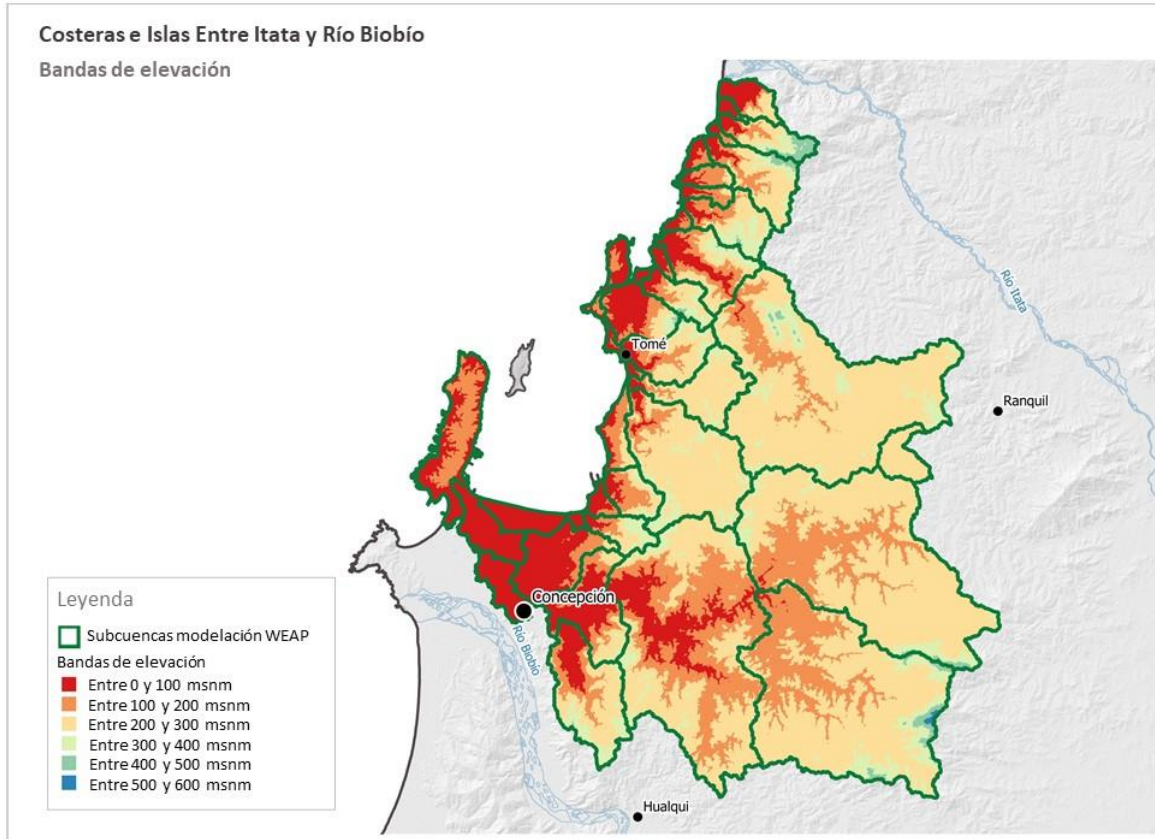
Las subcuencas son representadas en WEAP con elementos de **“Unidad Hidrológica”** o **“Catchment”**. En total se tienen 37 subcuencas, presentadas en la **Figura 4-3**.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-3 Subcuencas de modelación en WEAP**

Un aspecto importante que considerar en un modelo hidrológico son las distintas elevaciones dentro del área de estudio. Por esto, además de la delimitación anterior, se consideran 6 bandas de elevación, distanciadas cada 100 m.s.n.m. Esto se ha realizado utilizando el DEM ASTER Global Digital Elevation Model V003 de la NASA y es representado en la **Figura 4-4**.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-4 Bandas de elevación consideradas en la modelación en WEAP**

### 4.3. Forzantes Meteorológicas

Las forzantes meteorológicas de entrada para el modelo corresponden a precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad.

Con respecto a la precipitación y temperatura en el periodo histórico (abril de 1985 a marzo de 2020), se ha seleccionado el modelo meteorológico CR2MET V2.0, que posee datos distribuidos a escala diaria y mensual. La construcción de la grilla de precipitación y temperatura se basa en una regionalización en un reanálisis atmosférico de ERA-Interim, considerando la topografía local y parámetros calibrados de observaciones locales.

Para la validación de este modelo se comparan los valores de temperatura y precipitación que este ha simulado con los datos observados en diferentes estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Además, se calculan tres parámetros de eficiencia para cuantificar la bondad del ajuste.

Por otra parte, para la representación de las forzantes meteorológicas de humedad relativa y velocidad del viento, se utiliza la información incluida en el estudio "Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona

---

Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral” (DGA, 2019). Por último, para la obtención de fracción de nubosidad se utiliza la información obtenida a partir del proyecto EarthEnv.

#### **4.3.1. Forzantes Meteorológicas para el Periodo Histórico**

##### **4.3.1.1. Fuentes de Obtención de Forzantes Meteorológicas para el Periodo Histórico**

- **Precipitación**

Para la caracterización de la precipitación histórica en la cuenca de estudio, se utiliza el modelo CR2MET v2.0, desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), el cual contiene información de precipitación en una grilla rectangular de 0,05° latitud-longitud (5 km aproximadamente) para el territorio de Chile continental en el periodo entre 1979 a 2018 a escala diaria.

- **Temperatura**

Para la caracterización de la temperatura histórica en la cuenca, se utiliza el modelo CR2MET v2.0, que como se ha mencionado anteriormente, es un producto desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Este producto contiene información de temperatura en una grilla rectangular de 0,05° latitud-longitud (5 km aproximadamente) para el territorio de Chile continental en el periodo 1979 a 2020, a escala diaria.

- **Humedad Relativa**

La información de humedad relativa también es obtenida a partir de información grillada. En estos casos, la fuente de información corresponde al estudio “Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral” (DGA, 2019), el cual incluye humedad relativa con valores tri horarios desde 1979 a 2015, que abarcan desde la cuenca del río Itata (Código BNA 081) al norte, y las cuencas costeras e Islas entre río Palena y río Aysén (código BNA 1101) y cuenca Archipiélagos de las Guaitecas y de los Chonos (Código BNA 1102), al sur. Estos datos, disponibles en formato de grilla, son agregados a nivel diario para su uso en la modelación hidrológica.

---

- **Velocidad del Viento**

La información de velocidad del viento también es obtenida a partir del estudio "Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral" (DGA, 2019), el cual incluye velocidad del viento con valores tri horarios desde 1979 a 2015, que abarcan desde la cuenca del río Itata (Región del Biobío) hasta las cuencas costeras e Islas entre río Palena y río Aysén (Región de Aysén). Estos datos, disponibles en formato de grilla, son agregados a nivel diario para su uso en la modelación hidrológica.

- **Fracción de Nubosidad**

Por último, la fracción de nubosidad se obtuvo del proyecto EarthEnv (Wilson y Jetz, 2016), cuyo objetivo fue desarrollar capas estandarizadas de 1 km de resolución espacial, para monitorear y modelar biodiversidad, ecosistemas y climas. La base de datos entrega promedios mensuales derivados de 15 años de observaciones diarias de sensores remotos a nubes con una resolución de 1 km.

#### **4.3.1.2. Validación de Modelos Meteorológicos de Precipitación y Temperatura**

Tanto para precipitación como para temperatura, la información de los modelos considerados ha sido sometida a una validación comparándola con las magnitudes observadas en las estaciones meteorológicas de la zona. Las estaciones utilizadas para esta validación se presentan en la **Tabla 4-2**, indicando el código de la estación, a qué entidad pertenece (Dirección General de Aguas, DGA, o Dirección Meteorológica de Chile, DMC) y de qué datos se dispone. De cada una de ellas se obtiene la estadística de precipitación y temperatura (según corresponda) de la información pública manejada por la DGA y la DMC.

**Tabla 4-2 Estaciones meteorológicas utilizadas para la validación**

Estación	Código BNA	Fuente	Datos
Andalién	08220006-1	DGA	Precipitación
Bernardo O'Higgins Chillan	360011	DMC	Precipitación y temperatura
Cancha Los Litres	08135004-3	DGA	Precipitación
Carriel Sur Concepción	360019	DMC	Precipitación y temperatura
Chillancito	08133003-4	DGA	Precipitación
Coelemu	8141002-K	DGA	Precipitación
Concepción DGA	08410001-3	DGA	Precipitación
Dichato	08210002-4	DGA	Precipitación
Estero Bellavista en Tomé	08210003-2	DGA	Precipitación
Estero Hualqui en Desembocadura	08393002-0	DGA	Precipitación
Estero Nonguén Frente U. Del Biobío	08220008-8	DGA	Precipitación
Itata en Coelemu	08141001-1	DGA	Precipitación
Las Pataguas	08220005-3	DGA	Precipitación
Quilaco	08318002-1	DGA	Precipitación y temperatura
Rafael	08140001-6	DGA	Precipitación
Río Biobío en Desembocadura	08394001-8	DGA	Precipitación

Fuente: Elaboración propia

Para validar los modelos meteorológicos de precipitación y temperatura, se comparan los datos observados en las estaciones meteorológicas, mencionadas anteriormente, con los resultados de los modelos meteorológico en los puntos donde se ubican las estaciones. Se consideran tres parámetros de eficiencia:

- Eficiencia de Kling-Gupta (KGE):

$$KGE = 1 - \sqrt{\left( (r - 1)^2 + \left( \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1 \right)^2 \right)}$$

Donde:

$r$  = coeficiente de correlación lineal entre datos observados y simulados

$\sigma_{sim}$  = desviación estándar datos simulados

$\sigma_{obs}$  = desviación estándar datos observados

$\mu_{sim}$  = promedio datos simulados

$\mu_{obs}$  = promedio datos observados

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{sim}(t) - Pp_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{obs}(t) - \overline{Pp_{obs}})^2}$$

Donde:

$T$  = número total de pasos de tiempo.

$Pp_{sim}(t)$  = precipitación simulada en tiempo "t".

$Pp_{obs}(t)$  = precipitación observada en tiempo "t".

$\overline{Pp_{obs}}$  = promedio de la precipitación observada.

- Coeficiente de determinación ( $R^2$ ):

$$R^2 = \frac{(\sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{obs}(t) - \overline{Pp_{obs}})(Pp_{sim}(t) - \overline{Pp_{sim}}))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{obs}(t) - \overline{Pp_{obs}})^2 \sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{sim}(t) - \overline{Pp_{sim}})^2}$$

Donde:

$\overline{Pp_{sim}}$  = promedio de la precipitación simulada

Para facilitar el análisis de los indicadores de eficiencia se han establecido cuatro tramos para clasificar la bondad del ajuste, los cuales se indican en la **Tabla 4-3** con sus respectivas fuentes de información.

**Tabla 4-3 Indicadores de eficiencia**

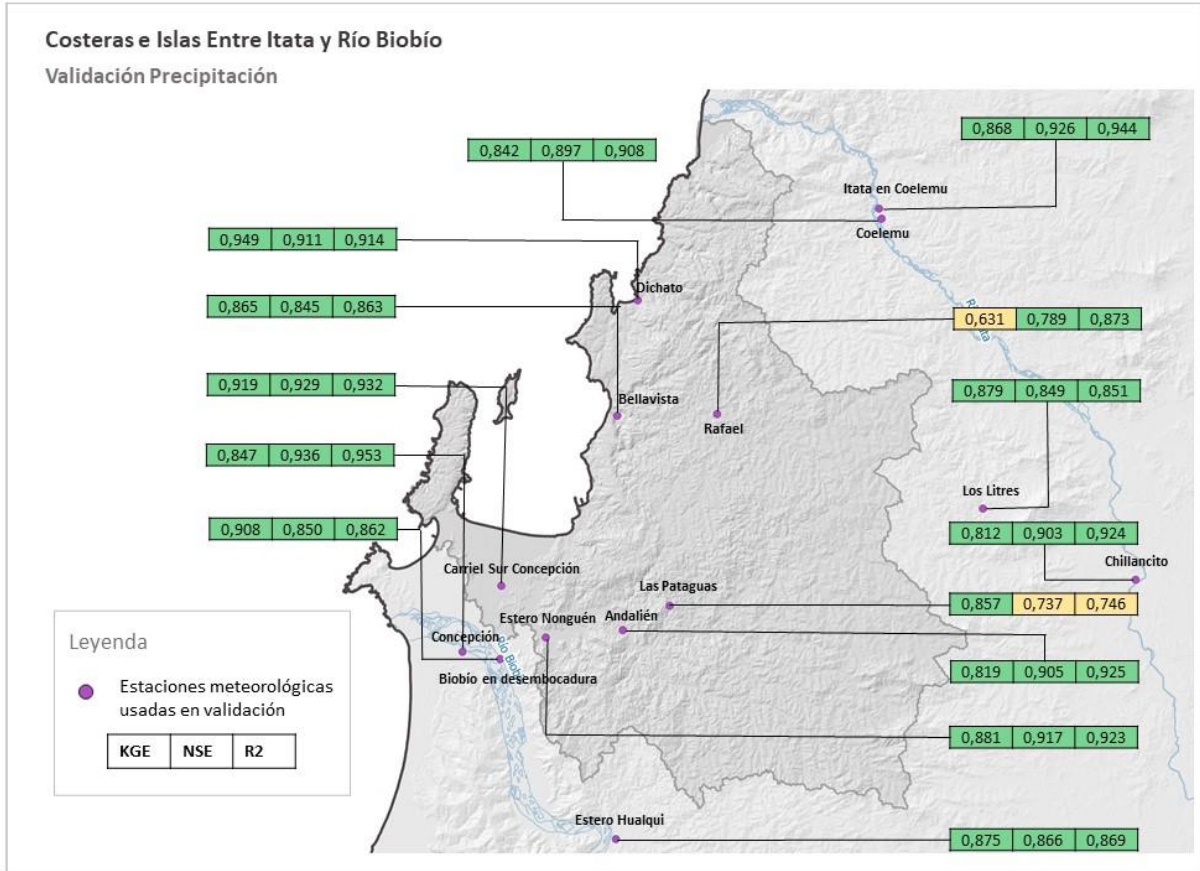
Clasificación	KGE	NSE	$R^2$
Insuficiente	<0,5	<0,5	<0,25
Satisfactorio	0,5 - 0,65	0,5 - 0,65	0,25 - 0,5
Bueno	0,65 - 0,75	0,65 - 0,75	0,5 - 0,75
Muy bueno	>0,75	>0,75	>0,75
Fuente	(Hossain, S.; Hewa, G.A. & Wella-Hewage, S., 2019)	(Hossain, S.; Hewa, G.A. & Wella-Hewage, S., 2019)	(Ku-Cheng, K. & Ming-Shyan, H., 2020)

Fuente: Elaboración propia

- **Validación del Modelo de Precipitación**

Como se mencionó anteriormente, para la precipitación se utiliza el modelo CR2MET v2.0 y su validación se realiza comparando observaciones de 14 estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Cabe mencionar que se consideraron valores medios mensuales para el cálculo de los índices de eficiencia, los resultados se observan en la **Figura 4-5**, donde cada índice esta resaltado con el color correspondiente a su clasificación según la **Tabla 4-3**.

Se puede observar en la **Figura 4-5** que los indicadores de todas las estaciones clasifican en el rango bueno o muy bueno.

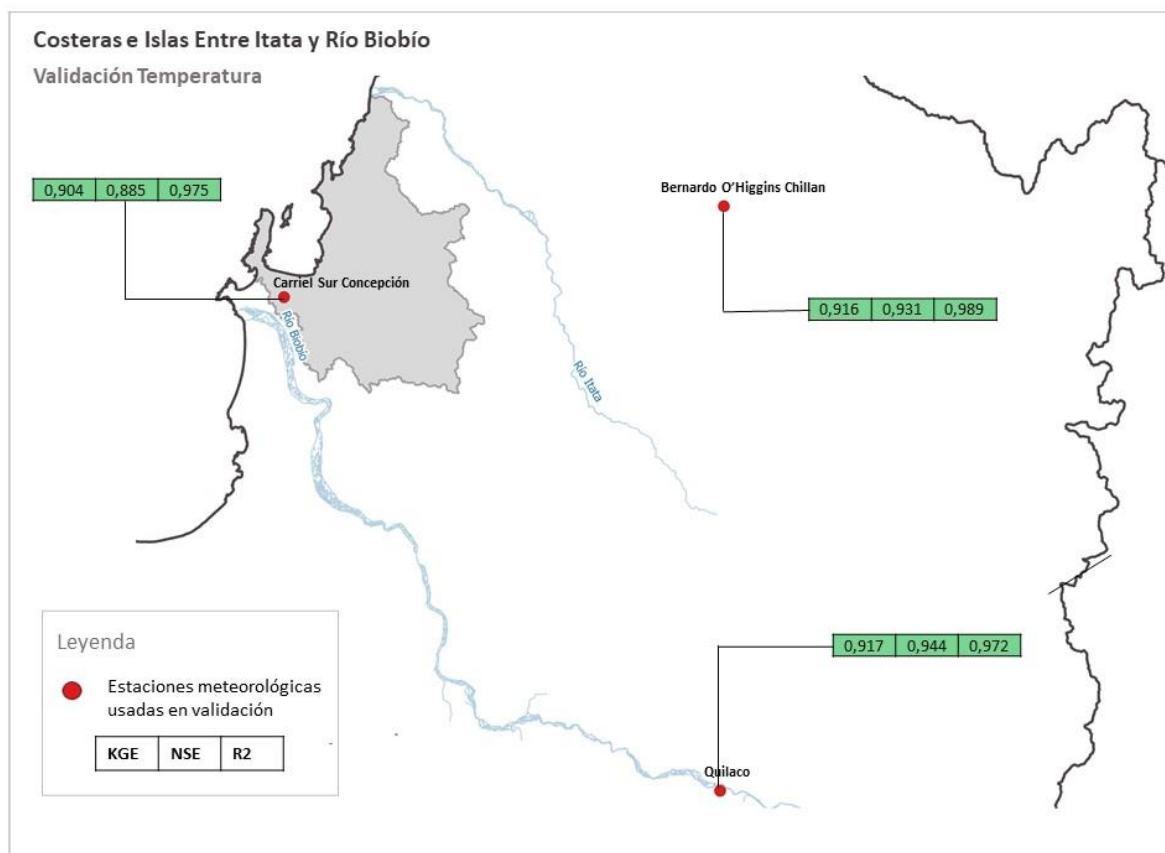


Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-5 Validación del modelo de precipitación del periodo histórico**

- **Validación del Modelo de Temperatura**

Al igual que para la precipitación, la temperatura se obtiene del modelo CR2MET v2.0. La validación se realiza comparando los valores del modelo con las series observadas de tres estaciones cercanas a la cuenca de estudio. Los índices de eficiencia para cada estación y su clasificación según los colores de la **Tabla 4-3** se observan en la **Figura 4-6**. En este caso, los valores de los tres índices de cada estación indican un muy buen ajuste.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-6 Validación del modelo de temperatura del periodo histórico**

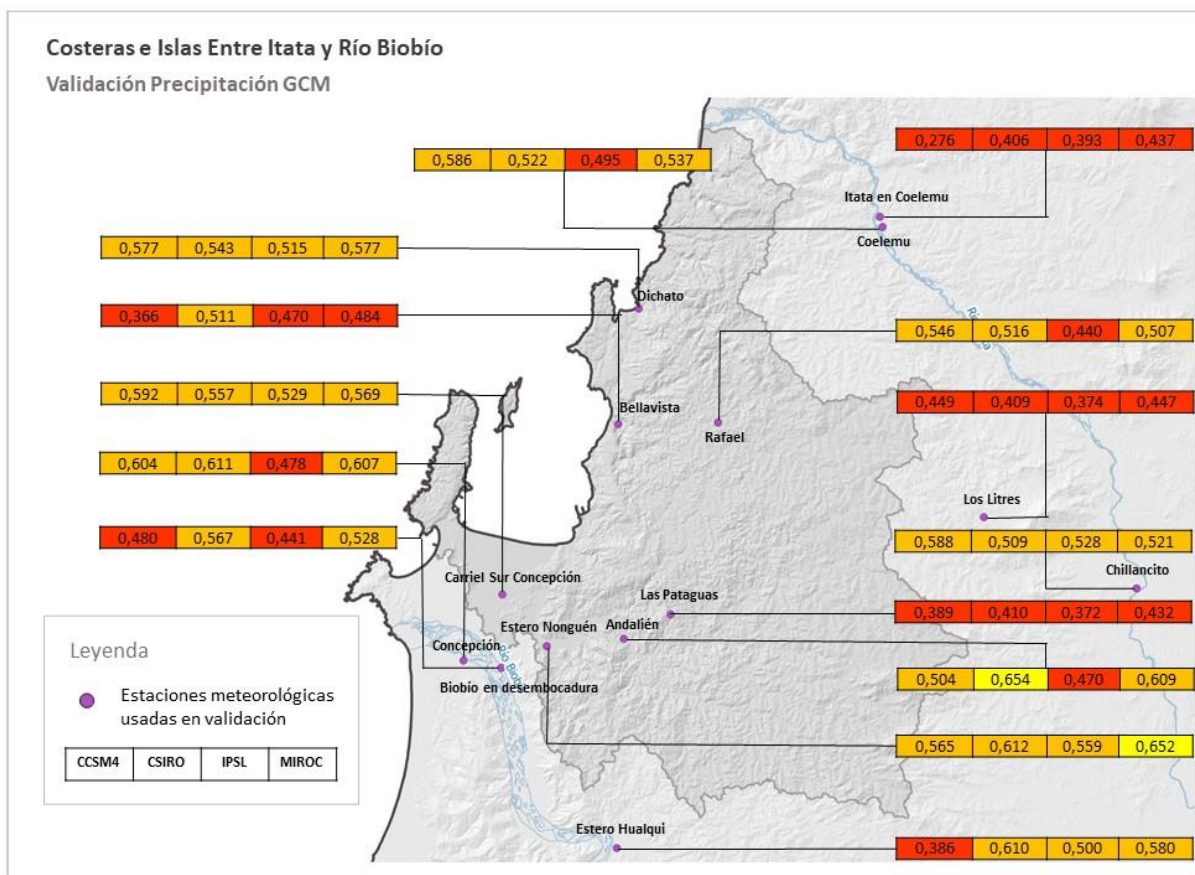
#### 4.3.2. Forzantes Meteorológicas para el Periodo Projectado

Para el periodo futuro (2021 – 2060) se consideran las mismas cinco forzantes meteorológicas que para el periodo histórico. En el caso de la velocidad del viento, la fracción de nubosidad y la humedad relativa, se utiliza una extensión de las series históricas, tomando para cada mes del periodo proyectado el promedio mensual del periodo histórico correspondiente a esa forzante.

Por otro lado, para la precipitación y temperatura se evalúan cuatro sets de Modelos de Circulación Global (o GCM, por sus siglas en inglés), obtenidos desde el estudio Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral (DGA, 2019).

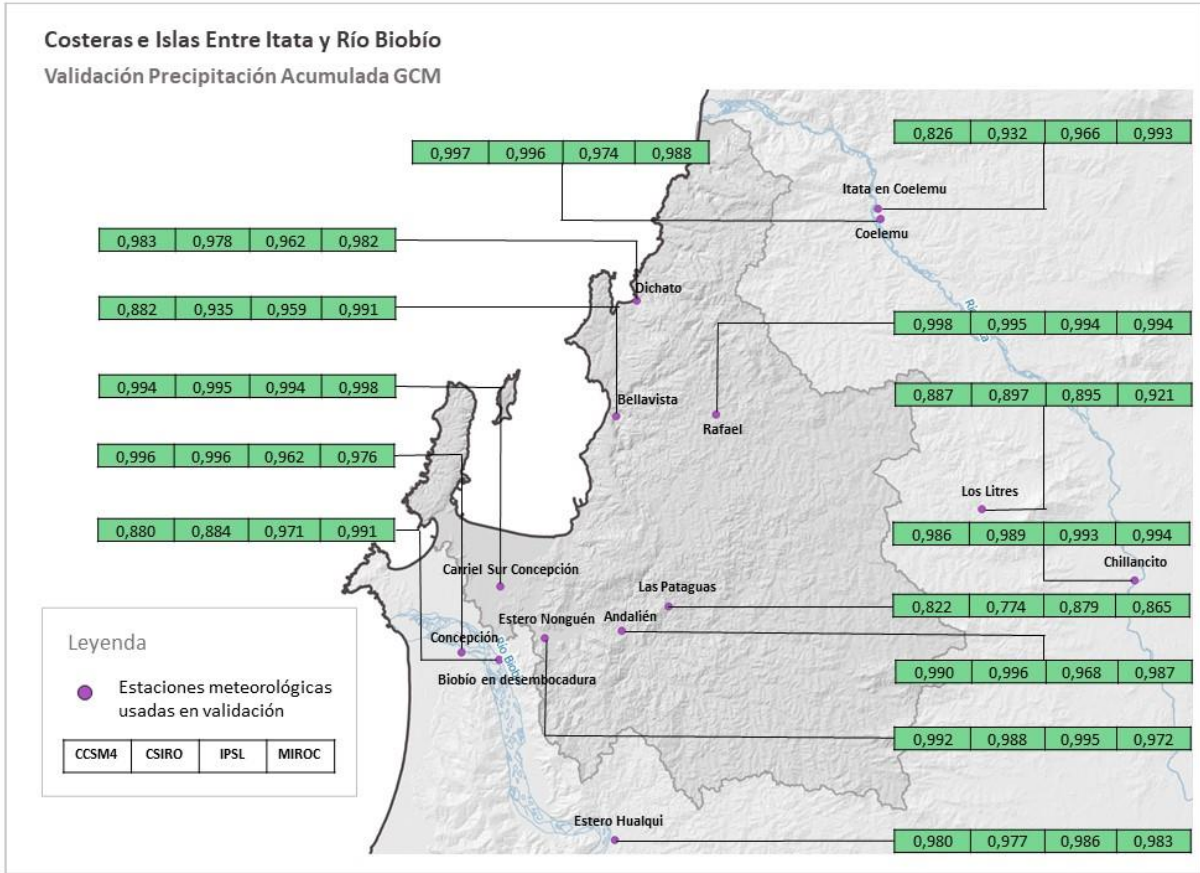
Los modelos evaluados corresponden al MIROC, CSIRO, CSM4 y el IPSL, todos bajo el escenario RCP 8.5. La forma de selección fue comparar la precipitación media mensual y la precipitación acumulada en el periodo histórico de cada modelo, con la estadística histórica de la DGA y evaluar el ajuste mediante el índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE) y el coeficiente de determinación  $R^2$ .

En la **Figura 4-7** se muestran los valores obtenidos de KGE para la precipitación media mensual en los cuatro GCM y en la **Figura 4-8** se muestran los valores del coeficiente  $R^2$  de la precipitación acumulada en los cuatro GCM. Considerando estos resultados, se ha decidido que el modelo MIROC es el de mejor ajuste y el que se usa para la modelación del periodo futuro.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-7 Índice KGE de la precipitación media mensual simulada por los modelos GCM en las estaciones DGA**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-8 Coeficiente de determinación  $R^2$  de la precipitación acumulada simulada por los modelos GCM en las estaciones DGA**

#### 4.3.3. Procesamiento de la Información Meteorológica

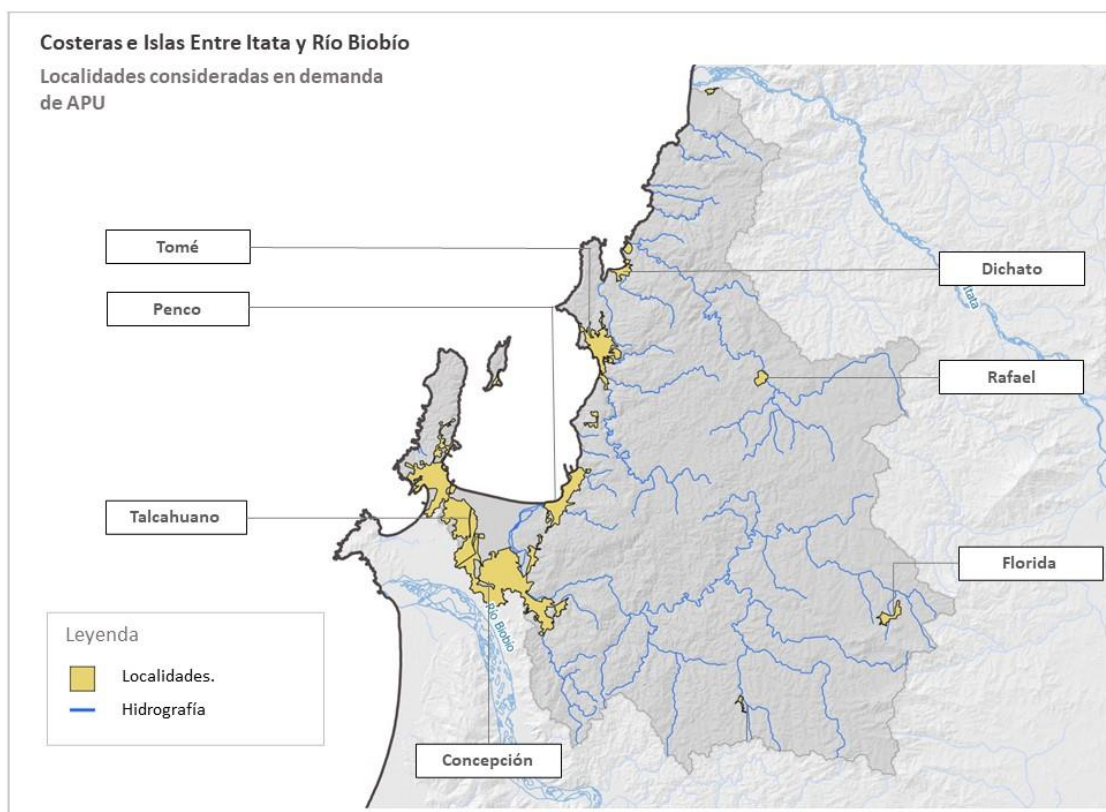
Para obtener valores mensuales de cada forzante, se hizo el cruce de información meteorológica con las bandas de cada subcuenca, así se obtienen valores de precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y fracción de nubosidad para cada banda de elevación de cada subcuenca. Este procesamiento se realizó en R.

#### 4.4. Demanda de Agua Potable Urbana

La demanda de Agua Potable Urbana considerada en la modelación hidrológica incluye las 7 principales localidades de la cuenca:

- Concepción
- Dichato
- Florida
- Penco
- Rafael
- Talcahuano
- Tomé

En la **Figura 4-9** se muestra la ubicación de estas localidades, las cuales se ingresan en el modelo de WEAP como elementos de **Sitio de Demanda**. Las localidades costeras de Concepción, Talcahuano, Penco, Tomé y Dichato se abastecen únicamente de fuentes superficiales, mientras que en Rafael y Florida hay también fuentes subterráneas. A excepción de Rafael, todas las localidades cuentan con plantas de tratamiento de aguas servidas donde son recolectadas y tratadas antes de ser devueltas a cauces superficiales o descargadas al mar.



Fuente: Elaboración propia

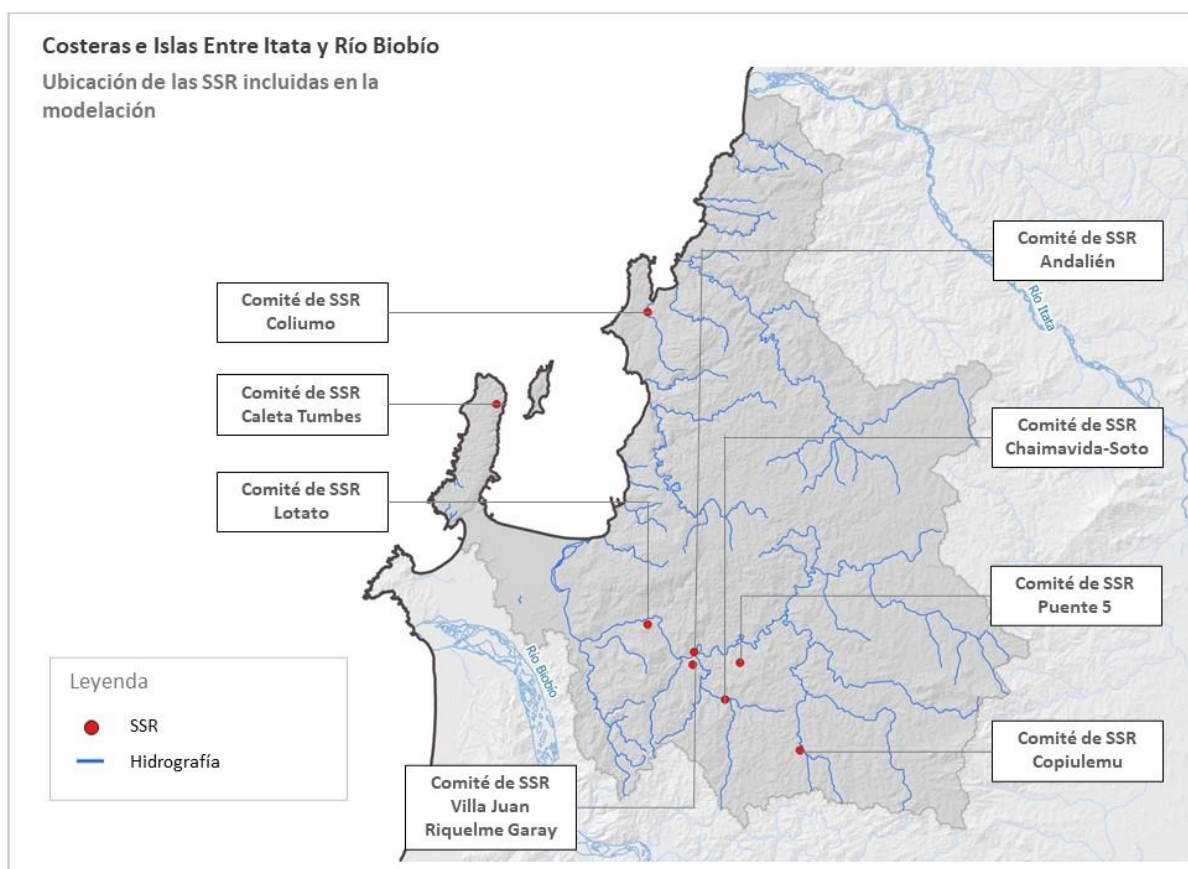
**Figura 4-9 Localidades incluidas en la demanda de Agua Potable Urbana**

La demanda de agua potable de cada localidad se ha estimado usando proyecciones de población y la dotación de cada una. Se ha asumido para todas las localidades un consumo igual a 20%.

#### 4.5. Demanda de Servicio Sanitario Rural

Existen 8 servicios sanitarios rurales (SSR) en la cuenca costera entre ríos Itata y Biobío, cada uno de los cuales se ha incluido como un **Sitio de demanda** en WEAP. El volumen de agua utilizado en cada sitio esta dado por la población y su dotación, esta última se ha establecido en 140 L/hab/día, debido a la falta de información al respecto.

Se ha considerado que los SSR tienen un consumo igual al de las localidades, es decir un 20% y el resto es restituído al acuífero por infiltración. Además, las pérdidas totales por producción y distribución se fijaron en un 20%. La ubicación de los comités de cada SSR y ubicación aproximada de la extracción se muestra en la **Figura 4-10**.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-10 SSR incluidos en la demanda de Servicio Sanitario Rural**

---

#### **4.6. Demanda de Agua para Uso Agrícola**

No existe una demanda agrícola importante en la cuenca del punto de vista de un plan estratégico de vista global.

#### **4.7. Demanda de Agua para Uso Industrial**

No existe una demanda industrial importante en la cuenca del punto de vista de un plan estratégico de vista global.

#### **4.8. Embalses**

No hay embalses importantes para la modelación de la cuenca.

#### **4.9. Centrales Hidroeléctricas**

No hay centrales hidroeléctricas importantes para la modelación de la cuenca.

#### **4.10. Sectores Acuíferos**

A pesar de que este plan no considera la modelación de aguas subterráneas, esta se ha representado en WEAP mediante 14 sectores acuíferos (**Figura 3-15**).

Estos sectores acuíferos se ingresan en WEAP como elementos de **Aguas Subterráneas**, los cuales son recargados por la percolación natural de la precipitación proveniente desde los elementos **Unidad Hidrológica**.

Las fracciones de percolación que cada elemento de **Unidad Hidrológica** envía a los elementos de **Aguas Subterráneas**, se establece de acuerdo con la porción de área que cada Unidad Hidrológica abarca en cada uno de los elementos de Aguas Subterráneas. De esta manera, si una Unidad Hidrológica posee solo un elemento de Agua Subterránea bajo ella, ésta dirige la totalidad de sus flujos de percolación hacia aquella unidad de Agua Subterránea; en caso de existir más de un elemento de Agua Subterránea bajo la Unidad Hidrológica, la división de este flujo se realiza de acuerdo con la fracción de área que la Unidad Hidrológica tiene sobre cada elemento de Agua Subterránea.








Es importante mencionar que si bien el método de humedad del suelo (utilizado por WEAP en las Unidades Hidrológicas que representan subcuencas para simular los procesos hidrológicos ocurridos dentro de éstas) esquematiza las subcuencas con dos baldes, uno para representar los horizontes de suelo más superficiales y otro para representar los más profundos, cuando una Unidad Hidrológica es conectada a un elemento Aguas Subterráneas


en ésta se elimina el balde más profundo, que pasa a ser reemplazado por el elemento Aguas Subterráneas.

Debido a que no se cuenta con información sobre el volumen de agua en los sectores acuíferos al inicio del periodo de modelación, este se supone igual al volumen actual que fue estimado con los niveles estáticos, los que a su vez fueron obtenidos de la interpretación de la campaña TEM y de información extraída de los expedientes de derechos de agua.

#### 4.11. Resumen Esquemático Modelo WEAP

**Tabla 4-4 – Resumen de elementos del modelo WEAP Itata-Biobío**

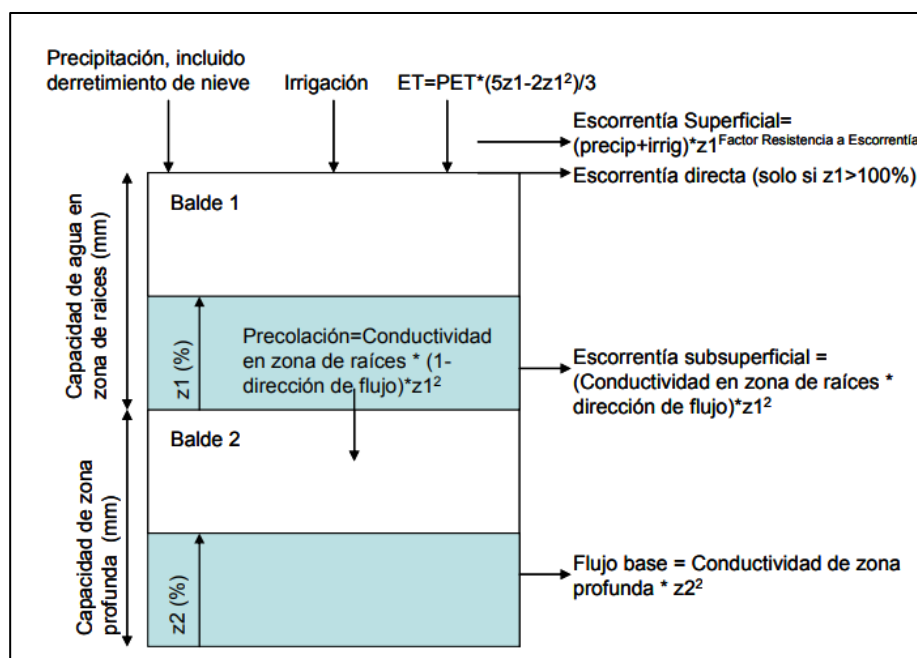
Elemento (español – inglés)	Simbología	Elementos en el modelo
Río - <i>River</i>		Ríos: Rafael, Pingueral y Andalién; Esteros: Agüita, Bellavista, Coliumo, Collén, Dadi, Dichato, Lirquén, Nachur, Nonguén, Perales, Penco, Popen, Pudá y Purema; Unificación de Costeras (UC) entre 1 y 17.
Agua subterránea - <i>Groundwater</i>		Sectores acuíferos AC_01 a AC_14, Mar y Acuífero del río Biobío
Otros suministros - <i>Other Supplies</i>		Río Biobío y río Itata
Sitio de demanda - <i>Demand site</i>		Localidades: LOC_CONCEPCION LOC_DICHATO LOC_FLORIDA LOC_PENCO LOC_RAFAEL LOC_TALCAHUANO LOC_TOME  SSR: SSR Andalién SSR Coliumo SSR Copiulemu SSR Chaimávida-Soto SSR Lotato SSR Puente 5 SSR Villa Juan Riquelme Garay
Unidad hidrológica - <i>Catchment</i>		Cuencas de aporte natural: AN_01 a AN_16 Cuencas laterales: CL_01 a CL_06 Cuencas Costeras Unificadas: CU_01 a CU_15
Escorrentía/Infiltración - <i>Runoff/infiltration</i>		Entre unidades hidrológicas y sectores acuíferos
Flujo de retorno - <i>Return flow</i>		Desde localidades y SSR hacia el mar, sectores acuíferos y/o cauces superficiales

Elemento (español – inglés)	Simbología	Elementos en el modelo
Link de transmisión – <i>Transmission Link</i>		Hacia LOC_ CONCEPCION desde río Biobío Hacia LOC_ DICHATO desde AC_09 Hacia LOC_ FLORIDA desde Estero Popen y AC_04 Hacia LOC_ PENCO desde Estero Nonguén Hacia LOC_ RAFAEL desde río Pingueral y el Molino Hacia LOC_ TALCAHUANO desde río Biobío Hacia LOC_ TOME desde Estero Nachur y Estero Bellavista

Fuente: Elaboración propia

#### 4.12. Parámetros y Factores de Ajuste

WEAP representa las unidades hidrológicas como dos baldes, uno en la zona superficial de las raíces y otro en la zona profunda (ver **Figura 4-11**), en cada uno de estos baldes suceden distintos procesos hidrológicos como escorrentía, percolación, evapotranspiración, los cuales involucran una serie de parámetros que se deben calibrar.



Fuente: Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile (2009)

**Figura 4-11 Esquema de modelación de WEAP**

Para agilizar el proceso de calibración, se definen factores asociados a la pendiente, uso de suelo y sector de cada subcuenca, que multiplican los parámetros y son fácilmente modificables en la sección de **"Key assumptions" o supuestos claves**, hasta obtener un set de factores que mejor ajuste entregan al modelo. En la **Tabla 4-5** se muestra que factores involucrados en los parámetros calibrados.

**Tabla 4-5 Factores de "Key assumptions" para calibrar parámetros**

<b>Sigla</b>	<b>Nombre</b>	<b>F. Pendiente</b>	<b>F. uso de suelo</b>	<b>F. Ajuste (sector)</b>
Kc	Coeficiente de cultivo		X	X
Sw	Capacidad de agua en zona de raíces	X	X	X
Dw	Capacidad de agua en zona profunda	X		X
RRF	Factor de resistencia a la escorrentía	X	X	X
Ks	Conductividad en zona de raíces	X	X	X
Kd	Conductividad en zona profunda	X		X
f	Dirección de flujo	X		X
Z <sub>1</sub> inicial	% de almacenamiento primer balde		X	

Fuente: Elaboración propia

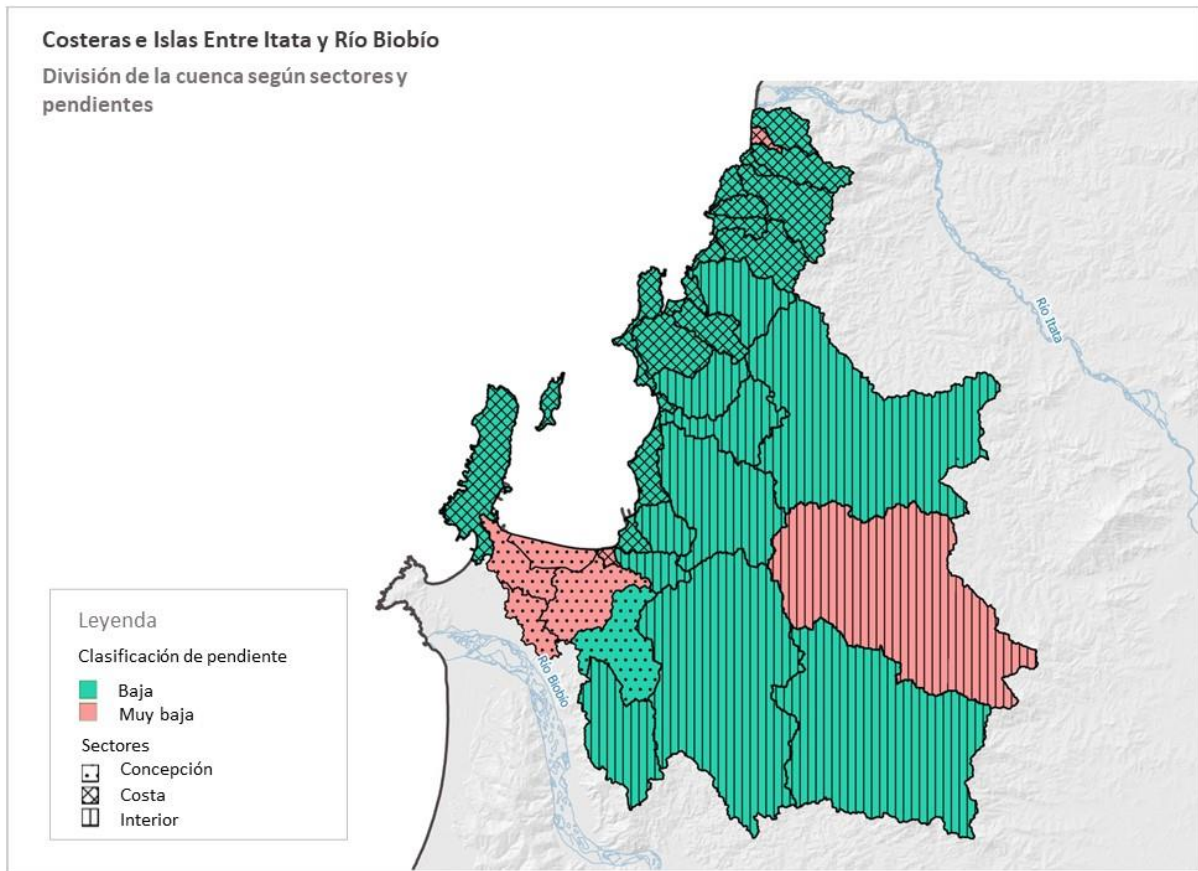
La clasificación según pendiente para la cada subcuenca es como se indica en la **Tabla 4-6**.

**Tabla 4-6 Clasificación de pendientes para las subcuencas modeladas en WEAP**

<b>Rango de pendientes</b>	<b>Clasificación</b>
0° - 7°	Muy baja
8° - 19°	Baja
20° - 24°	Moderada
25° - 28°	Alta
>29°	Muy alta

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-12** se muestra la división según pendientes y también los sectores de cada cuenca.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-12 División de la cuenca por sectores y pendiente**

Los factores ajustados según pendientes, usos de suelo y sectores se muestran en la **Tabla 4-7**, **Tabla 4-8** y **Tabla 4-10**, respectivamente. Estos valores, de manera inicial, se toman como referencia desde el estudio anterior (DGA, 2020), a excepción de los valores del coeficiente de cultivo (**Tabla 4-9**) que se calcularon con la metodología descrita en Hunink, J. et al. (2017).

**Tabla 4-7 Factores según pendiente**

Factores de pendiente	Dw	Kd	Ks	RRF	Sw	f
Muy alta	1.500	43.460	5	0,5	0.75	0,9
Alta	2.000	43.460	2,5	0,6	0,80	0,9
Moderada	3.000	65.185	2	0,7	0,85	0,85
Baja	4.500	86.915	1,2	0,8	0,9	0,8
Muy baja	5.000	86.915	1	1	1	0,8

Fuente: Elaboración propia basado en DGA, 2020

**Tabla 4-8 Factores según uso de suelo**

Factores de uso de suelo	Kc	Sw	RRF	Ks	Z1 inicial
Área urbana	Valor mensual	150	3	650	10
Bosque nativo		750	4	650	20
Cuerpos de agua		120	0.1	780	100
Cultivo agrícola		350	4	650	20
Eucalyptus globulus		750	4	650	20
Humedales		750	4	650	25
Matorrales y matorrales arborescentes		560	2	650	25
Plantación otras especies		750	4	650	20
Plantación Pinus radiata		750	4	650	20
Praderas		560	2	650	25
Suelo desnudo		150	1,6	650	15

Fuente: Elaboración propia basado en DGA, 2020

**Tabla 4-9 Variación mensual de índice Kc según uso de suelo**

Valor mensual Kc (uso de suelo)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Área urbana	0,78	0,79	0,79	0,80	0,79	0,81	0,83	0,82	0,79	0,79	0,78	0,79
Bosque nativo	1,05	1,03	1,04	1,05	1,03	1,03	1,07	1,06	1,03	1,06	1,04	1,04
Cuerpos de agua	0,84	0,77	0,79	0,83	0,82	0,84	0,89	0,98	0,80	0,86	0,83	0,80
Cultivo agrícola	0,95	0,96	0,98	0,99	0,97	0,97	1,00	0,98	0,95	0,95	0,94	0,94
Eucalyptus globulus	1,05	1,03	1,04	1,06	1,03	1,03	1,05	1,04	1,03	1,04	1,03	1,04
Humedales	0,88	0,87	0,87	0,91	0,91	0,92	0,95	0,93	0,89	0,90	0,88	0,88
Matorrales y matorrales arborescentes	1,02	1,01	1,02	1,04	1,01	1,01	1,04	1,04	1,01	1,03	1,01	1,01
Plantación otras especies	1,02	1,01	1,02	1,02	1,00	1,00	1,03	1,03	1,01	1,02	1,01	1,01
Plantación Pinus radiata	1,05	1,03	1,05	1,06	1,04	1,03	1,05	1,04	1,01	1,04	0,84	0,83
Praderas	0,99	0,98	0,99	1,02	1,01	0,99	1,04	1,02	0,97	0,99	0,98	0,98
Suelo desnudo	0,87	0,80	0,79	0,92	0,88	0,91	0,92	0,89	0,79	0,88	0,84	0,83

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-10 Factores de ajuste por sector**

Factores de Ajuste	Kc	Sw	Dw	RRF	Ks	Kd	f
Sector Concepción	1,5	1,0	2,0	1,0	0,8	0,12	0,9
Sector Interior	1,5	2,2	2,0	1,0	2,0	0,12	0,72
Sector Costa	1,5	1,0	2,0	1,0	0,8	0,12	0,8

Fuente: Elaboración propia desde DGA, 2020

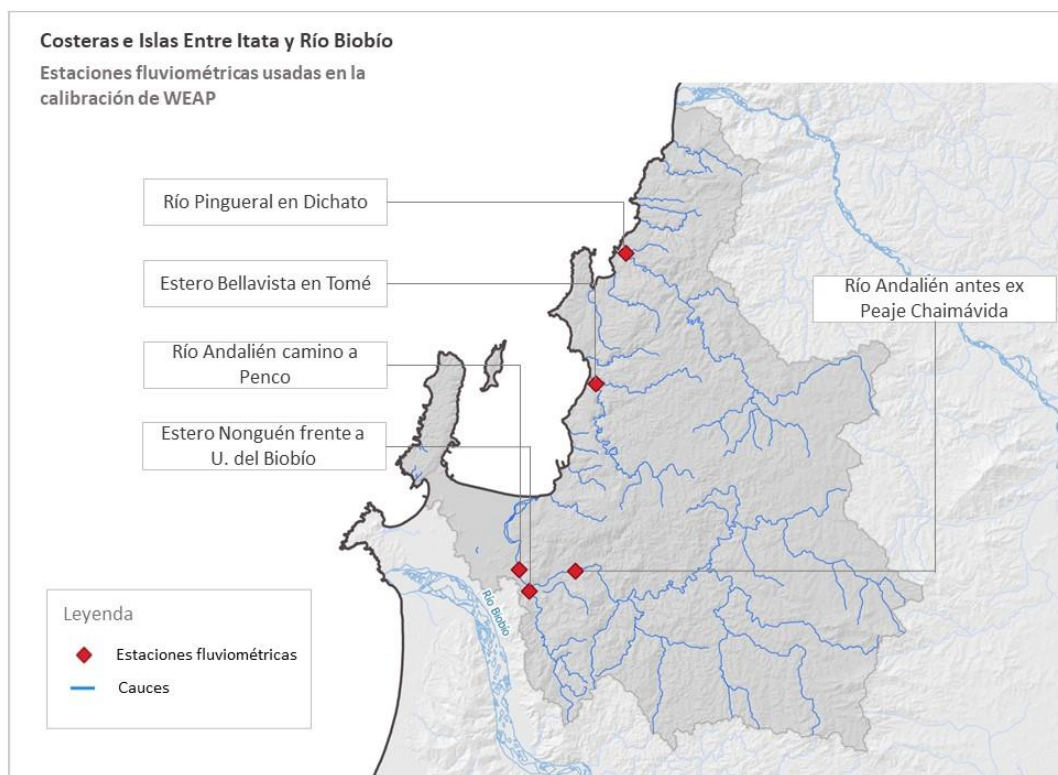
#### 4.13. Calibración del Modelo

Para La calibración del modelo WEAP se comparan los caudales modelados por WEAP con las mediciones disponibles en las estaciones fluviométricas ubicadas dentro de la cuenca. Las estaciones consideradas se presentan en la **Tabla 4-11** y su ubicación se puede ver en la **Figura 4-13**.

**Tabla 4-11 Estaciones fluviométricas usadas en la calibración del modelo**

Estación	Código BNA	UTM E (m)	UTM N (m)	Periodo con datos
Río Andalién antes ex Peaje Chaimávida	08220010-K	681352	5925167	Ene/2015 – Dic/2019
Río Andalién camino a Penco	08220001-0	675941	5925303	Abr/1985 – Nov/2019
Río Pingueral en Dichato	08210001-6	686206	5955683	Abr/1985 – Mar/1989
Estero Nonguén frente U. del Biobío	08220008-8	676919	5923237	Abr/2009 – Mar/2020
Estero Bellavista en Tomé	08210003-2	683322	5943150	Ago/2009 – Mar/2020

Fuente: Elaboración propia con información de <https://dga.mop.gob.cl/>



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-13 Ubicación de las estaciones fluviométricas utilizadas en la calibración del modelo en WEAP**

Para evaluar el ajuste entre el modelo y los caudales observados, se calculan a nivel mensual los índices KGE, NSE y el BIAS. Los resultados se muestran en la **Tabla 4-12**. Los índices muestran un buen ajuste entre las series comparadas de las cinco estaciones.

**Tabla 4-12 Valores de índices de eficiencia para la calibración de caudales mensuales**

Estación Fluviométrica	KGE	NSE	BIAS (%)
Río Andalién camino a Penco	0,86	0,79	4,87
Río Andalién antes ex Peaje Chaimávida	0,74	0,72	23,16
Río Pingueral en Dichato	0,82	0,74	8,70
Esteros Nonguén frente a U. del Biobío	0,75	0,56	15,14
Esteros Bellavista en Tomé (*)	0,84	0,77	6,12

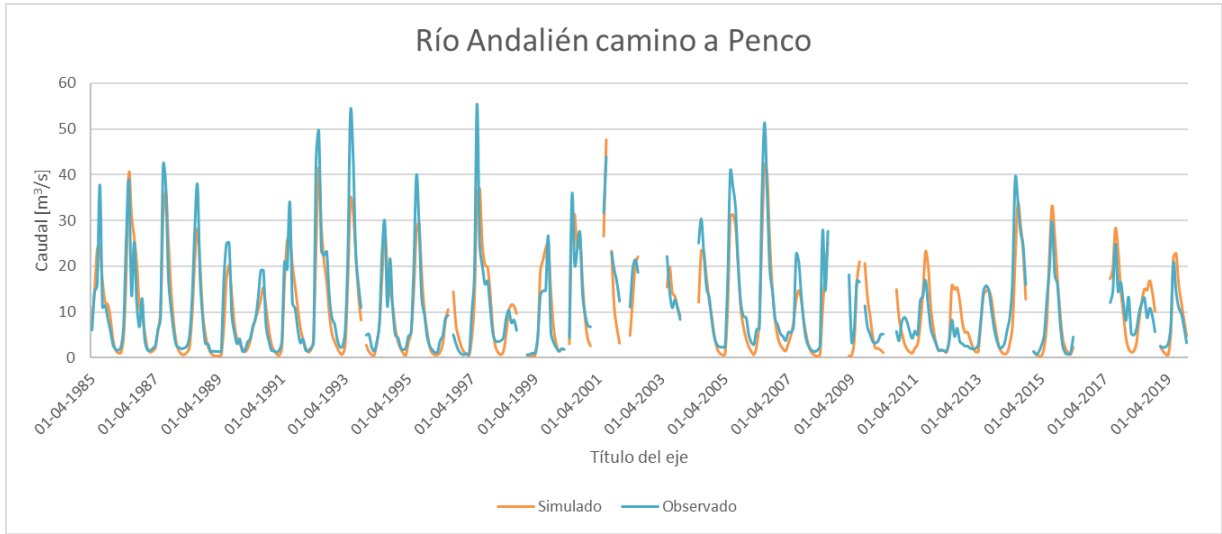
(\*): Comparación con modelo hidrológico de Essbio, no con observaciones de estación fluviométrica

Fuente: Elaboración propia

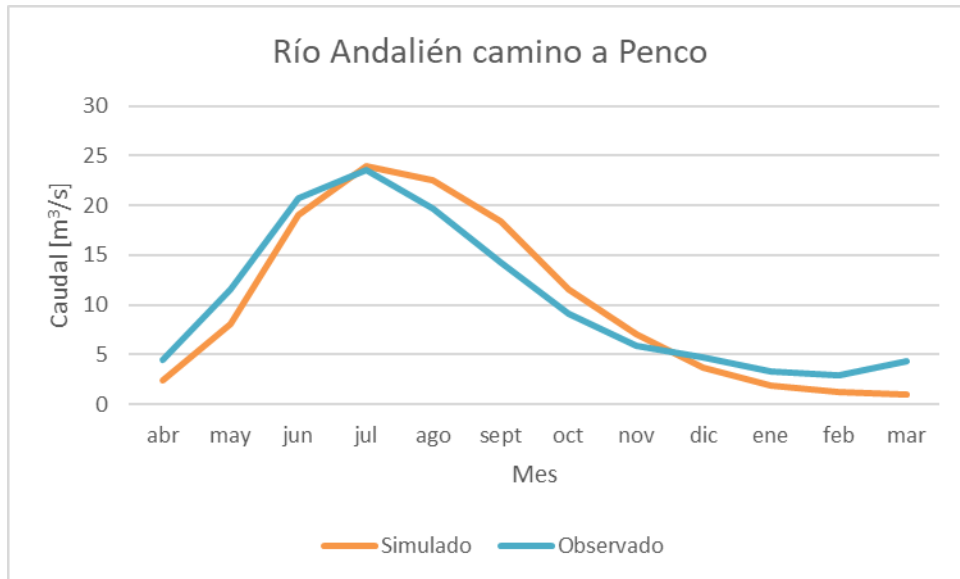
---

Adicionalmente, en las **Figura 4-14, Figura 4-15, Figura 4-16, Figura 4-17 y Figura 4-18** se presentan los gráficos de las series de caudales mensuales simulados y observados por estación y, además, sus curvas de variación estacional.

Cabe mencionar que en el caso de la estación Bellavista en Tomé, la comparación se realizó con los caudales modelados del estudio "Estudio Hidrológico Localidad de Tomé" (Essbio, 2020) y no con los caudales medidos por la estación DGA, ya que los caudales de la estación se ven afectados por el ingreso de agua del mar desde su desembocadura y también, aguas arriba de la estación, existe una barrera temporal de la captación de la sanitaria Essbio. Estos factores determinan que los registros de la estación no sean realmente representativos de la hidrología de la cuenca.



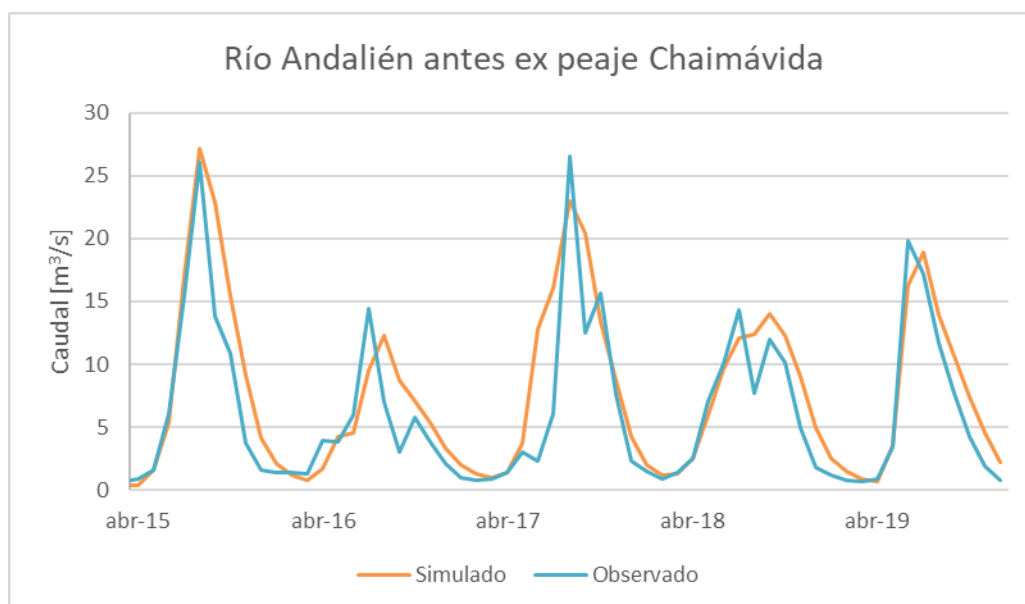
(a)



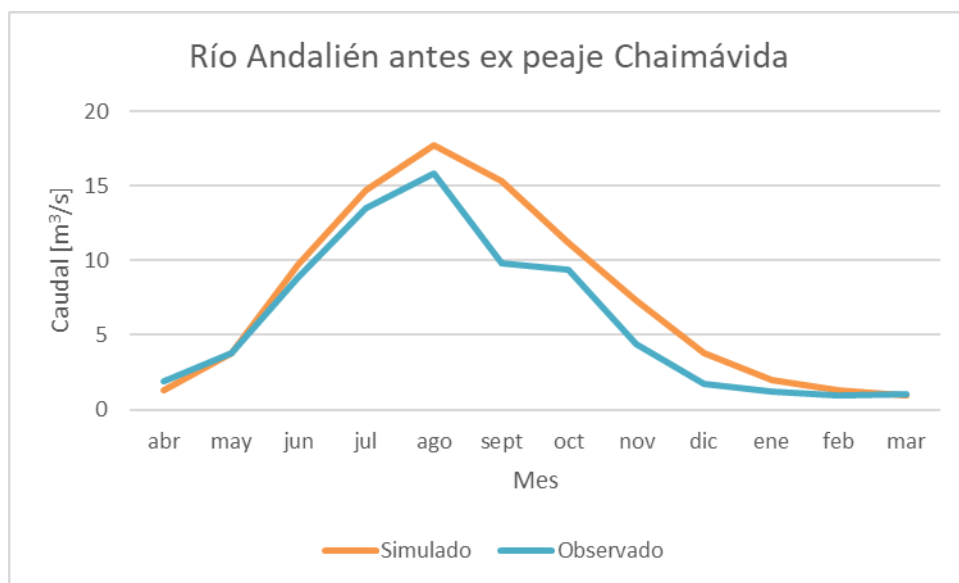
(b)

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-14 Para la estación Río Andalién camino a Penco: (a) Gráfico de la serie de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de caudales promedios mensuales observados y simulados**



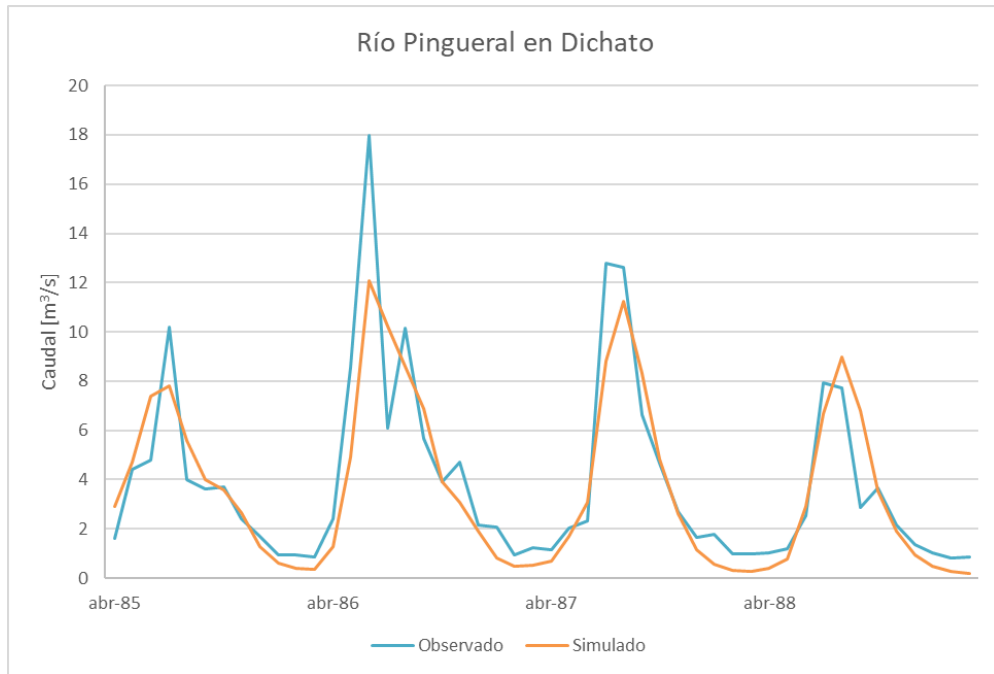
(a)



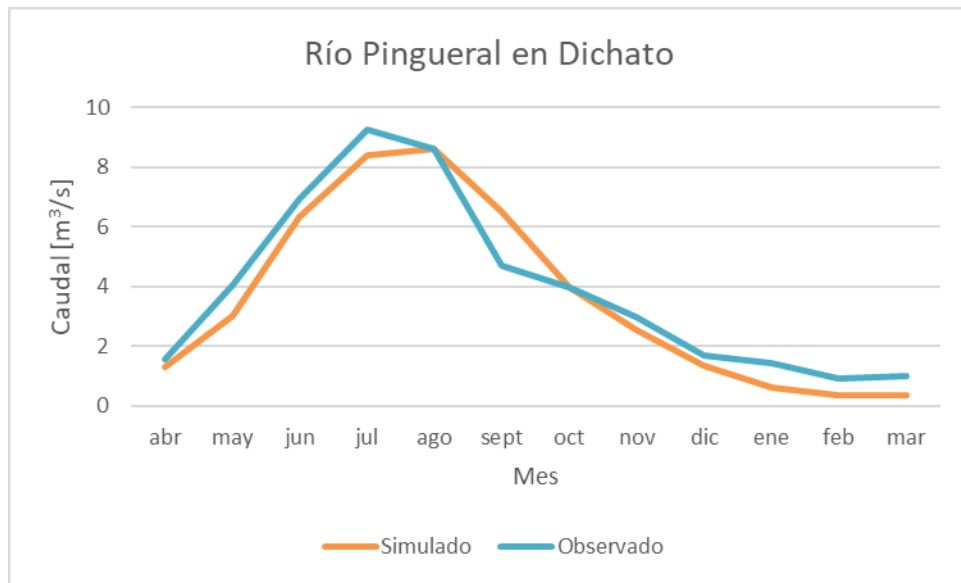
(b)

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-15 Para la estación Río Andalién antes ex Peaje Chaimávida: (a) Gráfico de la serie de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de caudales promedios mensuales observados y simulados**



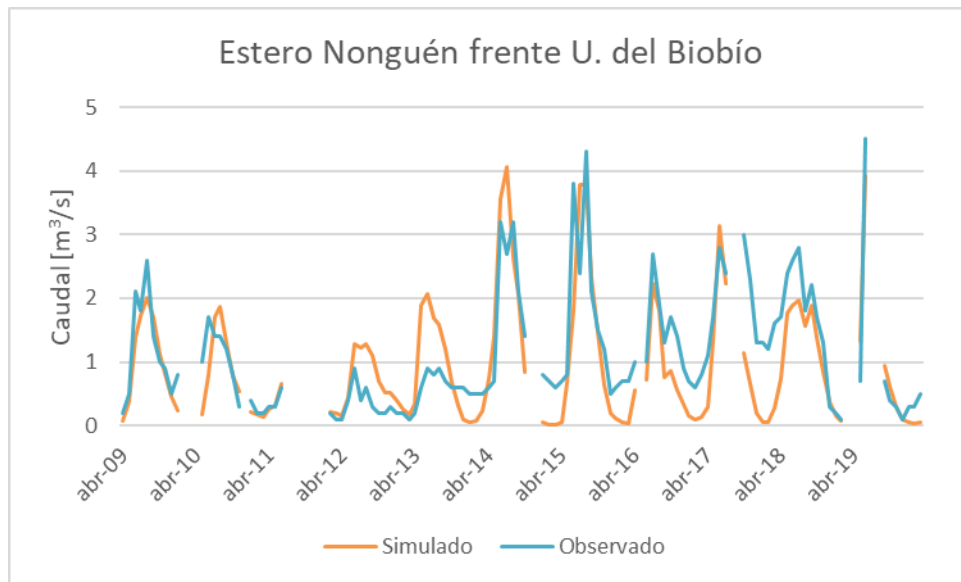
(a)



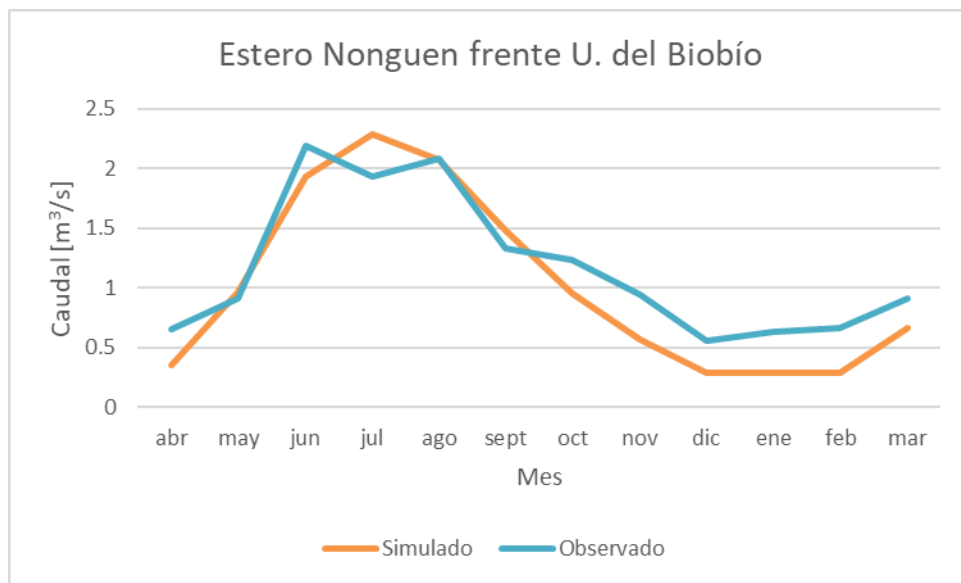
(b)

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-16 Para la estación Río Pingueral en Dichato: (a) Gráfico de la serie de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de caudales promedios mensuales observados y simulados**



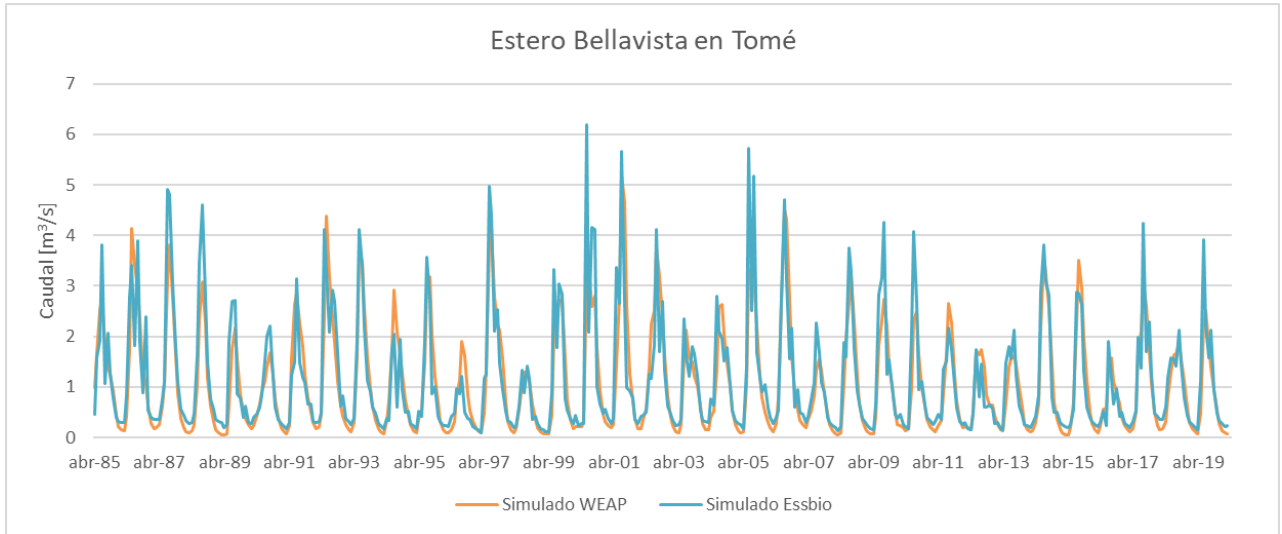
(a)



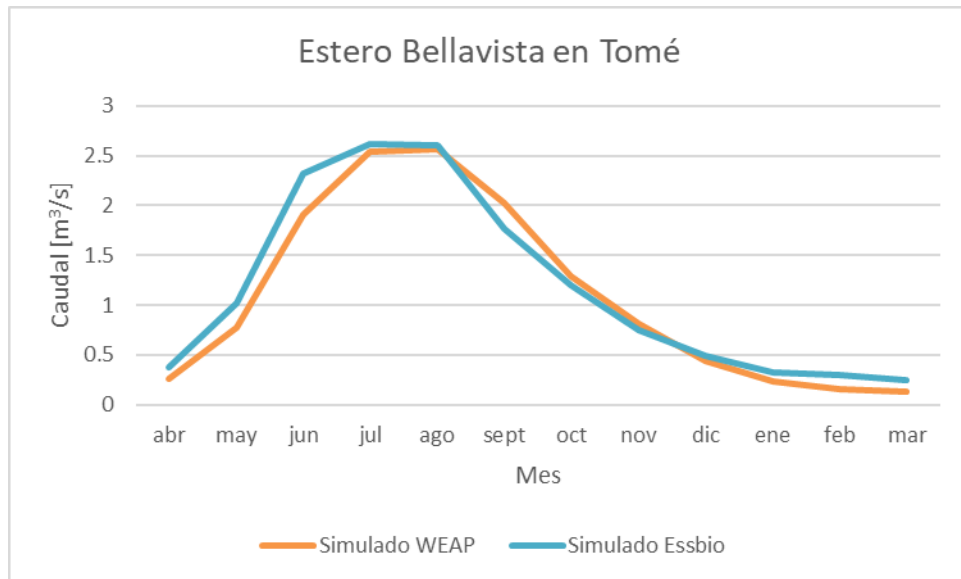
(b)

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-17 Para la estación Estero Nonguén frente a U. del Biobío: (a) Gráfico de la serie de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de caudales promedios mensuales observados y simulados**



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-18 Para la estación Estero Bellavista en Tomé: (a) Gráfico de la serie de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de caudales promedios mensuales observados y simulados**

---

#### 4.14. Balance Hídrico

##### 4.14.1. Balance de Aguas Superficiales

El cálculo del balance hídrico se realiza por año hidrológico (abril a marzo) y para su análisis se han definido los siguientes periodos:

- Balance histórico: Periodo abril 1990 - marzo 2015.
- Balance actual: Periodo abril 2015 - marzo 2021.
- Balance proyectado: Periodo abril 2021 - marzo 2050.

En el caso del balance superficial, el volumen de control considerado es la cuenca completa y se tienen los siguientes componentes para su cálculo:

**Precipitación ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ):** Volumen de agua caída en el periodo analizado dentro de la cuenca de estudio.

**Caudales desde sitios de demanda ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ):** Caudales de origen subterráneo que se suman a la parte superficial para satisfacer demandas de APU y SSR.

**Evapotranspiración ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ):** Pérdida de agua de los cultivos, o masa vegetal, por transpiración y del suelo por evaporación.

**Percolación ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ):** Volumen de agua que infiltra a través del suelo y se añade a los acuíferos.

**Descargas al mar ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ):** Caudales de cauces que desembocan en el mar.

**Caudales consumidos por sitios de demanda ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ):** Caudales de origen superficial que son consumidos por los APU y SSR.

El **balance** es la diferencia entre las entradas y salidas de la cuenca y se espera que sea lo más cercano a 0. El **error** porcentual es calculado con respecto a la precipitación.

En la **Tabla 4-13** se muestran los resultados del balance superficial de la cuenca para el periodo histórico y actual y en la **Tabla 4-14** los resultados del periodo proyectado.

**Tabla 4-13 Balance hídrico superficial cuencas costeras entre ríos Itata y Biobío. Periodo histórico y actual**

Componentes balance	1990 - 2020 (hm <sup>3</sup> /año)	Comparación periodo histórico y actual			
		Histórico 1990 - 2014 (hm <sup>3</sup> /año)	Actual 2015 - 2020 (hm <sup>3</sup> /año)	Δ (hm <sup>3</sup> /año)	Variación %
<b>Entradas</b>	<b>1.506,69</b>	<b>1.549,38</b>	<b>1.328,79</b>	<b>-220,59</b>	<b>-14,23%</b>
Precipitación	1.506,68	1.549,37	1.328,78	-220,59	-14,23%
Otras entradas	0,01	0,01	0,01	0,00	21,96%
<b>Salidas</b>	<b>1.505,86</b>	<b>1.548,40</b>	<b>1.328,58</b>	<b>-219,82</b>	<b>-14,20%</b>
Evapotranspiración	524,18	527,85	508,92	-18,93	-3,59%
Percolación	348,91	363,66	287,41	-76,25	-20,97%
Escurrimiento al mar	626,22	650,32	525,82	-124,50	-19,14%
Otras salidas	6,54	6,57	6,43	-0,15	-2,22%
<b>Variación de volumen almacenado (ΔV)</b>	<b>-3,52</b>	<b>-4,90</b>	<b>2,24</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Balance	4,35	5,88	-2,03	-	-
Error %	1,00	1,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-14 Balance hídrico superficial cuencas costeras entre ríos Itata y Biobío. Periodo actual y proyectado**

Componentes balance	2021 - 2060 (hm <sup>3</sup> /año)	2051 - 2060 (hm <sup>3</sup> /año)	Comparación periodos			
			2015 - 2020/ 2021 - 2060		2015 - 2020/ 2051 - 2060	
			Δ (hm <sup>3</sup> /año)	Variación %	Δ (hm <sup>3</sup> /año)	Variación %
<b>Entradas</b>	<b>1.474,56</b>	<b>1.312,67</b>	<b>145,77</b>	<b>10,97%</b>	<b>-16,11</b>	<b>-1,21%</b>
Precipitación	1.474,55	1.312,67	145,77	10,97%	-16,11	-1,21%
Otras entradas	0,01	0,01	2,12E-06	0,02%	9,20E-07	0,01%
<b>Salidas</b>	<b>1.475,53</b>	<b>1.312,43</b>	<b>146,95</b>	<b>11,06%</b>	<b>-16,15</b>	<b>-1,22%</b>
Evapotranspiración	523,73	491,79	14,81	2,91%	-17,13	-3,37%
Percolación	331,72	288,21	44,30	15,42%	0,79	0,28%
Escurrimiento al mar	613,41	526,04	87,59	16,66%	0,22	0,04%
Otras salidas	6,68	6,38	0,25	3,89%	-0,04	-0,65%
Variación volumen almacenado	1,13	1,79	-	-	-	-
Balance	-2,10	-1,54	-	-	-	-
Error %	0,00	0,00	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

#### 4.14.2. Balance de Aguas Subterráneas

El balance hídrico subterráneo considera las siguientes entradas:

**Recarga (hm<sup>3</sup>/año):** Precipitación líquida que percola a través el suelo y recarga los acuíferos.

**Flujos inter acuíferos (hm<sup>3</sup>/año):** Caudal subterráneo que escurre de un sector acuífero a otro circundante. Puede ser una entrada o salida.

Por otro lado, considera las siguientes salidas:

**Extracciones (hm<sup>3</sup>/año):** Caudal bombeado para satisfacer las demandas de APU y SSR.

**Flujos hacia el mar (hm<sup>3</sup>/año):** Caudal descargado al mar por la porción acuífera de la cuenca.

El balance subterráneo utiliza como unidad de control los SHAC presentes en la cuenca, para el periodo histórico y actual los resultados se muestran en la **Tabla 4-15**.

**Tabla 4-15 Balance hídrico subterráneo cuencas costeras entre ríos Itata y Biobío. Periodo histórico y actual**

Componentes balance	SHAC río Andalién			SHAC río Pingueral		
	1990 -2020 (hm <sup>3</sup> /año)	1990 -2014 (hm <sup>3</sup> /año)	2015- 2020 (hm <sup>3</sup> /año)	1990 -2020 (hm <sup>3</sup> /año)	1990 -2014 (hm <sup>3</sup> /año)	2015- 2020 (hm <sup>3</sup> /año)
<b>Entradas</b>	<b>214,32</b>	<b>223,68</b>	<b>175,33</b>	<b>128,16</b>	<b>133,29</b>	<b>106,77</b>
Recarga por precipitación	214,12	223,49	175,06	127,70	132,84	106,29
Otras entradas	0,20	0,18	0,27	0,46	0,45	0,48
<b>Salidas</b>	<b>212,99</b>	<b>219,18</b>	<b>187,19</b>	<b>127,69</b>	<b>132,42</b>	<b>108,00</b>
Flujos interacuíferos y salida al mar	212,68	218,88	186,85	127,69	132,42	108,00
Extracciones	0,32	0,31	0,35	0,00	0	0
<b>Variación almacenamiento</b>	<b>0,81</b>	<b>1,84</b>	<b>11,87</b>	<b>0,32</b>	<b>0,09</b>	<b>1,27</b>
<b>Error %</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>	<b>0,00</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración propia

En las **Tabla 4-16** y **Tabla 4-17** se muestran los resultados del balance en el periodo proyectado para el SHAC río Andalién y río Pingueral, respectivamente.

**Tabla 4-16 Balance hídrico subterráneo del SHAC río Andalién. Periodo actual y proyectado**

Componentes balance	2021 – 2060 (hm <sup>3</sup> /año)	2051 – 2060 (hm <sup>3</sup> /año)	Comparación periodos			
			2015 - 2020/ 2021 -2060		2015 - 2020/ 2051 - 2060	
			$\Delta$ (hm <sup>3</sup> /año)	Variación %	$\Delta$ (hm <sup>3</sup> /año)	Variación %
<b>Entradas</b>	<b>197,65</b>	<b>170,89</b>	<b>22,31</b>	<b>12,73</b>	<b>-4,44</b>	<b>-2,53</b>
Recarga por precipitación	197,35	170,58	22,28	12,73	-4,48	-2,56
Otras entradas	0,30	0,31	0,03	10,63	0,04	14,88
<b>Salidas</b>	<b>196,10</b>	<b>173,27</b>	<b>8,90</b>	<b>4,75</b>	<b>-13,93</b>	<b>-7,44</b>
Flujos interacuíferos y salida al mar	195,73	172,88	8,88	4,75	-13,97	-7,48
Extracciones	0,37	0,39	0,02	5,93	0,04	11,16
<b>Variación almacenamiento</b>	<b>0,34</b>	<b>2,38</b>	-	-	-	-
Error %	0,39	0,00	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-17 Balance hídrico subterráneo del SHAC río Pingueral. Periodo actual y proyectado**

Componentes balance	2021 – 2060 (hm <sup>3</sup> /año)	2051 – 2060 (hm <sup>3</sup> /año)	Comparación periodos			
			2015 - 2020/ 2021 -2060		2015 - 2020/ 2051 - 2060	
			Δ (hm <sup>3</sup> /año)	Variación %	Δ (hm <sup>3</sup> /año)	Variación %
<b>Entradas</b>	<b>127,72</b>	<b>109,02</b>	<b>20,95</b>	<b>19,62%</b>	<b>2,24</b>	<b>2,10%</b>
Recarga por precipitación	127,21	108,52	20,93	19,69%	2,23	2,10%
Otras entradas	0,51	0,50	0,02	5,00%	0,01	2,73%
<b>Salidas</b>	<b>126,78</b>	<b>109,42</b>	<b>18,78</b>	<b>17,39%</b>	<b>1,42</b>	<b>1,32%</b>
Flujos interacuíferos y salida al mar	126,78	109,42	18,78	17,39%	1,42	1,32%
Extracciones	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00	0,00%
<b>Variación almacenamiento</b>	<b>0,02</b>	<b>0,40</b>	-	-	-	-
Error %	0,50	0,00	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

#### 4.15. Escenarios de Gestión

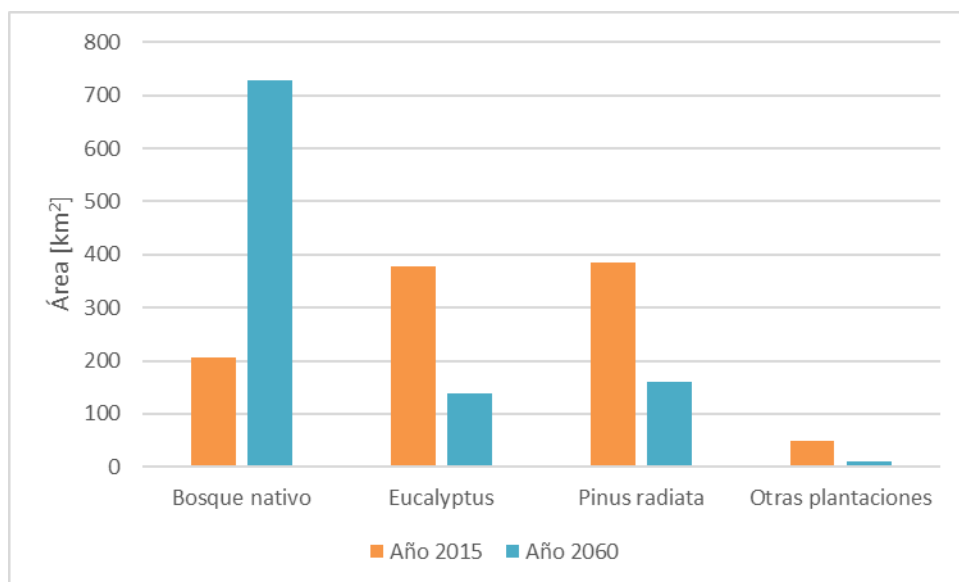
En la modelación hidrológica de las cuencas costeras entre ríos Itata y Biobío se han incluido tres escenarios de gestión, que son descritos a continuación.

##### 4.15.1. Escenario de Gestión de Cambios de Uso del Suelo

- **Descripción del Escenario de Gestión**

Un tema conflictivo en la zona de estudio es la gran presencia de plantaciones forestales, las que al año 2015 según la CONAF cubrían un 56% del área de la cuenca. Por esta razón, uno de los escenarios a evaluar es la producción de agua para el caso que se reduzca la cobertura de plantaciones forestales al 20% de la superficie de la cuenca.

Para la modelación de este escenario en WEAP, se reduce progresivamente entre los años 2020 y 2060 el área de los usos de suelo correspondientes a: *Eucalyptus globulus*, *Pinus Radita* y Plantación otras especies y se reemplaza por Bosque Nativo, logrando que al término del periodo proyectado el área total de plantaciones sea de un 20%, cabe recalcar que las áreas de los otros usos de suelo se mantienen igual a las del escenario base. Las áreas del año 2020 son extraídas desde el Catastro de Usos de Suelo de la CONAF del año 2015, en la **Figura 4-19** se muestran las variaciones de las áreas de bosque nativo y las distintas plantaciones forestales entre el año 2015 y 2016 para este escenario.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-19 Variación de usos de suelos de plantaciones y bosque nativo considerados en la modelación entre el año 2015 y 2060.**

#### 4.15.2. Escenario de Gestión de Aumento Poblacional

- **Descripción del Escenario de Gestión**

Con el objetivo de evaluar la suficiencia y las brechas de las actuales fuentes de agua potable urbana, se plantea un escenario con un crecimiento poblacional de un 3%, mayor al tendencial estimado por el INE (Instituto Nacional de Estadísticas), de esta forma la demanda de agua de uso potable se intensifica proporcional a la población. Se busca especialmente evaluar la suficiencia de sistemas costeros como Tomé-Coliumo, Dichato y Pingueral.

Para la modelación de este escenario en WEAP, se modifica la demanda anual ("Annual Activity Level") del periodo futuro para los Sitios de Demanda correspondientes a las localidades **de Concepción, Talcahuano, Penco, Tomé, Florida, Dichato y Rafael**, por la población simulada con una tasa de crecimiento del 3% anual. Este cambio se produce desde el año 2018 en adelante, para los años anteriores se utiliza la población del escenario base.

En la **Tabla 4-18** se muestra la tasa de crecimiento y la población proyectada al 2060 para el escenario tendencial y exponencial en las 7 localidades consideradas.

**Tabla 4-18 Comparación de la población adoptada en el escenario tendencial y escenario exponencial**

Localidad	Tasa de crecimiento poblacional	Población Base Plan de Desarrollo	Población proyectada por escenario tendencial	Población proyectada por escenario exponencial
		2017	2060	2060
Dichato	3%	4.486	7.347	15.455
Tome	3%	43.212	66.286	151.045
Penco	3%	46.718	71.664	162.161
Concepción	3%	217.537	333.697	989.078
Talcahuano	3%	147.831	226.769	979.378
Rafael	3%	1.305	2.002	3.582
Florida	3%	4.525	6.941	11.924
<b>Total</b>		<b>465.614</b>	<b>714.707</b>	<b>2.312.623</b>

Fuente: Elaboración propia

#### **4.15.3. Escenario de Gestión de Trasvase mediante Acueducto Litoral Biobío Norte**

Este escenario de gestión considera un acueducto que una la planta La Mochita con las localidades del litoral al norte del Biobío que presentan demanda insatisfecha histórica o futura, según el escenario base. En la actualidad la Planta La Mochita abastece a dos localidades dentro de la cuenca, Concepción y Talcahuano, las cuales no presentan brecha.

Para modelar este escenario en WEAP, se une a través de un *Transmission Link* el elemento RIO\_BIOBIO (representando La Mochita) con los *Sitios de demanda* de Tomé, Dichato, Penco y SSR\_Coliumo y se mantienen las poblaciones tendenciales y el caudal máximo extraíble de La Mochita que hay en el escenario base.

---

## 5. BRECHAS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Durante el desarrollo del modelo hidrológico del presente plan se han identificado algunas brechas, que son necesarias tomar en consideración al revisar y utilizar el estudio. Los orígenes de estas brechas incluyen la falta de información en la zona, limitaciones propias de WEAP y simplificaciones y conjeturas necesarias para la modelación.

A continuación, se describen en detalle las principales brechas identificados en este estudio.

- **Inexistencia de pozos de observación de niveles estáticos**, los que servirían para una mejor representación de la parte subterránea y que serían necesarios para una posterior modelación numérico, lo que a su vez permitiría realizar un análisis de sustentabilidad de acuíferos.
- **Baja representación de la fluviometría** en la zona norte y este de la cuenca, ya que las estaciones fluviométricas se concentran en la zona sur y cercanas a la costa. Los datos que entregan las estaciones son una importante fuente de información para una correcta calibración del modelo numérico superficial.
- **Dificultar para caracterizar los distintos usos de suelo**, en particular el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), lo que limita las conclusiones que se pueden realizar con un escenario de cambios de uso del suelo. En este sentido, habría que actualizar esta información a medida que surjan nuevas investigaciones o herramientas capaces de una mejor estimación.
- **Incertidumbre asociada a la interpretación de estaciones TEM** para estimar las permeabilidades y coeficientes de infiltración. A pesar de también utilizar información de pruebas de bombeo de expedientes de pozos de la cuenca, la capa de permeabilidad y niveles estáticos tiene un grado de incertidumbre importante.

Las brechas descritas limitan especialmente el caracterizar y estudiar la cuenca desde un punto de vista subterráneo, debido a que WEAP no está diseñado para conocer la evolución en el tiempo de los niveles de aguas subterráneas, las interacciones río-acuífero y los cambios en los flujos entre sectores acuíferos. Una forma de abordar esto sería avanzar con el acople del modelo WEAP con MODFLOW, este plan ya contempla un primer acercamiento a esto al incluir un modelo conceptual subterráneo en esta plataforma.

Sin embargo, si se quisiera avanzar con un modelo integrado, sería necesario primeramente monitorear los niveles de los acuíferos, y hacerlo durante un tiempo suficientemente extenso como para poder utilizar esa información en una calibración de modelo numérico; ideal sería contar con una estadística en distintos lugares de la cuenca con una extensión mayor a 10 años o incluso más. Excepcionalmente, como situación inicial para comenzar un modelo que después podría seguir siendo perfeccionado, sería aceptable una estadística de 5 años.





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO I PARTICIPACIÓN CIUDADANA**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

# Apéndices

En la versión digital de este informe se pueden encontrar los siguientes documentos, referidos al proceso de participación ciudadana llevada a cabo en el desarrollo de este plan de gestión:

- **Anexo I.1. Participación Ciudadana**
- **Anexo I.2. PAC - Plan de Comunicación**
- **Anexo I.3. PAC - Plan de Participación Ciudadana y Plan de Medios**
- **Anexo I.4. PAC - Conversatorio de Mujeres**
- **Anexo I.5. PAC - Metodología de Participación Ciudadana**





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO J PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

# Apéndices

En la versión digital de este informe se pueden encontrar las siguientes carpetas, en las que se ubican documentos referidos a la planificación estratégica propiamente tal, llevada a cabo en el desarrollo de este plan de gestión:

- Carpeta: J.1 Listado de Iniciativas del Plan
- Carpeta: J.2 Fichas de Iniciativas
- Carpeta: J.3 Memoria de Cálculo de Iniciativas
- Carpeta: J.4 Caracterización de Servicios Sanitarios Rurales
- Carpeta: J.5 Memoria de Cálculo de Indicadores
- Carpeta: J.6 Infografías
- Carpeta: J.7 Grupo Asesor





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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS E ISLAS ENTRE EL RÍO ITATA Y RÍO BIOBÍO**

## **ANEXO K MINUTAS DE REUNIONES**

**REALIZADO POR  
HIDROGESTIÓN S.A.**

**S.I.T. N° 510**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022**



---

# Apéndices

En la versión digital de este informe se pueden encontrar las siguientes carpetas, en las que se ubican minutas y documentos de registro de las reuniones llevadas a cabo durante el desarrollo de este PEGH:

- Carpeta: **K.1. Minutas de Coordinación**
- Carpeta: **K.2. Minutas de Reunión**
- Carpeta: **K.3. Talleres**
- Carpeta: **K.4. Grabaciones**

