

UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke

**INTERACCIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE LAS CUENCAS DE
LOS RÍOS BUENO Y MAULLÍN MODELADO MEDIANTE
SOFTWARE**

“Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil”.

GUSTAVO IGNACIO QUINTANA SUSPERREGUY

Concepción, Octubre 2017

NOMESCLATURA

DGA: Dirección General de Aguas.

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería.

SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

SEA: Servicio de Evaluación Ambiental.

.BMP: formato de imagen de mapa de bits.

msnm: Metros sobre el nivel del mar

°C: Grados Celsius

INDICE

1	JUSTIFICACIÓN.....	3
2	OBJETIVO GENERAL	5
2.1	Objetivos específicos	5
3	HIDROGRAFÍA REGIÓN DE LOS RÍOS Y REGIÓN DE LOS LAGOS.....	6
4	MODELO HIDROGEOLOGICO.....	6
5	METODOLOGÍA	7
6	ANTECEDENTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	8
6.1	Drenajes principales de las cuencas.....	8
6.2	Características hidrogeológicas e hidráulica de las cuencas.....	9
6.3	Climatología de la zona	10
6.4	Recarga y descarga de las cuencas.....	11
7	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	11
7.1	Definición del dominio	12
7.2	Definición de las condiciones de borde	13
7.3	Conductividad hidráulica.....	14
7.4	Recarga en los acuíferos	15
7.5	Balance hídrico del sistema acuífero	17
8	ANÁLISIS DE RESULTADOS	18
8.1	Cuantificación de la recarga	18
8.2	Características generales de la modelación.....	19
8.3	Balance de masas	21
8.4	Análisis de sensibilidad	23
9	CONCLUSIONES	24
10	BIBLIOGRAFÍA.....	25

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Desarrollo de un modelo hidrogeológico (SEA, 2012).	7
Figura 2. Geografía de las cuencas y sus principales drenajes.....	8
Figura 3. Límites de la cuenca río Bueno y río cuenca Maullín.....	10
Figura 4. Superposición de imagen a Google Earth, con las condiciones de bordes a modelar. ..	13
Tabla 1. Condiciones de borde a utilizar Cotas de los ríos (Google Earth, 2017).	14
Figura 5. Conductividades hidráulicas en zona de modelación.	15
Figura 6. Valores de recargas superficiales de los acuíferos por zona (m/día).	17
Figura 7. Esquema de funcionamiento del sistema hídrico.....	18
Tabla 2. Resultados de recarga	19
Figura 8. Características generales y límites de cuencas superficiales y subterráneas.	20
Tabla 3. Balance de masas en área total de cada acuífero modelado.	21
Figura 9. Dirección de flujos y líneas piezométricas, recarga del 10% de precipitaciones	23

INTERACCIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS BUENO Y MAULLÍN MODELADO MEDIANTE SOFTWARE

Autor: Gustavo Quintana Susperreguy

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío - Bío

Correo electrónico: guquinta@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

Para lograr conocer de mejor forma el recurso que entregan las aguas subterráneas, se han implementado diversas técnicas para su estudio. Entre ellas la simulación de un modelo hidrogeológico es uno de los que ha logrado representar más fielmente las condiciones de una zona. Se recreó un modelo hidrogeológico de la zona de interacción de las cuencas del Río Bueno y Río Maullín, ubicadas en las regiones de Los Ríos y Los Lagos respectivamente en Chile. Para ello se recopiló gran parte de la información de la Dirección General de Aguas (DGA). Además se realizó una proyección de las condiciones de zonas contiguas a la de estudio para la cuenca del río Maullín, ya que su información oficial es acotada. Con esto se logró la simulación de los sentidos de flujos de las aguas y nivel de interacción presente entre estas dos cuencas, generando un balance hídrico. Se desarrolló un análisis de sensibilidad simulando mayor aporte a estas cuencas, lo que dio como resultado datos no representativos. Se concluyó principalmente que es la cuenca de río Bueno la que realiza el aporte a la cuenca del río Maullín y no habría aporte en sentido contrario.

Palabras Claves: *Aguas subterráneas, modelo hidrogeológico, Balance Hídrico, río Maullín, río Bueno, Cuencas.*

4859 Palabras Texto + 7 Figuras/Tablas*250 + 4 Figuras/Tablas*500= 8.609 Palabras

INTERACTION OF THE AQUIFERES OF THE BASINS OF RIVERS BUENO AND MAULLÍN MODELED BY SOFTWARE

Author: Gustavo Quintana Susperreguy

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

E-mail: guquinta@alumnos.ubiobio.cl

Advisor: Álvaro Suazo Schwencke

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

E-mail: asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

To know of better form the resource that the groundwater delivers, diverse skills have been implemented for its study; between them the simulation of a hydrogeological model is one of those that it has represented more faithfully the conditions of an area. A hydrogeological model recreated the interaction of the basins of the Bueno river and Maullín river, located in the region of Los Rios and Los Lagos in Chile. For its big part of the information was compiled of the General Directorate of Water (DGA), also there was realized a projection of the conditions of areas contiguous to that of study for the basin of the Maullín river, since its official information is annotated. With this simulation was achieved of flow direction of the waters and level of present interaction between these two basins, generating a water balance. Also a sensibility analysis developed simulating major contribution to these basins, what it gave like turned out not representative information. It ended principally that is the basin of river Bueno who realizes the contribution to the basin of the river Maullín and there would not be contribution in the opposite direction.

Key Words: *Groundwater, hydrogeological model, Water Balance, Maullín river, Bueno river, basi*

1 JUSTIFICACIÓN

El agua es el recurso renovable primordial para el desarrollo de la humanidad, y como tal se debe resguardar su preservación. Para esto es necesario conocer el recurso hídrico disponible y las características de este en cada zona. Chile es un país privilegiado en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, y para preservar la disponibilidad y uso eficiente de este, cuenta con el Código de Aguas, que regula el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de agua. Este marco normativo define que el agua es un bien de uso público, estableciendo los derechos de aprovechamiento por parte de los privados. La dirección general de aguas, velará por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo (caudal mínimo que debieran tener los ríos para mantener los ecosistemas, conservando la calidad ecológica), además difundir la información generada por su red hidrométrica contenida en el Catastro Público de Aguas con el objeto de contribuir a la competitividad del país y mejorar la calidad de vida de las personas.

En cuanto a la disponibilidad subterránea de este elemento, que será el centro del estudio cabe mencionar que este país presenta a lo largo de su superficie 101 cuencas y 467 subcuencas fluviales, relativamente pequeñas, y con fuertes pendientes dadas por la Cordillera de Los Andes, que determina que gran parte de los recursos hídricos lleguen al Océano Pacífico. Se entiende por cuenca a “aquella depresión o forma geográfica que hace que el territorio vaya perdiendo altura a medida que se acerca al nivel del mar”. Una cuenca hidrográfica y una cuenca hidrológica se diferencian en que la primera se refiere exclusivamente a las aguas superficiales, mientras que la cuenca hidrológica incluye las aguas subterráneas (acuíferos). La recarga de un acuífero corresponde a la cantidad de agua que ingresa al acuífero desde una fuente externa (generalmente por infiltración desde la superficie o desde otro sistema acuífero) (DGA, 2004). La recarga media estimada alcanza los $55\text{m}^3/\text{s}$ desde la región Metropolitana al norte, dicho volumen de agua procede de precipitaciones que escurre por los cauces superficiales y subterráneos. Al sur de la región de O'Higgins no se cuenta con información detallada del potencial de recarga, debido a que las aguas subterráneas presentan menor importancia como fuente de abastecimiento. Para esta zona, la DGA ha realizado una primera aproximación, donde se estima que la recarga sería alrededor de $160\text{m}^3/\text{s}$ entre las regiones del Maule y de Los Lagos, para las regiones al sur de la de región de Los Lagos, no se cuenta con información sobre el potencial de recarga (DGA, 2011).

Por todo lo mencionado anteriormente, uno de los principales objetivos de este trabajo es caracterizar el recurso hídrico subterráneo representado en dos cuencas; Cuenca del río Bueno y río Maullín, demostrando su interacción a nivel subterráneo, que no necesariamente coincidirán con su interacción superficial. Para ello se utilizará un modelo computacional, seleccionado en base a las características que entrega, facilitando la representación virtual de la interacción, a través de los datos recopilados en la investigación previa. Teniendo en cuenta la amplia información existente sobre la cuenca del río Bueno, es factible extenderla hacia el sur, abarcando también la cuenca del río Maullín del cual la información es más acotada. En resumen, se buscará aportar nueva información tomando como base la existente.

2 OBJETIVO GENERAL

Analizar el nivel de interacción de los acuíferos de las cuencas de los ríos Bueno y Maullín, modelando el sector entre el río Rahue (Coihueco), el río Maullín y el lago Llanquihue.

2.1 Objetivos específicos

- Identificar los acuíferos principales de las cuencas de los ríos Bueno y Maullín.
- Desarrollar un modelo para la simulación del flujo de agua subterránea en el área de estudio mediante Modflow.
- Determinar el sentido y magnitud de la interacción de las aguas subterráneas entre los dos acuíferos.

3 HIDROGRAFÍA REGIÓN DE LOS RÍOS Y REGIÓN DE LOS LAGOS

Los ríos en estas regiones se caracterizan por presentar una gran cantidad de ríos de régimen mixto y con caudal constante mantenido por las precipitaciones permanentes. Tienen poca pendiente y son regulados en su caudal por los diversos lagos, situación que los hace navegables, además tienen un gran potencial hidroeléctrico. Las principales cuencas del área corresponden a los ríos Valdivia, Bueno, Llico, Maullín, Petrohué, Puelo y Yelcho. Estas incluyen numerosos e importantes cuerpos de agua y no presentan déficit de balance hídrico, lo cual genera una red de drenaje abundante en ambas regiones. Debe mencionarse que existen zonas planas con problemas de drenaje y donde la napa freática se ubica a nivel superficial, denominadas ñadis. El agua de estas cuencas en general es muy pura, salvo en parte del río Valdivia. Las únicas oportunidades en que las aguas arrastran sedimentos son después de fuertes precipitaciones en los meses de mayo a julio, especialmente si se ha efectuado construcción de caminos en las proximidades de los cauces.

4 MODELO HIDROGEOLÓGICO

Los modelos hidrogeológicos son representaciones físicas o numéricas de un sistema hidrogeológico real, representado en la Figura 1. Estos permiten observar a escala el comportamiento hidrogeológico de un acuífero como herramienta de la investigación hidrogeológica, la cual se fundamenta con información proveniente de la zona a estudiar.

La creación de un modelo se debe realizar en dos grandes etapas; la primera de ellas es un modelo conceptual, en el cual se realiza la recopilación de las características hidrogeológicas de la zona a estudiar, en este caso de las cuencas de río Bueno y Maullín, siendo la base y punto de partida para la creación de dicho modelo. Requiere de una revisión detallada de la información disponible, lo que servirá de sustento técnico a la hora de definir las condiciones hidrogeológicas que serán representadas luego, determinarán la precisión y la capacidad predictiva del mismo. La segunda etapa consiste en llevar los elementos establecidos en el modelo conceptual a una formulación matemática, que permita establecer una estimación cuantitativa más precisa de las variables de estado.

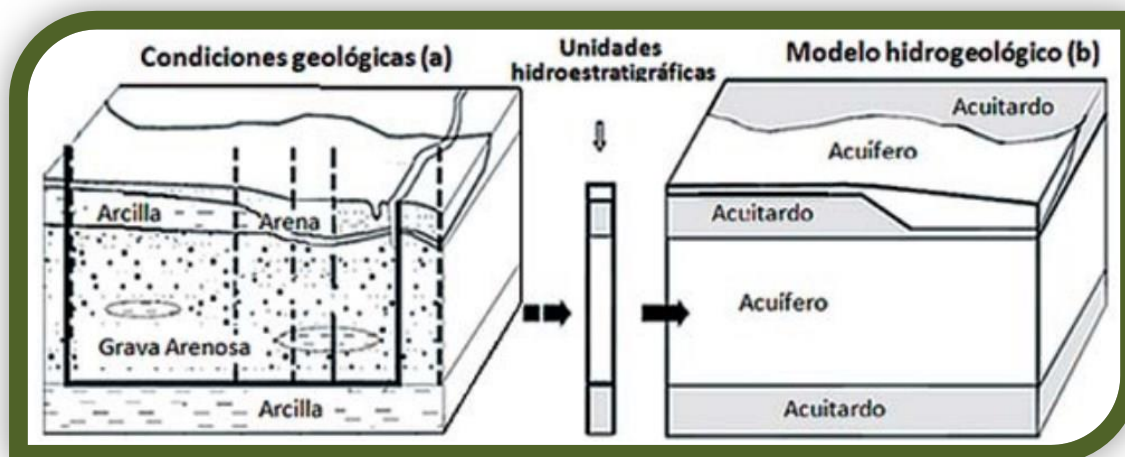


Figura 1. Desarrollo de un modelo hidrogeológico (SEA, 2012).

5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio se utilizó como referencia estudios hidrogeológicos antes realizados, además de guías gubernamentales que sirven de base para la creación de un modelo de este tipo. Se describe de la siguiente forma:

- ✓ Recopilación de información relevante del área de estudio, mediante fuentes confiables y actualizadas, con datos claros; DGA, SEIA, SERNAGEOMIN proyectos anteriores, entre otros.
- ✓ Vaciamiento de datos obtenidos y filtrados de acuerdo a objetivos del estudio en software Groundwater Vistas, para el desarrollo del modelo en sí.
- ✓ Una vez desarrollado el modelo, se analizará los resultados entregados a través del programa, para luego ser interpretados de manera cuantitativa.
- ✓ Finalmente mediante el análisis de sensibilidad se buscarán variaciones entregadas por el programa. Con todo lo anterior se podrá llegar a conclusiones y observaciones del estudio.

6 ANTECEDENTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

6.1 Drenajes principales de las cuencas

Para ambas cuencas existen un conjunto de afluentes de menor volumen en comparación a su cauce principal que son un aporte a la formación de la cuenca (Figura 2). Ambas cuencas son de carácter exorreicas, las cual significa que su cauce principal desemboca en el mar.

Para la Cuenca del río Bueno existen ríos y esteros siendo los más influentes el río Bueno, Pilmaiquén, el Rahue y Coihueco, entre otros. Presenta también una serie de lagos y lagunas, siendo el Lago Ranco el más extenso de la cuenca.

Para la cuenca del río Maullín su principal curso es el río Maullín, recibiendo aportes de ríos y esteros de menor envergadura. Por la ribera norte el río Calabozo que recoge aguas desde Frutillar; los ríos Negro y Bueno y el estero La Tranca, los ríos Gato, Chaqueigua, Gómez, entre otros.



Figura 2. Geografía de las cuencas y sus principales drenajes.

6.2 Características hidrogeológicas e hidráulica de las cuencas

El área de estudio (Figura 3) presenta un conjunto de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edades que fluctúan entre Paleozoico superior y Holoceno. Hacia el oeste, se presenta un basamento metamórfico del Paleozoico- Triásico perteneciente al Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM) o Serie Oeste que forma casi en su totalidad la Cordillera de la Costa con rocas sedimentarias Cenozoicas subordinadas. El valle central se encuentra constituido por rocas sedimentarias y volcánicas Cenozoicas, además de presentar depósitos sedimentarios glaciares, fluviales, glaciofluviales y piroclásticos cuaternarios. Hacia el este constituyendo la Cordillera de los Andes se encuentran rocas intrusivas graníticas y volcánicas Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas (Sernageomin, 2002).

Por otra parte, la cuenca hidrográfica del río Bueno, ubicada en la región de los Ríos, se extiende desde la latitud 39°50' hasta la latitud 41°05' Sur, donde limita con la cuenca del río Valdivia por el norte y con el lago Llanquihue por el sur. Esta cuenca nace en el lago Ranco, la cual tiene un área de 17.210 km² y abarca las provincias de Ranco, Llanquihue y Osorno, donde su longitud es de 200 km en dirección este-oeste desembocando en el Océano Pacífico, donde posee un caudal promedio de 760 m³/s.

La cuenca hidrográfica del río Maullín, ubicada en la provincia de Llanquihue, Región de los Lagos, se extiende desde la latitud 40°40' Norte hasta la latitud 41°40' Sur. Nace en el lago Llanquihue, tiene un área de 4.738 km², donde su longitud es de 85 km en dirección este-oeste desembocando en el Océano Pacífico. Posee un caudal promedio de 73 m³/s y su principal afluente es el lago Llanquihue.

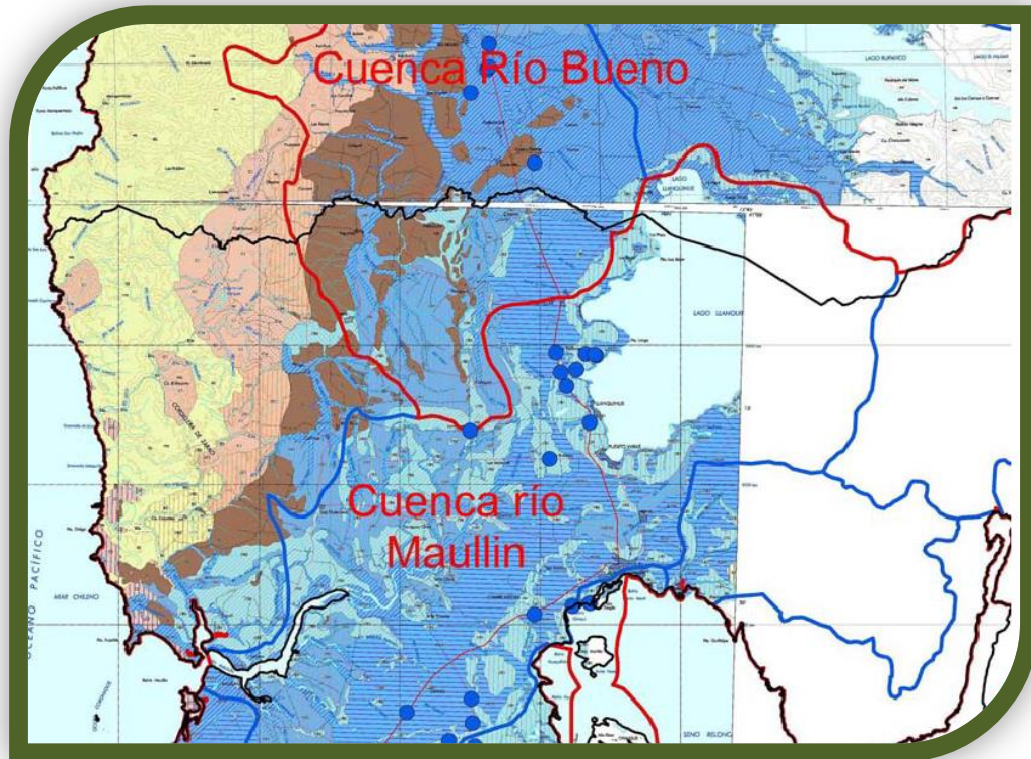


Figura 3. Límites de la cuenca río Bueno y río cuenca Maullín.

6.3 Climatología de la zona

El clima en las dos zonas estudiadas son muy similares, ya que ambas cuentan con dos tipos climáticos. Por una parte un clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea, sectores centro y bajos de las cuencas, donde se caracteriza por presentar precipitaciones a lo largo de todo el año, aunque los meses de verano presentan menor pluviosidad que los meses invernales. Por otro lado clima templado frío lluvioso con influencia mediterránea en sector precordillerano. Este clima se caracteriza por las bajas temperaturas durante todo el año y el aumento de las precipitaciones con la altura, las cuales llegan a los 3.000 mm anuales, sobre los 1.200 m.s.n.m. Los montos de precipitación registrados por la estación meteorológica Maullín, alcanzan los 1.789,8 mm/año y una temperatura media anual de 9,8°C. La escorrentía registrada en este sector, alcanza los 1.441

mm/año. Los montos de precipitación registrados por la estación meteorológica Río Bueno en la localidad del mismo nombre, alcanzan los 1.191 mm/año y una escorrentía media anual de 2.915 mm.

6.4 Recarga y descarga de las cuencas

Para ambas cuencas la recarga se genera principalmente a través de un mecanismo natural gracias a las precipitaciones, ya que un porcentaje de ellas se infiltra a los acuíferos dependiendo de la permeabilidad del tipo de suelo, es decir la recarga se genera en base a un proceso activo desde la superficie. Por otro lado la descarga se lleva a cabo por el carácter efluentes de los ríos de que componen las cuencas, vertiendo en la mayoría de los casos sus aguas al cauce. En algunas zonas, es posible que el nivel freático no alcance a conectar con las aguas del cauce, por características en la conductividad hidráulica, siendo de carácter influente y, por tanto, aportando agua al acuífero.

En la interacción del acuífero con la zona costera se produce una descarga en menor volumen de forma subterránea.

7 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para la creación del modelo hidrogeológico computacional es necesario contar con herramientas computacionales compatibles con los datos que se desea obtener. Groundwater Vistas de ESI (proveedor líder mundial en generación de prototipos virtuales) fue la primera interfaz MODFLOW que empleó técnicas de optimización matemática y aún admite más tipos de tecnología de optimización que cualquier otro programa de modelado, este presenta una plataforma visual de trabajo con los códigos del programa MODFLOW (three-dimensional (3D) finite-difference groundwater model), el cual a su vez es un software mundialmente utilizado para la simulación de flujos de aguas subterráneas. Dicha simulación es una herramienta clave para la predicción, manejo y control de los recursos hídricos, ya que permite conocer la

trayectoria y flujos de acuíferos y unidades geológicas. Estas herramientas computacionales están diseñadas para el uso de hidrogeólogos experimentados y requieren de información que debe provenir de estudios hidrogeológicos tradicionales, brindando apoyo a estudios gubernamentales a nivel mundial.

7.1 Definición del dominio

El dominio fue definido partiendo por los atributos básicos, que son los límites y geometría del área que representen la zona a modelar. Esto se realizó superponiendo una imagen (Figura 4) sobre el mapa global (obtenido de Google Earth), donde la imagen muestra las limitaciones geográficas de las cuencas y las características geológicas que facilitó la delimitación de la zona. Para la creación del modelo se importó la imagen con formato .BMP la cual permite que sea visualizada en el programa MODFLOW.

El área de estudio comprende dos regiones que son la región de los Ríos al norte y la región de los Lagos al sur. El área de modelación abarca la zona sur de la cuenca del río Bueno donde se encuentra el río Rahue, río Coihueco, río Negro y el lago Rupanco. A la izquierda (oeste) de la figura 4 se encuentra la Cordillera de la Costa que se extiende hasta la desembocadura del río Maullín y en el lado derecho de la imagen se extiende la Cordillera de los Andes. Por otro lado se considera la mayor parte de la cuenca del río Maullín, en la cual se encuentra el Lago Llanquihue y el río Maullín en toda su extensión. Finalmente el río Llico que no se encuentra dentro del área de las cuencas pero se utilizará de condición de borde para una mejor fabricación del modelo

Para representar de mejor forma la zona de modelación se adoptó una discretización espacial que contiene una grilla conformada por celdas homogéneas de 1100 metros por 1100 metros permitiendo trabajar con un área de $1,21 \text{ km}^2$ formando un total de 91 filas y 100 columnas (no se pudo utilizar una cantidad mayor a 100 filas o columnas por lo cual el modelo fue adoptado a las condiciones que permitía el programa, en la misma proporción de la imagen a modelar). De esta manera la grilla está compuesta de 9100 celdas que abarcan un área total de 11.011 km^2 que será representativa de la imagen que se extrajo del mapa global.

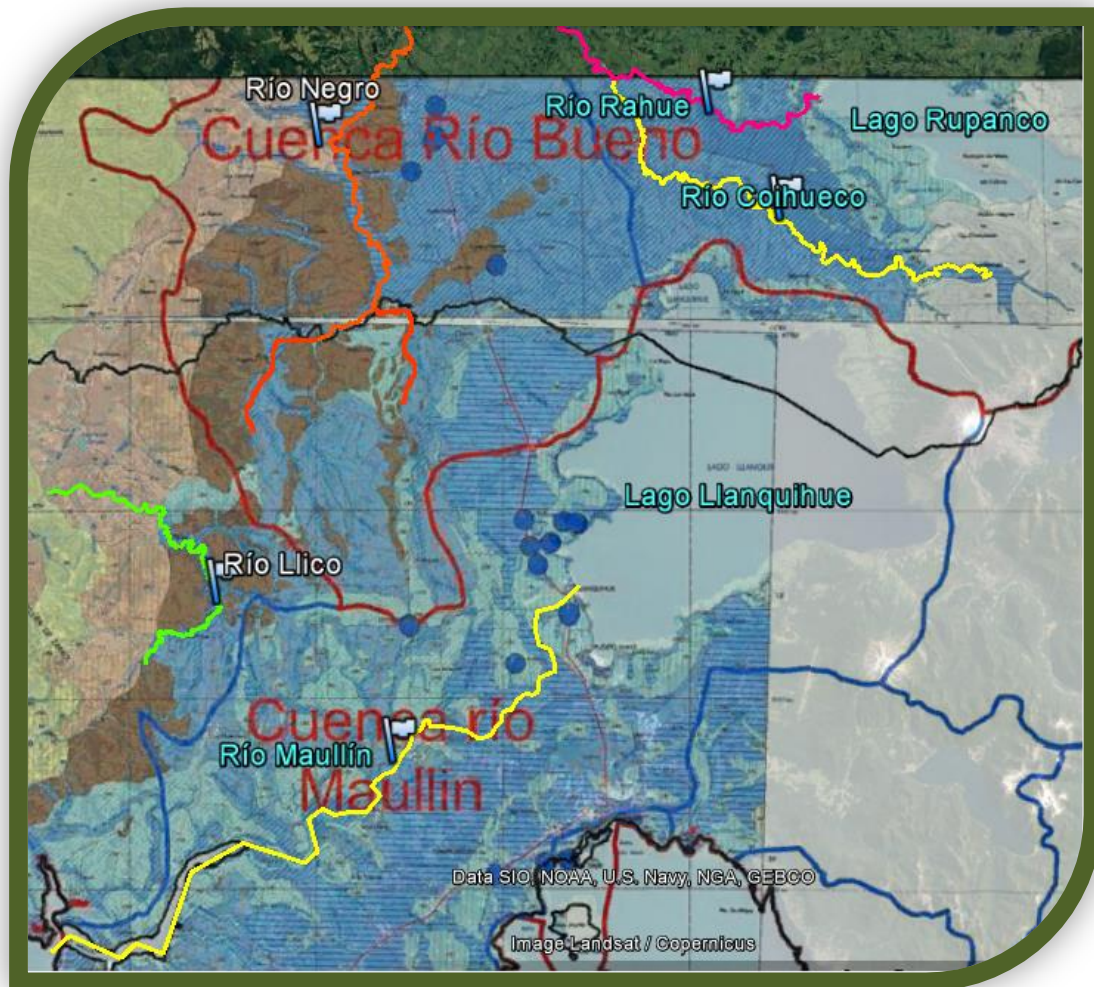


Figura 4. Superposición de imagen a Google Earth, con las condiciones de bordes a modelar.

7.2 Definición de las condiciones de borde

En esta etapa las condiciones de borde son de suma importancia, ya que permiten definir los límites físicos del dominio de modelación determinando características claves que incidirán en el comportamiento del modelo. En este caso para las condiciones de borde de ríos y lagos se incluyeron las cotas respectivas de cada uno de ellos (Tabla 1). Cabe destacar que se tomó como base en el programa una cota de 100 metros (espesor promedio de los acuíferos de la zona, información estimada del documento DGA, 2012) la cual será el punto de inicio de cada condición de borde.

Tabla N°1. Condiciones de borde a utilizar
Cotas de los ríos (Google Earth, 2017).

<i>Condición Real</i>	<i>Cota inicial (msnm)</i>	<i>Cota Final (msnm)</i>	<i>Condición Modelo</i>
Río Rahue	223	156	(Constant Head)
Río Coihueco	430	156	(Constant Head)
Río Negro	215	139	(Constant Head)
Río López	219	177	(Constant Head)
Lago Rupanco	223	223	(Constant Head)
Lago Llanquihue	153	153	(Constant Head)
Río Llico	238	107	(Constant Head)
Río Maullín	153	100	(Constant Head)
Cordillera de los Andes y de la Costa			No - Flow

*Los lagos tienen un nivel de cota constante.

*Constant Head: esta condición de borde actúa como una fuente infinita de agua que entra en el sistema.

*No - Flow: Corresponden a zonas impermeables del modelo, donde no hay flujo de agua subterránea.

7.3 Conductividad hidráulica

Gracias a estudios ya realizados por la DGA en base a las cuencas del río Valdivia y río Bueno (DGA 2012), se logró realizar una proyección estimada de la conductividad hidráulica (Figura 5) de la cuenca del río Maullín, ya que de este último no se cuenta con información oficial. De esta forma se obtuvieron tres zonas definidas en base a su conductividad hidráulica dependiendo de la formación geológica que abarca, obtenidas con el apoyo del mapa geológico oficial de Chile (SERNAGEOMIN, 2003).

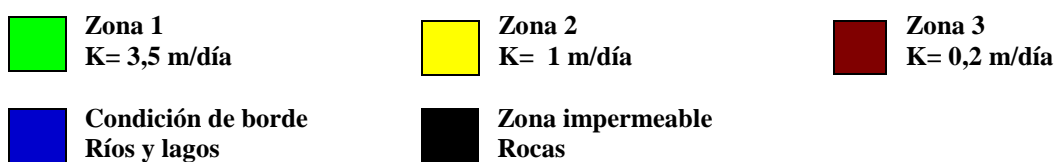
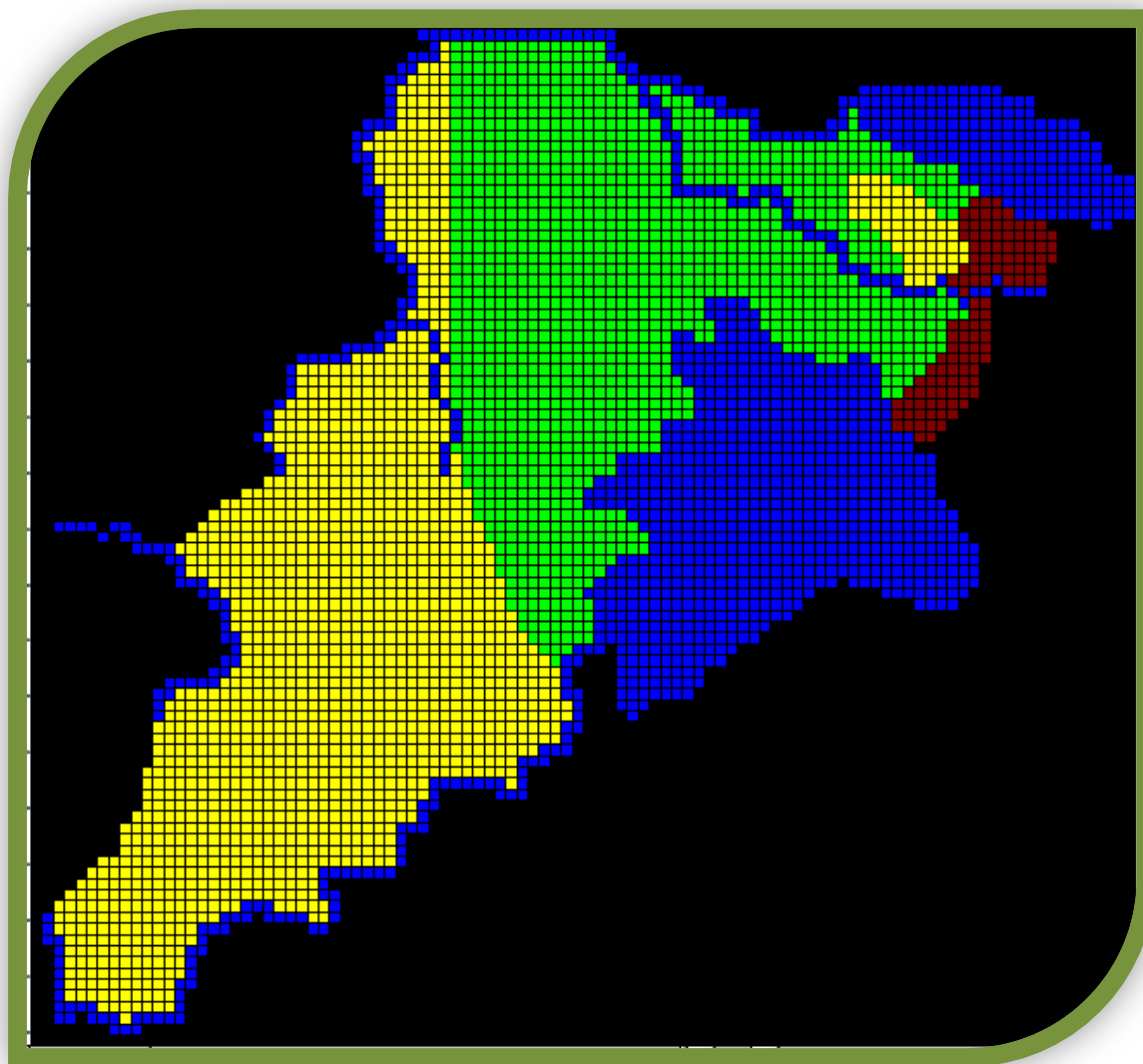


Figura 5. Conductividades hidráulicas en zona de modelación.

7.4 Recarga en los acuíferos

Uno de los principales mecanismo de recarga para ambas cuencas estudiadas es la infiltración mediante la precipitación, la cual percola y se incorpora al sistema de aguas subterráneas. Por lo tanto para la modelación de la recarga de los acuíferos se tomó en cuenta como principal fuente

de información el promedio de la precipitaciones media anual. Para esto se utilizó información de las estaciones pluviométricas que comprende la zona.

Bajo estas condiciones se estimó que era óptimo generar tres zonas de recargas distintas para una mejor representación, ya que se encontró variaciones significativas en sus precipitaciones (Figura 6).

Zona 1 (amarillo) abarca mayor parte de la cuenca del río Bueno en donde la información fue recopilada de estudios previos.

Zona 2 (calipso) abarca mayor parte de la cuenca del río Maullín, donde se utilizó tres estaciones pluviométricas para el cálculo de la precipitación media anual de la zona, estas son: Fresia, Frutillar y Maullín.

Zona 3 (verde) comprende parte de ambas cuencas, dado que en esta zona la precipitación media anual está sobre el promedio que se registra en la depresión intermedia y para resultados más fidedignos fue necesario crear una tercera zona.

La información fue estimada en base a la estación pluviométrica de Ensenada y el mapa de distribución de precipitación en relación a la altura sobre el nivel del mar (DGA, 2012).

Para lograr que el modelo arrojara resultados representativos y acorde con el estudio realizado por la DGA (2012) y luego de varias simulaciones se decidió trabajar con un porcentaje inferior a estudios similares, siendo aproximadamente un 1 % de las precipitaciones anuales totales. Gracias a esta medida el modelo entregó resultados aceptables para el estudio.

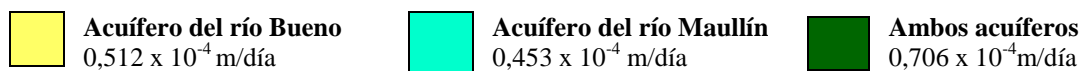
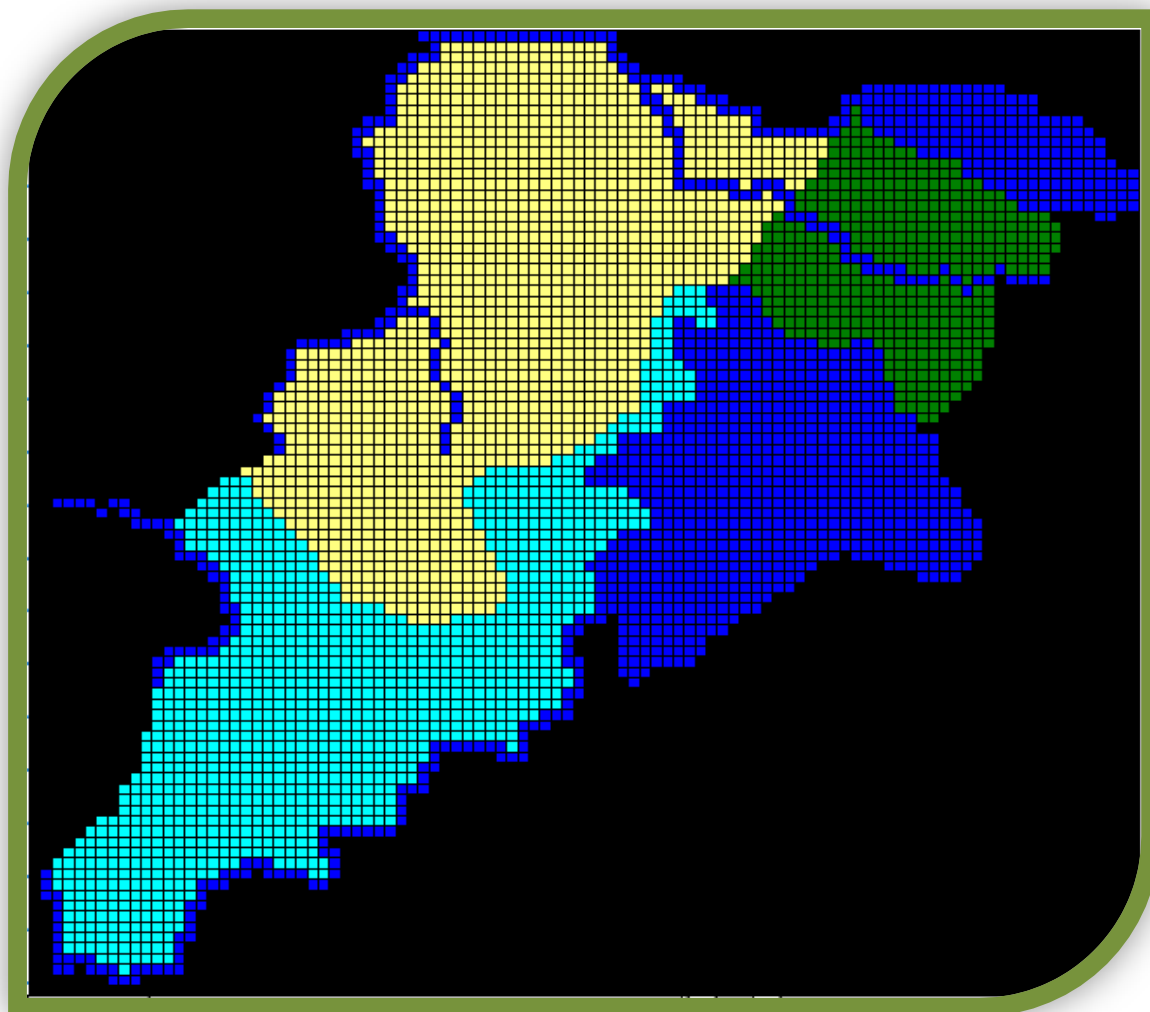


Figura 6. Valores de recargas superficiales de los acuíferos por zona (m/día).

7.5 Balance hídrico del sistema acuífero

Un modelo hidrogeológico en sí es la representación gráfica del balance hídrico de una zona. El objetivo es conocer los flujos de entrada y salida producto de diversos mecanismos en el área de modelación, mediante un modelo de régimen permanente, es decir un modelo que simula

condiciones de equilibrio del balance hídrico, que no considera cambios en el tiempo de las variables del sistema de acuífero en cuanto a sus niveles y flujos, por lo tanto no se consideraron almacenamientos en el acuífero.

Los parámetros de recarga del modelo se obtuvieron de estudios publicados por la DGA (2012).

En la Figura 7 se especifica los parámetros incluidos en el balance hídrico.

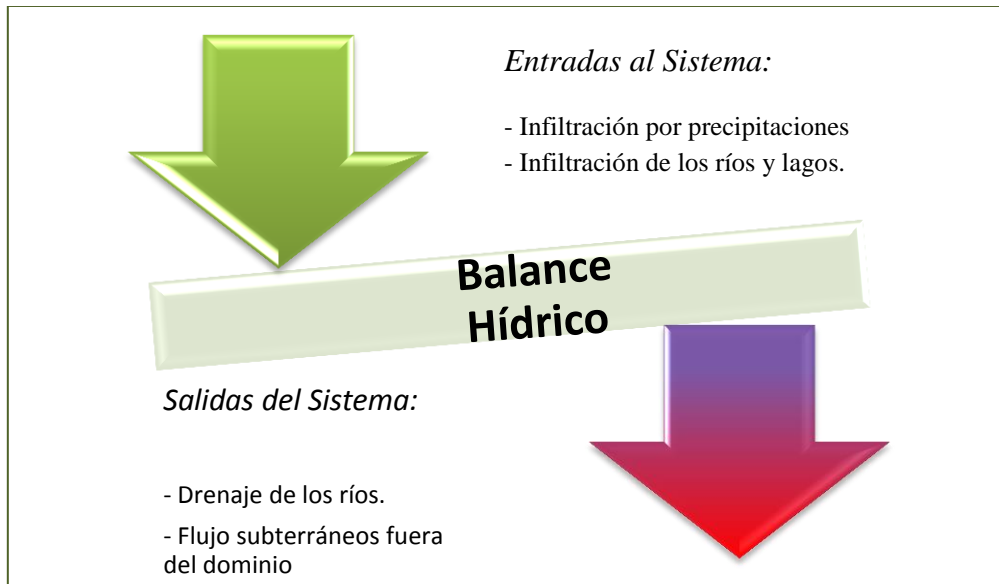


Figura 7. Esquema de funcionamiento del sistema hidrico.

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se detalla el análisis de resultados obtenidos en la modelación para así entender de forma resumida y de manera cuantitativa la interacción que se genera entre las cuencas del río Bueno y río Maullín.

8.1 Cuantificación de la recarga

En la Tabla 2 se muestra la recarga total por Infiltración de la precipitación, calculada a partir de un porcentaje (1%) de ellas.

Tabla 2. Resultados de recarga.

<i>Entrada</i>	<i>Área (Km²)</i>	<i>Recarga (m³/s)</i>
Acuífero río Bueno	1.542,7	0,914
Acuífero río Maullín	1.370,9	0,718
Ambos acuíferos	513	0,419
Total	3.426,6	2,051

En resumen la infiltración debido a las precipitaciones en el total de la zona modelada es de 2,05 m³/s.

8.2 Características generales de la modelación

Luego de haber ingresado los datos necesarios para el correcto desarrollo del programa se llevó a cabo la ejecución del modelo entregando a primera vista información como:

- ✓ Curvas de nivel estático (curvas que unen los puntos de igual cota formado un mapa equipotencial).
- ✓ Dirección de flujo (representadas por flechas en cada celda que indican la dirección del escurrimiento en la capa).

Ambos datos entregados por la modelación conforman la red de flujo del modelo.

Se puede observar en la Figura 8, de norte a sur, que el río Coihueco en parte de su trayectoria aporta flujo subterráneo en dirección al sur llegando al Lago Llanquihue, así también el río López siendo un río de menor cauce, pero el más representativo para el estudio en comparación a sus similares que se encuentran en la zona intermedia de la región, sus aguas subterráneas aportan en menor medida a la cuenca del río Maullín, continuando su trayectoria hacia el norte hasta la confluencia con el río Negro manteniendo la misma dirección. Por otra parte, las aguas subterráneas cercanas al río Llico se dirigen hacia éste, para luego ser desembocadas hacia la costa. Y por último y como delimitación de la zona de estudio hacia el sur, se logra observar que la mayor parte de la dirección de los flujos de aguas subterráneas son dirigidas y aportando al escurrimiento del río Maullín, desembocando finalmente en el mar.

Para el área trabajada en la modelación el escurrimiento de las aguas subterráneas son en mayor medida en dirección sureste. Esto puede deberse en gran parte al gradiente hidráulico generado en la zona gracias a los cambios de profundidad de las cotas.

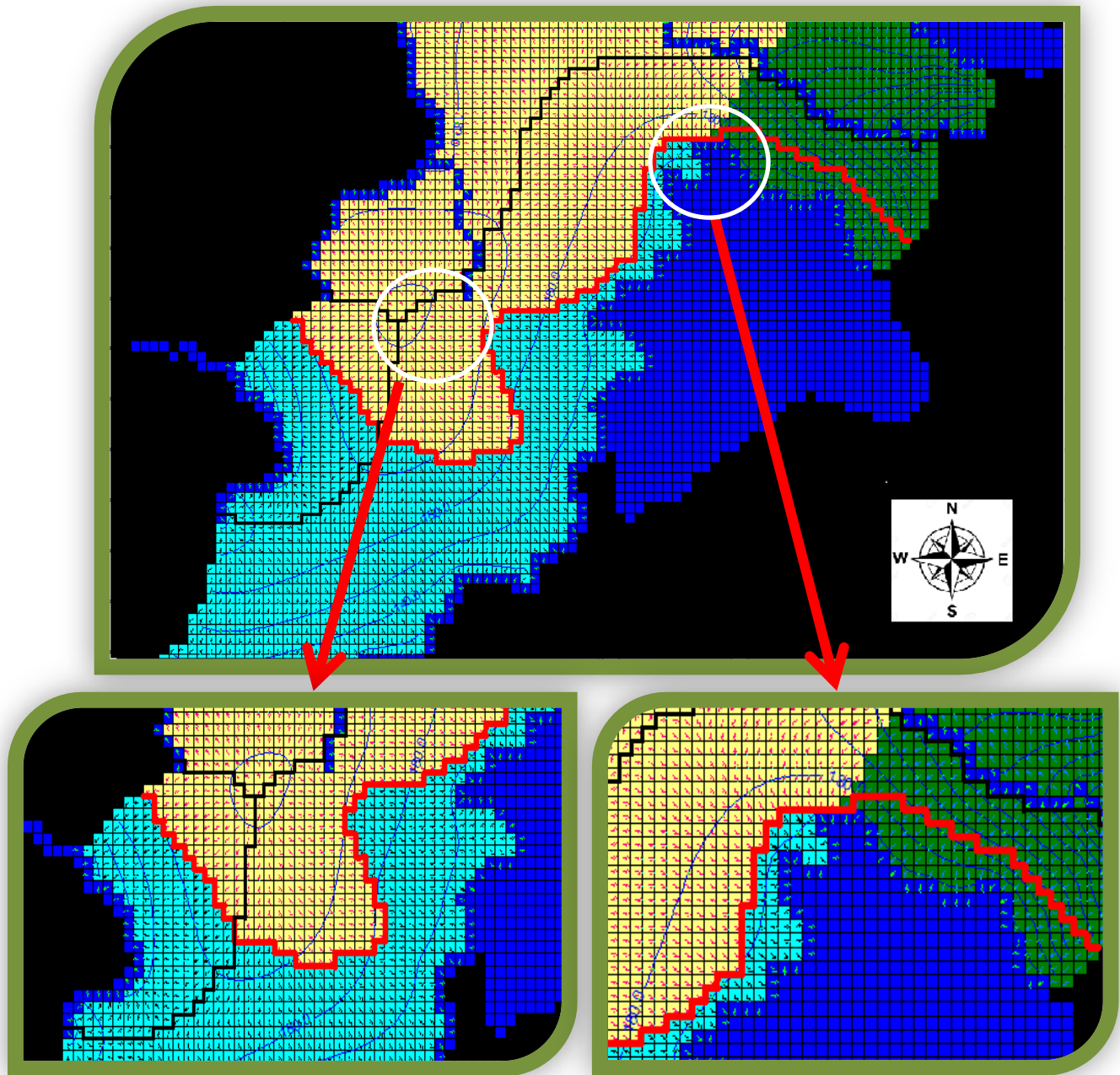


Figura 8. Características generales y límites de cuencas superficial y subterránea.

Cabe mencionar que la línea de color rojo, en la figura 8 indica el límite superficial de las cuencas, esta se confeccionó de manera de esquematizar dicho límite a partir de una imagen capturada del modelo.

Por otro lado la línea color negro de la Figura 8, refleja el límite subterráneo dado por el cambio de sentido del flujo de las aguas entre las dos cuencas, De esta línea se genera una bifurcación hacia al suroeste la cual representa el flujo de agua subterránea que aporta al cauce al río Llico que abarca un área aproximadamente de 297,6 km² del área modelada que corresponde a un 8,7%. Además al norte de dicho límite señalado el flujo de aguas es hacia el norte, en sentido a su misma cuenca (Cuenca del río Bueno). Si se toma de esta forma, se puede visualizar claramente que el aporte de aguas subterráneas se genera de norte a sur, siendo la cuenca del río Bueno la que realiza el aporte a la cuenca del río Maullín, que a su vez dichas aguas llegan al lago Llanquihue hacia el este, y también aportando al caudal del río Maullín, que finalmente desemboca en el océano Pacífico. En la Figura 8, se generó dos imágenes con aumento del área para observar de mejor manera el cambio de flujo, las curvas de nivel y el aporte al lago.

8.3 Balance de masas

De manera de interpretar los resultados arrojados por el programa Groundwater Vistas sobre el intercambio de aguas subterráneas entre los acuíferos, se confeccionó la tabla 3 que representa el flujo en m³/día de agua en todas las direcciones, como también las recargas de la zona.

Tabla 3. Balance de masas en área total de cada acuífero modelado

Cuenca del río Bueno y cuenca del río Maullín

	<i>Cuenca del Río Bueno</i>		<i>Cuenca del Río Maullín</i>	
	<i>Flujo de entrada (m³/día)</i>	<i>Flujo de salida (m³/día)</i>	<i>Flujo de entrada (m³/día)</i>	<i>Flujo de salida (m³/día)</i>
Oeste	244	- 33.569	27.906	-1.014
Este	1.014	- 27.906	33.569	-244
Sur	0	- 105.006	9	-158
Norte	158	9	105.006	0
Ríos, Lagos	159.156	- 109.295	5.021	-238.537
Recarga	115.213	0	68.441	0
Superficial				
TOTAL	275.786	- 275.786	239.953	-239.953

Al comparar los resultados de ambos acuíferos en la tabla 3 se destaca lo siguiente; en primer lugar lo más notorio es que el flujo de aguas subterráneas total es mayor en la zona modelada de la cuenca del río Bueno. Además el flujo de intercambio se produce de norte a sur y no a la inversa, es decir la cuenca del río Maullín recibe el mayor aporte de su flujo desde la cuenca del río Bueno y el aporte desde la cuenca del río Maullín al Bueno es despreciable. El aporte con dirección al sur corresponde a un 38% aproximadamente del flujo total de la fracción modelada de la cuenca del río Bueno, lo que a su vez corresponde a un 59% de la recarga total por precipitaciones de ambos acuíferos, que es finalmente el valor de intercambio (105.006 m³/día). Obtenido del siguiente cálculo.

$$\% \frac{\text{Intercambio}}{\text{Recarga por precipitación ambos acuíferos}} = \frac{105.006 \text{ m}^3/\text{día}}{177.312,55 \text{ m}^3/\text{día}} \times 100 \approx 59\%$$

El área asociada al intercambio de flujos subterráneos corresponda a 941.38 km² correspondiendo a un 38% del área total modelada de la cuenca del río Bueno. Extrapolando este resultado al total del área de la cuenca representa tan sólo un 5,47%.

De manera de relacionar el intercambio flujo subterráneo que se produce entre ambas cuencas modeladas con el flujo de los cauces principales de cada una de ellas, se generó el siguiente cálculo en función de los caudales medios del río Bueno y río Maullín respectivamente:

$$\% \frac{\text{Intercambio}}{\text{Caudal medio cuenca Río Bueno}} = \frac{105.006 \text{ m}^3/\text{día}}{65.664.000 \text{ m}^3/\text{día}} \times 100 \approx 0.16\%$$

$$\% \frac{\text{Intercambio}}{\text{Caudal medio cuenca Río Maullín}} = \frac{105.006 \text{ m}^3/\text{día}}{6.307.200 \text{ m}^3/\text{día}} \times 100 \approx 1.66\%$$

Estos resultados al compararse con las grandes masas de aguas que se transportan por los cauces principales de ambas cuencas, no generan un aporte significativo.

8.4 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad del modelo modificando el porcentaje de recarga por precipitaciones, aumentando significativamente este valor, alcanzando un 10%, recordando que se trabajó con un 1% en la modelación. Los resultados se muestran en la Figura 9 con los límites subterráneos.

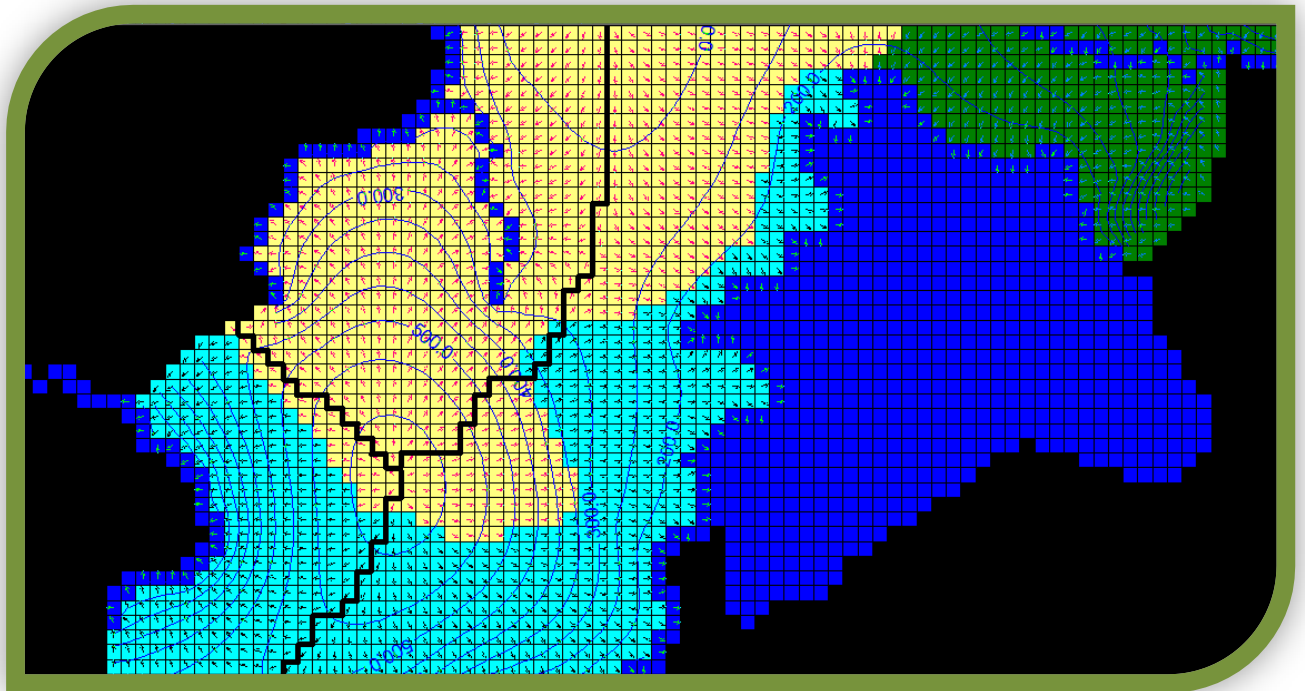


Figura 9. Dirección de flujos y líneas piezométricas con una recarga del 10% de precipitaciones

A primera vista el cambio más notorio corresponde a las modificaciones de los niveles piezométricos, lo que no concuerda con los estudios oficiales que existían en la zona anteriormente por parte de la DGA, dado este resultado todo dato entregado con este valor será poco representativo para la zona de estudio.

9 CONCLUSIONES

En primer lugar al terminar la modelación computacional se concluye que el flujo se muestra de manera compartida tanto al este como al oeste de la zona, sin tener un predominio claro. En cuanto al aporte de aguas en el límite de las cuencas, el modelo arroja claramente que el aporte hidrológico mayoritariamente se realiza desde la cuenca del río Bueno al Maullín.

A partir de las variables consideradas en este estudio se obtuvo como resultado un límite superficial de las cuencas no coincidente con el eventual límite subterráneo del flujo aguas del modelo.

Las líneas piezométricas (alturas de cotas) arrojadas por el modelo se aproximan a los valores ya determinados por estudios realizados anteriormente por la DGA, dando más veracidad a la simulación.

Se debe dejar en claro que la modelación se realizó en un porcentaje muy limitado de las áreas totales de las cuencas, por lo tanto al extrapolar estos resultados, la interacción por parte de la cuenca del río Bueno es de aproximadamente un 5%, pero por parte del río Maullín equivale a casi el 20%.

Técnicamente este estudio tuvo algunas limitaciones por el software computacional utilizado, ya que se trabajó con una versión educacional restringiendo algunas funciones que facilitarían la manipulación y la obtención de resultados.

Gracias a información obtenida y recopilada por estudios anteriores es posible proyectar datos a zonas poco trabajadas por organismos oficiales, aportando a futuras investigaciones que se realicen en la zona proyectada, facilitando la obtención de datos.

Al conocer el comportamiento y características de los flujos de aguas subterráneas de una zona específica se logra conocer los potenciales recursos a explotar. Para ello es necesario realizar estudios y simulaciones bajo diversas variables, como el ejecutado en este proyecto de título.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Arumí Ribera, J.L. y Oyarzún Lucero, R.A. (2006). Las aguas subterráneas en Chile. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 37-45. Chillán, Chile.
- CONIC BF INGENIEROS CIVILES CONSULTORES LTDA. (2010). Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X, ministerio de obras públicas, Santiago, Chile.
- DIRECCION GENERAL DE AGUAS, (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Bueno.
- DIRECCION GENERAL DE AGUAS, (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Maullín.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, (2012). Estudio cuencas principales Región de los Ríos, Informe realizado por Amphos 21 Consulting Chile Ltda.
- Figueroa, J.P.F. (2004). Las aguas subterráneas en el mundo. Revista Chile riego, Comisión Nacional de Riego. Santiago, Chile
- GOOGLE EARTH (2017). Version 7.3.0.3832, Earth Viewer 3D. <https://Earth.google.co>
- GROUNDWATER VISTAS (2017), Version 6. An Advanced 3D Modeling Environment for MODFLOW, Department of Geography, EE.UU.
- INSTITUTO DE INVESTIGACION AGROPECUARIAS, (2010). Análisis preliminares de niveles de aguas subterráneas, Dirección general de aguas, Santiago.
- SERVICIO DE EVALUCION AMBIENTAL (2012). Guía para el uso de modelos de agua subterráneas en el SEIA, Servicio de Evaluación Ambiental, SEA.
- Valdes R.M. (2009). Análisis del comportamiento espacial y temporal de las precipitaciones en la región de los ríos, la región de los lagos y la región de Aysén. Tesis, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca, Talca, Chile.