



**Dirección  
General de  
Aguas**

Ministerio de Obras  
Públicas

Gobierno de Chile

**Ministerio de Obras Públicas  
Dirección General de Aguas**

# **ESTIMACIÓN DE RECARGAS EN CUENCAS ALTIPLÁNICAS Y PRECORDILLERANAS DE VERTIENTE PACÍFICA**

## **RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR:**

**AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA**

**S.I.T. N° 251**

**Santiago, Septiembre 2011**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Ingeniero Civil Sr. Laurence Golborne Riveros

Director General de Aguas  
Abogado Sr. Matías Desmadryl Lira

Jefe (S) División de Estudios y Planificación  
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal  
Ingeniero Civil Luis Rojas Badilla

Contraparte Técnica  
Ingeniero Civil Andrea Osses Vargas

### AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA

Jefe de Proyecto  
Ingeniero Civil Jaime Vargas Paysen

#### Profesionales

Ingeniero Civil Ph.D Carlos Espinoza C.  
Geólogo - Hidrogeólogo Carlos Parraguez Decker  
Ingeniero Civil Jorge Baechler Rojas  
Empresa Geodatos S.A.  
Geóloga Sofía Aravena F.  
Ingeniero Civil Alberto Cisternas R.  
Ingeniera Civil en Geografía Claudia Hernández Leal

## ÍNDICE RESUMEN EJECUTIVO

<b>1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>2. ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>3</b>
<b>3. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.....</b>	<b>6</b>
<b>4. PROPUESTA METODOLÓGICA.....</b>	<b>6</b>
<b>4.1. RECARGAS .....</b>	<b>6</b>
<b>4.2. RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA .....</b>	<b>10</b>
4.2.1. Análisis de Precipitaciones Anuales y Mensuales.....	10
4.2.2. Análisis Relaciones Precipitación - Escorrentía .....	13
4.2.3. Comportamiento de la Relación P-E Frente a Diferentes Variables .....	14
<b>5. TRABAJOS DE TERRENO .....</b>	<b>15</b>
<b>5.1. Introducción .....</b>	<b>15</b>
<b>5.2. TRABAJOS GEOFÍSICOS REALIZADOS .....</b>	<b>16</b>
<b>5.3. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO GEOFÍSICO .....</b>	<b>16</b>
<b>6. DETERMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA.....</b>	<b>17</b>
<b>6.1. Permeabilidad y Pendiente del Agua Subterránea .....</b>	<b>17</b>
<b>6.2. Caudales Subterráneos en Secciones de Salida .....</b>	<b>18</b>
<b>7. BALANCES HÍDRICOS .....</b>	<b>20</b>
<b>8. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
<b>9. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>23</b>
<b>9.1. RESUMEN.....</b>	<b>23</b>
<b>9.2. CONCLUSIONES.....</b>	<b>27</b>

## PLANOS

**PLANO 1           ÁREA DE ESTUDIO**

## **1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS**

### **1.1. Introducción**

El Altiplano o Puna es una región de América del Sur que comprende el Norte de Chile, el centro y Sur del Perú, la parte occidental de Bolivia y el noroeste de Argentina. Básicamente son cuencas sedimentarias formadas en altura, en su mayoría sobre los 3.500 msnm, debido al tectonismo y a la actividad volcánica existente en estas latitudes.

Las precipitaciones en estas cuencas son de origen tropical, y ocurren durante el verano del hemisferio Sur, lo que es conocido como el 'Invierno Boliviano' o 'Invierno Altiplánico'. Estas precipitaciones son de carácter convectivo, con una alta variabilidad espacial, y se concentran en los meses de Enero y Febrero. Este fenómeno desaparece más al Sur, teniendo una mínima influencia en la Región de Atacama.

Las condiciones extremas sólo permiten que subsista una vegetación especializada, con pocos requerimientos hídricos y capaces de soportar amplias oscilaciones térmicas. Los bofedales conforman sistemas adaptados a estas condiciones, conocidas como vegetación de estepa o esteparia, que minimizan la transpiración debido a la reducida superficie de sus hojas, algunas de las cuales han evolucionado transformándose en espinas.

La zona Norte denominada Norte Grande reúne las condiciones de mayor aridez del Norte de Chile, por ésta razón los recursos hídricos subterráneos de la meseta altiplánica y de las quebradas con vertiente pacífica son una importante fuente de abastecimiento de la demanda de agua actual, y representan la principal fuente para el abastecimiento futuro de agua de la región. En dichas zonas además existen sectores con escasa información y conocimiento hidrológico lo que dificulta la evaluación de disponibilidades.

El conocimiento de los procesos hidrogeológicos e hidrológicos que intervienen y determinan los flujos aprovechables de estos sistemas es un trabajo de largo plazo, no obstante, el incremento de la demanda de agua (compañías mineras principalmente, y en menor grado ganadería y agricultura de los pueblos originarios) implica la búsqueda de soluciones de corto a mediano plazo, que a partir de la información disponible y en forma razonable, se pueda hacer cargo de la evaluación hidrológica dentro de un cierto nivel de certidumbre.

Dentro de esta línea de trabajo, la DGA ha abordado diferentes estudios que han permitido plantear diversas metodologías para la estimación de las recargas que se producen en el altiplano y en la precordillera del Norte de Chile; dentro de esos trabajos se cuentan los siguientes (en orden cronológico):

**Ref. 1: Estudio Evaluación de Los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama Ubicadas entre el Río Copiapó y La Región de Antofagasta SDT 276 (Año 2009-DARH).**

**Ref. 2: Estudio Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile , regiones XV, I, II y III; SIT N° 157 ( parte 1) y SIT N° 195 ( parte 2)- DICTUC 2009.**

**Ref. 3: Estudio Metodología para la Estimación de Recarga de Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica en el Norte de Chile XV, I, II, y III Regiones.; SIT N° 221 – GCF Ingenieros Limitada 2010.**

**Ref.4: Propuesta Metodológica para Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas y de Vertiente Pacífico; Documento de Trabajo, Marzo 2010, Luis Rojas Badilla y Carlos Salazar M., DGA.**

Dentro de esta línea de trabajo, la DGA abordó el año 2010 (Ref. 3), el estudio de una metodología para la estimación de recarga en el altiplano y Precordillera del Norte de Chile. Dicha metodología está basada conceptualmente en una simplificación del proceso de recarga en ambientes áridos, en la que se incorporó principalmente un trabajo de ordenamiento y sistematización para la determinación de la precipitación para el área de interés, y la zonificación del área de evaluación sobre la base de las particularidades de la cuenca de drenaje.

## **1.2. Objetivos**

El presente estudio tiene por principal objetivo, estimar la recarga de agua de las principales cuencas que cumplan con la condición de altiplánicas o de vertiente pacífica.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Realizar un análisis crítico de la metodología propuesta (Ref. 4), tomando en consideración el error esperado sobre las simplificaciones metodológicas y alcances de la misma.
- Desarrollar un análisis sistemático de la información física disponible (hidrología, geomorfología, hidrogeología, geología y usos) de las cuencas a considerar, que incluya las simplificaciones físicas, temporales y espaciales deducidas del modelo conceptual propuesto por la DGA, así como de la información administrativa de derechos y uso del agua.

- Desarrollar actividades de análisis y de terreno para el ajuste y mejora de la metodología, a partir de las recomendaciones del estudio realizado en el año 2010 (Ref. 4).
- Aplicar la metodología propuesta sobre la base de los antecedentes sistematizados.
- Efectuar balances hídricos de carácter preliminar sobre la base de los antecedentes de derechos y usos que se encuentren disponibles.
- Efectuar un análisis de validación que considere la coherencia regional y a nivel de cuenca de los resultados obtenidos.

## **2. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio corresponde a las cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de la Vertiente Pacífica. En el Plano N° 1 se muestra el área general de interés. En dicho plano se han incluido e identificado las cuencas que, de acuerdo con los Términos de Referencia, se estudiarán para aplicar la metodología y para llevar a cabo los correspondientes balances hídricos. Adicionalmente, se incluye la ubicación de las estaciones fluviométricas asociadas a las cuencas donde se aplicará la metodología, las estaciones fluviométricas que están a la salida o bien dentro de las cuencas donde se aplicarán los balances hídricos, y finalmente se han ubicado las estaciones pluviométricas que podrían ser útiles en el desarrollo del trabajo (102 estaciones).

Las cuencas donde se aplicará la metodología que será desarrollada y aquellas donde se efectuarán los balances hídricos son las que se incluyen en los Cuadros 2-1 y 2-2 siguientes.

**PLANO N° 1**  
**ÁREA DE ESTUDIO**

**CUADRO 2-1  
CUENCAS DONDE SE APLICARÁ LA METODOLOGÍA**

	<b>Cuenca</b>	<b>Altura Media</b>	<b>Área Total</b>
		<b>(msnm)</b>	<b>(km2)</b>
1	Río Lluta Alto	4.345	1.327
2	Río Lluta Bajo Río Azufre	4.448	381
3	Río Caquena	4.672	448
4	Río San José Alto	3.386	1.358
5	Río Codpa hasta Cala Cala	3.901	370
6	Río Camarones Hasta Conanoxa	3.177	2.006
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	4.084	519
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	4.214	548
9	Río Collacagua Hasta Peñablanca (Huasco)	4.294	721
10	Río Piga Hasta Collacagua (Huasco)	4.292	398
11	Río Guatacondo Hasta Copaquire	4.347	189
12	Río Loa Hasta Lequena	4.102	2.096
13	Río Salado	3.602	2.351
14	Río Salado Hasta Curti	4.285	547

**CUADRO 2-2  
CUENCAS DETERMINACIÓN BALANCE HÍDRICO**

	<b>Cuenca</b>	<b>Altura Media</b>	<b>Área Total</b>
		<b>(msnm)</b>	<b>(km2)</b>
1	Lauca	4.460	2.438
2	Caquena	4.386	3.150
3	Isluga	4.187	1.360
4	Cariquima	4.139	1.486
5	Codpa Alto	3.901	370
6	Salar del Huasco	4.165	1.471
7	Cancosa	4.173	2.048
8	Camiña Alto	4.084	519
9	Maricunga	4.295	2.195
10	Pedernales	3.992	3.588
11	Negro Francisco	4.547	905



### **3. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES**

Los antecedentes recopilados y revisados son los que se indican a continuación:

**Ref. 1: Estudio Evaluación de Los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama Ubicadas entre el Río Copiapó y La Región de Antofagasta DGA, SDT 276 (Año 2009-DARH).**

**Ref. 2: Estudio Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II y III; DGA, SIT N° 157 ( parte 1) y SIT N° 195 ( parte 2)- DICTUC 2009.**

**Ref. 3: Estudio Metodología para la Estimación de Recarga de Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica en el Norte de Chile XV, I, II, y III Regiones.; DGA, SIT N° 221 – GCF Ingenieros Limitada 2010.**

**Ref.4: Propuesta Metodológica para Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas y de Vertiente Pacífico; Documento de Trabajo, Marzo 2010, Luis Rojas Badilla y Carlos Salazar M., DGA.**

**Ref. 5: Estimación de Requerimientos Hídricos de Humedales del Norte de Chile, DGA, SDT 96, 2001.**

### **4. PROPUESTA METODOLÓGICA**

#### **4.1. RECARGAS**

El principal objetivo del estudio es formular una metodología que permita determinar las recargas en cuencas altiplánicas que no cuentan con control hidrométrico, y que sólo se cuenta con información hidrológica general como la precipitación media anual y una estimación de escorrentía total.

De acuerdo con la metodología DGA (Ref. 4), las hipótesis y conceptos hidrológicos base que ha sido utilizado para la definición o bien “concepción” de lo que significa la recarga en una cuenca altiplánica, fueron los siguientes:

- a) Los caudales medidos a la salida de las cuencas representarían la escorrentía total, por lo tanto los flujos subterráneos pasantes serían despreciables.
- b) Se define la recarga neta de la cuenca como el caudal base de salida, compuesto por el agua que infiltra y transita en algún momento en forma

subterránea, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior al de un año hidrológico.

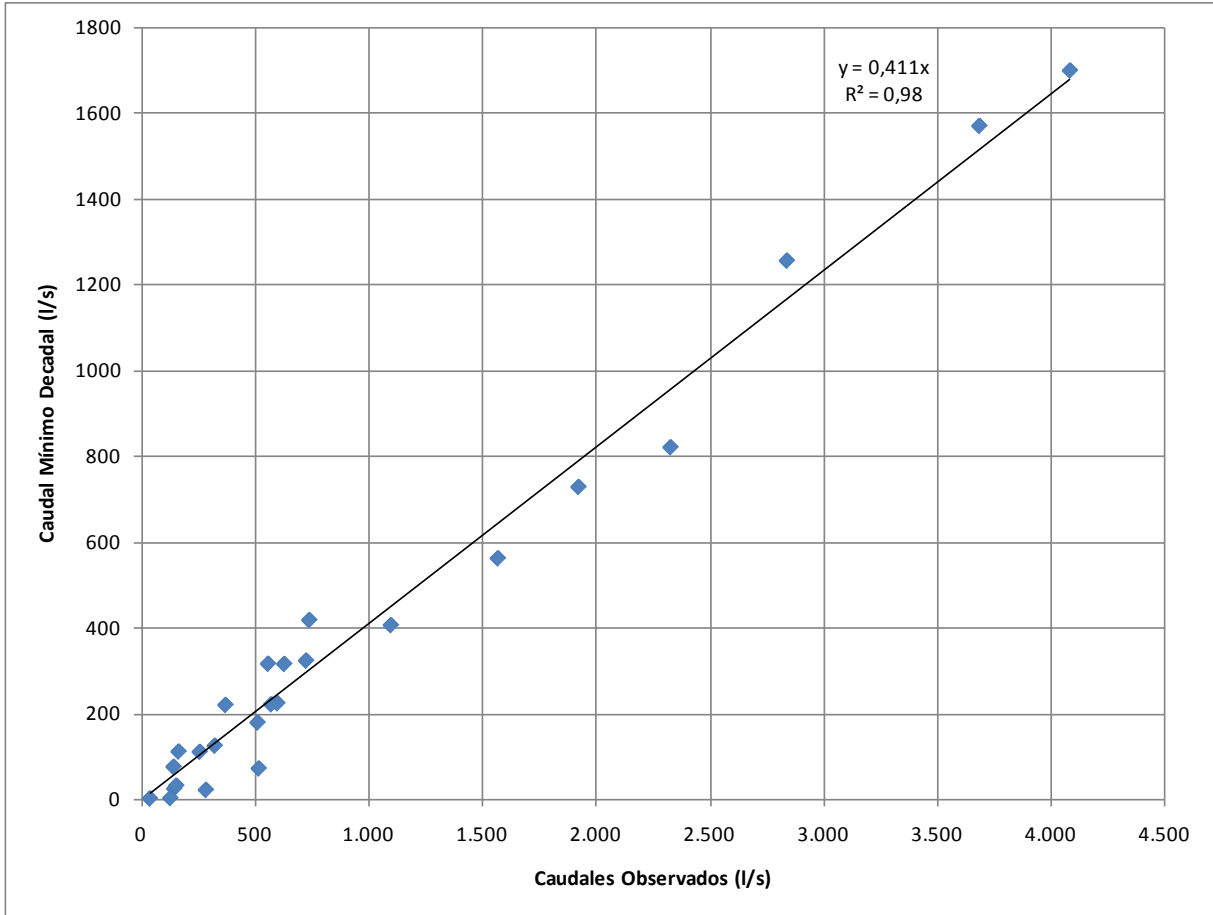
- c) La recarga neta o caudal base de salida de la cuenca puede ser estimado, en términos de caudal medio mensual, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de Junio, Julio y Agosto. Esta última hipótesis tendría sus fundamentos en:
- Las precipitaciones de invierno en las cuencas seleccionadas son bajas, y mayoritariamente sólidas. A su vez, las bajas temperaturas limitan el deshielo y las pérdidas que se producen por sublimación (evaporación). De acuerdo con lo señalado, se puede decir que no habrían aportes significativos a la escorrentía de salida en esos meses.
  - Durante el período de verano, el caudal base persiste aun cuando el caudal de salida pudiera ser menor al observado en invierno, debido a que se encontraría disminuido por la evaporación y evapotranspiración que alcanza su máximo anual, llegando incluso a consumir la totalidad del flujo base en años secos, o en períodos de sequía interanual.
  - Existiría consenso en interpretar las series hidrológicas del Norte bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de los cual resultaría razonable estimar el flujo base como el promedio del conjunto de 4 mínimos decadales observados históricamente.

Por otro lado, para efectos de analizar cómo se comporta la hipótesis de la correlación que existe entre los caudales observados (o totales si  $Q_{sub}$  es despreciable) a la salida de una determinada cuenca, con los caudales mínimos decadales de los meses de Junio, Julio y Agosto, en el Cuadro 4.1-1 se incluyen, para 25 cuencas altiplánicas con control fluviométrico (Estudio Ref. 3, SIT 221), los caudales observados y los mínimos decadales de dichas cuencas; en la Figura 4.1-1 se han graficado esos valores.

**CUADRO 4.1-1**  
**CAUDALES MÍNIMOS PROMEDIO DECADAL**  
**Y CAUDALES OBSERVADOS (Estudio SIT 221) CUENCAS 1 A 25**

	Cuenca	UTM		Altura Media (msnm)	Caudal Salida Obs. (l/s)	Mínimo Decadal Promedio (l/s)
		NORTE	ESTE			
1	Río Lluta Alto	8.023.749	436.092	4.345	1.921	728
2	Río Lluta Bajo Río Azufre	8.038.066	421.865	4.448	371	220
3	Río Caquena	8.002.060	474.867	4.672	1.097	406
4	Río San José Alto	7.952.919	439.148	3.386	599	224
5	Río Codpa hasta Cala Cala	7.925.348	457.079	3.901	146	25
6	Río Camarones Hasta Conanoxa	7.904.671	451.277	3.177	517	72
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	7.880.957	480.062	4.084	324	125
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	7.819.950	502.993	4.214	155	32
9	Río Collacagua Hasta Peñablanca (Huasco)	7.789.862	516.829	4.294	129	3
10	Río Piga Hasta Collacagua (Huasco)	7.793.980	521.931	4.292	143	76
11	Río Guatacondo Hasta Copaquire	7.683.722	522.308	4.347	39	2
12	Río Loa Hasta Lequena	7.640.075	537.009	4.102	512	179
13	Río Salado	7.536.476	577.205	3.602	558	316
14	Río Salado Hasta Curti	7.535.382	598.591	4.285	285	22
15	Río San Pedro de Atacama	7.502.542	593.650	4.027	739	418
16	Canal Cuno hasta Socaire	7.386.620	631.015	4.727	165	111
17	Río de la Ola (Pedernales)	7.053.685	495.396	4.026	629	316
18	Río Lamas (Maricunga)	7.015.706	523.360	4.919	258	111
19	Río Jorquera	6.933.311	457.227	3.799	725	323
20	Río Pulido	6.882.437	433.203	3.569	1.567	562
21	Río Manflas	6.855.012	410.018	3.566	572	222
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	6.801.726	395.840	3.361	4.079	1699
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	6.797.681	404.827	3.709	3.681	1570
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	6.752.104	377.615	3.471	2.325	821
25	Río Carmen hasta San Félix	6.746.525	379.781	3.632	2.836	1255

**FIGURA 4.1-1**  
**CORRELACIÓN DE CAUDALES OBSERVADOS**  
**Y MÍNIMOS DECADALES PROMEDIO, CUENCAS 1 A 25**



Del cuadro anterior se observa una buena correlación entre los caudales mínimos decadales promedio con los caudales observados.

## 4.2. RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA

### 4.2.1. Análisis de Precipitaciones Anuales y Mensuales

En el Cuadro 4.2-1 se incluyen las precipitaciones medias anuales y mensuales obtenidas en estudio SIT 221 (GCF 2010).

**CUADRO 4.2-1  
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES Y ANUALES (GCF 2010)**

	NOMBRE CUENCA	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1	Río Lluta	97,5	81,1	54,1	5,9	1,1	2,4	2,7	4,4	1,2	3,5	5,4	27,9	<b>287,3</b>
2	Río Lluta bajo Río Azufre	100,2	80,3	58,0	7,1	1,2	2,3	4,0	2,9	1,0	3,5	6,7	35,8	<b>303,2</b>
3	Río Caquena	118,3	99,7	72,7	11,0	1,2	2,2	5,8	7,1	1,6	4,7	11,6	44,0	<b>379,9</b>
4	Río San José Alto	45,2	38,6	21,3	0,6	0,2	0,9	1,0	2,1	0,8	0,9	0,9	12,2	<b>124,6</b>
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	47,9	41,9	24,7	1,9	0,2	0,7	1,4	2,1	1,0	0,9	1,8	13,8	<b>138,3</b>
6	Río Camarones hasta Conanoxa	34,2	39,0	19,5	1,4	0,2	0,2	1,3	1,9	0,9	0,5	0,6	6,8	<b>106,6</b>
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	61,7	70,3	22,8	4,4	2,5	1,0	3,9	1,6	3,2	1,3	0,8	12,8	<b>186,4</b>
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	45,8	45,6	21,1	1,3	1,7	0,7	0,8	2,7	1,0	0,5	1,0	6,7	<b>128,9</b>
9	Río Collacagua hasta Peñablanca (Huasco)	50,4	39,7	21,8	1,8	0,4	0,9	0,7	1,8	0,9	1,1	2,4	10,3	<b>132,1</b>
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	54,7	42,7	23,4	2,0	0,3	0,9	0,7	1,7	0,9	1,0	2,6	11,4	<b>142,4</b>
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	46,7	39,8	14,8	1,3	1,7	4,5	1,5	1,2	1,5	1,3	1,3	9,0	<b>124,6</b>
12	Río Loa hasta Leuqena	39,3	40,6	17,5	0,6	1,8	2,3	0,8	1,8	1,0	0,8	1,2	6,6	<b>114,1</b>
13	Río Salado	23,4	24,0	13,8	2,1	0,7	2,5	0,2	3,7	1,3	0,4	0,1	3,6	<b>75,9</b>
14	Río Salado hasta Curti	42,6	48,9	25,5	0,9	1,8	2,2	0,5	1,7	1,9	0,5	0,6	6,0	<b>133,1</b>
15	Río San Pedro de Atacama	25,0	26,8	16,7	0,6	1,3	3,1	0,6	1,3	1,0	0,3	0,3	2,7	<b>79,9</b>
16	Canal Cuno hasta Socaire	16,4	14,3	9,7	1,4	3,8	3,4	0,4	1,6	1,0	0,2	0,3	0,9	<b>53,5</b>
17	Río de La Ola (Pedernales)	0,0	1,2	2,7	1,8	5,4	8,9	18,0	5,6	2,0	0,5	0,0	0,1	<b>46,1</b>
18	Río Lamas (Maricunga)	0,1	1,2	3,0	2,4	6,6	11,1	15,5	6,8	2,2	0,6	0,0	0,2	<b>49,6</b>
19	Río Jorquera	0,2	1,0	2,8	3,2	7,7	13,2	10,4	8,2	2,3	0,9	0,1	0,3	<b>50,1</b>
20	Río Pulido	0,2	0,4	2,3	3,6	10,4	15,3	12,0	8,8	1,7	0,6	0,0	0,3	<b>55,6</b>
21	Río Manflas	0,1	0,2	1,8	3,2	9,2	15,0	12,9	9,3	1,2	0,5	0,1	0,2	<b>53,6</b>
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	0,2	0,1	1,7	4,5	10,3	19,6	18,9	13,0	1,3	0,7	0,1	0,2	<b>70,6</b>
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	0,2	0,1	1,9	4,8	11,5	22,0	21,0	14,4	1,4	0,8	0,1	0,2	<b>78,4</b>
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	0,2	0,1	1,4	3,5	10,8	21,6	18,0	12,1	1,5	0,6	0,2	0,1	<b>70,0</b>
25	Río Carmen hasta San Félix	0,2	0,1	1,5	3,5	10,8	21,6	18,3	12,4	1,5	0,6	0,2	0,1	<b>70,7</b>

La metodología usada en dicho estudio no toma en cuenta el aumento de los montos de precipitación con la altura, ya que sólo considera las estaciones pluviométricas disponibles, y sucede que hay cuencas (especialmente las ubicadas hacia el Sur, III Región) que no cuentan, dentro de esa cuenca, con valores de precipitación observada, y además, las estaciones pluviométricas con información se ubican alejadas de la cuenca.

Para efectos de corregir el error en las precipitaciones que fuera señalado antes, se han utilizado los siguientes nuevos antecedentes:

**a) Isoyetas Estudio “Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II y III”, Etapa 1, Informe Final Parte III, Hidrología Regional del Altiplano de Chile, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, SIT N° 157, Diciembre de 2008.**

**b) Isoyetas Balance Hídrico**

El cálculo de las precipitaciones medias mensuales y anuales se determinan a través de ArcGis, generando un manto de precipitaciones a partir de las curvas isoyetas. En el Cuadro 4.2-2 se muestra una comparación de las precipitaciones medias anuales calculadas según las 3 fuentes anteriores.

**CUADRO 4.2-2**  
**COMPARACIÓN DE PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES POR CUENCA**  
**SEGÚN DIFERENTES FUENTES**

	CUENCA	P anual SIT 221	P anual	P anual	DIF	DIF	DIF
			PUC	Balance Hídrico	SIT 221-PUC	SIT 221-BH	PUC-BH
		(mm)	(mm)	(mm)	%	%	%
1	Río Lluta Alto	287	283	263,6	1,6	9,0	7,3
2	Río Lluta bajo Río Azufre	303	293	259,2	3,4	16,9	13,1
3	Río Caquena	380	369	341,2	2,8	11,4	8,3
4	Río San José alto	125	128	148,3	-2,6	-16,0	-13,8
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	138	142	161,6	-2,9	-14,4	-11,9
6	Río Camarones hasta Conanoxa	107	105	126,2	1,0	-15,6	-16,4
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	186	189	230,0	-1,5	-19,0	-17,7
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	129	158	177,8	-18,5	-27,5	-11,0
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	132	140	185,5	-5,7	-28,8	-24,5
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	142	138	202,9	3,3	-29,8	-32,1
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	125	129	178,7	-3,4	-30,3	-27,8
12	Río Loa hasta Lequena	114	153	164,1	-25,2	-30,4	-7,0
13	Río Salado	76	94	110,3	-19,4	-31,2	-14,7
14	Río Salado hasta Curti	133	169	180,3	-21,4	-26,2	-6,1
15	Río San Pedro de Atacama	80	151	167,9	-47,2	-52,4	-9,9
16	Canal Cuno hasta Socaire	54	208	219,7	-74,3	-75,6	-5,3
17	Río de La Ola (Pedernales)	46	138	149,1	-66,6	-69,1	-7,3
18	Río Lamas (Maricunga)	50	171	176,3	-71,0	-71,9	-2,9
19	Río Jorquera	50	121	175,2	-58,6	-71,4	-30,9
20	Río Pulido	56	124	224,6	-55,0	-75,3	-45,0
21	Río Manflas	54	126	256,8	-57,5	-79,1	-50,9
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	71	126	216,0	-44,0	-67,3	-41,7
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	78	144	249,3	-45,8	-68,6	-42,0
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	70	128	214,8	-45,4	-67,4	-40,3
25	Río Carmen hasta San Félix	71	135	229,9	-47,6	-69,2	-41,3

Las diferencias entre las precipitaciones medias anuales entre el estudio SIT N° 221 y las del trabajo del PUC y del Balance Hídrico son importantes, y aumentan a medida que se avanza hacia el Sur. Las mayores diferencias se producen con el estudio SIT N° 221, debido a que ese trabajo no tomó en cuenta el aumento de los montos de precipitación con la altura.

Con relación a las diferencias entre las precipitaciones medias anuales del estudio de la PUC y las del Balance Hídrico, estas aumentan a medida que se avanza hacia el Sur. Ello se produce debido a que las isoyetas del Balance Hídrico en las zonas altas de la III Región son bastante mayores que las del estudio de la PUC.

#### 4.2.2. Análisis Relaciones Precipitación - Escorrentía

Se aplicó la relación Precipitación – Escorrentía desarrollada en el estudio DGA Ref. 4, usando las precipitaciones según las 2 fuentes antes descritas (isoyetas PUC y Balance Hídrico).

Se usó la relación P-E considerando sólo el área total de la cuenca y su precipitación media anual. Bajo el mismo concepto anterior, se trabajó además con las precipitaciones de invierno (suma de las precipitaciones medias mensuales entre Abril y Septiembre) y precipitación de verano (suma de las precipitaciones medias mensuales entre Octubre y Marzo), siendo el caudal total la suma de los caudales de invierno y verano generados.

Un resumen de los coeficientes de correlación se incluyen en el Cuadro 4.2-3.

**CUADRO 4.2-3**  
**COEFICIENTES R<sup>2</sup> PARA RELACIONES LINEALES SEGÚN ISOYETAS**  
**ESTUDIO PUC Y BALANCE HÍDRICO**

ISOYETAS PUC		ISOYETAS BALANCE HÍDRICO	
Con P anual	Con P inv y P ver	Con P anual	Con P inv y P ver
<b>0,60</b>	<b>0,73</b>	<b>0,88</b>	<b>0,93</b>

De acuerdo con los resultados obtenidos, las correlaciones entre caudales observados y calculados según las relaciones P-E utilizadas, se ajustan mejor con las isoyetas del Balance Hídrico, desglosando la precipitación media anual sobre la cuenca en precipitaciones de invierno y precipitaciones de verano.

Así, en las determinaciones futuras de caudales totales a la salida de una determinada cuenca, se utilizarán las relaciones obtenidas según precipitaciones del Balance Hídrico, de acuerdo con:

Donde:

f= f invierno o f verano

P= P invierno (suma de Abril a Septiembre); P verano (suma de Octubre a Marzo)



Q cal= se calcula el caudal de invierno y el caudal de verano; el caudal total generado es la suma de los 2.

**Parámetros m y c:**

	Verano	Invierno
m	1739	777
c	27	117

Es importante destacar que en las determinaciones de las precipitaciones de cada una de las 25 cuencas, se generó un manto de precipitaciones anuales con pixeles de 1.000 m x 1.000 m.

**4.2.3. Comportamiento de la Relación P-E Frente a Diferentes Variables**

Utilizando la relación Precipitación – Escorrentía según isoyetas del Balance Hídrico, con P inv. y P ver., se ha hecho un análisis, considerando las 25 cuencas antes señaladas, de su comportamiento que toma en cuenta las siguientes variables:

- Tamaño de la Cuenca
- Ubicación (Latitud – Longitud) de la Cuenca
- Altitud Media de la Cuenca
- Productividad de las Cuencas según Montos de Precipitaciones
- Influencia Cuenca Altiplánica
- Intervalo de Confianza

a) Respecto al tamaño de la cuenca, el coeficiente de correlación mejora a medida que el área de la cuenca aumenta (de 0 a 1.000 km<sup>2</sup>, 11 cuencas, R<sup>2</sup>= 0,53; de 1.000 a 2.000 km<sup>2</sup>, 6 cuencas, R<sup>2</sup>= 0,86; mayor a 2.000 km<sup>2</sup>, 8 cuencas, R<sup>2</sup>= 0,95).

b) Respecto a la ubicación de la cuenca (Latitud), la relación se comporta mejor en las Regiones XV y I, y en la III región; en la II Región la correlación es baja. Es importante destacar la buena correlación que se obtuvo en las cuencas ubicadas en las Regiones XV y I, siendo ésta de 0,96.

- Entre Latitud 17° 30´ y 20° 30´; 10 Cuencas: R<sup>2</sup>= 0,96
- Entre Latitud 20° 30´ y 24° 00´; 6 Cuencas: R<sup>2</sup>= 0,55
- Entre Latitud 26° 00´ y 30° 00´; 9 cuencas: R<sup>2</sup>= 0,91

- c) Tomando como parámetro la altitud media de la cuenca, se obtuvieron (para 2 rangos de altitud) mejores correlaciones para aquellas cuencas que se localizan entre los 3.000 y 4.000 msnm ( $R^2 = 0,93$ , versus 0,79 para cuencas cuyo rango de altitud varía entre los 4.000 y 5.000 msnm).
- d) Se validó que la productividad de una cuenca altiplánica (l/s/km<sup>2</sup>) aumenta con la precipitación media anual.
- e) Se aplicó la relación en cuencas que no son altiplánicas, y se llegó a la conclusión que no es aplicable a dicho tipo de cuencas (no altiplánicas).
- f) Se calculó el intervalo de confianza de la relación aplicada a las 25 cuencas con control fluviométrico. Con un 95 % de nivel de confianza, el caudal calculado estará dentro de un rango promedio de variación de 139 l/s.

## **5. TRABAJOS DE TERRENO**

### **5.1. Introducción**

Uno de los principales objetivos del estudio es lograr validar y/o modificar las relaciones de determinación de recargas hechas por la DGA (2010), en función de conocer el flujo subterráneo de salida en cada una de las cuencas (14) donde fue aplicada la metodología.

Conociendo los flujos de agua subterránea a la salida de las cuencas que se analicen, será factible introducir esa variable en las relaciones antes presentadas (si corresponde).

Los trabajos de terreno efectuados correspondieron a prospecciones geofísicas del tipo Nano Tem. Los perfiles Nano Tem se han realizado en la ubicación de las secciones donde se localizan las estaciones fluviométricas de salida de cada una de las 14 cuencas. En el Cuadro 5-1 se indican las estaciones fluviométricas de salida de cada una de las 14 cuencas donde se efectuaron las prospecciones geofísicas (Nano Tem).

### CUADRO 5-1 ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS

ID	Código BNA	Nombre Estación	Coordenadas (WGS84/19S)		Cota (msnm)	VIGENTE	CUENCA ASOCIADA
			Norte	Este			
1	01201003-6	RIO LLUTA EN ALCERRECA	8.008.914	432.775	3.550	SI	Río Lluta
2	01201005-2	RIO CARACARANI EN HUMAPALCA	8.026.684	425.680	3.908	SI	Río Lluta Bajo Río Azufre
3	01001002-0	RIO CAQUENA EN VERTEDERO	8.010.023	472.808	S/I	SI	Río Caquena
4	01310004-7	ACUEDUCTO AZAPA EN BOCATOMA	7.944.412	406.239	960	SI	Río San José Alto
5	01410004-0	RIO CODPA EN CALA-CALA	7.918.026	429.499	1.745	SI	Río Codpa Hasta Cala Cala
6	01502002-4	RIO CAMARONES EN CONANOXA	7.893.573	396.262	710	SI	Río Camarones Hasta Conaxa
7	01610002-1	QUEBRADA CAMIÑA EN ALTUSA	7.865.732	459.011	2.543	NO	Quebrada Camiña Hasta Altusa
8	01730007-5	QUEBRADA DE TARAPACA EN SIBAYA	7.812.568	482.515	2.830	SI	Quebrada de tarapacá Hasta Sibaya
9	01050004-4	RIO COLLACAGUA EN PEÑABLANCA	7.777.131	516.363	3.856	SI	Río Collacagua en Peñablanca
10	01050002-8	RIO PIGA EN COLLACAGUA	7.784.315	517.458	3.903	SI	Río Piga en Collacagua
11	02113001-K	RIO HUATACONDO EN COPAQUIRE	7.685.700	511.691	3.526	SI	Río Huatacondo Hasta Copaquire
12	02101001-4	RIO LOA ANTES REPRESA LEQUENA	7.604.843	534.743	3.315	SI	Río Loa Hasta Lequena
13	02105005-9	RIO SALADO ANTES JUNTA LOA	7.526.159	536.675	2.500	SI	Río Salado
14	02105001-6	RIO SALADO ANTES JUNTA CURTI	7.535.692	577.804	3.080	SI	Río Salado Antes Junta Curti

## 5.2. TRABAJOS GEOFÍSICOS REALIZADOS

Durante el mes de Julio del 2011, la empresa Geodatos realizó los trabajos geofísicos correspondientes a la aplicación del método Nano Tem en cada una de las secciones de salida de 14 cuencas.

## 5.3. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO GEOFÍSICO

Se ejecutaron 14 perfiles geofísicos, midiendo un total de 134 sondeos de Nano Transiente Electromagnético.

El objetivo general del trabajo fue la determinación cuantitativa de las propiedades eléctricas del subsuelo en la zona de interés, constituido por formaciones sedimentarias, y eventualmente rocas impermeables del basamento. Estas propiedades geoelectricas dependen de la mineralogía (litología) y microestructura (porosidad, granulometría, fracturamiento) de las rocas. Afecta de manera importante a la resistividad el tipo de fluidos que contengan las rocas (grado de saturación, salinidad, etc.). La existencia de estructuras y fenómenos de alteración también producen cambios de la resistividad que pueden ser detectados con un estudio geoelectrico.

En cada uno de los perfiles se interpretó una primera unidad sedimentaria que correspondería a sedimentos superficiales secos, luego el Nivel Estático, que separa lo seco de lo saturado, interpretando los sedimentos saturados (diferentes tipos de estratos, permeables, poco permeables, etc.) y luego la roca basal.

Los resultados de resistividad interpretada permitieron modelar los diferentes estratos, dando lugar a los siguientes grandes grupos litológicos (cada uno de ellos con mayor o menor permeabilidad, según su composición estratigráfica interpretada):

- Sedimentos superficiales
- Sedimentos finos arcillosos
- Sedimentos compactos de baja permeabilidad
- Gravas arcillosas
- Gravas, arenas y limos
- Gravas y arenas
- Gravas, ripios y arenas
- Gravas arenosas
- Gravas arcillosas
- Bolones, ripios y gravas
- Arenas arcillosas
- Arenas y gravas arcillosas
- Arenas, limos y arcillas
- Roca volcánica y/o lavas
- Rocas fracturadas con finos saturados
- Rocas fracturadas con gravas
- Roca

## 6. DETERMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA

El flujo subterráneo a la salida de cada una de las cuencas 13 cuencas (se eliminó Río Salado Antes Junta Loa debido a los resultados obtenidos en la prospección geofísica), se determinó de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Flujo Subterráneo} = K \times \Delta h / \Delta L \times \text{Sección} = K \times i \times \Omega$$

K= permeabilidad del medio poroso

i= pendiente del agua subterránea en la sección de interés

$\Omega$ = sección del medio poroso saturado

### 6.1. Permeabilidad y Pendiente del Agua Subterránea

La permeabilidad de los estratos permeables en las secciones de salida de cada una de las 13 cuencas de análisis ha sido estimada tomando en cuenta los siguientes antecedentes específicos:

- Permeabilidad asignada a las zonas 1, 2 y 3 en el estudio SIT N° 221 (GCF 2010).
- Estimación de la permeabilidad de acuerdo con los tipos de estratos acuíferos detectados a través de la geofísica (Nanotem), en conjunto con información geológica y experiencia del Consultor.

El criterio para determinar una permeabilidad y transmisibilidad equivalente en cada una de las secciones de control fue el siguiente:

- **Permeabilidad Equivalente:**

$$K_{eq} = (\sum (K_i \times \Omega_i)) / \Omega_t$$

Donde:

$K_{eq}$  = permeabilidad equivalente de la sección (L/T)

$K_i$  = permeabilidad de la sección i (L/T)

$\Omega_i$  = área de la sección i (L<sup>2</sup>)

$\Omega_t$  = área total de la sección (L<sup>2</sup>)

En este caso, el caudal subterráneo estará dado por:

$$Q_{sub} = K_{eq} \times i \times \Omega_t$$

Donde:

$K_{eq}$  = permeabilidad equivalente de la sección (L/T)

$i$  = pendiente media del agua subterránea (‰)

$\Omega_t$  = área total de la sección (L<sup>2</sup>)

Con relación a la pendiente del agua subterránea, ésta fue asignada similar a la pendiente del terreno, y esta última fue determinada con la generación de curvas de nivel calculadas con el software ArcGis 9.2 de ESRI, utilizando DEM Aster con píxeles de 30 m x 30 m.

## 6.2. Caudales Subterráneos en Secciones de Salida

En el Cuadro 6-1 se incluyen los caudales de agua subterránea que escurren en cada una de las secciones de salida de las 13 cuencas que se analizaron. Es importante señalar que los caudales subterráneos corresponden al caudal potencial, es decir, con niveles de agua subterránea altos, independiente del nivel estático que registró el estudio geofísico.

**CUADRO 6-1  
CAUDALES SUBTERRÁNEOS EN SECCIONES DE SALIDA  
DE LAS 13 CUENCAS QUE SE ANALIZARON**

	<b>NOMBRE CUENCA</b>	<b>Permeabilidad (m/s)</b>	<b>Pendiente A. S. (°/1)</b>	<b>Sección Medio Poroso (m2)</b>	<b>Caudal Subterráneo (l/s)</b>	<b>Caudal de Salida Obs.(l/s)</b>	<b>Porcentaje Q sub. / Q sal. (%)</b>
1	Río Lluta	0,000010	0,0920	263	0,242	1.921	0,013
2	Río Lluta bajo Río Azufre	0,000010	0,0089	481	0,043	371	0,012
3	Río Caquena	0,000140	0,0219	879	2,705	1.097	0,247
4	Río San José Alto	0,000185	0,0800	5.237	77,309	599	12,906
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	0,000110	0,0279	149	0,459	146	0,314
6	Río Camarones hasta Conanoxa	0,000058	0,0104	823	0,493	517	0,095
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	0,000153	0,0269	1.749	7,187	324	2,218
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	0,000096	0,0320	1.486	4,551	155	2,936
9	Río Collacagua hasta Peñablanca (Huasco)	0,000099	0,0036	523	0,187	129	0,145
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	0,000094	0,0123	4.151	4,818	143	3,369
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	0,000120	0,0170	1.900	3,868	39	9,918
12	Río Loa hasta Lequena	0,000075	0,0061	915	0,419	512	0,082
13	Río Salado hasta Curti	0,000002	0,0643	66	0,007	285	0,002
				Máximo	77,3	1.921	12,9
				Mínimo	0,007	39	0,002
				Promedio	7,9	480	2,5

De acuerdo con los resultados de flujos subterráneos obtenidos, se puede apreciar que éstos son despreciables frente al caudal de salida observado, corroborando la hipótesis de que el caudal dicho caudal corresponde al total que escurre por la sección de análisis, ya que el flujo subterráneo es despreciable.

La excepción de lo señalado ocurre en la sección del río Guatacondo y San José Alto, ya que los flujos subterráneos están en torno al 10 %. En el río Guatacondo ocurre que el caudal subterráneo calculado es muy bajo (4 l/s), y dado las suposiciones involucradas en el cálculo de éste, dicho valor estaría dentro de los rangos de error de su determinación. En el río San José Alto, la cuenca tiene la particularidad que la sección de escurrimiento subterráneo es importante, y a su vez, la permeabilidad equivalente también lo es. El caudal subterráneo obtenido es similar al caudal subterráneo de entrada que se obtuvo en la modelación del valle de Azapa ("Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región, 2010, DGA"), el cual fue estimado en 100 l/s.

## 7. BALANCES HÍDRICOS

Se llevaron a cabo balances hídricos globales y preliminares en 11 cuencas altiplánicas, con el principal objetivo de analizar los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada; en el Cuadro 7-1 se indican las cuencas de interés.

**CUADRO 7-1  
CUENCAS DONDE SE DESARROLLARON BALANCES HÍDRICOS**

	<b>Cuenca</b>	<b>Altura Media</b>	<b>Área Total</b>
		<b>(msnm)</b>	<b>(km2)</b>
<b>1</b>	Lauca	4.460	2.438
<b>2</b>	Caquena	4.386	3.150
<b>3</b>	Isluga	4.187	1.360
<b>4</b>	Cariquima	4.139	1.486
<b>5</b>	Codpa Alto	3.901	3.901
<b>6</b>	Salar del Huasco	4.165	1.471
<b>7</b>	Cancosa	4.173	2.048
<b>8</b>	Camiña Alto	519	4.084
<b>9</b>	Maricunga	4.295	2.195
<b>10</b>	Pedernales	3.992	3.588
<b>11</b>	Negro Francisco	4.547	905

Los balances hídricos desarrollados se hicieron bajo las siguientes premisas:

- Cada una de las cuencas se subdividieron en subcuencas. Dichas subcuencas se cerraron en puntos donde existía estación fluviométrica con estadísticas en general que tuvieran más de 10 años de longitud.
- Cuando la estación fluviométrica de interés había sido rellenada en el estudio SIT 221, se usó el caudal rellenado; cuando no fue rellenado, se usó el promedio de los caudales medios mensuales medidos en la estación.
- En cada subcuenca se generaron los caudales totales de salida según la relación P-E desarrollada.
- En cada nodo de separación de las subcuencas, se comparó el caudal total generado con el caudal de aguas superficiales medidas en la estación fluviométrica correspondiente (caudal medio anual observado). Cuando el caudal generado (caudal total) era menor al caudal medido, se asumió que el caudal total es el medido (flujo de agua subterránea nulo en la sección de medida del caudal). Al contrario, en caso de que el caudal total generado era mayor al medido, se asumió que el caudal total es el generado, y la diferencia entre dicho caudal y el medido en la estación corresponde al caudal subterráneo de salida (pasante) por dicha sección.
- Con relación a las demandas de aguas superficiales y subterráneas (derechos de aguas constituidas), sólo se consideraron las demandas de usos cuantitativamente relevantes en la cuenca, es decir las demandas mineras, sin tomar en cuenta las demandas de los pueblos indígenas. Se consideró el uso real del derecho, y no el valor de éste.
- Para efectos de las demandas, se tomó en cuenta el estudio “Derechos, Extracciones y Tasas Unitarias de Consumo de Agua del Sector Minero Regiones Centro Norte de Chile”, SIT N° 146, Proust Consultores, Marzo 2008. En el Anexo 2 se incluye la información, para cada una de las cuencas del balance hídrico, de los derechos de agua recopilada; en dicho anexo se adjunta además una figura con la ubicación de esos derechos (para cada cuenca).

Se hizo un análisis relacionado con la correlación entre los caudales observados y generados en cada una de las cuencas y subcuencas consideradas en los balances hídricos.

Se obtuvo una buena correlación de los caudales generados con los observados ( $R^2=0,87$ ). Eliminando las cuencas Río Colpacagua en Desembocadura y Río La Ola en Vertedero, el coeficiente de correlación sube a  $R^2=0,97$ .

Los resultados anteriores corroboran el buen comportamiento de la relación P-E, validándola.

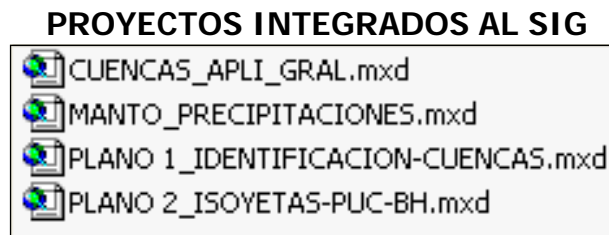


## 8. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Se desarrolló e implementó un Sistema de Información Geográfica (SIG), con la plataforma ArcGis 9.3 de ESRI.

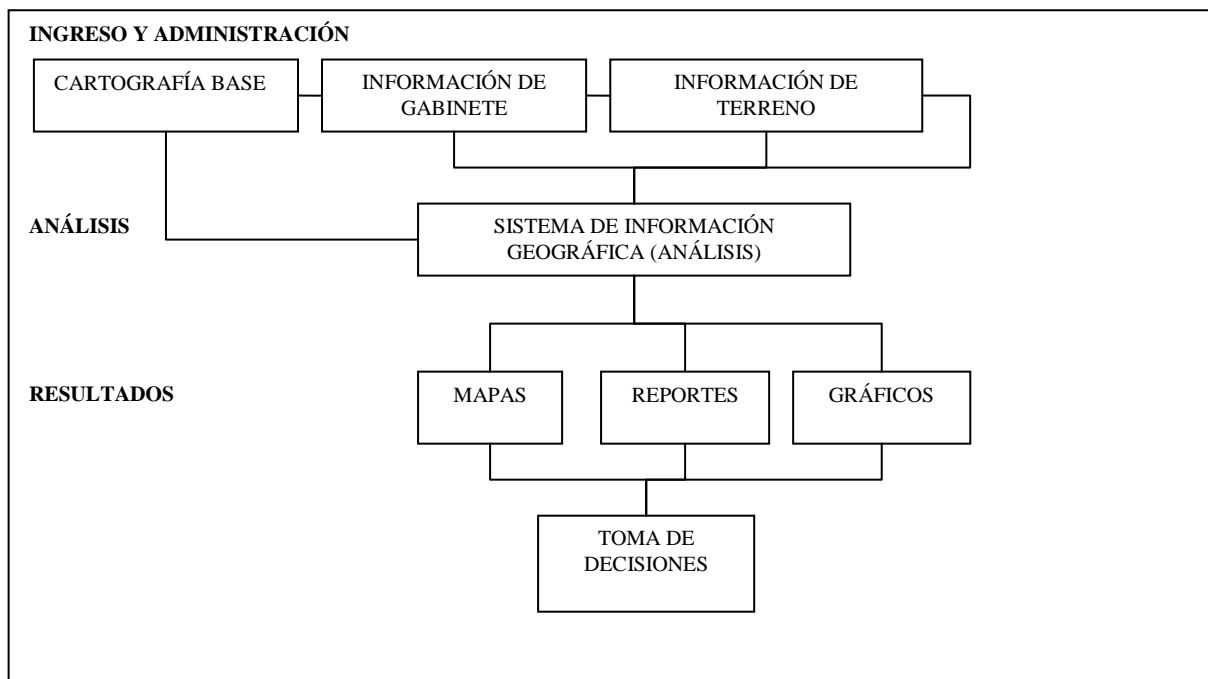
Para que la información presentada y generada en el estudio sea fácilmente accesada y consultada, se realizó la integración de todos los datos en un ambiente geoespacial, donde se relacionan directamente los puntos o sectores a que corresponde la información, con la asociada a dicho lugar.

De esta forma, el SIG se organizó físicamente en 4 proyectos que contienen la información.



El diseño conceptual y lógico general adoptado para el SIG, se presenta en la Figura 8-1.

**FIGURA 8-1  
DISEÑO CONCEPTUAL SIG**



## 9. RESUMEN Y CONCLUSIONES

### 9.1. RESUMEN

Un resumen del estudio efectuado se presenta a continuación:

- Se efectuó una completa recopilación de antecedentes de los últimos trabajos desarrollados en el área de estudio. Ello permitió un mejor conocimiento hidrológico de las cuencas altiplánicas (pluviometría y fluviometría), corregir y generar nueva información en cuencas de interés, y corroborar y/o modificar relaciones asociadas a generación de caudales medios mensuales en cuencas no controladas, así como también relaciones de cálculo de recargas en forma indirecta. Además, a través del análisis de estudios anteriores, se pudo mejorar relaciones precipitación – escorrentía que habían sido obtenidas en trabajos recientes.
- En documento desarrollado por la DGA, se definió como recarga neta de una determinada cuenca como el caudal base de salida, compuesto por el agua que infiltra y transita en algún momento en forma subterránea, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior al de un año hidrológico. Dicha recarga neta ha sido estimada, en términos de caudal medio mensual, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de Junio, Julio y Agosto.
- En 25 cuencas altiplánicas con información de caudales medios mensuales observados, se correlacionaron los caudales medios mensuales mínimos decadales (Junio, Julio y Agosto) con los caudales observados, obteniendo una correlación lineal con un coeficiente  $R^2$  de 0,98. Dicha correlación lineal da cuenta que, bajo la hipótesis anterior, la recarga neta en una determinada cuenca corresponde al 40 % del caudal observado (caudal total si el caudal subterráneo en la sección de medición del caudal es despreciable). En caso que se detecte que en la sección de salida de la cuenca de análisis existe flujo subterráneo, la recarga neta sería el 40 % del caudal observado más dicho flujo subterráneo.
- Previo al análisis de las relaciones precipitación – escorrentía en cuencas altiplánicas que fueron desarrolladas, se analizaron los resultados de generación de precipitaciones medias mensuales y anuales hechas en estudios recientes. Se generó una metodología de generación de precipitaciones (medias mensuales y anuales) en cualquier cuenca altiplánica, a través de un procedimiento de crear un manto de precipitaciones a través de Arc Gis (Topo To Raster), a partir de las isoyetas del estudio del Balance Hídrico. Esta metodología desarrollada toma en cuenta el aumento de las precipitaciones

con la altura. Importante es destacar que el manto de precipitaciones anuales se deben generar (Arc Gis) con pixeles de 1.000 m x 1.000 m

- Se obtuvo una relación que permite determinar caudales medios mensuales totales a la salida de una cuenca sin control fluviométrico, sólo a partir de las precipitaciones y del área total de la cuenca. Para validar la relación se usaron las mismas 25 cuencas con control fluviométrico indicadas anteriormente. La relación utiliza la precipitación media anual sobre la cuenca, o bien puede ser aplicada utilizando las precipitaciones de invierno (Abril – Septiembre) y de verano (Octubre – marzo), siendo con esta última alternativa que se obtuvieron mejores resultados (coeficiente de correlación lineal  $R^2 = 0,93$ ). La relación y parámetros finales es la siguiente:

Donde:

$f = f$  invierno o  $f$  verano

$P = P$  invierno (suma de Abril a Septiembre);  $P$  verano (suma de Octubre a Marzo)

$Q_{cal} =$  se calcula el caudal de invierno y el caudal de verano; el caudal total generado es la suma de los 2.

#### Parámetros m y c:

	Verano	Invierno
m	1739	777
c	27	117

- g) Se hizo un análisis del comportamiento de la relación frente a las siguientes variables: Tamaño de la Cuenca, Ubicación (Latitud – Longitud) de la Cuenca, Altitud Media de la Cuenca, Productividad de las Cuencas según Montos de Precipitaciones, Influencia Cuenca Altiplánica, Intervalo de Confianza.
- h) Respecto al tamaño de la cuenca, el coeficiente de correlación mejora a medida que el área de la cuenca aumenta (de 0 a 1.000 km<sup>2</sup>, 11 cuencas,  $R^2 = 0,53$ ; de 1.000 a 2.000 km<sup>2</sup>, 6 cuencas,  $R^2 = 0,86$ ; mayor a 2.000 km<sup>2</sup>, 8 cuencas,  $R^2 = 0,95$ ).

- i) Respecto a la ubicación de la cuenca (Latitud), la relación se comporta mejor en las Regiones XV y I, y en la III región; en la II Región la correlación es baja. Es importante destacar la buena correlación que se obtuvo en las cuencas ubicadas en las Regiones XV y I, siendo ésta de 0,96.
- Entre Latitud 17° 30´ y 20° 30´; 10 Cuencas: R2= 0,96
  - Entre Latitud 20° 30´ y 24° 00´; 6 Cuencas: R2= 0,55
  - Entre Latitud 26° 00´ y 30° 00´; 9 cuencas: R2= 0,91
- j) Tomando como parámetro la altitud media de la cuenca, se obtuvieron (para 2 rangos de altitud) mejores correlaciones para aquellas cuencas que se localizan entre los 3.000 y 4.000 msnm (R2= 0,93, versus 0,79 para cuencas cuyo rango de altitud varía entre los 4.000 y 5.000 msnm).
- k) Se validó que la productividad de una cuenca altiplánica (l/s/km<sup>2</sup>) aumenta con la precipitación media anual.
- l) Se aplicó la relación en cuencas que no son altiplánicas, y se llegó a la conclusión que no es aplicable a dicho tipo de cuencas (no altiplánicas).
- m) Se calculó el intervalo de confianza de la relación aplicada a las 25 cuencas con control fluviométrico. Con un 95 % de nivel de confianza, el caudal calculado estará dentro de un rango promedio de variación de 139 l/s.
- n) Se llevaron a cabo trabajos de terreno, correspondientes a prospecciones geofísicas con el método de Transiente Electromagnético (Nano TEM). Dichas prospecciones, las cuales permiten estimar la estratigrafía de la sección de análisis así como también la profundidad del agua subterránea, se hicieron a la salida de 14 cuencas altiplánicas (incluidas dentro de las 25 usadas en la validación de la relación P-E) en la ubicación de estaciones fluviométricas. El objetivo de estos trabajos fue calcular el flujo subterráneo pasante en cada una de las 14 secciones, y así validar la determinación de la recarga. Es decir, si el caudal subterránea resulta nulo, la recarga efectivamente es un 40 % de la escorrentía total generada; de lo contrario, a dicha recarga hay que agregar el flujo subterráneo calculado.
- o) A partir de los resultados de las prospecciones geofísicas, se asignaron permeabilidades a cada uno de los estratos definidos, se calculó la permeabilidad equivalente en cada sección, y luego, conociendo la sección y la pendiente del agua subterránea, que se supuso similar a la pendiente del terreno, se pudo estimar el caudal subterráneo pasante en cada una de las secciones.

- p) Los flujos subterráneos calculados son despreciables respecto al caudal medido en la estación fluviométrica correspondiente, corroborando que, al menos en las 14 cuencas analizadas, el flujo observado corresponde al caudal total que escurre por dicha sección.
- En 2 cuencas los flujos subterráneos fueron entorno al 10 % del flujo medido en la estación; en la cueca de Guatacondo el caudal subterráneo calculado fue de 4 l/s y el medido es 39 l/s. el valor del caudal subterráneo estaría dentro de los rangos de error de su determinación. Por ello, se puede establecer que esta cuenca no debiera ser considerada en los análisis. En la cuenca del río San José la sección de análisis presenta una alta permeabilidad y una importante sección de escurrimiento; el caudal subterráneo calculado fue de 77 l/s mientras que el caudal medido es 599 l/s.
  - De acuerdo con lo anterior, la hipótesis de que en las secciones de salida de las cuencas el caudal medido corresponde al caudal total, y por consiguiente el caudal generado también, se cumple en la generalidad de los casos, pero hay que tener en cuenta que el análisis en futuras cuencas donde se desee aplicar la metodología, se debe analizar con detención las características hidrogeológicas de la sección de salida de la cuenca específica correspondiente.
  - Se efectuaron balances hídricos globales y preliminares en 11 cuencas altiplánicas sin control fluviométrico, aplicando la relación P-E desarrollada. Cada una de ellas fueron subdivididas en subcuencas, cerrando los balances intermedios en estaciones fluviométricas.
  - A partir de los caudales generados y observados en las subcuencas incluidas en los balances hídricos, se correlacionaron entregando buenos coeficientes de correlación lineal ( $R^2 = 0,87$  y  $R^2 = 0,97$  eliminado 2 subcuencas). Lo anterior valida la relación P-E desarrollada.

## 9.2. CONCLUSIONES

A la luz de los resultados obtenidos, se pueden sacar las siguientes conclusiones y recomendaciones generales:

- a) Se ha formulado una relación simple que permite calcular el caudal total en cualquier cuenca altiplánica, conociendo sólo la precipitación media mensual y el área de la cuenca.
- b) A su vez, se desarrolló una metodología simple que permite calcular las precipitaciones medias mensuales en cualquier cuenca altiplánica ubicada entre las regiones de Arica y Parinacota (XV) y la región de Atacama (III).
- c) Se pudo corroborar que la recarga en una determinada cuenca altiplánica corresponde, aproximadamente, al 40 % del caudal total de dicha cuenca. A su vez, en la generalidad de los casos, el caudal generado con la relación P-E corresponde al caudal total de la cuenca, excepto cuando en la sección de cierre de la cuenca exista un relleno con características hidrogeológicas favorable que sugieran que escurre un caudal subterráneo importante. En ese caso, la recarga en la cuenca se debiera considerar como el 40 % del caudal generado más el caudal subterráneo pasante por la sección de cierre de la cuenca.
- d) Para futuras aplicaciones de la relación P-E, se debe tener en cuenta que ésta se comporta mejor a medida que el área de la cuenca altiplánica aumenta. En las regiones XV y I la relación tiene una excelente correlación lineal con los caudales observados ( $R^2 = 0,96$ ); no ocurre lo mismo en la II Región ( $R^2 = 0,55$ ). Respecto a la altitud media, mejores resultados se obtienen en rangos de altura media entre 3.000 y 4.000 msnm.