



**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

INFORME FINAL

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 INFORME FINAL

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
2. ÁREA DE ESTUDIO	3
3. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.....	5
4. PROPUESTA METODOLÓGICA.....	52
4.1. RECARGAS	52
4.2. RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA	58
4.2.1. Introducción	58
4.2.2. Análisis de Precipitaciones Anuales y Mensuales.....	59
4.2.3. Análisis Relaciones Precipitación - Escorrentía	65
4.2.4. Comportamiento de la Relación P-E Frente a Diferentes Variables	74
5. SELECCIÓN DE CUENCAS.....	85
5.1. Cuencas Aplicación Metodología	85
5.2. Cuencas donde se Desarrollarán los Balances Hídricos.....	86
6. TRABAJOS DE TERRENO	87
6.1. Introducción	87
6.2. TRABAJOS GEOFÍSICOS REALIZADOS	88
6.3. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO GEOFÍSICO	98
7. DETERMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA.....	100
7.1. Permeabilidad.....	101
7.2. Pendiente del Agua Subterránea.....	106
7.2.1. Generalidades	106
7.2.2. Procedimiento Generación de Curvas de Nivel.....	107
7.3. Secciones del Medio Poroso Saturado.....	124
7.4. Caudales Subterráneos en Secciones de Salida	124
8. BALANCES HÍDRICOS	127

8.1. Cuenca del Río Lauca	128
8.1.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	129
8.1.2. Resumen del Balance	132
8.1.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Lauca	133
8.2. Cuenca del Río Caquena	134
8.2.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	135
8.2.2. Resumen del Balance	138
8.2.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Caquena	138
8.3. Cuenca del Río Isluga.....	139
8.3.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	139
8.3.2. Resumen del Balance	142
8.3.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Isluga.....	143
8.4. Cuenca del Río Cariquima	143
8.4.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	144
8.4.2. Resumen del Balance	147
8.4.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Cariquima	148
8.5. Cuenca del Río Codpa.....	148
8.5.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	149
8.5.2. Conclusiones Balance Cuenca Río Codpa	150
8.6. Cuenca del Río Huasco	150
8.6.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	152
8.6.2. Resumen del Balance	154
8.6.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Huasco	155
8.7. Cuenca del Río Cancosa.....	155
8.7.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	157
8.7.2. Conclusiones Balance Cuenca Río Cancosa	158
8.8. Cuenca del Río Camiña.....	158
8.8.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	159
8.8.2. Conclusiones Balance Cuenca Río Camiña.....	160

8.9. Cuenca del Salar de Maricunga	161
8.9.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	163
8.9.2. Resumen del Balance	165
8.9.3. Conclusiones Balance Cuenca Salar de Maricunga	166
8.10. Cuenca del Salar de Pedernales	167
8.10.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	169
8.10.2. Resumen del Balance	171
8.10.3. Conclusiones Balance Cuenca Salar de Pedernales	172
8.11. Cuenca Laguna Negro Francisco	172
8.11.1. Balance Global de Escorrentía y Usos	174
8.11.2. Resumen del Balance	176
8.11.3. Conclusiones Balance Laguna Negro Francisco	177
8.12. Análisis de los Caudales Generados y Observados en las Cuencas y Subcuencas	177
9. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	181
9.1. Introducción	181
9.2. Plataforma Computacional.....	181
9.3. Base Cartográfica	184
9.4. Instalación de la Aplicación SIG	184
9.5. Diseño y Organización SIG.....	185
9.5.1. Diseño Lógico y Conceptual	185
9.5.2. Estructura de Directorios	187
9.5.3. Base de Datos y Diseño de Tablas.....	191
9.5.4. Presentación de Resultados	191
9.5.5. Planos Temáticos	192
9.5.6. Visualización de la Información en el SIG	192
10. RESUMEN Y CONCLUSIONES	195
10.1. RESUMEN.....	195
10.2. CONCLUSIONES.....	199

ANEXOS

ANEXO 1 **TRABAJO GEOFÍSICO**
ANEXO 2 **DERECHOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES**
 POR CUENCA BALANCE HÍDRICO

PLANOS

PLANO 1 **IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS**
PLANO 2 **ISOYETAS ESTUDIO PUC Y BALANCE HÍDRICO**

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. Lo anterior se realizará sobre la base de la información disponible y requerida por la metodología desarrollada por la DGA en el año 2010 (Ref. 4).

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. Se tendrá especial consideración a la estimación de demandas ambientales asociadas con vegas, bofedales y lagunas.
- Efectuar un análisis de validación que considere la coherencia regional y a nivel de cuenca de los resultados obtenidos.
- Caracterizar la potencialidad hídrica renovable a nivel regional.

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.

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

	Cuenca	Altura Media	Área Total
		(msnm)	(km2)
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**

	Cuenca	Altura Media	Área Total
		(msnm)	(km2)
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.

A continuación se presenta un resumen de los estudios antes indicados.

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).

Este trabajo fue realizado en base a información oficial de la DGA, más otros antecedentes de dominio público. El área de estudio correspondió a las cuencas comprendidas entre el límite Sur de la Región de Antofagasta y la cuenca del río Copiapó. El área está constituida por 3 tipos de cuencas, a saber, altiplánicas, costeras e intermedias. Específicamente en total se estudiaron 32 cuencas, de las cuales 24 fueron de origen altiplánico.

El principal objetivo del estudio fue elaborar una herramienta de apoyo a la resolución de las solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas.

A continuación se presentan las principales consideraciones efectuadas y los resultados obtenidos:

➤ **Caracterización Área en Estudio**

Se realizó una caracterización hidrológica e hidrogeológica del área en estudio, en base a antecedentes existentes. Dicha caracterización correspondió a estimaciones preliminares de los recursos, desarrollada a partir de metodologías simplificadas.

➤ **Hidrología**

El análisis de precipitaciones se realizó con información pluviométrica de estaciones ubicadas aproximadamente entre el salar de Atacama al Norte y la cuenca del río Copiapó al Sur. La información utilizada corresponde a una amplia zona vecina debido a que el área de estudio cuenta con muy pocas estaciones pluviométricas en su interior, siendo ésta la zona con menor densidad de información meteorológica en el extremo Norte del país.

En este contexto, se analizó la variación de precipitación en las zonas vecinas, con el objetivo de interpolar la información en el área de interés, estimando un gradiente de precipitaciones y generando un mapa de isoyetas de la zona.

Se realizó una extensión y relleno de las estadísticas, con el objetivo de lograr una buena caracterización de esa variable en la zona de interés.

➤ **Hidrogeología**

Las unidades y formaciones hidrogeológicas correspondieron principalmente a las unidades identificadas dentro de los mapas hidrogeológicos de las cuencas altiplánicas, agrupándose, por motivos de alcance del estudio, las formaciones en roca en sólo dos unidades.

Así, se definieron 4 unidades hidrogeológicas en base a la delimitación de secuencias geológicas del mapa geológico de Chile (escala 1:1.000.000, Sernageomín 2002), la permeabilidad, capacidad de almacenamiento y calidad de las aguas asociada a cada una de éstas. Las unidades hidrogeológicas se dividieron, en principio, según se ubicaran en zonas de rellenos sedimentarios no consolidados o bien en rocas.

Para los acuíferos ubicados en rellenos sedimentarios no consolidados, se definieron 2 zonas, una de alta importancia hidrogeológica y otra de media a baja importancia hidrogeológica. En detalle dentro de la cuenca es posible reconocer unidades con características hidrogeológicas diferentes dentro de los rellenos, no obstante estas

zonas son marginales con respecto al total, y no se justifica el análisis unitario dentro de los alcances de este estudio.

Las unidades hidrogeológicas en roca se dividieron en dos zonas, una zona con importancia hidrogeológica nula a baja, y una zona con importancia hidrogeológica media a baja. Al ser una clasificación realizada sobre la base del mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000, es posible encontrar, dependiendo del grado de fracturamiento y de consolidación de las rocas, diferentes características hidrogeológicas para una misma unidad, pero en el trabajo que se describe, el potencial de cada unidad se asignó según el comportamiento general del área de estudio.

➤ **Recarga**

De acuerdo con el trabajo desarrollado, se señala que la recarga de los acuíferos en la zona de estudio se produce principalmente por los aportes de la precipitación, la cual varía según su magnitud, dependiendo si la cuenca es costera, intermedia o altiplánica.

Se realizó una estimación de la recarga media anual a largo plazo, estimada por medio de coeficientes de infiltración y escorrentía, que ponderan las características hidrogeológicas de las unidades geológicas presentes en las cuencas analizadas.

La recarga por precipitación se calculó como la suma de una recarga lateral o de piedemonte, producida por la precipitación que cae sobre la roca impermeable o semipermeable, y una recarga directa dada por la precipitación que cae sobre los depósitos sedimentarios. La recarga lateral se estimó con la siguiente expresión:

$$R_L = P_p \times C_E \times C_i \times A_{RL} \quad (1)$$

Donde:

P_p : Precipitación media sobre la cuenca de análisis

C_E : Coeficiente de Escorrentía

C_i : coeficiente de infiltración (depende de la permeabilidad y consolidación de la unidad hidrogeológica)

A_{RL} : superficie de la unidad

La recarga directa se calcula de la misma manera, pero sin considerar el coeficiente de escorrentía, y considerando la superficie de depósitos sedimentarios,

$$R_L = P_p \times C_i \times A_{RL} \quad (2)$$

Para las cuencas que se encuentran **insertas en el altiplano** y la cordillera de Los Andes, la principal fuente de recarga corresponde a las precipitaciones que se producen en los conos volcánicos que las rodean y que están formados por rocas del Mioceno con una permeabilidad y almacenamiento asociados a su fracturamiento, por lo que se estima que poseen un potencial hidrogeológico bajo a nulo. Dichas zonas sólo constituyen una zona de transferencia del agua subterránea hacia las zonas más bajas de la cuenca, donde se presentan rellenos de depósitos aluviales actuales (Cuaternarios) y depósitos evaporíticos (Salares), que corresponden a los sectores con mayor potencial hidrogeológico de estas cuencas.

La principal (si no la única) forma de descarga de estas cuencas es la evaporación, por lo que la calidad de las aguas empeora, debido al aumento de la concentración de sales a medida que se avanza desde la cabecera de las cuencas hacia las zonas más bajas.

En el Cuadro 3-1 se incluyen los parámetros utilizados (Precipitaciones, superficies, coeficientes, etc.) en la determinación de la recarga al acuífero para cada una de las 23 Cuencas Altiplánicas analizadas.

**CUADRO 3-1
RECARGA POR CUENCA**

Nº	NOMBRE	AREA TOTAL (m ²)	UNIDADES DE ROCA (m ²)	DEPOS. NO CONSOLID. (m ²)	PP (mm)	CE	CI	RECARGA LATERAL (m ³ /s)	RECARGA DIRECTA (m ³ /s)	RECARGA TOTAL (m ³ /s)	RECARGA TOTAL (l/s)
1	Salar de Gorbea	363.811.403	314.105.530	49.705.872	135	0,13	0,3	0,05244056	0,0638346	0,1162751	116
2	Salar de Azufrera	250.170.225	215.377.934	34.792.290	135	0,13	0,3	0,03595779	0,04468188	0,080639	81
3	Salar de Agua Amarga	461.752.973	417.015.800	44.737.172	135	0,13	0,3	0,06962164	0,0574535	0,1270752	127
4	Quebrada La Rosa	128.895.951	121.394.751	7.501.200	125	0,13	0,3	0,01876584	0,00891981	0,0276856	28
5	Cerro Blanco	379.264.228	348.212.543	31.051.685	125	0,13	0,3	0,0538285	0,03692409	0,090572	91
6	Cerro El Encanche	176.331.055	169.806.717	6.524.338	125	0,13	0,3	0,0262496	0,0077582	0,0340078	34
7	Salar de La Isla	736.399.107	576.523.458	159.875.648	125	0,13	0,3	0,08912201	0,19011088	0,2792329	279
8	Salar de Aguilar	590.238.383	482.394.754	107.843.629	125	0,13	0,3	0,07457111	0,1282387	0,2028090	203
9	Salar de Los Infieles	304.625.270	284.688.042	19.937.227	125	0,13	0,3	0,0440085	0,0237077	0,0677162	68
10	Salar de Las Parinas	829.678.899	729.477.919	100.200.978	130	0,13	0,3	0,11727714	0,12391674	0,2411938	241
11	Salar Grande	781.104.342	686.847.105	94.257.237	130	0,13	0,3	0,1104234	0,1165662	0,2269897	227
12	Queb. Los Maranceles	107.058.251	103.011.289	4.046.961	125	0,13	0,3	0,015924	0,0048123	0,0207360	21
13	Cerro Agua de Morales	89.427.004	82.823.443	6.603.560	130	0,13	0,3	0,01331541	0,0081665	0,0214819	21
14	La Laguna	456.868.397	442.102.988	14.765.408	133	0,13	0,3	0,07271652	0,0186815	0,0913980	91
15	Salar de Piedra Parada	380.575.664	327.092.123	53.483.540	125	0,13	0,3	0,0505636	0,063598	0,1141618	114
16	Laguna de Las Parinas	95.591.130	84.192.916	11.398.213	130	0,13	0,3	0,01353558	0,01409596	0,02763155	28
17	Lagunas Bravas	408.031.501	374.564.518	33.466.982	130	0,13	0,3	0,06021823	0,04138801	0,10160624	102
18	Laguna del Jilguero	112.866.240	102.104.891	10.761.349	130	0,13	0,3	0,01641527	0,01330837	0,02972364	30
19	Salar de Wheelwright	292.265.222	243.637.582	48.627.639	130	0,13	0,3	0,03916928	0,0601369	0,09930618	99
20	Laguna Verde	1.001.738.788	862.776.759	138.962.028	150	0,13	0,3	0,160047	0,19829057	0,35833757	358
21	Piedra Pómez	918.736.915	863.396.947	55.339.968	150	0,13	0,3	0,1601621	0,07896685	0,23912895	239
22	Salar de Maricunga	2.194.515.505	1.608.614.376	585.901.128	160	0,13	0,3	0,31829508	0,89178254	1,21007762	1210
23	Laguna del Negro Francisco	905.325.615	758.595.235	146.730.379	150	0,13	0,3	0,14072115	0,20937554	0,35009669	350

Cabe indicar que el para el Salar de Pedernales, se contaba con mayores antecedentes producto de estudios anteriores, motivo por el cual al aplicar la metodología de los coeficientes de infiltración y escorrentía antes mencionada, se

llegó a establecer una recarga anual igual a 19.457.712 m³/año, lo que equivale a 617 l/s en forma continua.

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.

En estos estudios, desarrollados por el DICTUC, se realizó la caracterización hidrológica a nivel regional de las cuencas altiplánicas chilenas, considerando variables meteorológicas como **precipitaciones, temperatura y evaporación de tanque, e hidrológicas como los escurrimientos superficiales.**

Para el análisis se recopilaron series históricas de estas variables a nivel mensual y anual, materializando rellenos y análisis de acuerdo a metodologías convencionales. Se destaca el relleno de precipitaciones por correlaciones múltiples utilizando dos estaciones de condiciones similares en lugar de una, por ser más adecuado ante las condiciones meteorológicas particulares de la zona.

Se utilizaron datos de lluvias de Argentina y Bolivia, además de los nacionales, lo cual permitió efectuar un análisis de precipitaciones con una perspectiva global del comportamiento de las precipitaciones altiplánicas.

Específicamente, del análisis se observó que se produce un cambio significativo en la precipitación media anual en función de la latitud, notándose que en las estaciones ubicadas sobre los 3.000 msnm la cantidad de agua caída de la XV y I Región es mucho mayor que el agua caída en la II Región.

Con relación al cálculo de la **recarga media anual de largo plazo, ésta se realizó por medio de un balance de masa y de coeficientes de escorrentía e infiltración, basado en la litología de superficie de las cuencas, la influencia de los cauces en la geomorfología y los montos de precipitación en distintas bandas de altura.**

Específicamente, el método utilizado en este trabajo coincide con el aplicado en el Estudio SIT N° 276 antes descrito; es decir, se adoptaron las mismas ecuaciones (fórmulas) para determinar la recarga directa y lateral en cada cuenca (ver expresiones 1 y 2 anteriores).

La metodología desarrollada se aplicó en las siguientes cuencas, distribuidas en I, II y III región:

- Cuenca del Salar del Huasco (código BNA 111) ubicada en la I o XV región
- Salar El Laco (código 227) y Salar Aguas Calientes 2 (código 216), Laguna Tuyajto (código 226) y Pampas Colorada (código 228), Las Tecas (código 229) y Puntas Negras (código 218), todas ubicadas en la II región
- Salares de Maricunga (código 329) y Salar de Pedernales (código 318) ubicadas en la III Región.

Los resultados para las recargas fueron comparados con aquéllos obtenidos en otros estudios del DICTUC, de manera de poder calibrar los coeficientes de escorrentía y evaporación utilizados. La comparación mostró que son satisfactoriamente similares.

Este estudio estuvo enfocado principalmente **a cuencas endorreicas**, las cuales simplifican el balance por no poseer caudales superficiales de salida. Se indica que el balance quedaría sobre determinado si se quisiese aplicar a una cuenca con caudales efluentes.

El balance propuesto es simple, basándose en la estimación de pocos parámetros; por esta razón, requiere pocas variables de entrada.

Finalmente, los valores obtenidos de recarga para las cuencas de la III región (Salares de Maricunga y Pedernales) en las cuales se aplicó la metodología señalada, dieron como resultado lo indicado en el Cuadro 3-2 siguiente (se incluye la recarga calculada en el estudio SDT 276).

CUADRO 3-2
RECARGA MEDIA ANUAL SALARES DE MARICUNGA Y PEDERNALES

SALAR	ÁREA (km ²)	PP (mm)	Recarga Mínima			Recarga Media			Recarga Máxima			Recarga en Estudio SDT 276 (l/s)
			(mm)	(l/s)	(% PP)	(mm)	(l/s)	(% PP)	(mm)	(l/s)	(% PP)	
Maricunga	2194,6	160,7	15,5	1.079	10	20	1.370	13	24	1.669	15,4	1.210
Pedernales	3587,7	133,1	5,2	589	4	6	696	5	7	806	5,3	617

Al comparar estos valores con los obtenidos para estas mismas cuencas en el estudio SDT 276, elaborado por el DARH de la DGA, se observa bastante similitud en los valores de recarga media obtenidos en ambos estudios.

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.

El objetivo de este estudio fue proponer una metodología para estimar recargas en cuencas altiplánicas y de precordillera de vertiente pacífica, aplicable en escala regional a cualquier cuenca ubicada entre las regiones XV y III, **sobre la cota 1.500 m.s.n.m.** Para lo anterior se analizaron los modelos conceptuales existentes y metodologías usadas para estimar recarga en el norte de Chile, buscando los aciertos y limitaciones que se deben tener en cuenta en el desarrollo de la metodología. A continuación se identifican los estudios revisados y analizados en ese trabajo.

➤ **Estudios Revisados y Analizados en Estudio SIT N° 221.**

Específicamente, se revisaron 7 estudios, identificando las principales consideraciones utilizadas y resultados obtenidos en la estimación de recargas. Los estudios analizados fueron:

- a) SIT DGA N°195. 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 2, informe final partes VIII, IX Y X, Noviembre 2009.
- b) The Development of Water Resources in Northern Chile, JICA-DGA, PCI. Marzo 1995.
- c) Definición de Estrategias de Manejo Sustentable Para el Acuífero de Azapa, XV Región”, SIT N° 201 DGA, Diciembre 2009.
- d) Modelo Integrado Quebrada Larga. “Modelos De Escorrentía Superficial y Modelos De Flujo Subterráneo”, parte del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto El Morro, GCF Ingenieros para Minera El Morro, Agosto 2009.
- e) Hidrogeología sector Salar de Pajonales, II Región de Antofagasta, GCF Ingenieros para Aguas Amarilla Ltda., Mayo 2003.
- f) Modelo de Flujo Subterráneo para Representar el Sistema Hidrogeológico de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, GCF Ingenieros Consultores, Diciembre 2005.
- g) Actualización de la Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Derechos de Aprovechamiento en las Subcuencas Afluentes al Salar de Atacama. II Región., GCF Ingenieros para la DGA, Febrero 2010.

➤ **Modelo Conceptual Aplicado. Consideraciones Generales**

A continuación se identifican las principales consideraciones efectuadas en la confección del modelo conceptual desarrollado para determinar la recarga, las cuales incluyen variables no incorporadas en los 2 estudios antes descritos:

- Las precipitaciones pueden producirse como lluvia o nieve. La lluvia genera escorrentía superficial y la nieve se acumula produciendo escorrentía superficial en el deshielo.
- Ciertos eventos de precipitaciones son breves y de cuantías reducidas; éstos pueden no ser capaces de generar escorrentía, evaporándose completamente. Otros en cambio, son tormentas intensas de corta duración que generan una escorrentía superficial que potencialmente puede generar un flujo de recarga.
- La intensidad de los eventos de lluvia es determinante en los procesos de recarga; las lluvias de intensidad baja generalmente se evaporan antes de producir un flujo superficial o algún tipo de infiltración. A nivel regional, con datos de precipitaciones representados a través de isoyetas promedio mensuales, los eventos y sus intensidades no quedan lo suficientemente explícitos; la metodología desarrollada consideró esta distorsión.
- El cálculo de lluvias efectivas acumuladas anuales, mensuales, incluso diarias, restando la evaporación potencial, puede resultar nulo. Sin embargo, una tormenta de horas puede superar el umbral de la evaporación potencial y generar escorrentía y recarga. Este aspecto es muy relevante al modelar recarga en zonas áridas, y fue especialmente analizado en el desarrollo de la metodología.
- Un análisis hidrogeológico en cuencas sin información puede resultar insuficiente, particularmente si no hay datos de permeabilidades, coeficientes de almacenamiento o geometría acuífera. En esos casos, la metodología incluye hipótesis simplificadoras para caracterizar al acuífero en base a la información geológica de superficie (Mapa Geológico Nacional escala 1.000.000, Sernageomín) y a la topografía.

MODELO CONCEPTUAL

- Variables de Entrada

Suelos

La infiltración de precipitaciones o de la escorrentía superficial depende del tipo de suelo. El mapa geológico nacional, permitió obtener una caracterización gruesa del tipo de suelo a nivel de cuenca; la geología de superficie permitió establecer una jerarquía de capacidades de infiltración, basada en una apreciación cualitativa de las unidades geológicas.

De este modo, en una cuenca dada, se ordenó de mayor a menor capacidad de recepción de recarga (o viceversa), las unidades geológicas de superficie que se obtienen al intersectar el contorno de la cuenca con el mapa geológico.

Lluvias

Se realizó un estudio de precipitaciones de todas las estaciones de la zona Norte, a nivel de lluvias mensuales. Se aplicó un modelo estocástico multivariado para rellenar dichas estadísticas, dadas las particulares características de las precipitaciones en la zona de estudio.

La precipitación nival se consideró representando la línea de nieves, e incorporando el retardo en los flujos superficiales debido a los procesos de acumulación, evaposublimación y deshielo. La temporalidad del modelo influye directamente sobre los resultados, por lo tanto se creó un método que incorpora la variabilidad horaria o diaria, efectuando balances mensuales.

Evaporación

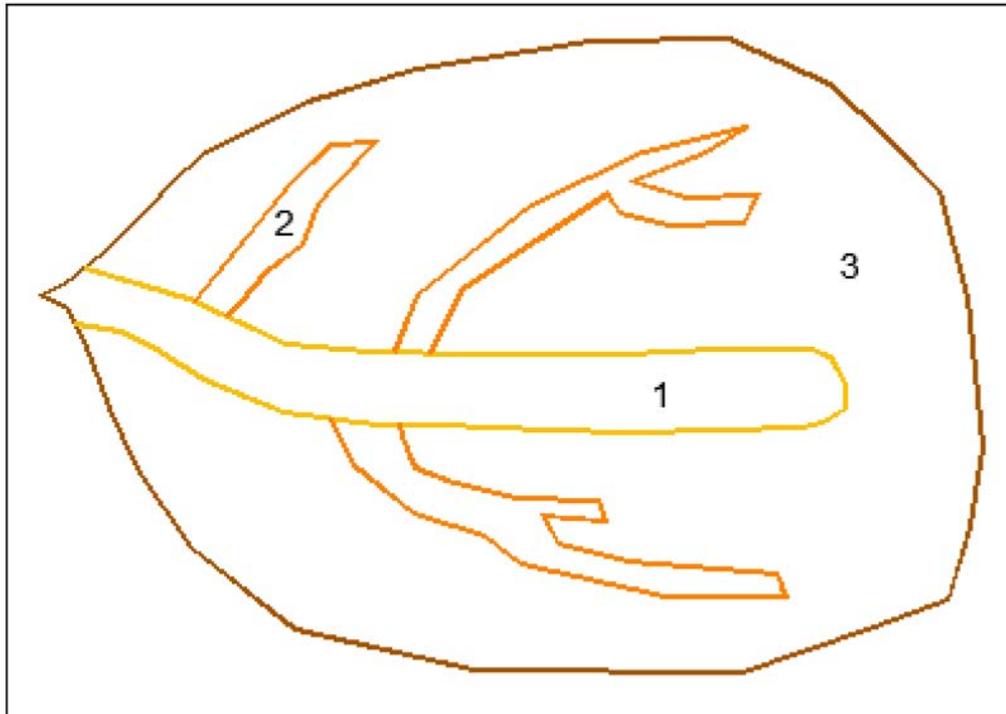
Los caudales de recarga dependen directamente de la evaporación real, puesto que lo que precipita y no se evapora está potencialmente disponible para infiltrar. En otras palabras, el agua que no se evapora durante un evento de precipitación, escurre superficialmente o se acumula en alguna depresión, ahí tiene la posibilidad de infiltrar, dependiendo de las características conductivas del suelo, originando la recarga efectiva de la cuenca. Para ello se cuantificó de la manera más ajustada posible la evaporación real, utilizando datos disponibles de evaporación potencial en la zona de estudio.

Caudales Superficiales

Se estudiaron los registros fluviométricos en las estaciones existentes en el área de interés. Se analizó la extensión, consistencia y validez de los registros, para luego efectuar un análisis hidrológico del registro histórico de 50 estaciones de control fluviométrico.

ENFOQUE CONCEPTUAL

- Cuenca Hipotética



- Zona 1: cauces principales, con lechos predominantemente de relleno fluvial, aluvial o semejante.

- Zona 2: cauces secundarios, con lechos menos modelados producto de flujos reducidos o intermitentes y, por lo tanto, de un espesor de relleno menor que en la zona 1. Estos cauces secundarios son los que alimentan a los de la zona 1.

-Zona 3: zona de escurrimiento superficial no acumulado, por lo cual no presenta mayores depositaciones fluviales o aluviales. Es principalmente una zona rocosa cuyo escurrimiento alimenta los cauces secundarios de la zona 2.

De acuerdo a la geología de cada zona: 1, 2 y 3, se podrán jerarquizar sus permeabilidades. Del mismo modo, se tendrá una estimación de la evaporación potencial y porcentaje de la cuenca que abarca cada zona.

Las ecuaciones de balance son las siguientes:

$$\begin{array}{llll}
 P_3 = E_3 + R_3 + Q_3 + \Delta S_3^a + \Delta S_3^n & E_3 = C_3^E \cdot P_3 & R_3 = C_3^R \cdot P_3 & Q_3 = C_3^Q \cdot P_3 \\
 P_2 + Q_3 = E_2 + R_2 + Q_2 + \Delta S_2^a + \Delta S_2^n & E_2 = C_2^E \cdot (P_2 + Q_3) & R_2 = C_2^R \cdot (P_2 + Q_3) & Q_2 = C_2^Q \cdot (P_2 + Q_3) \\
 P_1 + Q_2 = E_1 + R_1 + Q_1 + \Delta S_1^a + \Delta S_1^n & E_1 = C_1^E \cdot (P_1 + Q_2) & R_1 = C_1^R \cdot (P_1 + Q_2) & Q_1 = C_1^Q \cdot (P_1 + Q_2)
 \end{array}$$

Donde:

- P_i : Precipitación zona i
- E_i : Evaporación zona i
- R_i : Recarga zona i
- Q_i : Escorrentía total zona i
- ΔS_i^j : Almacenamiento zona i (j=a: acuífero; j=n: nival)
- C_i^E : Coeficiente de evaporación zona i
- C_i^R : Coeficiente de recarga zona i
- C_i^Q : Coeficiente de escorrentía zona i

Haciendo simplificaciones, se llegaron a las siguientes ecuaciones:

$$\begin{array}{l}
 C_j^R = C^K \times k_j \\
 C_j^E = C^E \times E_j^P \\
 C_j^Q = 1 - C_j^E - C_j^R
 \end{array}$$

Donde:

- k_i : Permeabilidad zona i
- C^K : Coeficiente global de recarga
- C^E : Coeficiente global de evaporación
- C^Q : Coeficiente global de escorrentía

También se supuso que en el largo plazo en una situación de equilibrio, el flujo subterráneo F es la suma de las recargas por zonas, y que la variación de almacenamiento es nula:

$$F = R1 + R2 + R3 \quad \Delta S_j^i = 0 \text{ (equilibrio largo plazo)}$$

La aplicación del modelo fue en 25 cuencas seleccionadas. Los factores tomados en cuenta en la selección de las 25 cuencas fueron las siguientes:

- Abarcan toda la zona de estudio (entre las Regiones XV y III) son cuencas que se ubican sobre los **1.500 m.s.n.m.**, variando en tamaño y geomorfología.
- Presentan una diversidad geológica que permite distinguir al menos dos zonas de distintas permeabilidades representativas, generalmente tres. Lo anterior permite desagregar la superficie (zonas 1, 2 y 3), jerarquizando así las permeabilidades asociadas a cada zona.
- Cuentan con un control fluviométrico confiable en la salida de la cuenca, casi en todos los casos de más de 30 años de extensión. El propósito de contar con esta información es poder verificar que los resultados de escorrentía superficial obtenidos mediante el método propuesto sean similares a los caudales observados y, en caso contrario, poder corregir los resultados (de caudales y recargas) en base a la información registrada.
- Cuencas, en lo posible, poco intervenidas en cuanto a extracciones o descargas de aguas superficiales y subterráneas; sin embargo, esto es prácticamente imposible de encontrar en la zona de estudio, por lo cual se debe conocer cuáles son las intervenciones relevantes, de forma de incorporarlas a los balances hídricos

En el Cuadro 3-3 se incluyen las 25 cuencas seleccionadas.

CUADRO 3-3
CUENCAS SELECCIONADAS

	Nombre	Área (Km ²)	Estación Fluviométrica
1	Río Lluta Alto	1328.4	Río Lluta en Alcerreca
2	<i>Río Lluta bajo Río Azufre</i>	383.6	<i>Río Caracarani en Humapalca</i>
3	Río Caquena	451.9	Río Caquena en Vertedero
4	Río San José alto	1358.4	Acueducto Azapa en Bocatoma
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	370.3	Río Codpa en Cala-Cala
6	Río Camarones hasta Conanoxa	2006.3	Río Camarones en Conanoxa
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	519.0	Quebrada Camiña en Altusa
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	548.3	Q. Tarapaca en Sibaya
9	Río Collacagua hasta Peñablanca (Huasco)	722.0	Río Collacagua en Peñablanca
10	<i>Río Piga hasta Collacagua (Huasco)</i>	398.9	<i>Río Piga en Collacagua</i>
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	189.0	Río Huatacondo en Copaquire
12	Río Loa hasta Lequena	2056.0	Río Loa Antes Represa Lequena
13	Río Salado	2358.0	Río Salado A. J. Loa
14	<i>Río Salado hasta Curti</i>	549.1	<i>Río Salado A. J. Curti</i>
15	Río San Pedro de Atacama	1412.0	Río San Pedro en Cuchabrachi
16	Canal Cuno hasta Socaire	170.3	Canal Cuno en Socaire
17	Río de La Ola (Pedernales)	1224.8	Río La Ola en Vertedero
18	Río Lamas (Maricunga)	1067.6	Río Lamas en El Salto
19	Río Jorquera	4191.6	Río Jorquera en Vertedero
20	Río Pulido	2023.9	Río Pulido en Vertedero
21	Río Manflas	982.6	Río Manflas en Vertedero
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	4104.7	Río Transito Antes Junta Río Carmen
23	<i>Río Transito hasta Angostura de Pinte</i>	2780.9	<i>Río Transito en Angostura Pinte</i>
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	3038.6	Río Carmen en Ramadillas
25	<i>Río Carmen hasta San Félix</i>	2755.1	<i>Río Carmen en San Felix</i>

Dado que entre las variables que forman parte del sistema hídrico en la zona de interés, **la precipitación es de la mayor importancia para la estimación de recargas**, se efectuó el análisis de esa variable aplicando métodos para representar el comportamiento de variables en que la componente aleatoria es relevante.

Para ello, se aplicó un método estocástico multivariado, el cual permitió rellenar y extender las estadísticas mensuales de precipitaciones en 102 estaciones pluviométricas, manteniendo la correlación espacial entre las lluvias en las distintas estaciones, así como las características históricas de las precipitaciones en cada estación.

A partir de los resultados del análisis pluviométrico, se sectorizó el área de estudio en cuatro zonas homogéneas, caracterizadas por la cantidad de precipitación promedio anual sobre cada una de ellas, y por su cota media sobre el nivel medio del mar. Los límites de esta sectorización resultaron ser los siguientes:

- Zona 1: Entre el extremo norte de Chile y hasta antes del extremo Norte de la cuenca del Río San José.
- Zona 2: Entre la cuenca del Río San José y la cuenca del Río san Pedro de Atacama.
- Zona 3: Entre el Salar de Atacama y el Salar de Maricunga.
- Zona 4: Entre la cuenca del Río Jorquera y el extremo sur de la III Región.

Con relación a los resultados de las precipitaciones obtenidas en el trabajo en comento, en el presente análisis se detectaron algunas incongruencias. En efecto, las precipitaciones medias anuales generadas (raster de precipitaciones anuales promedio y luego promedios por cuenca), en algunas cuencas no coinciden con la suma de las precipitaciones mensuales generadas para esas cuencas. En análisis posteriores, cuando se utilice esa información, se procederá a realizar las correcciones correspondientes.

Además de las precipitaciones, como variables necesarias para la aplicación del balance, se analizaron los caudales superficiales (para el relleno de las series de caudales, se aplicó el mismo modelo estocástico multivariado aplicado en las precipitaciones), la evaporación potencial y la temperatura.

Por otro lado, el análisis efectuado de las características geológicas y geomorfológicas de las cuencas estudiadas permitió representar adecuadamente las condiciones de permeabilidad, ya que entregó valores consistente en términos comparativos entre cuencas, al basarse en el mapa geológico de Chile en escala 1:1.000.000, disponible para todo el territorio nacional, eliminando además con ello la necesidad de contar con información geológica de detalle.

- Aplicación del Modelo Conceptual y Análisis de Resultados

Inicialmente, se aplicó la metodología ante un escenario de equilibrio de largo plazo, usando valores promedio anuales de cada variable y despreciando así la acumulación nival y la variación en los niveles de los acuíferos y, por ende, los volúmenes de acumulación (almacenamiento) en los embalses subterráneos. Para esta condición, se obtuvieron los rangos de variación dentro de los cuales se ubican los valores de los coeficientes de evaporación y permeabilidad o recarga para las distintas cuencas.

Al aplicar la metodología a nivel mensual para el período estadístico de 40 años, en que se incluyó todas las variables, los caudales medios mensuales generados presentan un ajuste de inferior calidad a los obtenidos para el largo plazo, aunque se mantienen dentro del mismo orden de magnitud. Ante este escenario mensual, el cual integra más variables al balance al considerar las variaciones en los almacenamientos nival y acuífero, se contó con más restricciones que permitieron acotar los coeficientes de evaporación y recarga a valores fijos dentro de los rangos previamente obtenidos.

La obtención de series de **caudales medios mensuales confiables** fue una de las limitantes en el desarrollo del trabajo, principalmente por no contar con información detallada de las intervenciones efectivas que se llevan a cabo dentro de cada sistema y de su efecto sobre estos caudales.

Al no ser posible llevar los caudales registrados a un régimen homogéneo único, el uso de los caudales registrados o el uso de cualquier método de relleno de las estadísticas pudo introducir errores en los resultados. No obstante, dado que la parte más relevante de esas intervenciones proviene de los usos ancestrales de aguas por parte de las comunidades indígenas, al considerar el período histórico a partir de 1970, ese efecto ha quedado incorporado en las evaluaciones.

Las principales características geográficas e hidrológicas de cada una de las 25 cuencas donde se aplicó el modelo se incluyen en el Cuadro 3-4 siguiente.

**CUADRO 3-4
CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS DE CUENCAS**

	Nombre de la cuenca	UTM E (m)	UTM N (m)	Elev. media cuenca (msnm)	Área zona 1 (km ²)	Área zona 2 (km ²)	Área zona 3 (km ²)	Área total (km ²)	P anual promedio (mm)	Q _{salida} (l/s)
1	Río Lluta Alto	436092	8023749	4345	246	467	614	1326	287	1921
2	Río Lluta bajo Río Azufre	421865	8038066	4448	113	98	170	381	294	371
3	Río Caquena	474867	8002060	4672	18	170	260	448	380	1097
4	Río San José alto	439148	7952919	3386	157	221	980	1358	120	599
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	457079	7925348	3901	25	19	326	370	131	146
6	Río Camarones hasta Conanoxa	451277	7904671	3177	202	369	1435	2006	103	517
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	480062	7880957	4084	13	0	506	519	157	324
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	502993	7819950	4214	40	0	508	548	124	155
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	516829	7789862	4294	65	16	640	722	109	129
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	521931	7793980	4292	65	0	333	399	112	143
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	522308	7683722	4347	13	20	156	189	97	39
12	Río Loa hasta Lequena	537009	7640075	4102	182	392	1522	2096	110	512
13	Río Salado	577205	7536476	3602	469	672	1210	2351	105	558
14	Río Salado hasta Curti	598591	7535382	4285	38	77	432	547	133	285
15	Río San Pedro de Atacama	593650	7502542	4027	158	166	1068	1391	82	739
16	Canal Cuno hasta Socaire	631015	7386620	4727	13	0	125	138	54	165
17	Río de La Ola (Pedernales)	495396	7053685	4026	108	538	573	1219	46	629
18	Río Lamas (Maricunga)	523360	7015706	4919	204	215	637	1056	50	258
19	Río Jorquera	457227	6933311	3799	105	1436	2558	4099	50	725
20	Río Pulido	433203	6882437	3569	19	543	1343	1905	58	1567
21	Río Manflas	410018	6855012	3566	110	235	602	946	57	572
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	395840	6801726	3361	182	861	2935	3978	72	4079
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	404827	6797681	3709	145	635	1875	2654	81	3681
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	377615	6752104	3471	97	790	2105	2992	71	2325
25	Río Carmen hasta San Félix	379781	6746525	3632	87	631	1990	2708	71	2836

Q_{salida}=caudal superficial promedio a la salida de la cuenca (medido y rellenado)

Con los valores finales de los coeficientes incluidos en las ecuaciones del balance según el modelo anual (escenario promedio), los resultados obtenidos son los que se incluyen en el Cuadro 3-5 siguiente.

CUADRO 3-5
RESULTADOS OBTENIDOS PARA ESCENARIO PROMEDIO

Cuenca	C_{EV}	C_K	Q_{pp} (l/s)	R (l/s)	Ev (l/s)	Ex (l/s)	Q_{salida} (l/s)	Q_{pp} (%)	R (%)	Ev (%)	Ex (%)	Q_{salida} (%)
	$(10^{-9}) \cdot (l/s)^{-1}$	$(l/s)^{-1}$										
1	16.5	78.4	12452	2904	7155	470.8	1921	100	23.3	57.5	3.8	15.4
2	59.1	224.7	3690	838	2190	291.5	371	100	22.7	59.3	7.9	10.1
3	45.0	136.3	5474	510	3049	817.9	1097	100	9.3	55.7	14.9	20.0
4	13.0	150.0	5287	1013	3160	514.9	599	100	19.2	59.8	9.7	11.3
5	37.0	2601.2	1588	519	914	9.1	146	100	32.7	57.6	0.6	9.2
6	9.0	175.1	6728	2152	3924	135.5	517	100	32.0	58.3	2.0	7.7
7	23.0	3248.1	2623	659	1631	9.5	324	100	25.1	62.2	0.4	12.3
8	21.0	2335.6	2226	677	1391	3.0	155	100	30.4	62.5	0.1	7.0
9	17.0	1143.8	2526	807	1588	1.3	129	100	32.0	62.9	0.0	5.1
10	34.0	933.0	1430	381	903	3.2	143	100	26.6	63.2	0.2	10.0
11	60.0	3543.2	599	189	369	3.2	39	100	31.5	61.5	0.5	6.4
12	6.6	190.7	7573	2387	4673	0.0	512	100	31.5	61.7	0.0	6.8
13	8.5	76.2	8009	2150	5236	65.2	558	100	26.8	65.4	0.8	7.0
14	30.0	694.8	2374	532	1538	18.8	285	100	22.4	64.8	0.8	12.0
15	11.0	130.5	3725	504	2432	50.2	739	100	13.5	65.3	1.3	19.8
16	22.0	483.9	242	13	61	3.0	165	100	5.3	25.4	1.2	68.1
17	8.1	13.8	1785	89	1015	51.3	629	100	5.0	56.9	2.9	35.3
18	9.5	200.2	1677	457	962	0.0	258	100	27.3	57.4	0.0	15.4
19	2.1	70.4	6506	2219	3544	18.6	725	100	34.1	54.5	0.3	11.1
20	3.0	53.2	3484	247	1626	43.7	1567	100	7.1	46.7	1.3	45.0
21	7.2	248.9	1705	349	783	1.1	572	100	20.5	45.9	0.1	33.5
22	1.7	27.3	9135	1033	4009	14.3	4079	100	11.3	43.9	0.2	44.6
23	2.3	15.5	6811	358	2758	14.3	3681	100	5.3	40.5	0.2	54.0
24	3.4	64.4	6723	883	3503	12.5	2325	100	13.1	52.1	0.2	34.6
25	3.3	32.5	6128	305	2974	12.3	2836	100	5.0	48.5	0.2	46.3
Mínimo	1.7	13.8	242	13	61	0.0	39	100	5.0	40.5 (25.4)	0.0	5.1
Máximo	60.0	3543.2	12452	2904	7155	817.9	4079	100	34.1	65.4	14.9	54.0 (68.1)

Q_{pp} =caudal de lluvia; R=caudal de recarga; Ev=caudal de evaporación; Ex=caudal de extracciones de agua superficial; Q_{salida} =caudal superficial de salida (medido, rellenado).

A partir de los resultados anteriores, se puede afirmar lo siguiente:

- La recarga efectiva varía entre un 5% y un 34% de la precipitación.
- La evaporación real entre un 40% y un 65% (salvo cuenca N° 16, 25%).
- El caudal de escorrentía superficial varía entre un 5% y un 54%.
- Las extracciones de agua superficial alcanzan un máximo de un 14%.

Con el objetivo de aplicar la metodología a cuencas sin control fluviométrico, se buscaron relaciones que permitiesen obtener coeficientes (evaporación y permeabilidad) de partida para evaluar dichas cuencas.

Así, se aplicó la metodología a 11 cuencas no controladas, cuyos resultados se incluyen en el Cuadro 3-6 siguiente.

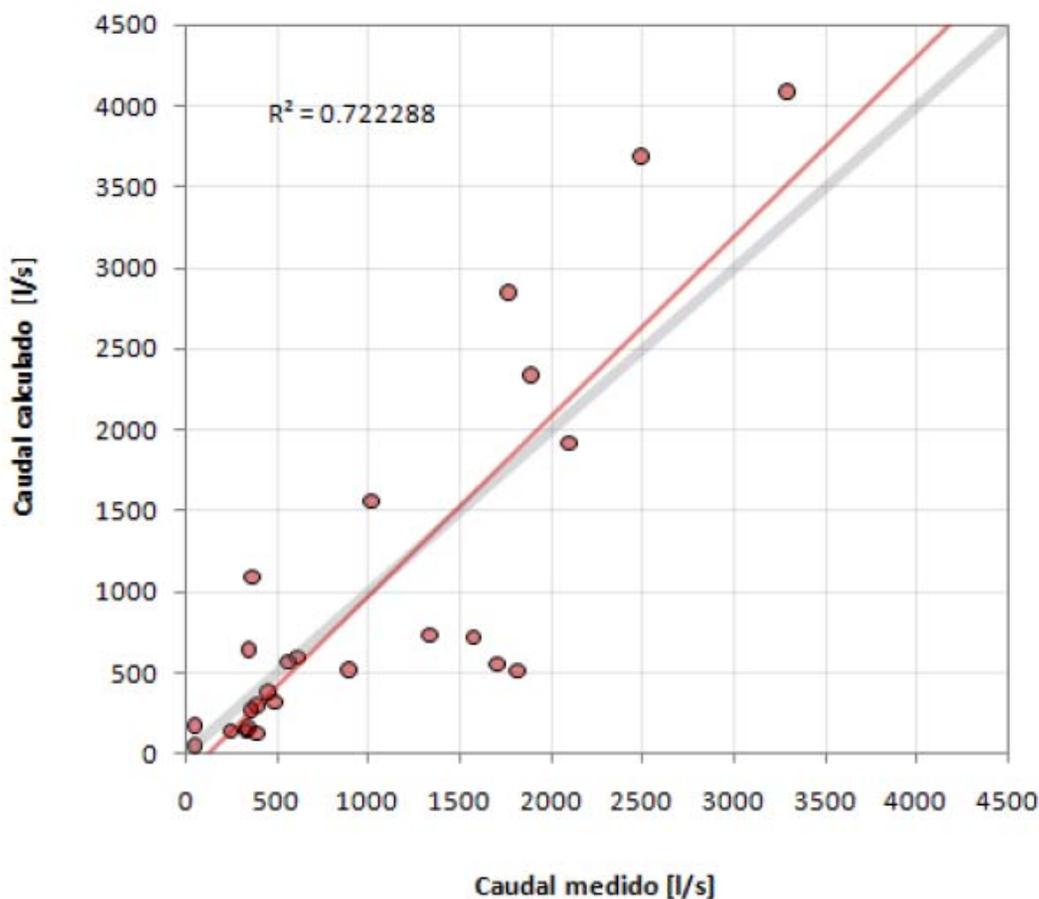
**CUADRO 3-6
RESULTADOS EN CUENCAS NO CONTROLADAS**

	Cuenca	CEv inicial	Ck inicial	CEv final	Ck final	Qpp l/s	R l/s	Ev l/s	Q _{salida} l/s	Qpp %	R %	Ev %	Q _{salida} %
1	Río Lauca	12.1	129	8.1	20	20378	4019	12035	4324	100.0	19.7	59.1	21.2
2	Quebrada del Aroma	8.6	446	7.6	53	5658	1241	3421	996	100.0	21.9	60.5	17.6
3	Quebrada de Quipisca	20.7	501	15.8	140	1081	257	663	160	100.0	23.8	61.4	14.8
4	Quebrada de Quisma	57.3	3171	38.6	770	293	103	182	8	100.0	35.3	62.0	2.7
5	Quebrada de Chacarilla	14.4	339	9.6	71	1934	522	1207	204	100.0	27.0	62.4	10.6
6	Quebrada Caracoles	18.6	355	2.2	9	329	67	215	47	100.0	20.2	65.5	14.3
7	Llano de la Paciencia	140.5	4000	9.0	10	806	84	535	188	100.0	10.4	66.3	23.3
8	Quebrada de Tal Tal	683.3	4000	2.1	16	2268	524	1510	234	100.0	23.1	66.6	10.3
9	Quebrada del Chañaral	24.6	603	11.0	10	3405	259	1984	1162	100.0	7.6	58.3	34.1
10	Río Astaburuaga hasta Cono	11.1	150	41.5	610	346	49	181	117	100.0	14.0	52.2	33.7
11	Río Figueroa hasta Río Turbio	2.0	55	2.4	35	5346	946	2765	1635	100.0	17.7	51.7	30.6
	Mínimo	2.0	55	2.1	9	293	49	181	8	100.0	7.6	51.7	2.7
	Máximo	683.3	4000	41.5	770	20378	7276	11980	1635	100.0	35.7	66.6	34.1

Q_{pp}=caudal de lluvia; R=caudal de recarga; Ev=caudal de evaporación; Q_{salida}=caudal superficial de salida (medido, rellenado).

Luego se realizó una verificación de la metodología para las mismas 25 cuencas antes señaladas, pero suponiendo desconocido el caudal de escorrentía superficial de salida. La correlación entre los caudales medidos versus los caudales calculados en las 25 cuencas se muestra en la Figura 3-1 siguiente.

FIGURA 3-1
CAUDALES MEDIDOS VRS. CALCULADOS (25 cuencas)



Las principales conclusiones del estudio fueron las siguientes:

- El método elaborado se basó en un balance hídrico, que considera, además de la recarga, las variables precipitación líquida y sólida, almacenamiento de nieves y derretimiento de ésta, evaporación desde cada cuenca, acumulación en acuíferos y afloramientos, y caudales superficiales. Para estos efectos, se hizo depender el balance hídrico de ciertos coeficientes de evaporación y de permeabilidad o recarga, característicos de cada cuenca, los cuales varían espacialmente, habiéndose calibrado éstos al aplicar la metodología a un total de 25 cuencas a lo largo de la zona de estudio.
- Los caudales de salida de las cuencas fueron el resultado de las diferencias entre entradas y salidas que interactúan en cada sistema, y constituyen los valores que pueden ser comparados con los caudales observados para la

calibración del modelo, y así definir los valores de los coeficientes de evaporación y de permeabilidad o recarga en cada cuenca.

- Los resultados de la aplicación directa del método, pudo resultar adecuada en algunos casos, pero en otros sólo debiera ser considerada como una referencia del orden de magnitud del caudal medido.
- Para los efectos de aplicaciones posteriores y a fin de disminuir la incertidumbre en los valores de algunas de las variables utilizadas, sería recomendable determinar con una razonable aproximación en cada cuenca, el flujo subterráneo pasante en la salida, el cual en el largo plazo representa la recarga subterránea neta, entendiéndola como el promedio en el tiempo de ese flujo, suponiendo que no hay variación del almacenamiento subterráneo en ese período.

Es importante destacar que las relaciones para obtener los coeficientes (de evaporación, de recargas, etc.) requeridos para aplicar el modelo no siguen un patrón común, llegando a relaciones que resultan en extremo complicadas.

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.

En el año 2010 la DGA desarrolló un estudio para estimación de la recarga en la zona altiplánica y cuencas de vertiente pacífico, con el cual se buscó avanzar en la formulación metodológica y en la preparación y sistematización hidrológica e hidrogeológica de la información base.

Este trabajo correspondió a una versión preliminar puesta a disposición de la presente Consultoría, pero cuya versión final ha sido publicada con modificación en el SDT N° 317 de Agosto del 2011. Este informe no ha sido considerado en el presente trabajo.

El modelo conceptual desarrollado tiene una formulación simple, pero su aplicación requirió de antecedentes con un nivel de detalle superior al disponible, en particular, la regionalización de los parámetros no tuvo resultados adecuados para lograr su extensión generalizada, debido a que el rango de incertidumbre fue alto por la baja predictividad a escala regional.

Sobre la base de los avances mencionados y la necesidad de contar con una herramienta de aplicación simple y con una precisión razonable, se desarrolló una formulación metodológica que se basó en un modelo simplificado del comportamiento

de la escorrentía a nivel regional, orientado a la estimación de la recarga neta en las cuencas del Norte de Chile.

Se elaboró una propuesta metodología que incorpora simplificaciones temporales y espaciales de las variables hidrológicas e hidrogeológicas de mayor importancia, en consistencia con la información disponible, de manera que toda particularidad no cubierta se propague aleatoriamente sobre los resultados. En esta línea, el trabajo fue enfocado desde un principio **“a nivel regional”**.

El origen de la presente propuesta metodológica fue el estudio “The Study on The Development of Water Resources in Northern Chile”, JICA, 1995.

En dicho trabajo, se intentó relacionar el coeficiente de escorrentía de la cuenca con la precipitación media anual de largo plazo de la cuenca respectiva.

Así, la relación que se llegó a establecer fue:

$$Q_s = f \times P \times A$$

$$P = m \times f + C$$

Donde:

Q_s = Caudal medio superficial de salida o escorrentía total (largo plazo)

P = Precipitación media anual de la cuenca = Recarga

A = Área de la cuenca

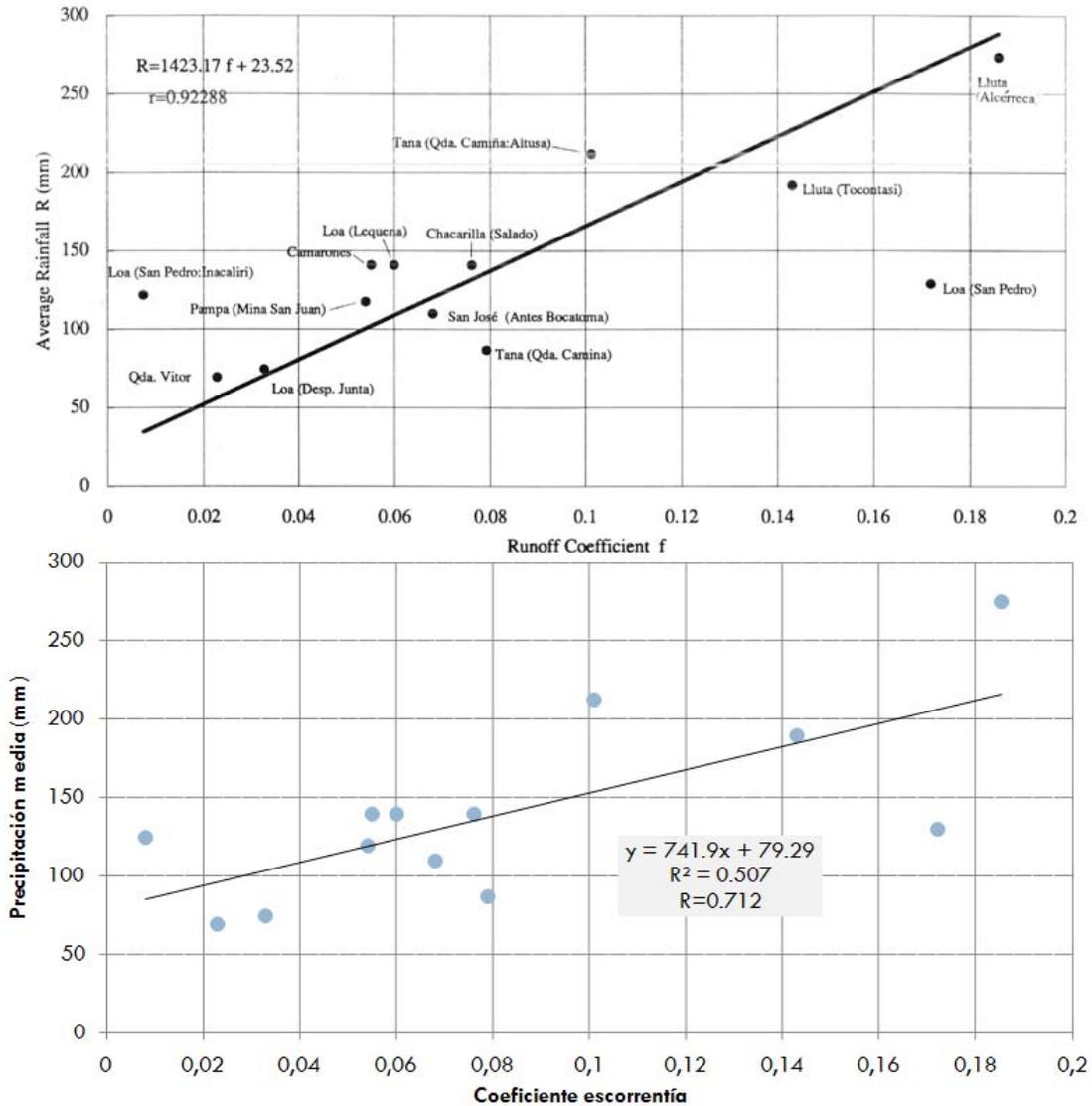
f = coeficiente de escorrentía de la cuenca

m y C = coeficientes de ajuste lineal

Los gráficos de ajuste lineal (aproximado) se muestra en la Figura 3-2 siguiente; en dicha figura se ha agregado el ajuste lineal real.

FIGURA 3-2
AJUSTE PRECIPITACIÓN ANUAL VRS. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

JICA, 1995



De acuerdo con lo indicado en los 2 gráficos anteriores, se tiene:

- Ajuste JICA: $P = R = 1.423,17 \times f + 23,52$
- Ajuste Real: $P = 741,9 \times f + 79,29$; $R^2 = 0,507$; $R = 0,712$

Se observa que la relación propuesta por JICA en 1995 no se ajusta convenientemente. Es importante destacar que el ajuste JICA responde a un ajuste

gráfico, donde algunas estaciones fueron ignoradas, como por ejemplo Loa en San Pedro, Loa en Lequena y Loa en Inacaliri, todas ellas ubicadas en la II Región.

La principal dificultad que presenta desarrollar una metodología de aplicación regional para la determinación de la recarga de cuencas altiplánicas consiste básicamente en la poca información disponible.

El presente trabajo desarrollado por la DGA se dividió en 2 etapas, a saber:

- a) Búsqueda de una relación de largo plazo entre la escorrentía total de salida de una cuenca y la precipitación media sobre ésta, utilizando todas las cuencas seleccionadas en el estudio de la Ref. 3.
- b) Determinación de la recarga neta o efectiva, estimada a partir del comportamiento de los caudales superficiales estacionales de salida de las cuencas, donde los conceptos de caudal base interanual, demandas estacionales máximas y mínimas, períodos interanuales húmedos o secos, flujo pasante subterráneo, etc., son elementos básicos para la fundamentación de la estimación.

➤ **Relación Escorrentía Total – Precipitación Media**

Una primera relación adoptada entre la escorrentía total y la precipitación media de las cuencas del Norte de Chile fue establecida por la JICA en 1995, estimando con ella la recarga media hacia la Pampa del Tamarugal.

$$Q_s = f * P_c * A$$

$$P_c = m f + C$$

$$Q_s = f (P_c) = P_c (P_c - C) * A / m$$

$$Q_s = (A/m) * P_c^2 - (C * A/m) * P_c$$

Donde,

P_c = Precipitación media anual de largo plazo de la cuenca

Q_s = Caudal medio superficial de salida de la cuenca o escorrentía total (largo plazo)

A = Área de la cuenca

f = Coeficiente de escorrentía de la cuenca

donde m y C son coeficientes de ajuste lineal

La relación anterior supone flujo subterráneo pasante nulo o poco significativo respecto al caudal superficial, hipótesis que puede constituir un elemento distorsionador en la correlación.

Este trabajo de la DGA tomó como base la metodología JICA, incorporándole una corrección de tipo hidrogeológico, definiendo 2 tipos de suelos o zonas hidrogeológicas dentro de la cuenca de drenaje:

- Zona 1: asociada a distintas formaciones de origen sedimentario (antiguas y modernas)
- Zona 2: asociada a suelos poco permeables (rocas antiguas y formaciones volcánicas impermeables)

El planteamiento quedó expresado como sigue:

$$Q_2 = f_2 P_c Z_2$$

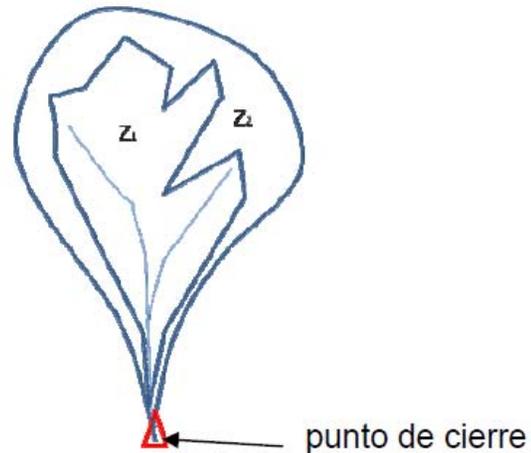
$$Q_2 / Z_1 = P_{2_1}$$

$$Q_1 = f_1 (P_c + P_{2_1}) Z_1$$

$$Q_1 = f_1 P_c Z_1 + f_1 f_2 P_c Z_2$$

$$P_c = m_2 f_2 + C_2$$

$$(P_c + P_{2_1}) = m_1 f_1 + C_1$$



Q_2 = Escorrentía total de salida de la cuenca 2

Q_1 = Escorrentía total de salida de la cuenca 1

Z_2 = área de la cuenca 2

Z_1 = área de la cuenca 1

f_2 = coeficiente de escorrentía de la zona 2

f_1 = coeficiente de escorrentía de la zona 1

P_c = Precipitación media anual de largo plazo de la cuenca

P_{2_1} = aporte de la escorrentía total desde la zona 2 a la zona 1, expresada en términos de precipitación media

m_1, m_2, C_1, C_2 son coeficientes de ajuste lineal

Los cálculos fueron realizados en base a planillas automáticas Excel, con el objetivo de que los coeficientes de ajuste lineal pudieran ser calibrados simultáneamente para las 25 cuencas y subcuencas. El ajuste se efectuó mediante el uso de la función SOLVER de EXCEL cuyo objetivo fue minimizar la desviación entre los valores de escorrentía total observada y la calculada, teniendo como variable de ajuste los coeficientes de ajuste lineal.

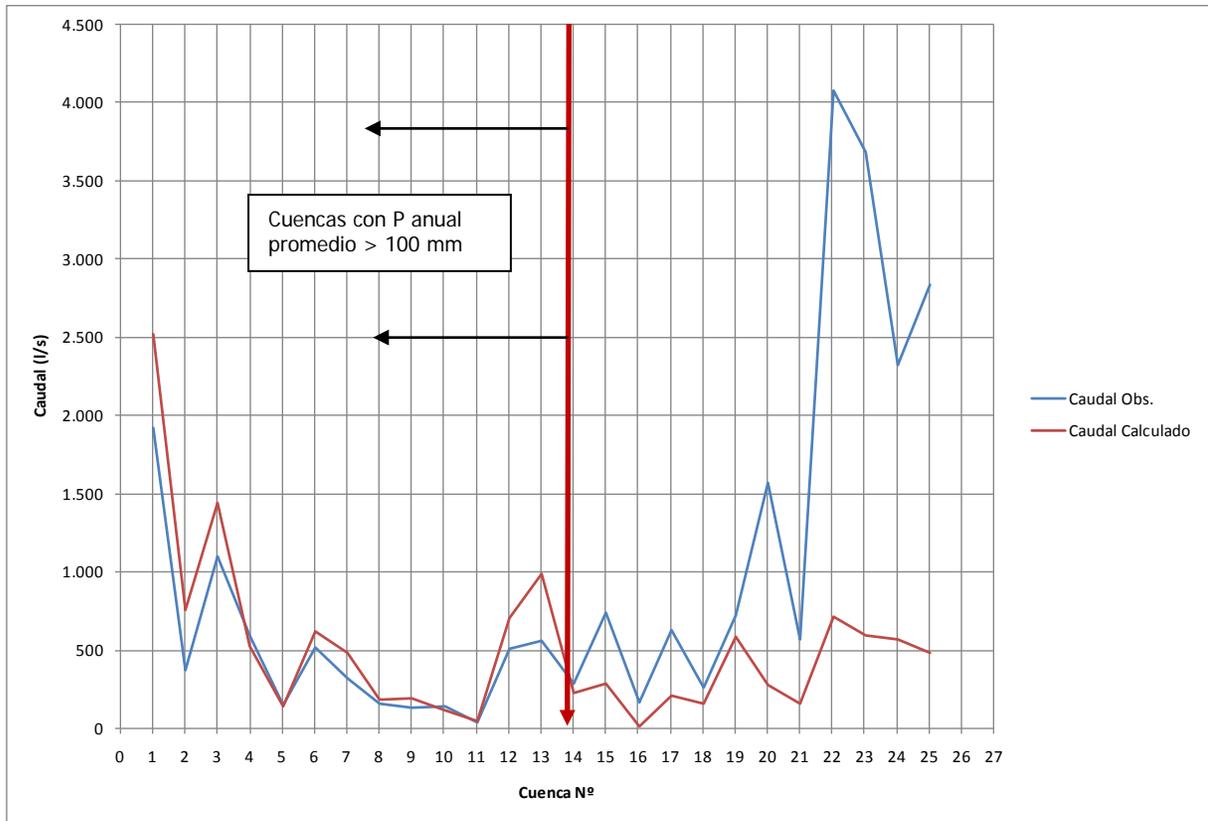
Los resultados obtenidos se incluyen en el Cuadro 3-7 siguiente.

CUADRO 3-7
PARÁMETROS m1, m2, C1 y C2 PARA MINIMIZAR ERROR ENTRE
Qobs Y Qcalculado

	Nombre de la cuenca	Elev. media cuenca (msnm)	Área zona 2 (km ²)	Área zona 1 (km ²)	Área total (km ²)	Q _{cp}	P anual promedio	Q _{calida}	f2	f1	Q2	P ₂₋₁	P1	Q1	Qobs	d ² /Qobs	d/Qobs	
						(l/s)	(mm)	(l/s)										
1	Río Lluta Alto	4345	614	713	1327	12452	287	1921	0.49	0.27	2734	121	408	2521	1921	187	0.31	
2	Río Lluta bajo Río Azufre	4448	170	211	381	3690	294	371	0.50	0.27	792	118	412	757	371	402	1.04	
3	Río Caquena	4672	260	188	448	5474	380	1097	0.63	0.34	1980	332	712	1440	1097	107	0.31	
4	Río San José alto	3386	980	378	1358	5287	120	599	0.23	0.23	868	72	192	523	599	10	0.13	
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	3901	326	44	370	1588	131	146	0.25	0.27	338	242	373	138	146	0	0.05	
6	Río Camarones hasta Conanoxa	3177	1435	571	2006	6728	103	517	0.21	0.22	968	53	156	620	517	21	0.20	
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	4084	506	13	519	2623	157	324	0.29	0.60	729	1769	1926	478	324	73	0.47	
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	4214	508	40	548	2226	124	155	0.24	0.29	477	376	500	186	155	6	0.20	
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	4294	640	81	721	2526	109	129	0.22	0.25	477	186	295	188	129	27	0.46	
10	Río Piña hasta Collacagua (Huasco)	4292	333	65	398	1430	112	143	0.22	0.24	261	126	238	116	143	5	0.19	
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	4347	156	33	189	599	97	39	0.20	0.23	95	90	187	44	39	1	0.14	
12	Río Loa hasta Lequena	4102	1522	574	2096	7573	110	512	0.22	0.22	1154	63	173	703	512	71	0.37	
13	Río Salado	3602	1210	1141	2351	8009	105	558	0.21	0.21	844	23	128	989	558	332	0.77	
14	Río Salado hasta Curti	4285	432	115	547	2374	133	285	0.25	0.24	460	126	259	228	285	11	0.20	
15	Río San Pedro de Atacama	4027	1068	324	1392	3725	82	739	0.17	0.21	484	47	129	283	739	282	0.62	
16	Canal Cuno hasta Socaire	4727	125	13	138	242	54	165	0.13	0.21	28	68	122	11	165	144	0.94	
17	Río de La Ola (Pedernales)	4026	573	646	1219	1785	46	629	0.12	0.20	99	5	51	204	629	287	0.68	
18	Río Lamas (Maricunga)	4919	637	419	1056	1677	50	258	0.13	0.20	126	10	60	157	258	40	0.39	
19	Río Jorquera	3799	2558	1541	4099	6506	50	725	0.13	0.20	507	10	60	585	725	27	0.19	
20	Río Pulido	3569	1343	562	1905	3484	58	1567	0.14	0.20	339	19	77	277	1567	1062	0.82	
21	Río Manflas	3566	602	345	947	1705	57	572	0.14	0.20	148	14	71	155	572	305	0.73	
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	3361	2935	1043	3978	9135	72	4079	0.16	0.21	1065	32	104	716	4079	2773	0.82	
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	3709	1875	780	2655	6811	81	3681	0.17	0.21	832	34	115	595	3681	2587	0.84	
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	3471	2105	887	2992	6723	71	2325	0.16	0.21	746	27	98	566	2325	1331	0.76	
25	Río Carmen hasta San Félix	3632	1990	718	2708	6128	71	2836	0.16	0.21	705	31	102	481	2836	1955	0.83	
																	12046	

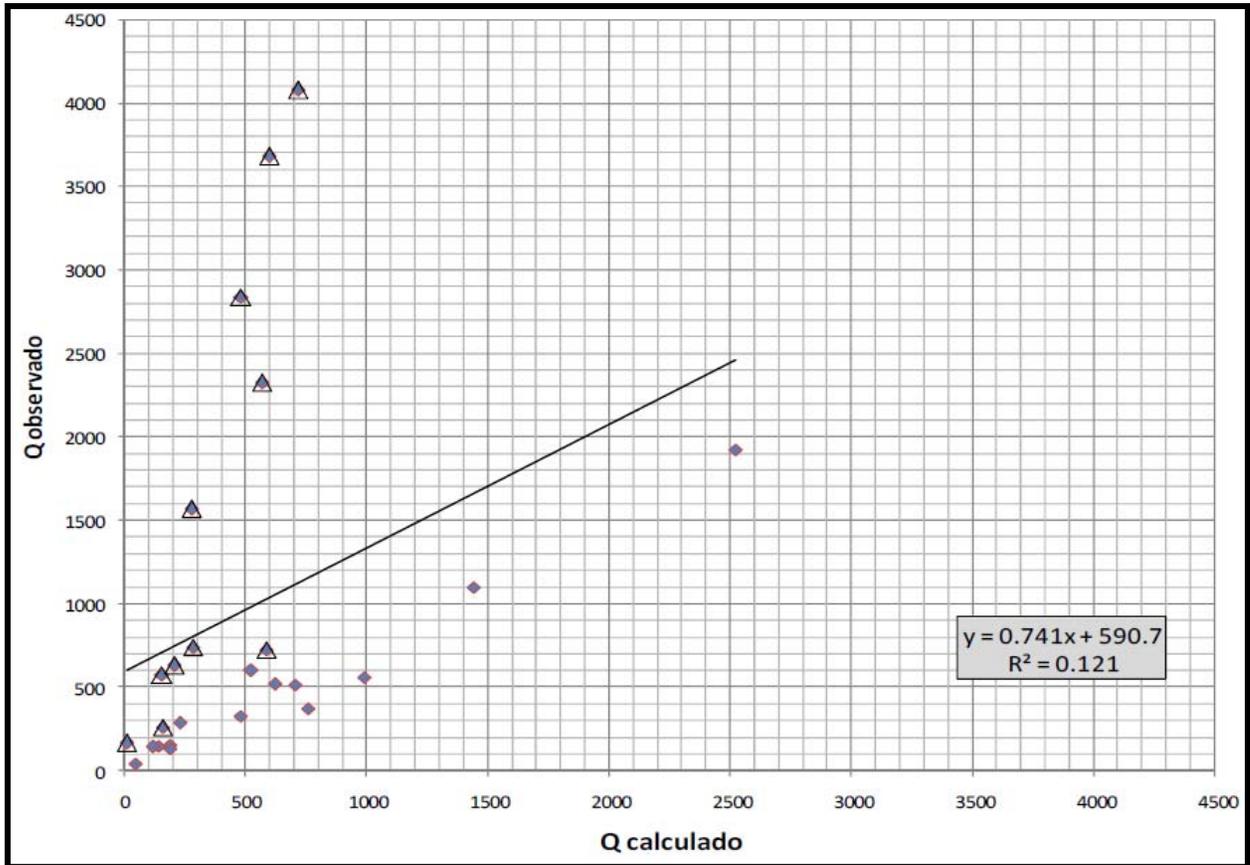
En la Figura 3-2 se muestra la comparación entre los caudales calculados y observados según el planteamiento antes consignado.

FIGURA 3-3
CAUDALES OBSERVADOS VRS. CAUDALES GENERADOS



La correlación entre los caudales observados y calculados se muestra en la Figura 3-4 siguiente.

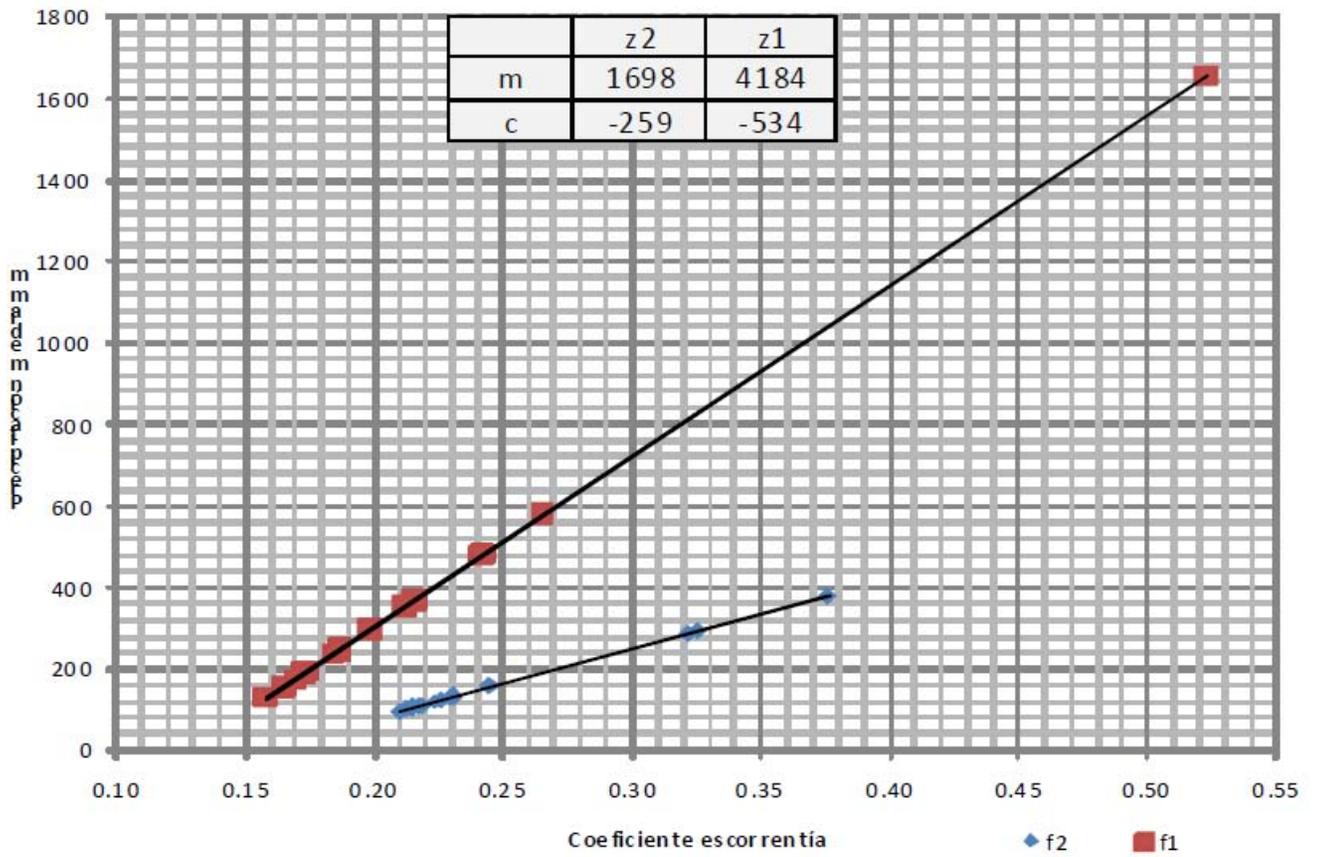
FIGURA 3-4
CAUDAL OBSERVADO VRS. CAUDAL CALCULADO



Tal como se puede apreciar de los gráficos anteriores, el comportamiento de las 25 cuencas sigue dos grupos o tendencias perfectamente identificables, una de ellas con caudales estimados muy inferiores a los observados, y la otra, con caudales estimados un poco por debajo de los observados. De acuerdo con ello, se desagregaron dichas tendencias sobre la base de un umbral de 100 mm de precipitación media anual.

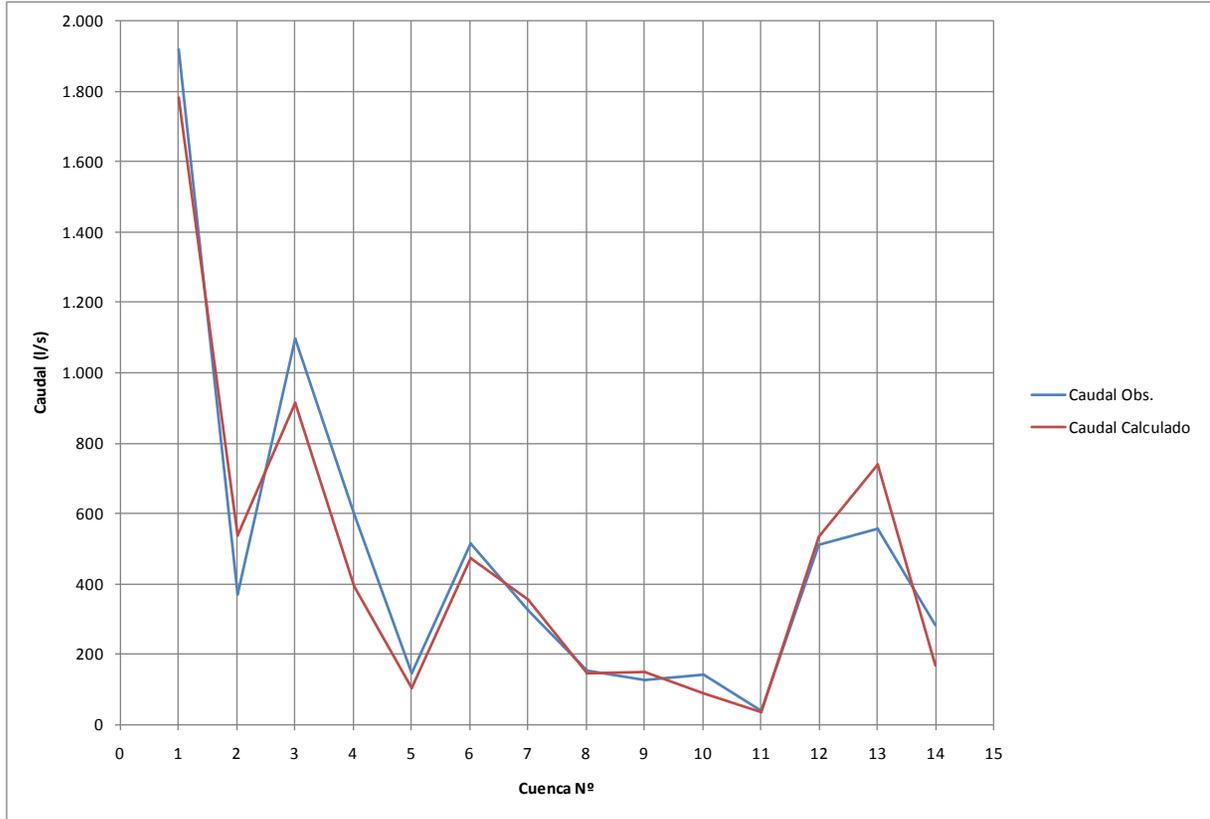
Para la nueva condición, es decir, prescindiendo de las cuencas con precipitaciones promedio anuales menores a 100 mm, el siguiente gráfico muestra esta nueva condición (Figuras 3-5 y 3-6).

FIGURA 3-5
COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA VRS. PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL



Nota: f1 ha sido correlacionado con P1 (Cuadro 3-7) y f2 con PP anual

FIGURA 3-6
CAUDALES OBSERVADOS VRS. CAUDALES GENERADOS
(cuencas con P anual promedio > 100 mm)

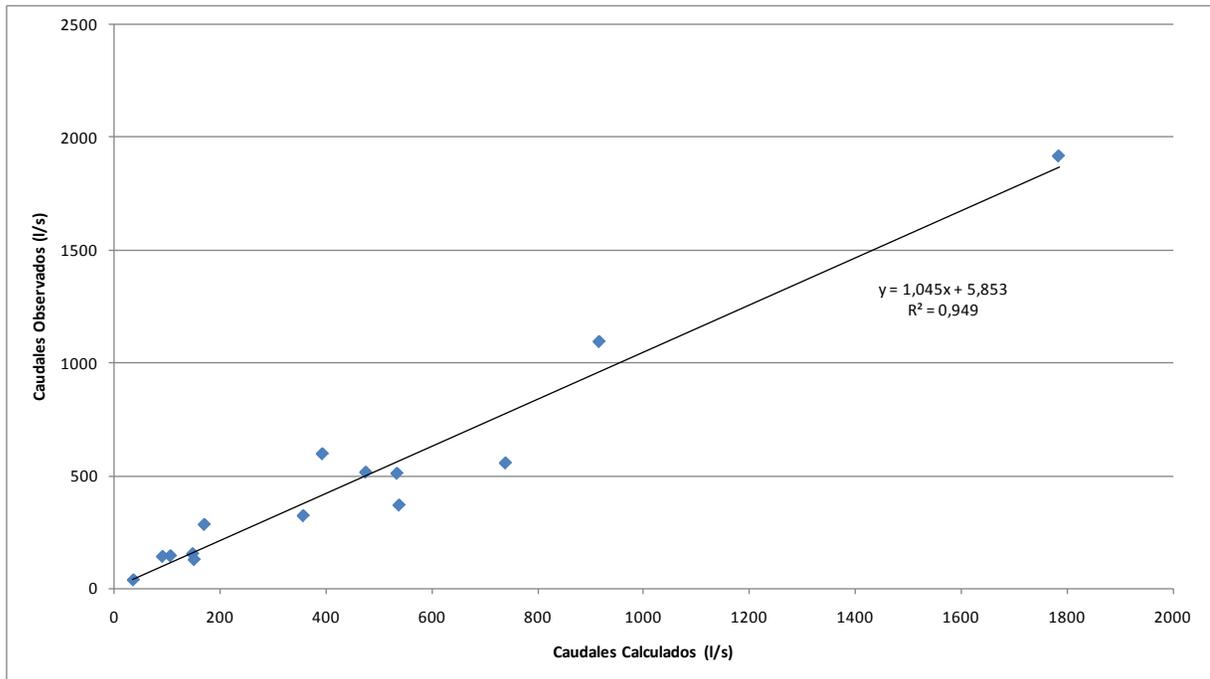


Bajo esta nueva condición de análisis, en el Cuadro 3-8 se incluye el cálculo de los parámetros para esta nueva condición ($P > 100$ mm), mientras que en la Figura 3-7 se muestra un gráfico de los caudales calculados vrs. los caudales medidos.

CUADRO 3-8
PARÁMETROS BAJO LA NUEVA CONDICIÓN DE ANÁLISIS
(cuencas con P anual promedio > 100 mm)

	Nombre de la cuenca	media cuenca (msnm)	Área zona 2 (km ²)	Área zona 1(km ²)	Área total (km ²)	Q _{op} (l/s)	P anual prom (mm)	Q _{calda} (l/s)	f2	f1	Q2	P ₂₋₁	P1	Q1	Qobs	d ² /Qobs	d/Qobs
2	Río Lluta bajo Río Azufre	4448	170	211	381	3690	294	371	0.33	0.22	516	77	371	537	371	74	0.45
3	Río Caquena	4672	260	188	448	5474	380	1097	0.38	0.27	1179	198	578	915	1097	30	0.17
4	Río San José alto	3386	980	378	1358	5287	120	599	0.22	0.17	832	69	189	392	599	71	0.34
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	3901	326	44	370	1588	131	146	0.23	0.21	311	223	354	105	146	12	0.28
6	Río Camarones hasta Conanoxa	3177	1435	571	2006	6728	103	517	0.21	0.17	999	55	158	474	517	4	0.08
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	4084	506	13	519	2623	157	324	0.24	0.52	617	1497	1654	356	324	3	0.10
8	Quebrada de Tarapaca hasta Siba	4214	508	40	548	2226	124	155	0.23	0.24	450	355	479	147	155	0	0.05
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	4294	640	81	721	2526	109	129	0.22	0.20	479	187	296	150	129	4	0.17
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasc)	4292	333	65	398	1430	112	143	0.22	0.18	258	125	237	90	143	20	0.37
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	4347	156	33	189	599	97	39	0.21	0.17	101	96	193	35	39	0	0.10
12	Río Loa hasta Lequena	4102	1522	574	2096	7573	110	512	0.22	0.17	1153	63	173	533	512	1	0.04
13	Río Salado	3602	1210	1141	2351	8009	105	558	0.21	0.16	863	24	129	738	558	58	0.32
14	Río Salado hasta Curti	4285	432	115	547	2374	133	285	0.23	0.19	420	115	248	169	285	47	0.41
																334	

FIGURA 3-7
CORRELACIÓN CAUDALES CALCULADOS VRS. CAUDALES MEDIDOS



Se puede establecer que el comportamiento de las 14 cuencas ($PP > 100$ mm), está relacionada exclusivamente con el umbral de precipitación, y no por la localización geográfica de éstas.

Recientemente, la DGA encontró una nueva relación más simple para el cálculo de la escorrentía total en función de la precipitación media anual de la cuenca. Ésta nueva relación trabaja con el área total de la cuenca (no distingue entre área 1 y área 2). Utilizando las mismas hipótesis (ecuaciones) presentadas anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados.

CUADRO 3-9
PARÁMETROS f, m y c CON NUEVA RELACIÓN ($P > 100$ mm)

	Nombre de la cuenca	Elev. media cuenca (msnm)	Área total (km ²)	P anual promedio (mm)	f real	Qobs (l/s)	f-lineal	Qcal-lineal (l/s)
1	Río Lluta Alto	4.345	1.326	287	0,159	1.921	0,14994	1.809
2	Río Lluta bajo Río Azufre	4.448	381	294	0,104	371	0,15257	542
3	Río Caquena	4.672	448	380	0,203	1.097	0,18492	998
4	Río San José alto	3.386	1.358	120	0,116	599	0,08711	450
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	3.901	370	131	0,095	146	0,09125	140
6	Río Camarones hasta Conanoxa	3.177	2.006	103	0,079	517	0,08072	529
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	4.084	519	157	0,125	324	0,10103	261
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	4.214	548	124	0,072	155	0,08862	191
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	4.294	722	109	0,052	129	0,08298	207
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	4.292	399	112	0,101	143	0,08411	119
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	4.347	189	97	0,067	39	0,07846	46
12	Río Loa hasta Lequena	4.102	2.096	110	0,070	512	0,08335	609
13	Río Salado	3.602	2.351	105	0,071	558	0,08147	638
14	Río Salado hasta Curti	4.285	547	133	0,124	285	0,09201	212
		m	0,0003762					
		c	0,0420					

Donde:

$f \text{ real} = Q \text{ obs} / (P \text{ anual} \times \text{Área})$

$f \text{-lineal} = f \text{ correlacionado linealmente con } P \text{ anual} = m \times f \text{ real} + c$

$Q \text{ cal-lineal} = \text{Caudal total estimado} = f \text{ lineal} \times P \text{ anual} \times \text{Área}$

A continuación se muestra la comparación de los caudales calculados totales vrs. los caudales observados (Figura 3-8) y la correlación lineal de ambos caudales (generados y observados).

FIGURA 3-8
CAUDALES OBSERVADOS Y GENERADOS
(nueva relación precipitación – escorrentía)

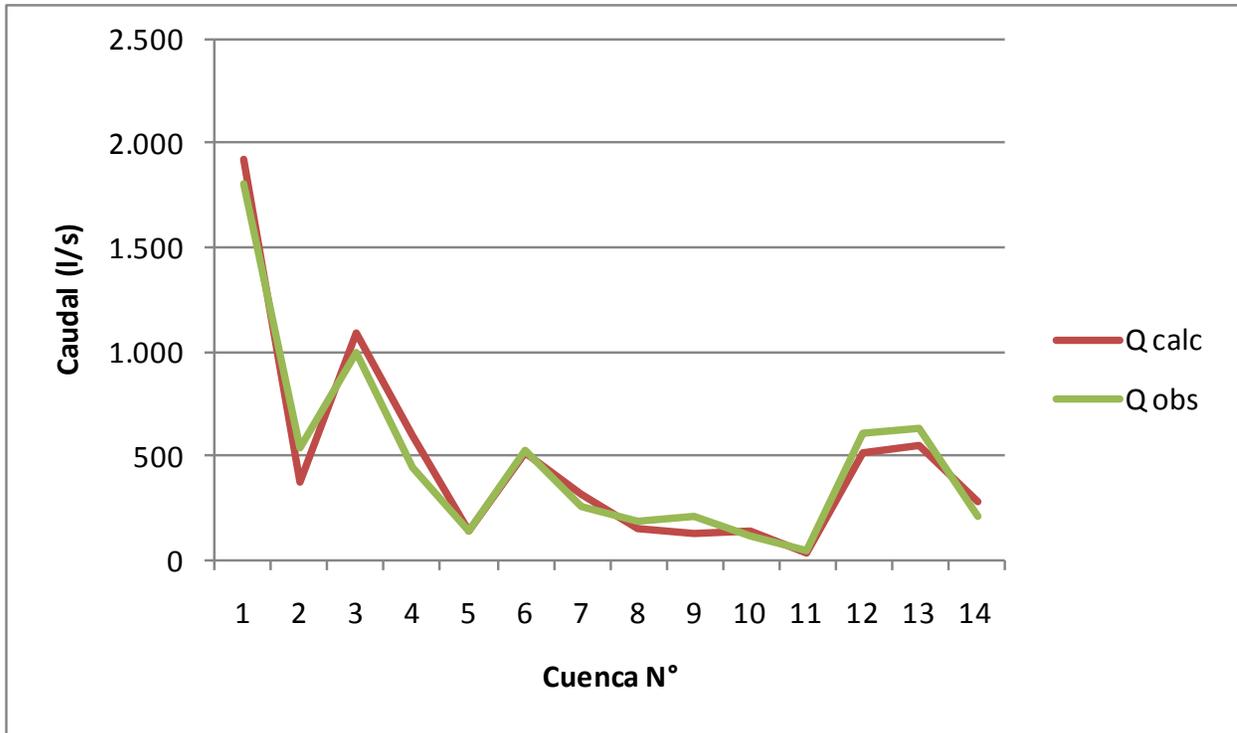
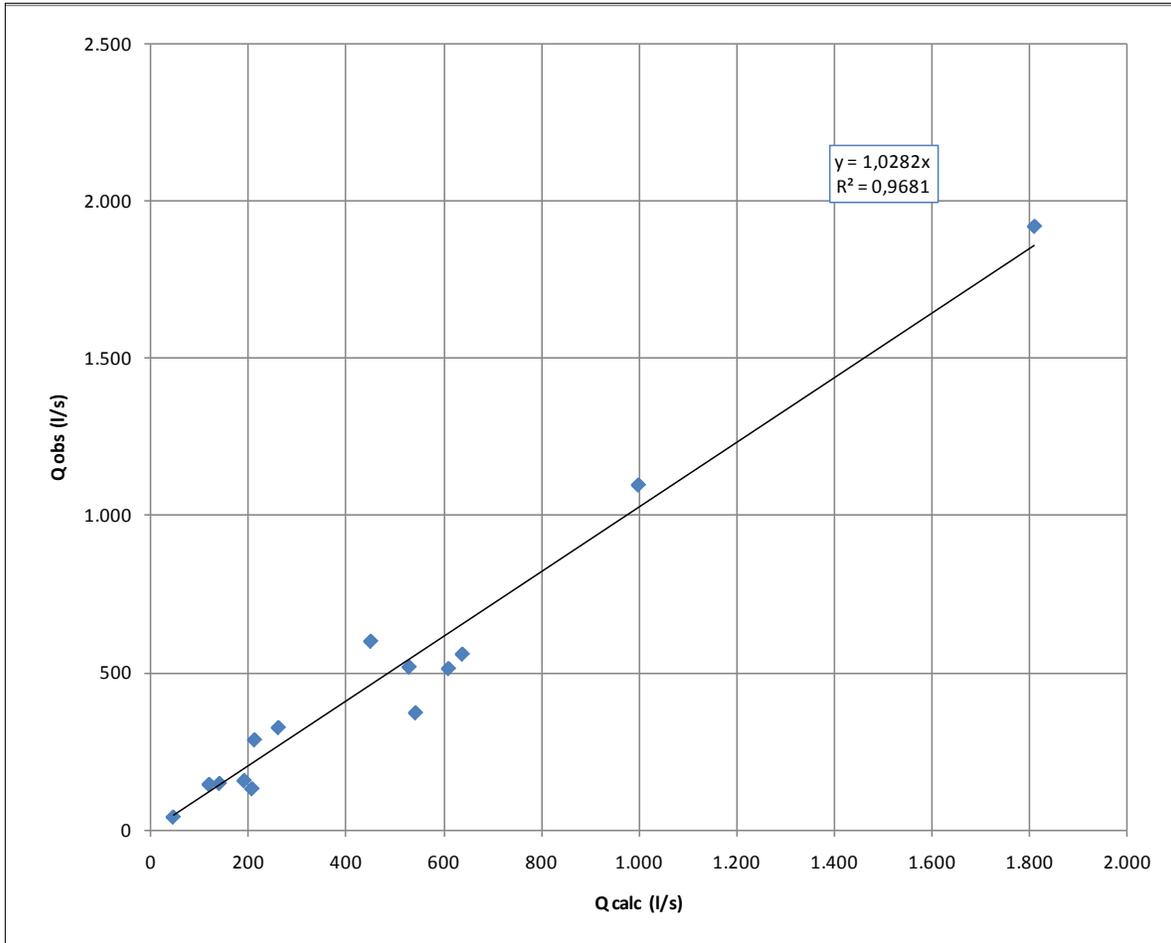


FIGURA 3-9
CORRELACIÓN LINEAL CAUDALES OBSERVADOS Y GENERADOS
(nueva relación precipitación – escorrentía)



Del gráfico anterior se puede observar que la correlación entre los caudales observados y los caudales generados (caudal total) con la nueva relación ($R^2 = 0,9681$) es mejor que con la relación anterior presentada ($R^2 = 0,941$).

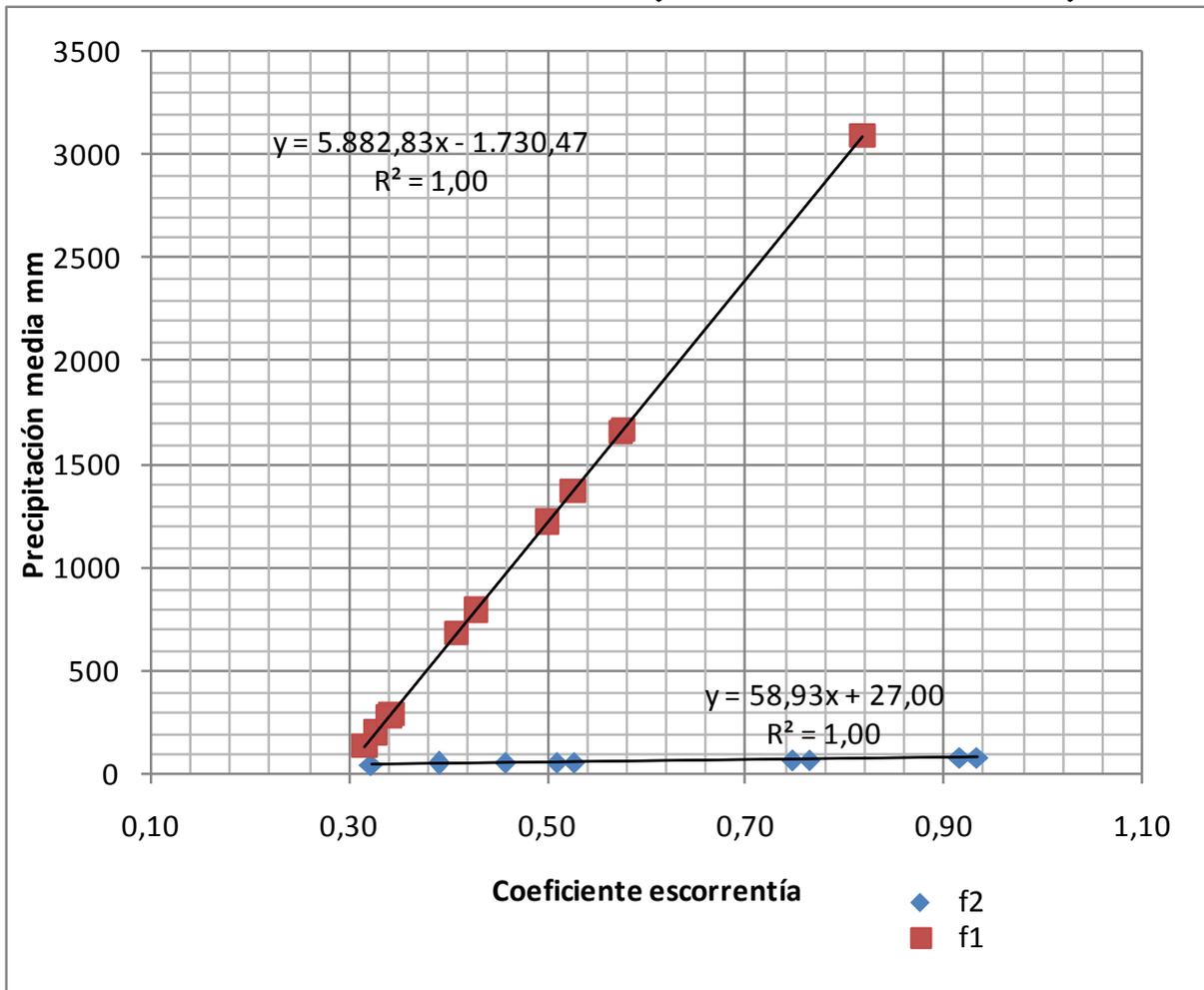
Por otro lado, recientemente la DGA hizo un análisis para las cuencas con $PP < 100$ mm (11 cuencas de las 25 estudiadas en el estudio SIT 221), llegando a los siguientes resultados.

CUADRO 3-10
PARÁMETROS (Cuencas con PP < 100 mm)

	Nombre de la cuenca	Elev. media cuenca (msnm)	Área zona 2 (km ²)	Área zona 1(km ²)	Área total (km ²)	P anual promedio		Q _{salida} (l/s)	f2	f1	Q2	P2-1	P1	Q1 (Qcal)
						Q _{pp} (l/s)	(mm)							
15	Río San Pedro de Atacama	4027	1234	158	1391	3725	82	739	0,93	0,41	2995	598	680	1395
16	Canal Cuno hasta Socaire	4727	125	13	138	242	54	165	0,46	0,34	98	238	292	41
17	Río de La Ola (Pedernales)	4026	1111	108	1219	1785	46	629	0,32	0,33	523	153	199	223
18	Río Lamas (Maricunga)	4919	852	204	1056	1677	50	258	0,39	0,32	527	82	132	269
19	Río Jorquera	3799	3994	105	4099	6506	50	725	0,39	0,43	2472	742	792	1131
20	Río Pulido	3569	1886	19	1905	3484	58	1567	0,53	0,82	1825	3029	3087	1523
21	Río Manflas	3566	837	110	946	1705	57	572	0,51	0,34	770	221	278	331
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	3361	3796	182	3978	9135	72	4079	0,76	0,50	6618	1147	1219	3526
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	3709	2510	145	2654	6811	81	3681	0,92	0,53	5908	1285	1366	3306
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	3471	2895	97	2992	6723	71	2325	0,75	0,58	4867	1582	1653	2925
25	Río Carmen hasta San Félix	3632	2621	87	2708	6128	71	2836	0,75	0,58	4406	1597	1668	2659

	z2	z1
m	59	5883
c	27	-1730

FIGURA 3-10
COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (Cuencas con PP < 100 mm)



Nota: f1 ha sido correlacionado con P1 (Cuadro 3-9) y f2 con PP anual

FIGURA 3-11
CAUDALES OBSERVADOS VRS. CAUDALES CALCULADOS
(Cuencas con PP < 100 mm)

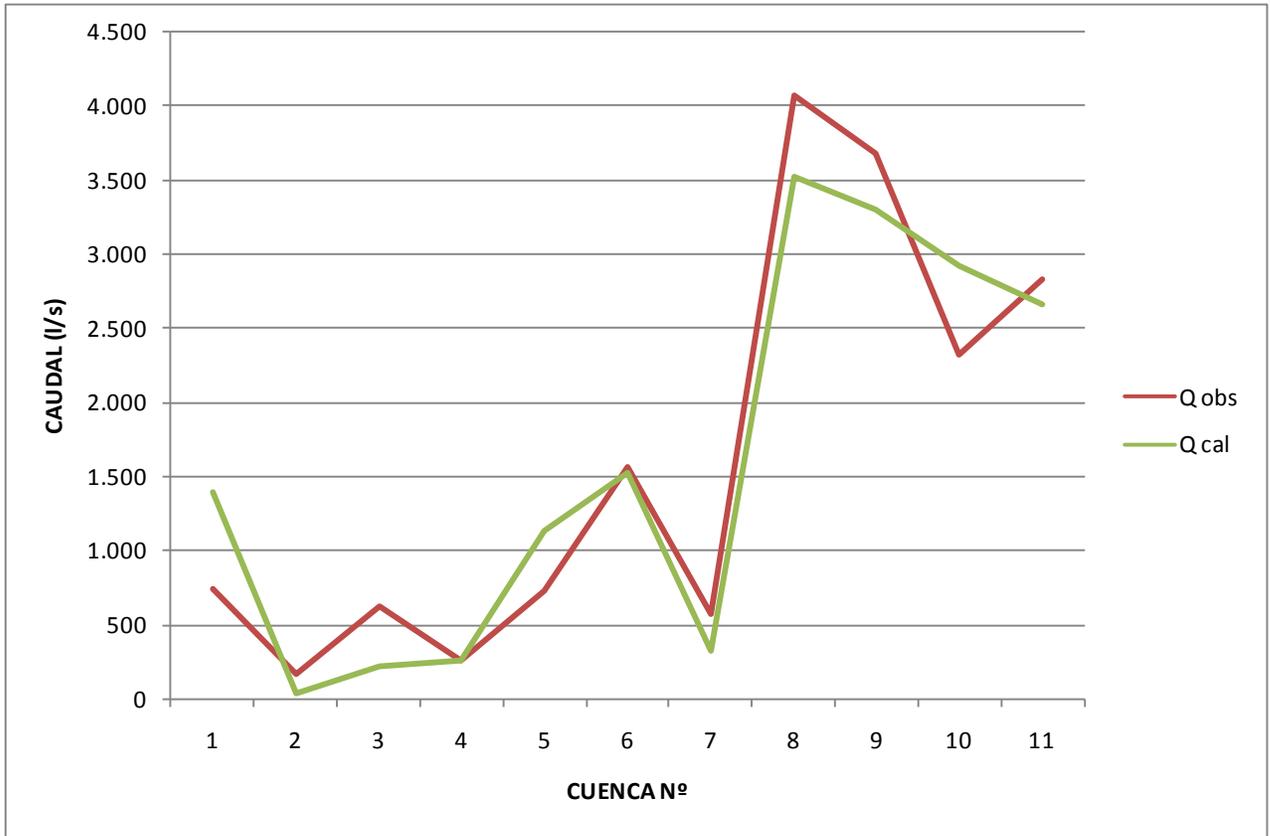
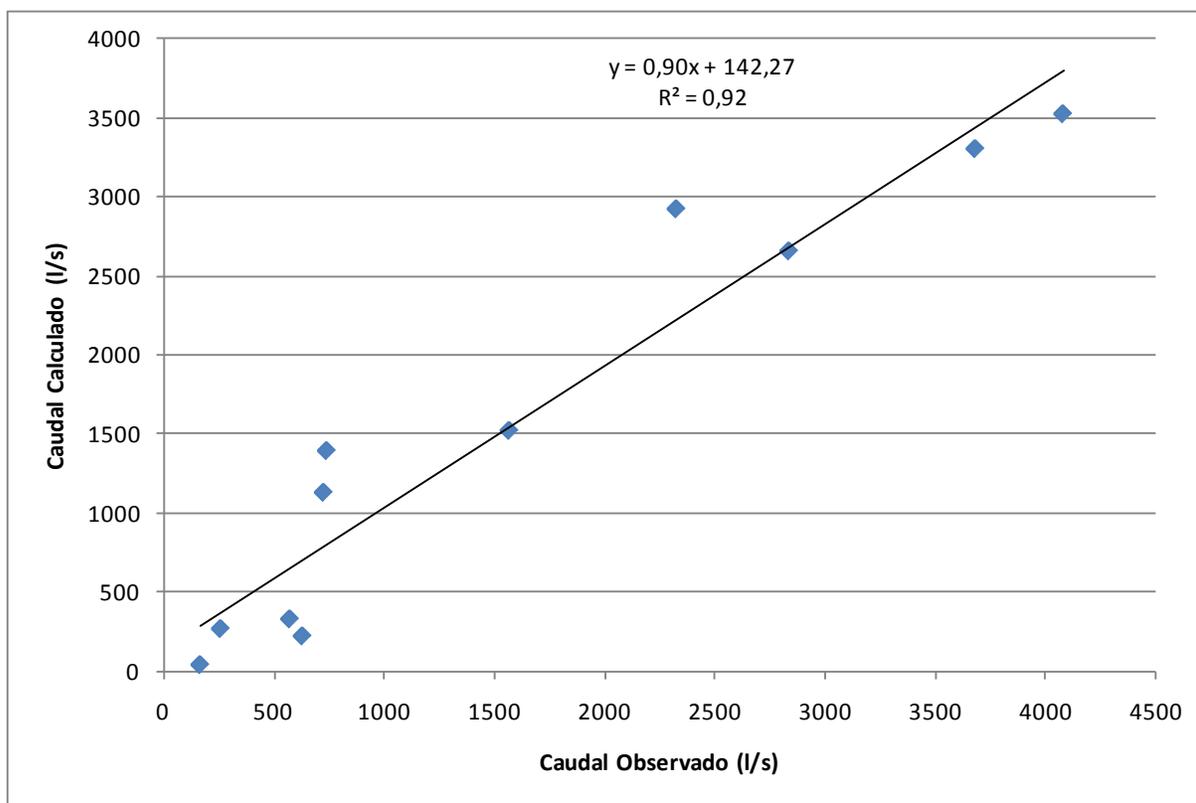


FIGURA 3-12
CORRELACIÓN CAUDALES OBSERVADOS VRS. CAUDALES CALCULADOS
(Cuencas con PP < 100 mm)



En el documento que se analiza se indica que queda pendiente, por falta de antecedentes, un eventual ajuste producto del error derivado al asumir que el flujo subterráneo pasante bajo las estaciones fluviométricas es nulo. Este análisis se lleva a cabo en puntos posteriores, una vez que se realicen los trabajos de terreno, tendientes a determinar los flujos subterráneos en las cuencas donde se aplicará la metodología.

➤ **Determinación de la Recarga Neta**

Se pretende formular una metodología que permita determinar las recargas en cuencas 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 según la relación propuesta en el punto anterior.

Las hipótesis y conceptos hidrológicos base adoptados 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.

En el Cuadro 3-11 se incluyen los caudales promedios mínimos decadales de los meses de Junio, Julio y Agosto, y los caudales de salida de cada una de las 14 cuencas, observados y calculados.

CUADRO 3-11
CAUDALES OBSERVADOS, CALCULADOS Y MÍNIMOS DECADEALES (promedio
meses de Junio, Julio y Agosto)

Cuenca	Caudales (l/s)		
	Observados	Calculados	Mínimos Decadales
1	1921	1783	728
2	371	537	220
3	1097	915	406
4	599	392	224
5	146	105	25
6	517	474	72
7	324	356	125
8	155	147	32
9	129	150	3
10	143	90	76
11	39	35	2
12	512	533	179
13	558	738	316
14	285	169	22

En las siguientes 2 figuras (Figura 3-13 y 3-14) se muestran las correlaciones entre los caudales promedio mínimos decadales y los caudales observados, y lo mismo pero para los caudales calculados, para las 14 cuencas seleccionadas.

FIGURA 3-13
CAUDAL MÍNIMO PROMEDIO DECADAL VRS. CAUDAL OBSERVADO

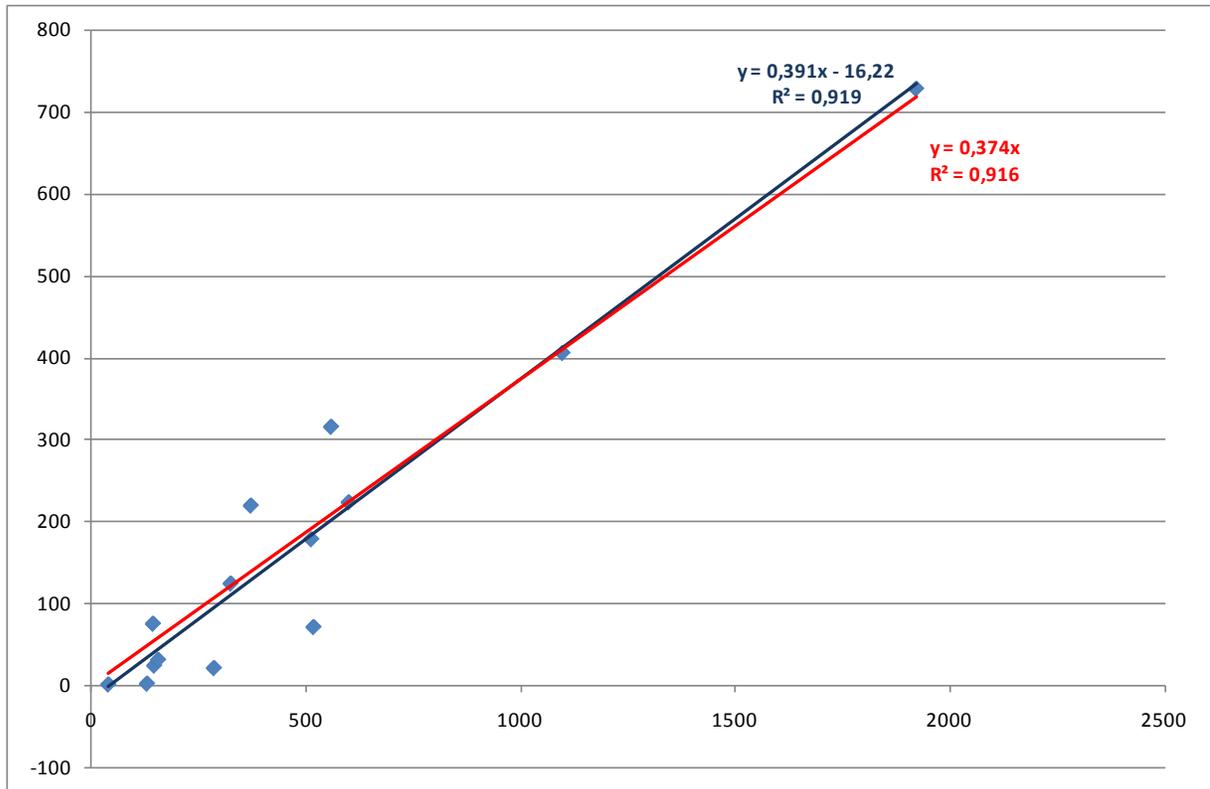
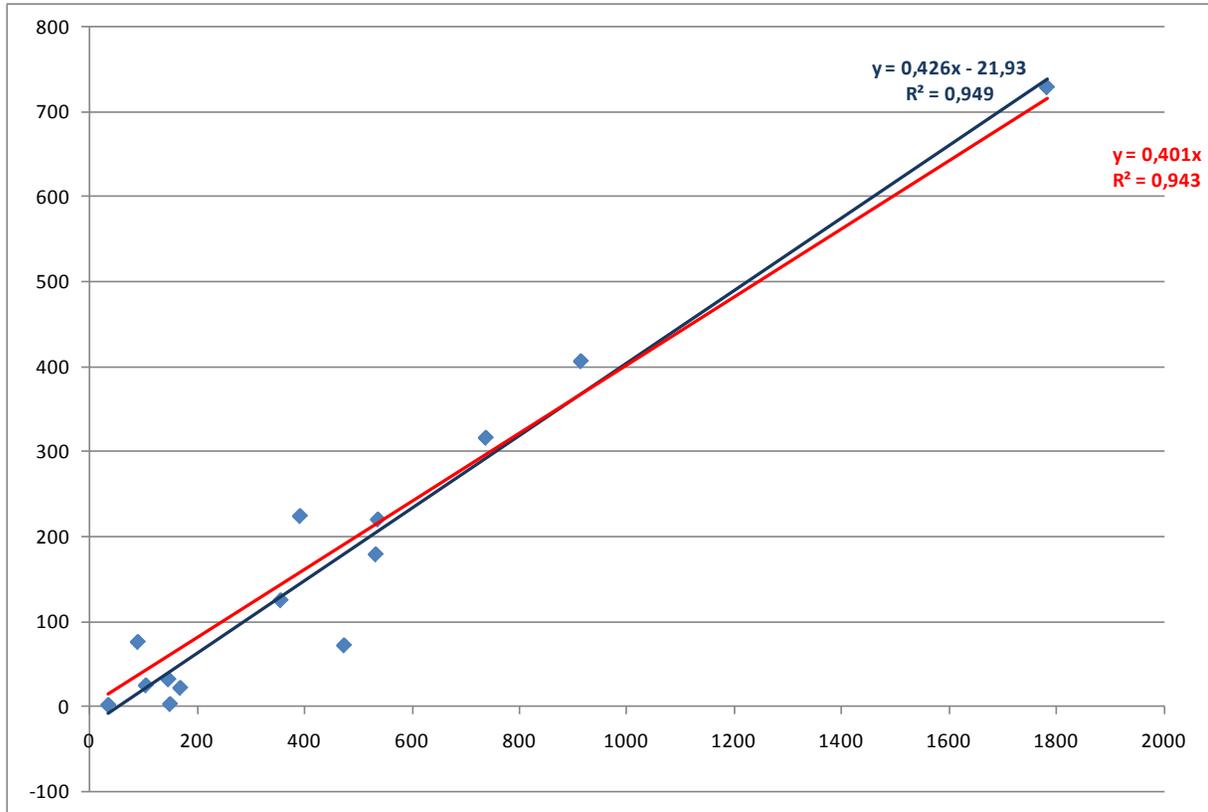


FIGURA 3-14
CAUDAL MÍNIMO PROMEDIO DECADAL VRS. CAUDAL OBSERVADO
(correlación lineal con origen en 0)



De acuerdo con los resultados presentados, se puede asumir, suponiendo que los caudales mínimos decadales promedio de los meses de Junio, Julio y Agosto corresponden efectivamente a la recarga neta en la cuenca de análisis, que esa recarga corresponde entre un 37 % y un 40% de la escorrentía total de salida de una cuenca altiplánica.

➤ **Aplicación**

Existen restricciones que podrían aparecer en la aplicación metodológica en un sector específico con una capacidad de evacuación subterránea no despreciable, y que podrían requerir ajustes conceptuales que no se encuentran resueltos, tales como:

Al asumir que en todas las estaciones fluviométricas seleccionadas no existía un flujo subterráneo pasante significativo, el flujo base de largo plazo debía formar parte del hidrograma de la estación de control fluviométrico. Sin embargo, a lo largo de una

cuenca cualquiera la condición de flujo subterráneo cero no es válida necesariamente, y pueden existir sectores específicos con una gran capacidad de transmisión de caudal subterráneo, permitiendo transitar todo el caudal base y parte de la escorrentía estacional.

Evidentemente, en estos casos se genera un recurso subterráneo adicional al de largo plazo o recarga neta (R_n), que por el momento se definirá como recarga prima (R^+), y que para todos los efectos se considera como recursos de mediano a corto plazo que requerirán de estudios específicos que por el momento escapan al alcance de una evaluación preliminar. Estas cuencas, o mejor dicho, estas secciones de paso, se identifican por presentar escurrimiento superficial sólo en algunos meses del año, así como poseer una formación acuífera consistente con el nivel de caudales involucrados.

- Un caso especialmente interesante es el de cuencas o secciones de paso que no presentan flujo superficial alguno, como por ejemplo, las zonas de orilla en salares o zonas terminales de cuencas altiplánicas endorreicas, específicamente en sectores previos a la manifestación de los afloramientos naturales propios de estos sistemas. En estos casos, la escorrentía total estimada correspondería a la suma de la Recarga neta (R_n) más el flujo subterráneo (R^+).

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

El principal objetivo de este trabajo estuvo enfocado en la estimación de los requerimientos hídricos de los sistemas de humedales en la zona altiplánica chilena, sobre la base de la estimación de las tasas de evapotranspiración y evaporación en zonas de vegas y bofedales, teniendo como objetivos específicos una caracterización hidrobiológica de las formaciones vegetacionales, caracterización del régimen hidrológico de la zona de estudio, caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas que alimentan estos humedales y estimación de evaporación desde superficies libres en torno a estos humedales.

El estudio estuvo focalizado en el Bofedal de Isluga y Bofedal de Chungará, cuya ubicación se aprecia en la Figura 3-15. En dichos sitios se realizaron trabajos de terreno que incluyeron mediciones de caudal, muestreos de calidad de agua, análisis isotópicos de Deuterio y Oxígeno-18 y caracterización vegetal

FIGURA 3-15
UBICACIÓN DE BOFEDALES ESTUDIADOS



- DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

El cálculo de la Evapotranspiración se aplicó a un sector del Bofedal de Isluga donde se presentaron las mejores características para establecer un balance hídrico, esto es, hidrogeológicamente cerrado, elección que se basó en aforos y análisis fisicoquímicos e isotópicos (Deuterio y Oxígeno-18).

El subsector considerado, se extendió en el tramo que se desarrolla entre los puntos de muestreo Islu-4 e Islu-7 (ver Figura 4 del informe en análisis).

Se estimó la evapotranspiración de referencia mensual a partir de los métodos de evaporímetro de bandeja y Penman-Monteith. Para el primer caso se consideró la evaporación de bandeja media mensual histórica de las estaciones meteorológicas DGA Caquena, Collacagua y Chungará-Ajata, consideradas representativas de la zona de estudio. Para el coeficiente de bandeja K_p se adoptó el valor de 0,75 en base a los valores sugeridos por la literatura.

En las campañas de terreno y sobre la base de la caracterización de los grupos vegetacionales que componen el bofedal, se identificaron Unidades a las que se les asignó un valor de K_c . Los valores considerados se señalan en el Cuadro 3-12; en dicho cuadro se incluyen las áreas asociadas a cada cobertura vegetal en el subsector que va desde Islu-4 a Islu-7.

**CUADRO 3-12
VALORES DE K_c SEGÚN UNIDAD VEGETACIONAL. AREAS DE CADA
COBERTURA ENTRE ISLU-4 E ISLU-7**

Unidad vegetacional	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Area (km ²)
Cojines	1,00	1,00	1,00	1,00	2,467
Transición 1	0,83	0,80	0,78	0,80	1,211
Vega 1	0,76	0,69	0,58	0,69	-
Transición 2	0,60	0,52	0,35	0,52	0,768
Vega 2	0,50	0,42	0,24	0,42	0,842
Afloramiento salino	0,50	0,30	0,30	0,30	0,225
Lagunas	1,15	1,15	1,15	1,15	0,278
				Total Area:	5,791

Los resultados de la evapotranspiración de referencia para los días de las campañas de terreno se incluyen en el Cuadro 3-13.

CUADRO 3-13

Evapotranspiración de referencia en las fechas de las campañas de terreno

Fecha	Bandeja	Penman-Monteith	Promedio
	mm/día		
8-Ago-98	4,50	5,07	4,79
24-Ene-99	5,48	6,60	6,04
9-Sep-99	4,50	5,13	4,82

La evapotranspiración en el tramo del mayor ensanchamiento del bofedal de Isluga (entre ISL-4 e ISL-7) expresada en mm/día y l/s se presenta en el Cuadro 3-14. Los valores indicados se adoptaron considerando el día específico. En el mismo cuadro se incluye la diferencia entre aforos puntuales realizados en la entrada y salida superficial del tramo.

CUADRO 3-14

EVAPOTRANSPIRACIÓN Y CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA EN ENSANCHAMIENTO DE BOFEDAL ISLUGA

Fecha	Evapotranspiración			QE	QS	QE-QS
	mm/día	l/s	l/s/ha	l/s		
8-Ago-98	4,79	231	0,40	327	240	87
24-Ene-99	6,04	335	0,58	388	88	300
9-Sep-99	4,82	240	0,41	371	165	206

QE = Caudal de entrada. Corresponde a aforo instantáneo en ISL-4

QS = Caudal de salida. Corresponde a aforo instantáneo en ISL-7

Al analizar estos resultados se aprecia que para dos de las tres campañas las diferencias entre los caudales entrantes y salientes son similares a la evapotranspiración calculada (300 l/s v/s 335 l/, y 206 l/s v/s 240 l/s).

La excepción lo constituyen los valores correspondientes al mes de Agosto de 2008, donde la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida es 2,7 veces menor a la Evapotranspiración calculada. Lo anterior sucede debido a que en la época de invierno los bofedales entran en una situación que se podría denominar "hibernación", bajando significativamente el consumo de agua. En ese sentido, cuando se desee evaluar la evapotranspiración de bofedales en épocas de invierno, los coeficientes de evapotranspiración debieran ser corregidos; en este caso en particular, el valor de la evapotranspiración que se obtenga, se debiera multiplicar por un factor aproximado a 0,4; lo anterior debe ser corroborado con análisis de balances que se hagan en otros bofedales, y corridas de aforos en épocas de invierno.

No obstante lo anterior, los caudales correspondientes a los aforos son caudales instantáneos. Por lo anterior, es posible decir que esta primera aproximación no está tan lejana a la realidad y que los aportes y salidas de agua subterránea, en este tramo, son escasos o nulos. Ello se pudo corroborar además a partir de los análisis isotópicos de Deuterio y Oxígeno-18 en dicho bofedal, de los cuales se concluyó que en este tramo no hay aportes subterráneos, por lo que las diferencias de caudal entre la entrada y la salida se deberían principalmente a la evapotranspiración.

A partir de registros históricos de la estación de Collacagua, la evaporación de bandeja máxima es de 11 mm/día; según esto, la tasa máxima de evapotranspiración en la totalidad de este ensanchamiento del bofedal sería de unos 0.8 l/s/ha en el que los cojines tendrían 0.96 l/s/ha.

Las principales conclusiones que se obtuvieron de este trabajo fueron las siguientes:

- Los resultados obtenidos forman parte de un trabajo de mayor alcance que se orienta a generar información que permita conocer los procesos hídricos e hidrobiológicos que intervienen en humedales de altura localizados en el altiplano chileno.
- Respecto a la parte fisicoquímica, a partir de los análisis fisicoquímicos de Isluga como de Chungará, se concluyó que los flujos subterráneos incrementan su salinidad en el sentido del escurrimiento. Este aumento de concentración de sales tiene tres fuentes principales: la propia evaporación que concentra las sales de las aguas de aporte, la redisolución de sales depositadas superficialmente durante el estiaje, y los procesos de meteorización por el ácido carbónico que se ven incrementados por la descomposición de materia orgánica.
- El espesor de la columna de sedimentos bajo un bofedal, la cobertura vegetacional y la extensión de una formación de vegas o de bofedal, lo establece fundamentalmente las condiciones geomorfológicas locales (pendiente del cauce, permeabilidad de las formaciones adyacentes, singularidades hidrogeológicas, litología de las cuencas de aporte, etc.) y el régimen hídrico a que está sujeto (caudal base, caudal de crecidas). El tema calidad de agua está subordinada a las condicionantes anteriores. Sin perjuicio de lo anterior, la calidad de agua tiene un rol de primera importancia en lo relativo a la composición biológica asociada a estos sistemas.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible estimar preliminarmente la demanda evapotranspirativa máxima como un valor de 0,8 l/s/ha. Ésta fue calculada a partir de un valor máximo de evaporación de bandeja en la Estación Collacagua que resultó 11 mm/día.

- Con relación a las unidades vegetacionales básicas definidas en el estudio, se obtuvo un valor máximo de 0,96 l/s/ha para cojines y de 0,55 l/s/ha para vegas.
- Los valores de evapotranspiración obtenidos teóricamente fueron estimados a partir de coeficientes de cultivos (K_c) de especies vegetales sometidas a similares condiciones hídricas, por lo que se sugiere corroborar los valores obtenidos con mediciones directas de evapotranspiración en terreno. Para ello, se propone instalar equipos diseñados para tal efecto, como por ejemplo lisímetros, en las distintas unidades vegetacionales.
- Como recomendación, se propuso seleccionar un lugar de estudio donde poder implementar un seguimiento continuo mediante la instrumentalización y monitoreo. En este sector se aplicarían diversos escenarios a un sistema de Bofedales, ya sea stress hídrico y cambios en la calidad del agua de aporte, todo esto tendiente a establecer reglas o criterios para protección y/o mitigación de Bofedales Altiplánicos.
- Es importante destacar que los valores de evapotranspiración que se utilicen en la época de invierno debieran corregirse por un factor menor a la unidad, debido a que estos sistemas, durante dicha época, entran en una situación que podría denominarse “hibernación”, razón por la cual el consumo de agua es mucho menor al teórico que se calcula.

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, 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:

- d) Los caudales medidos a la salida de las cuencas representarían la escorrentía total, por lo tanto los flujos subterráneos pasantes serían despreciables.
- e) 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.
- f) 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 dichos caudales mínimos decadales para las cuencas 15 a 25 (estudio SIT 221), mientras que en el Cuadro 4.1-2 se muestran los caudales observados y los mínimos decadales de dichas cuencas.

**CUADRO 4.1-1
CAUDALES MÍNIMOS DECADALES CUENCAS 15 A 25 (m3/s)**

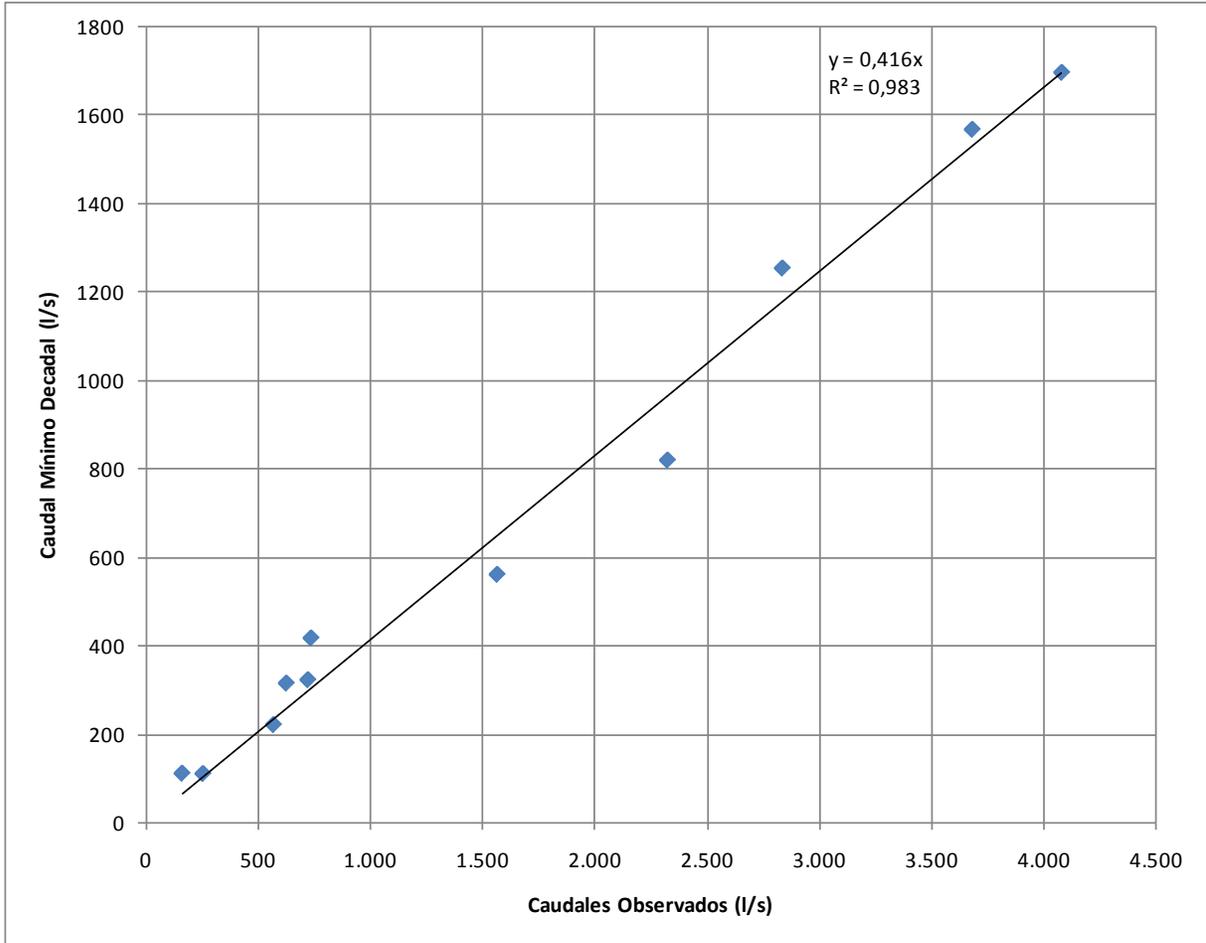
AÑO	Cuenca 15	Cuenca 16	Cuenca 17	Cuenca 18	Cuenca 19	Cuenca 20	Cuenca 21	Cuenca 22	Cuenca 23	Cuenca 24	Cuenca 25
1970	0,9	0,2	0,6	0,2	0,2	0,4	0,1	0,6	0,6	0,3	0,1
1971	0,8	0,2	0,5	0,2	0,1	0,4	0,1	0,5	0,6	0,2	0,1
1972	0,3	0,2	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	1,3	1,3	0,6	0,8
1973	0,9	0,2	0,6	0,3	1,0	1,1	0,6	3,4	3,1	2,3	2,2
1974	0,6	0,2	0,4	0,2	0,4	0,7	0,2	1,7	1,1	0,8	0,5
1975	0,4	0,1	0,5	0,2	0,4	0,8	0,2	1,1	0,8	0,7	0,5
1976	0,8	0,2	0,5	0,2	0,4	0,6	0,2	1,0	0,8	0,5	0,4
1977	0,5	0,2	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	1,6	1,3	0,7	0,7
1978	0,8	0,2	0,6	0,2	0,3	0,6	0,2	2,2	1,8	1,5	1,1
1979	0,8	0,3	0,5	0,2	0,2	0,5	0,1	1,4	1,5	1,1	1,1
1980	0,8	0,2	0,5	0,0	0,4	0,6	0,4	2,6	2,2	2,0	1,7
1981	0,8	0,2	0,5	0,1	0,8	1,5	0,5	3,5	3,1	2,5	2,0
1982	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,8	0,3	2,7	2,5	1,7	1,5
1983	0,8	0,1	0,4	0,2	0,6	1,9	0,6	3,8	4,0	2,3	2,1
1984	0,7	0,2	0,5	0,4	1,0	2,3	0,6	5,6	4,9	2,7	2,3
1985	0,8	0,2	0,6	0,3	1,1	1,6	0,9	5,8	3,2	3,0	2,9
1986	0,8	0,2	0,6	0,2	0,9	1,4	0,4	3,1	2,9	1,8	1,6
1987	0,8	0,2	0,4	0,2	0,6	1,6	0,6	4,2	3,4	2,6	2,3
1988	0,8	0,1	0,4	0,2	2,4	2,5	1,0	6,1	4,1	4,0	2,8
1989	0,8	0,2	0,5	0,2	1,3	1,3	0,5	3,5	2,9	2,1	4,6
1990	0,7	0,1	0,2	0,2	1,2	0,8	0,3	2,1	2,4	1,3	2,2
1991	0,6	0,1	0,3	0,2	0,6	1,0	0,3	2,0	2,3	1,5	2,3
1992	0,7	0,2	0,4	0,2	0,7	1,2	0,7	3,4	3,2	2,3	2,8
1993	0,7	0,4	0,7	0,2	1,1	1,4	0,6	3,8	3,6	2,2	3,8
1994	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,7	0,2	1,8	2,0	1,5	3,4
1995	0,6	0,1	0,4	0,2	0,3	0,6	0,2	1,8	1,6	1,3	3,1
1996	0,6	0,2	0,5	0,2	0,4	0,5	0,2	1,5	1,3	1,4	1,5
1997	0,7	0,1	0,6	0,2	0,5	1,1	0,5	3,5	2,4	2,0	3,9
1998	0,6	0,1	0,1	0,2	1,2	1,9	2,0	6,8	6,3	5,0	4,7
1999	0,6	0,2	0,5	0,2	0,9	1,0	0,5	3,3	3,1	1,9	4,3
2000	0,6	0,1	0,5	0,1	0,6	1,0	0,3	3,8	3,5	1,9	6,0
2001	0,6	0,1	0,6	0,3	0,5	1,3	0,5	4,1	2,5	0,2	3,5
2002	0,8	0,2	0,6	0,3	0,8	1,4	0,5	4,2	3,5	0,1	3,6
2003	0,7	0,1	0,6	0,3	1,1	1,5	0,7	4,0	4,8	0,3	4,4
2004	0,7	0,1	0,6	0,3	1,0	1,1	0,3	2,8	2,4	0,1	2,9
2005	0,6	0,2	0,6	0,3	0,7	0,8	0,4	2,3	2,3	0,2	4,8
2006	0,6	0,2	0,6	0,3	0,6	1,0	0,3	2,6	2,2	0,1	2,2
2007	0,6	0,2	0,6	0,3	0,4	0,8	0,2	2,2	2,4	0,3	2,5
2008	0,4	0,2	0,5	0,2	0,9	1,0	0,4	2,9	3,0	0,2	2,0
	Cuenca 15	Cuenca 16	Cuenca 17	Cuenca 18	Cuenca 19	Cuenca 20	Cuenca 21	Cuenca 22	Cuenca 23	Cuenca 24	Cuenca 25
Min 1	0,3	0,1	0,4	0,2	0,1	0,4	0,1	0,5	0,6	0,2	0,1
Min 2	0,4	0,1	0,4	0,0	0,4	0,6	0,3	2,6	2,2	1,7	1,5
Min 3	0,6	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,2	1,5	1,3	1,3	1,5
Min 4	0,4	0,1	0,5	0,1	0,4	0,8	0,2	2,2	2,2	0,1	2,0
Prom	0,4	0,1	0,3	0,1	0,3	0,6	0,2	1,7	1,6	0,8	1,3
Prom (l/s)	418	111	316	111	323	562	222	1.699	1.570	821	1.255

**CUADRO 4.1-2
CAUDALES MÍNIMOS PROMEDIO DECADAL Y CAUDALES OBSERVADOS
CUENCAS 15 A 25**

	Cuenca	UTM		Altura Media (msnm)	Caudal	Mínimo Decadal
		NORTE	ESTE		Salida Obs. (l/s)	Promedio (l/s)
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	1.699
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	6.797.681	404.827	3.709	3.681	1.570
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	1.255

En la Figura 4.1-1 se muestra la correlación entre los caudales observados (y rellenados en estudio SIT 221) y los caudales mínimos decadales de las cuencas 15 a 25.

FIGURA 4.1-1
CORRELACIÓN DE CAUDALES OBSERVADOS
Y MÍNIMOS DECADALES PROMEDIO, CUENCAS 15 A 25



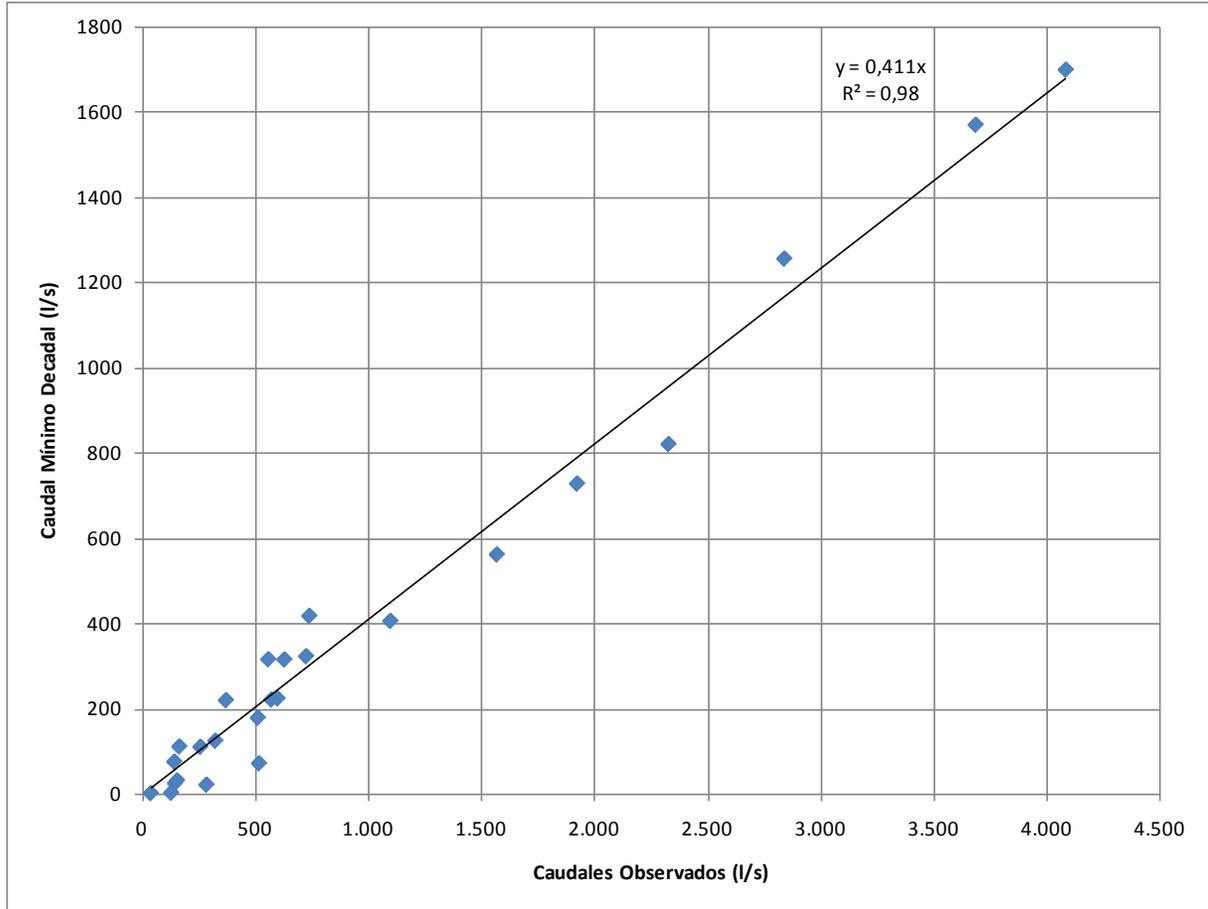
De la figura anterior se observa una buena correlación lineal entre los caudales observados y los mínimos decadales de las cuencas 15 a 25.

En el Cuadro 4.1-3 se incluyen los caudales observados y mínimos decadales de las 25 cuencas estudiadas en el estudio de SIT 221, mientras que en la Figura 4.1-2 se muestra la correlación lineal que existe entre ambos.

CUADRO 4.1-3
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 Sbaya	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 Píga 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 4.1-2
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.

En definitiva, los caudales mínimos decadales promedio tienen una buena correlación con los caudales observados (o caudales totales suponiendo que el caudal subterráneo es despreciable).

4.2. RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA

4.2.1. Introducción

En el estudio SIT 221 (GCF, 2010), dentro de las labores que se hicieron, se llevó a cabo un completo estudio hidrológico (precipitaciones y caudales). Con relación al cálculo de las precipitaciones medias anuales y mensuales por cuenca, a continuación se resume el procedimiento:

- Para estimar las precipitaciones anuales promedio asociadas a la superficie de cada cuenca, se utiliza el programa ArcGis 9.2 de Esri, donde, con la herramienta "Topo to Raster" se genera un raster o manto de precipitaciones anuales promedio, esto mediante la interpolación de los valores puntuales de precipitación anual, que se tienen de cada una de las estaciones pluviométricas escogidas y rellenadas con anterioridad. Luego, utilizando la herramienta "Zonal Statistics" del conjunto "Spatial Analyst" de ArcGis, se obtiene el valor representativo de la precipitación anual promedio de cada cuenca. Con esta herramienta, es factible obtener el promedio de las precipitaciones de interés al considerar los valores de cada celda del raster que se encuentre dentro de una cuenca específica. Es decir, se intercepta el manto de precipitaciones, con cada una de las cuencas y se promedia el valor de precipitación de cada celda del raster, que está contenida dentro de cada cuenca. Para la determinación de las precipitaciones mensuales representativas de cada cuenca, se interpola un valor de lluvia proporcional a las precipitaciones de las 8 estaciones j más cercanas al centro de gravedad de cada cuenca. El peso de cada estación es el promedio ponderado α_{ij} , el cual se determinan función del inverso de las distancias al cuadrado entre las respectivas estaciones y los centros de gravedad de las cuencas.

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.

4.2.2. 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); es importante destacar que las precipitaciones que se incluyen en el Cuadro 4.2-1 son levemente distintas a las del estudio señalado, debido a que en algunas quebradas había ciertas incongruencias pues la suma de las mensuales no coincidía con la anual. Así, en el presente trabajo se hizo la corrección correspondiente.

**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	287,3
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	303,2
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	379,9
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	124,6
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	138,3
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	106,6
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	186,4
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	128,9
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	132,1
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	142,4
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	124,6
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	114,1
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	75,9
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	133,1
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	79,9
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	53,5
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	46,1
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	49,6
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	50,1
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	55,6
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	53,6
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	70,6
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	78,4
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	70,0
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	70,7

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.

El trazado de las líneas de isoprecipitación o isoyetas se realizó a través de la interpolación espacial de las precipitaciones medias anuales para el año hidrológico, luego de realizar el relleno de los datos faltantes. Inicialmente se trazaron isoyetas utilizando el programa Surfer V7.0 (1999, Golden Software), las que fueron luego corregidas en base a la topografía y a los gradientes de la precipitación con la altura.

Estas isoyetas fueron contrastadas con los valores de precipitación media anual de las estaciones generadas en ese estudio, corrigiéndolas cuando ello fue necesario.

Se determinan los mantos de precipitaciones anuales promedio a partir de las isoyetas, para luego obtener las correspondientes lluvias medias mensuales asociadas a cada una de las cuencas; mayores detalles del procedimiento específico se pueden consultar en el estudio SIT 157.

Los valores de las precipitaciones medias mensuales y medias anuales por cuenca se incluyen en el Cuadro 4.2-2 siguiente.

CUADRO 4.2-2
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES Y ANUALES
A PARTIR DE LAS ISOYETAS DEL ESTUDIO DE LA PUC

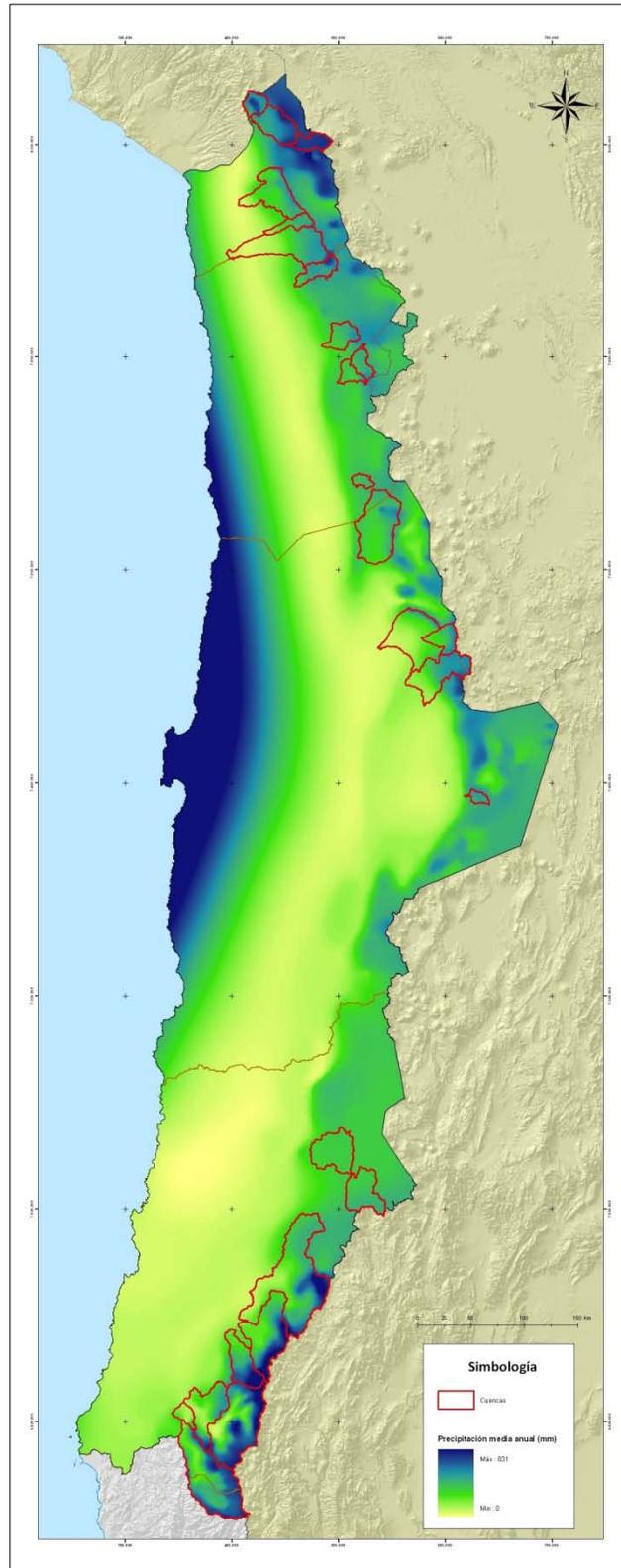
	CUENCA	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1	Río Lluta Alto	96,0	79,8	53,2	5,8	1,1	2,4	2,7	4,3	1,2	3,4	5,3	27,5	282,8
2	Río Lluta bajo Río Azufre	96,9	77,7	56,1	6,8	1,2	2,2	3,9	2,8	1,0	3,4	6,5	34,7	293,3
3	Río Caquena	115,0	97,0	70,7	10,7	1,2	2,2	5,7	6,9	1,5	4,6	11,2	42,8	369,4
4	Río San José alto	46,4	39,7	21,9	0,6	0,2	0,9	1,0	2,1	0,8	0,9	0,9	12,5	127,9
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	49,3	43,1	25,4	2,0	0,2	0,7	1,4	2,2	1,1	0,9	1,9	14,2	142,4
6	Río Camarones hasta Conanoxa	33,9	38,6	19,3	1,4	0,2	0,2	1,3	1,9	0,9	0,5	0,6	6,7	105,5
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	62,7	71,4	23,2	4,4	2,6	1,0	4,0	1,6	3,2	1,3	0,8	13,0	189,2
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	56,3	55,9	25,9	1,6	2,1	0,8	1,0	3,3	1,2	0,6	1,2	8,3	158,2
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	53,4	42,1	23,1	1,9	0,4	1,0	0,7	1,9	0,9	1,2	2,6	10,9	140,0
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	52,9	41,3	22,7	2,0	0,3	0,8	0,7	1,7	0,9	1,0	2,5	11,0	137,8
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	48,4	41,3	15,3	1,3	1,8	4,7	1,5	1,3	1,5	1,3	1,4	9,3	129,0
12	Río Loa hasta Lequena	52,5	54,2	23,4	0,8	2,4	3,1	1,0	2,3	1,4	1,0	1,6	8,8	152,5
13	Río Salado	29,1	29,7	17,1	2,6	0,9	3,2	0,2	4,6	1,6	0,4	0,2	4,5	94,1
14	Río Salado hasta Curti	54,2	62,3	32,5	1,1	2,3	2,8	0,6	2,1	2,4	0,7	0,7	7,6	169,4
15	Río San Pedro de Atacama	47,4	50,7	31,6	1,2	2,5	5,8	1,1	2,5	2,0	0,7	0,6	5,2	151,2
16	Canal Cuno hasta Socaire	63,9	55,5	37,5	5,4	15,0	13,3	1,6	6,2	4,0	0,9	1,2	3,4	208,1
17	Río de La Ola (Pedernales)	0,1	3,5	8,0	5,5	16,1	26,5	53,9	16,8	6,0	1,4	0,1	0,3	138,2
18	Río Lamas (Maricunga)	0,2	4,0	10,3	8,1	22,7	38,4	53,4	23,6	7,6	2,2	0,1	0,6	171,2
19	Río Jorquera	0,4	2,4	6,8	7,7	18,6	31,8	25,1	19,9	5,5	2,1	0,2	0,7	121,1
20	Río Pulido	0,3	0,9	5,1	7,9	23,1	33,9	26,7	19,7	3,8	1,4	0,1	0,6	123,6
21	Río Manflas	0,3	0,4	4,2	7,4	21,6	35,2	30,3	22,0	2,9	1,2	0,1	0,4	126,1
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	0,3	0,2	3,0	8,0	18,4	35,1	33,7	23,3	2,3	1,3	0,2	0,3	126,0
23	Río Transito hasta Angostura de Pinte	0,3	0,3	3,5	8,9	21,1	40,6	38,6	26,5	2,6	1,4	0,2	0,3	144,5
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	0,4	0,2	2,6	6,3	19,8	39,6	32,9	22,1	2,7	1,0	0,3	0,2	128,2
25	Río Carmen hasta San Félix	0,4	0,2	2,8	6,7	20,7	41,2	34,9	23,6	2,8	1,1	0,3	0,2	135,0

b) Isoyetas Balance Hídrico

El mismo proceso anterior se hizo pero tomando como información las isoyetas del Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987).

El manto de precipitaciones medias anuales generadas a partir de las isoyetas del Balance Hídrico se muestra en la Figura 4.2-1, mientras que los valores de las precipitaciones medias mensuales y medias anuales por cuenca se incluyen en el Cuadro 4.2-3 siguiente.

FIGURA 4.2-1
MANTO DE PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES



**CUADRO 4.2-3
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES Y ANUALES
A PARTIR DE LAS ISOYETAS DEL BALANCE HÍDRICO**

	CUENCA	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1	Río Lluta Alto	89,5	74,4	49,6	5,4	1,0	2,2	2,5	4,0	1,1	3,2	5,0	25,6	263,6
2	Río Lluta bajo Río Azufre	85,7	68,7	49,6	6,1	1,0	2,0	3,4	2,5	0,9	3,0	5,8	30,7	259,2
3	Río Caquena	106,2	89,5	65,3	9,9	1,1	2,0	5,3	6,3	1,4	4,2	10,4	39,5	341,2
4	Río San José alto	53,9	46,0	25,4	0,7	0,2	1,1	1,2	2,4	0,9	1,1	1,0	14,5	148,3
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	56,0	48,9	28,9	2,2	0,2	0,8	1,6	2,5	1,2	1,1	2,1	16,1	161,6
6	Río Camarones hasta Conanoxa	40,6	46,2	23,1	1,7	0,3	0,2	1,5	2,2	1,1	0,6	0,7	8,0	126,2
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	76,2	86,8	28,2	5,4	3,1	1,2	4,8	2,0	3,9	1,6	1,0	15,8	230,0
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	63,2	62,9	29,1	1,8	2,4	0,9	1,1	3,7	1,3	0,7	1,4	9,3	177,8
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	70,8	55,7	30,6	2,5	0,5	1,3	1,0	2,5	1,2	1,5	3,4	14,4	185,5
10	Río Piga hasta Collacagua (Husco)	77,9	60,8	33,4	2,9	0,4	1,2	1,0	2,5	1,3	1,5	3,7	16,3	202,9
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	67,0	57,1	21,2	1,8	2,5	6,5	2,1	1,7	2,1	1,8	1,9	12,9	178,7
12	Río Loa hasta Lequena	56,5	58,3	25,2	0,9	2,5	3,3	1,1	2,5	1,5	1,1	1,7	9,5	164,1
13	Río Salado	34,1	34,9	20,1	3,1	1,0	3,7	0,3	5,4	1,8	0,5	0,2	5,2	110,3
14	Río Salado hasta Curti	57,7	66,3	34,6	1,2	2,5	3,0	0,7	2,3	2,5	0,7	0,8	8,1	180,3
15	Río San Pedro de Atacama	52,6	56,3	35,1	1,3	2,8	6,5	1,2	2,8	2,2	0,7	0,6	5,7	167,9
16	Canal Cuno hasta Socaire	67,5	58,7	39,6	5,7	15,8	14,1	1,7	6,6	4,3	0,9	1,3	3,6	219,7
17	Río de La Ola (Pedernales)	0,1	3,7	8,7	5,9	17,4	28,6	58,2	18,1	6,5	1,5	0,1	0,4	149,1
18	Río Lamas (Maricunga)	0,2	4,2	10,6	8,4	23,4	39,6	55,0	24,3	7,9	2,2	0,1	0,6	176,3
19	Río Jorquera	0,6	3,4	9,9	11,1	26,9	46,1	36,3	28,7	7,9	3,1	0,3	0,9	175,2
20	Río Pulido	0,6	1,6	9,3	14,4	42,0	61,7	48,5	35,8	6,9	2,6	0,2	1,0	224,6
21	Río Manflas	0,6	0,9	8,5	15,1	43,9	71,7	61,7	44,8	5,9	2,5	0,3	0,9	256,8
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	0,5	0,4	5,2	13,8	31,5	60,1	57,8	39,9	3,9	2,2	0,3	0,5	216,0
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	0,6	0,4	6,0	15,4	36,5	70,0	66,7	45,8	4,5	2,4	0,4	0,6	249,3
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	0,6	0,4	4,4	10,6	33,1	66,3	55,2	37,0	4,5	1,7	0,5	0,3	214,8
25	Río Carmen hasta San Félix	0,6	0,4	4,8	11,5	35,2	70,2	59,5	40,2	4,7	1,8	0,5	0,4	229,9

En el Plano 2 se muestran las isoyetas del estudio de la PUC (2008) y las del Balance Hídrico de Chile.

Finalmente, en el Cuadro 4.2-4 se muestra una comparación de las precipitaciones medias anuales calculadas según las 3 fuentes anteriores.

CUADRO 4.2-4
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, 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.

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.

4.2.3. Análisis Relaciones Precipitación - Escorrentía

Las relaciones que la DGA había planteado para el cálculo de la escorrentía total a la salida de una cuenca sin control fluviométrico, estuvieron basadas en las precipitaciones medias anuales por cuenca del estudio SIT N° 221, las cuales, tal como fuera señalado, no están correctas pues no toman en cuenta el aumento de la precipitación con la altura.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la relación Precipitación – Escorrentía, para las 25 cuencas, usando la relación que considera sólo el área total de la cuenca y su precipitación media anual.

Bajo el mismo concepto anterior, es factible además trabajar 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.

➤ RELACIÓN UTILIZADA

$f_{\text{real}} = Q_{\text{obs}} / (P_{\text{anual}} \times \text{Área})$

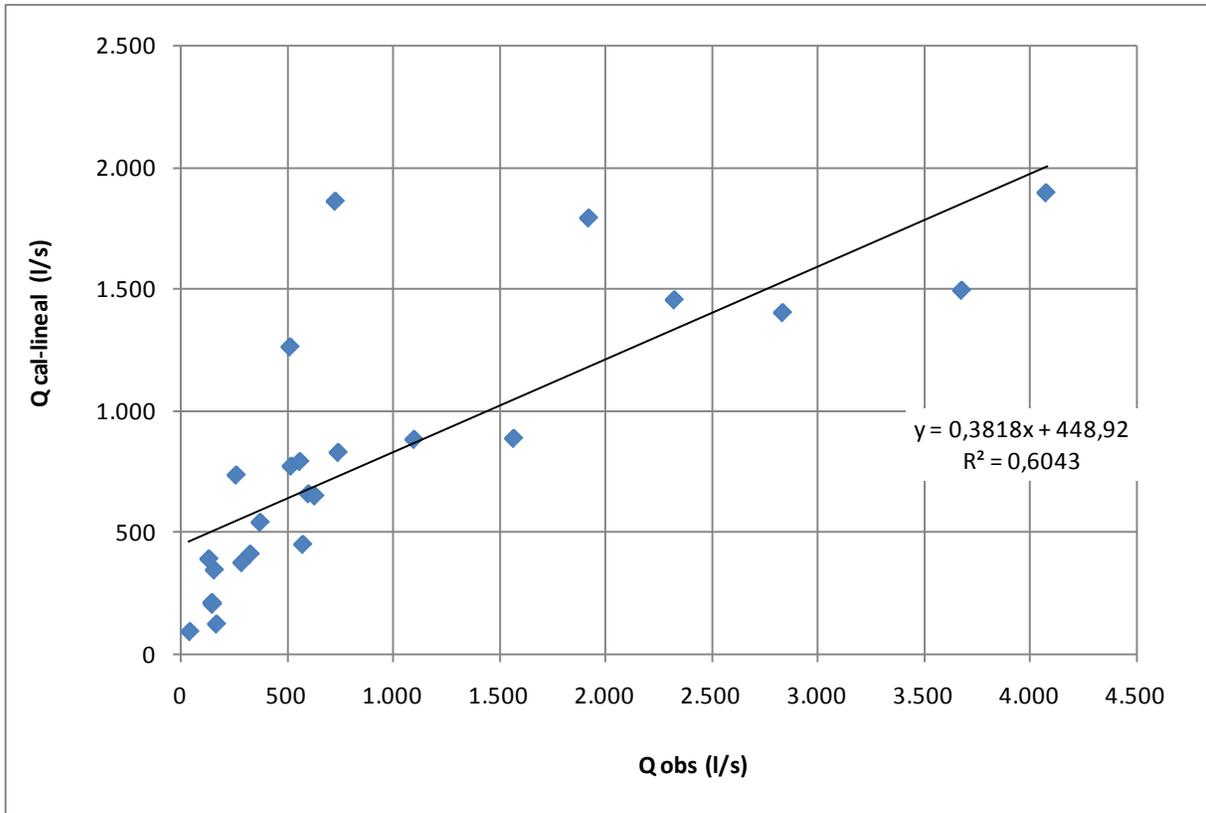
$f_{\text{lineal}} = f_{\text{correlacionado}} \text{ linealmente con } P_{\text{anual}} = m \times f_{\text{real}} + c$

$Q_{\text{cal-lineal}} = \text{Caudal total estimado} = f_{\text{lineal}} \times P_{\text{anual}} \times \text{Área}$

a) Resultados Usando Isoyetas del Estudio PUC

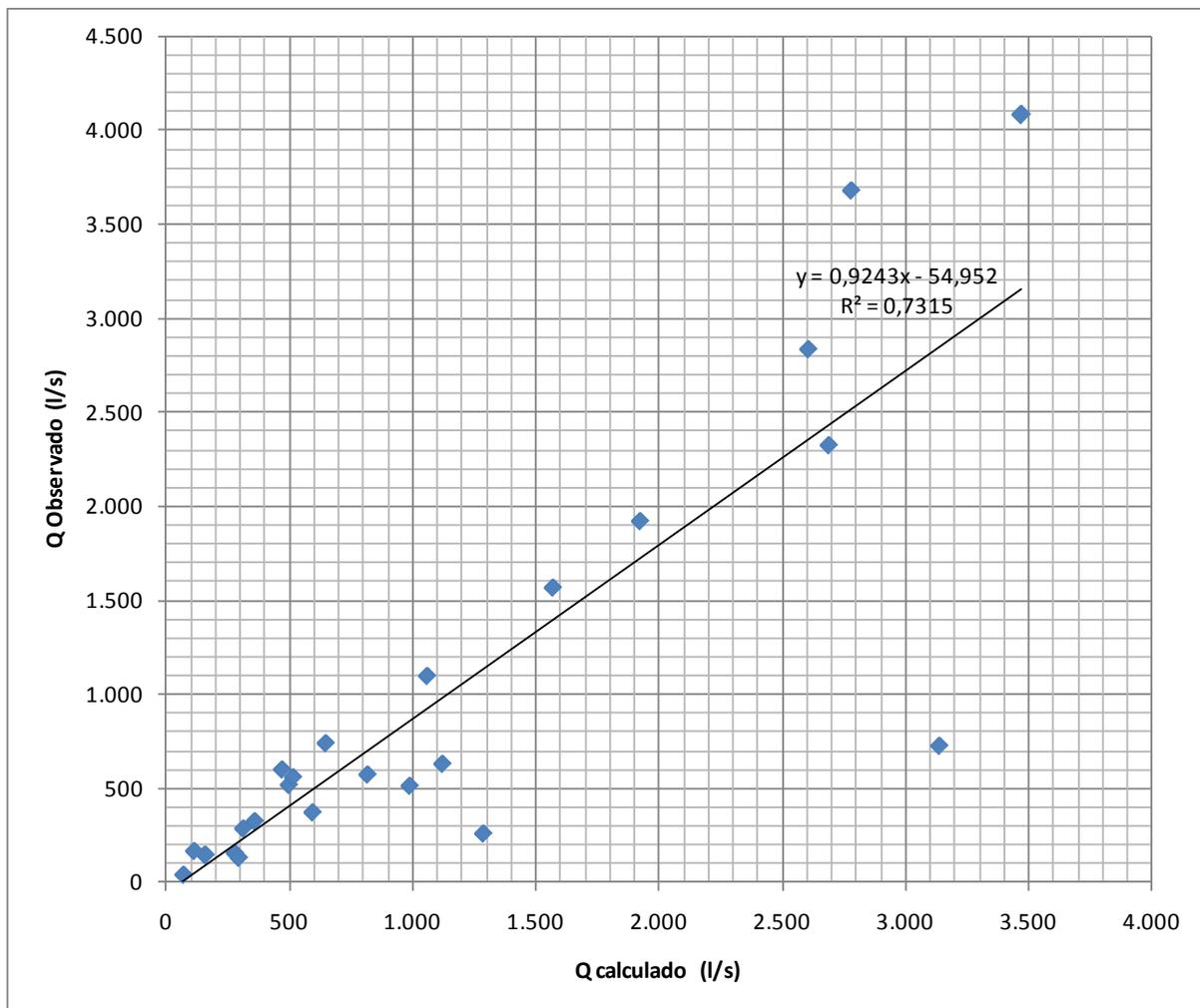
- Con P anual

	Nombre de la cuenca	Elev. media cuenca (msnm)	Área total (km ²)	P anual promedio (mm)	f real	Qobs	f-lineal	Qcal-lineal
1	Río Lluta Alto	4345	1326	282,8	0,162	1.921	0,15077	1.793
2	Río Lluta bajo Río Azufre	4448	381	293,3	0,105	371	0,15288	542
3	Río Caquena	4672	448	369,4	0,209	1.097	0,16817	883
4	Río San José alto	3386	1358	127,9	0,109	599	0,11966	659
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	3901	370	142,4	0,087	146	0,12256	205
6	Río Camarones hasta Conanoxa	3177	2006	105,5	0,077	517	0,11516	773
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	4084	519	189,2	0,104	324	0,13197	411
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	4214	548	158,2	0,056	155	0,12575	346
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	4294	722	140,0	0,040	129	0,12210	391
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	4292	399	137,8	0,082	143	0,12165	212
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	4347	189	129,0	0,050	39	0,11989	93
12	Río Loa hasta Lequena	4102	2096	152,5	0,051	512	0,12460	1.263
13	Río Salado	3602	2351	94,1	0,080	558	0,11287	792
14	Río Salado hasta Curti	4285	547	169,4	0,097	285	0,12799	376
15	Río San Pedro de Atacama	4027	1391	151,2	0,111	739	0,12433	829
16	Canal Cuno hasta Socaire	4727	138	208,1	0,181	165	0,13576	124
17	Río de La Ola (Pedernales)	4026	1219	138,2	0,118	629	0,12173	650
18	Río Lamas (Maricunga)	4919	1056	171,2	0,045	258	0,12836	736
19	Río Jorquera	3799	4099	121,1	0,046	725	0,11829	1.862
20	Río Pulido	3569	1905	123,6	0,210	1.567	0,11879	887
21	Río Manflas	3566	946	126,1	0,151	572	0,11929	451
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	3361	3978	126,0	0,257	4.079	0,11929	1.897
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	3709	2654	144,5	0,303	3.681	0,12299	1.496
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	3471	2992	128,2	0,191	2.325	0,11972	1.456
25	Río Carmen hasta San Félix	3632	2708	135,0	0,245	2.836	0,12109	1.404



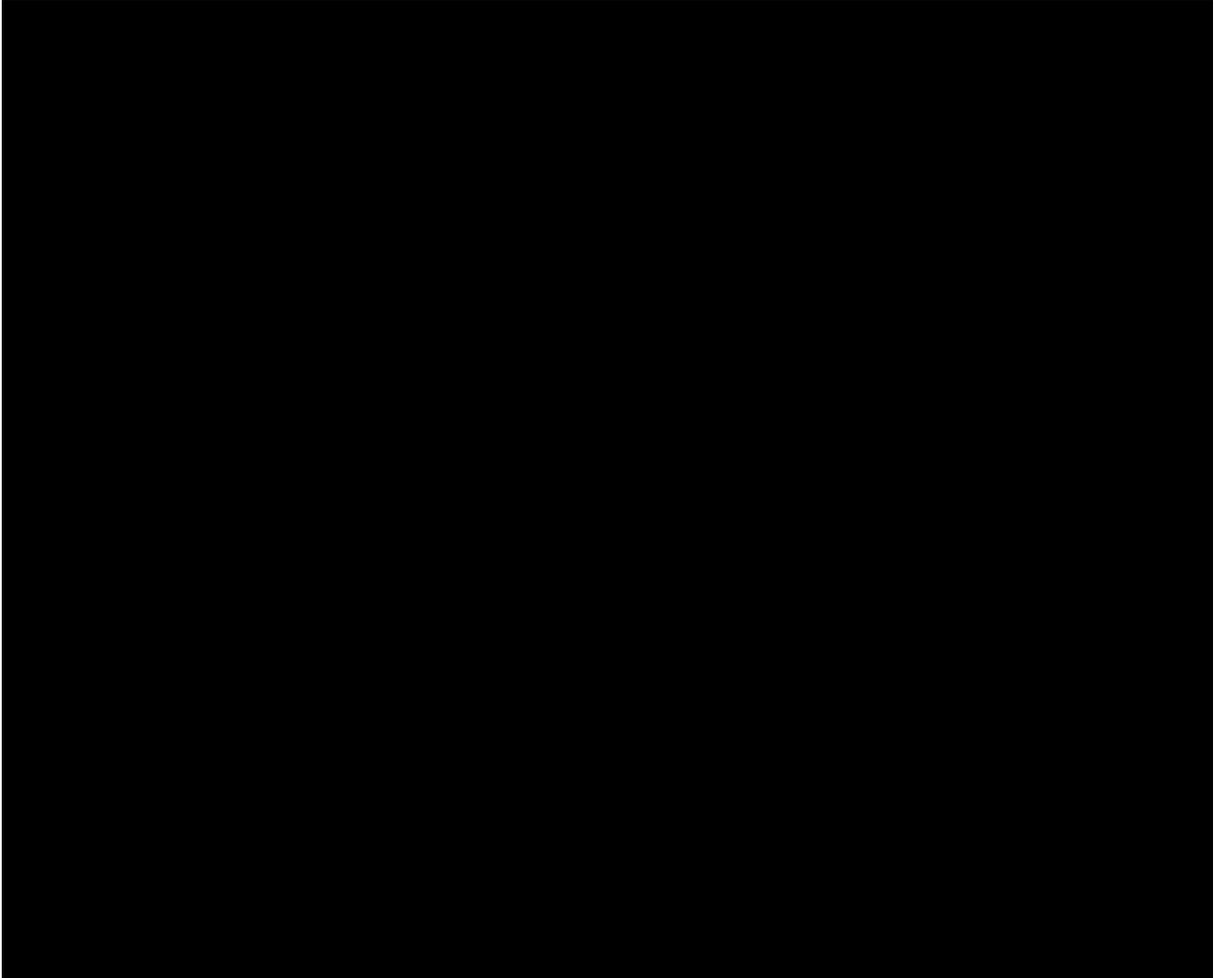
- Con P verano y P invierno

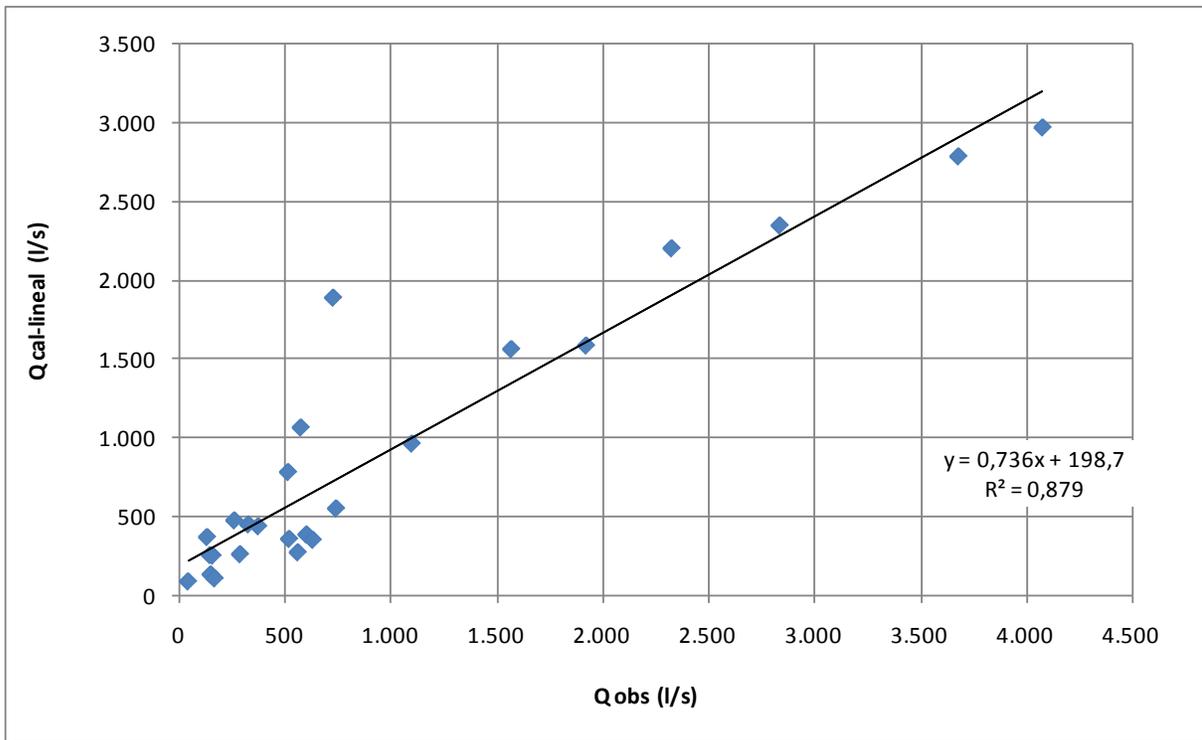
	Nombre de la cuenca	Área total (km ²)	P Vno (mm)	Pinv (mm)	Ptot (mm)	fvno	finv	Qvno (l/s)	Qinv (l/s)	Qcalculado (l/s)	Qobs (l/s)
1	Río Lluta Alto	1326	265	17	283	0,16	0,17	1799	122	1921	1921
2	Río Lluta bajo Río Azufre	381	275	18	293	0,17	0,17	555	36	591	371
3	Río Caquena	448	341	28	369	0,20	0,17	987	69	1056	1097
4	Río San José alto	1358	122	6	128	0,08	0,16	429	38	467	599
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	370	135	7	142	0,09	0,16	140	14	154	146
6	Río Camarones hasta Conanoxa	2006	100	6	105	0,07	0,16	436	59	495	517
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	519	172	17	189	0,11	0,17	310	46	356	324
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	548	148	10	158	0,10	0,16	247	28	275	155
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	722	133	7	140	0,09	0,16	267	25	292	129
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	399	131	6	138	0,09	0,16	144	13	157	143
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	189	117	12	129	0,08	0,16	55	12	67	39
12	Río Loa hasta Lequena	2096	142	11	153	0,09	0,16	867	119	985	512
13	Río Salado	2351	81	13	94	0,06	0,16	352	160	512	558
14	Río Salado hasta Curti	547	158	11	169	0,10	0,16	278	32	310	285
15	Río San Pedro de Atacama	1391	136	15	151	0,09	0,16	535	110	645	739
16	Canal Cuno hasta Socaire	138	162	46	208	0,10	0,18	74	37	110	165
17	Río de La Ola (Pedemales)	1219	13	125	138	0,02	0,23	11	1108	1118	629
18	Río Lamas (Maricunga)	1056	17	154	171	0,02	0,25	13	1271	1284	258
19	Río Jorquera	4099	13	109	121	0,02	0,22	33	3103	3136	725
20	Río Pulido	1905	8	115	124	0,02	0,22	9	1558	1567	1567
21	Río Manflas	946	7	119	126	0,02	0,23	3	811	814	572
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	3978	5	121	126	0,02	0,23	11	3460	3471	4079
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	2654	6	138	144	0,02	0,24	8	2770	2778	3681
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	2992	5	123	128	0,02	0,23	7	2680	2687	2325
25	Río Carmen hasta San Félix	2708	5	130	135	0,02	0,23	7	2597	2604	2836



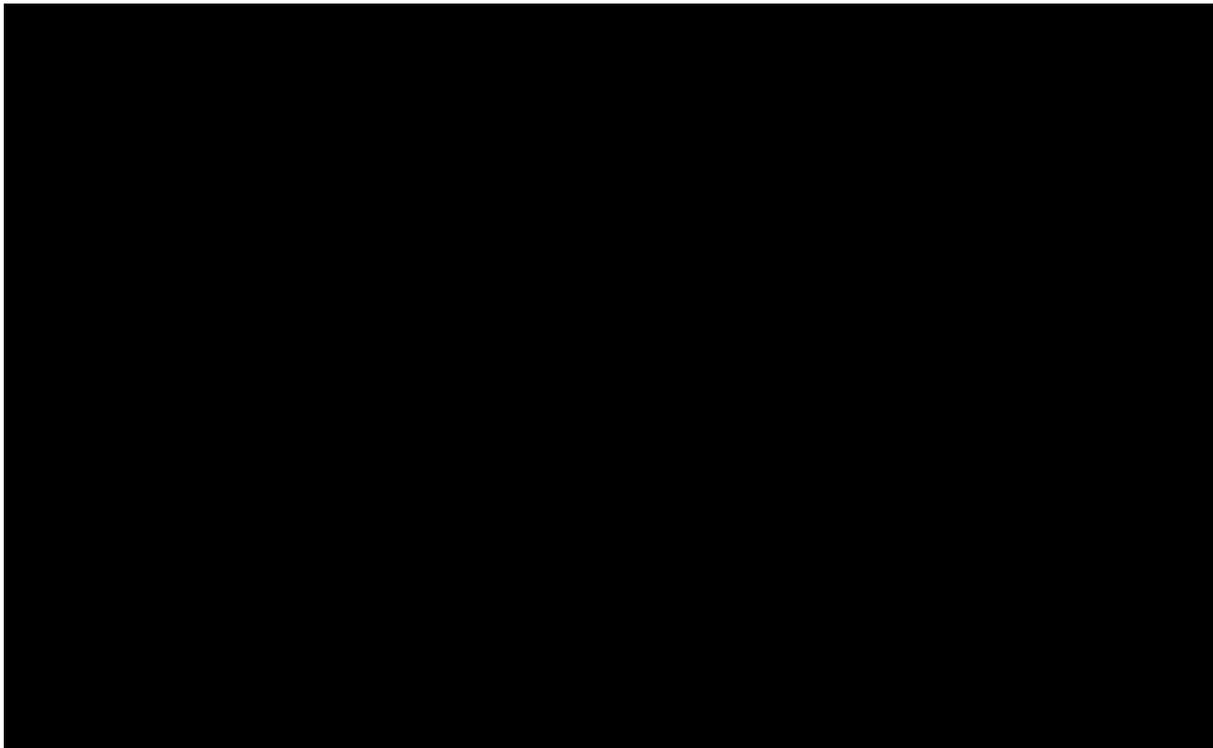
b) Resultados Usando Isoyetas del Balance Hídrico

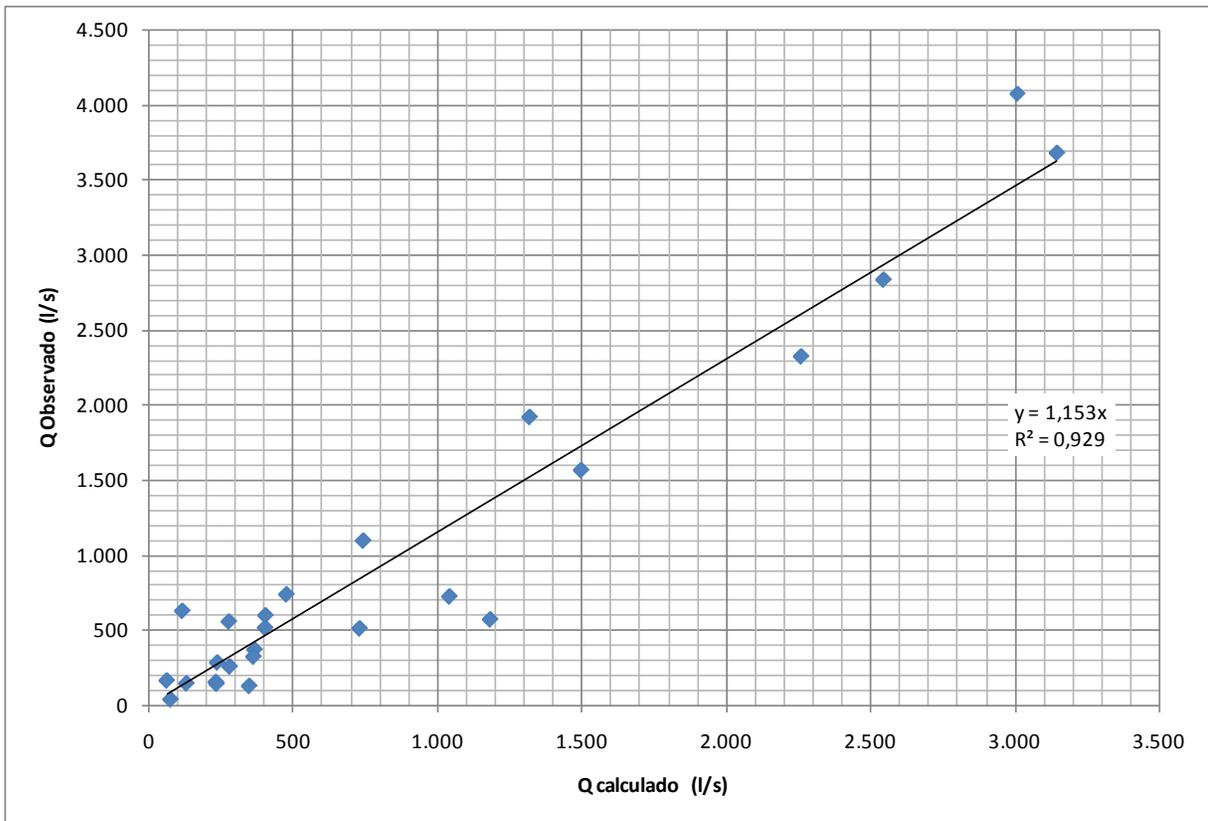
- Con P anual



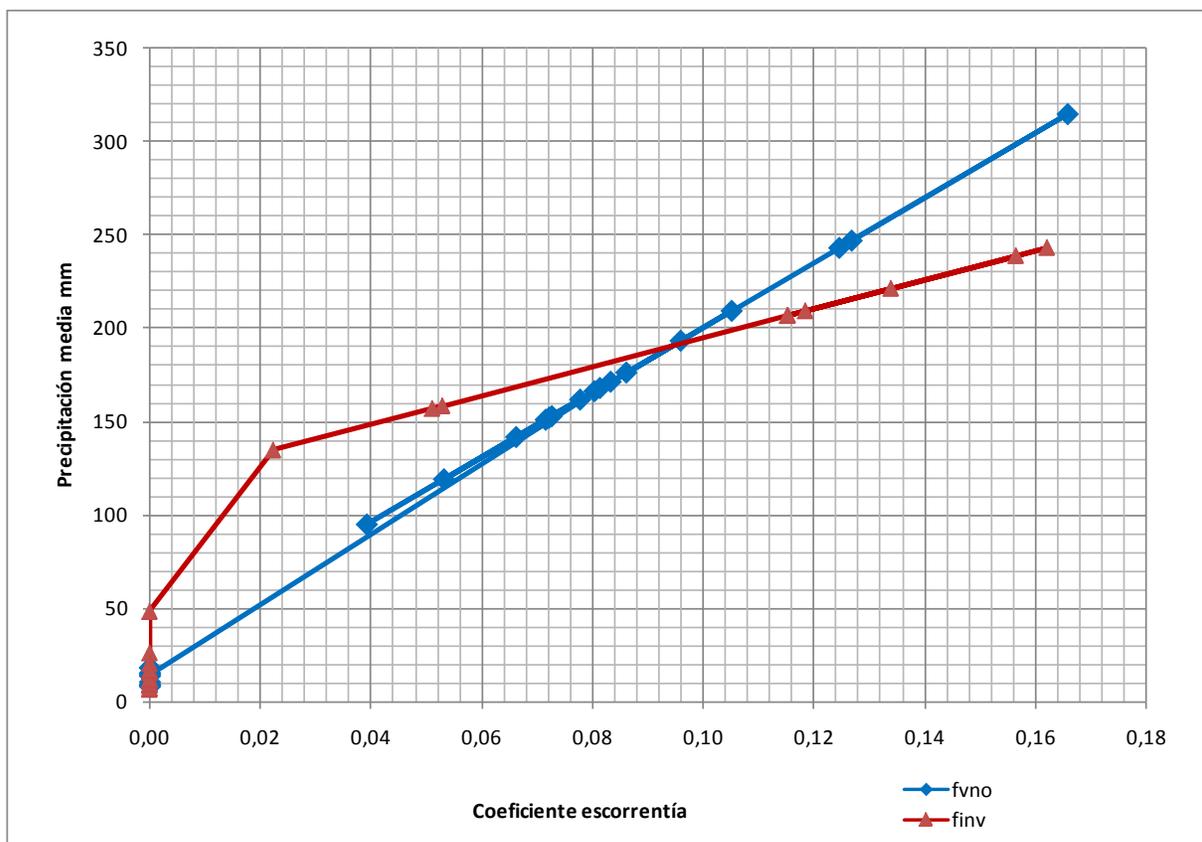


- Con P verano y P invierno





Los coeficientes de escorrentía para invierno y verano, para este último caso, se muestran en el siguiente gráfico.



Un resumen de los coeficientes de correlación se incluyen en el Cuadro 4.2-5.

**CUADRO 4.2-5
COEFICIENTES R² 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
0,60	0,73	0,88	0,93

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 (ver explicación en punto 4.2.1), se generó un manto de precipitaciones anuales con pixeles de 1.000 m x 1.000 m.

4.2.4. 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:

- a) Tamaño de la Cuenca
- b) Ubicación (Latitud – Longitud) de la Cuenca
- c) Altitud Media de la Cuenca
- d) Productividad de las Cuencas según Montos de Precipitaciones
- e) Influencia Cuenca Altiplánica
- f) Intervalo de Confianza

La idea es analizar el comportamiento de la relación frente a las variables regionales antes indicadas.

a) Tamaño de la Cuenca

Los rangos de áreas escogidas fueron los siguientes:

- 0 a 1.000 km²
- 1.000 a 2.000 km²
- Mayor que 2.000 km²

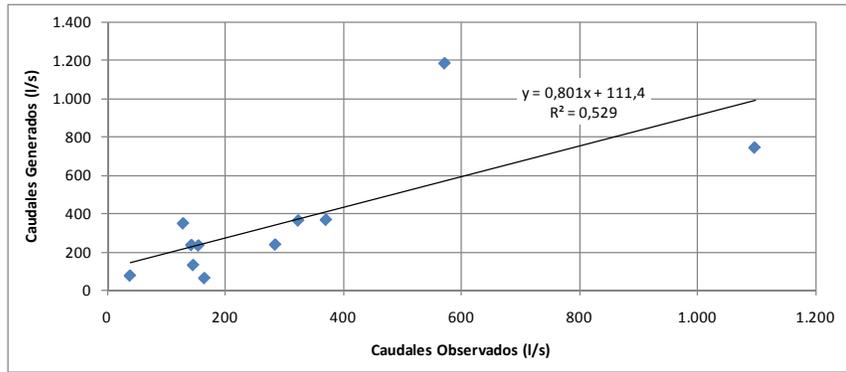
En el Cuadro 4.2-6 se incluyen los rangos y caudales calculados con la relación antes señalada.

**CUADRO 4.2-6
RANGOS Y CAUDALES CALCULADOS**

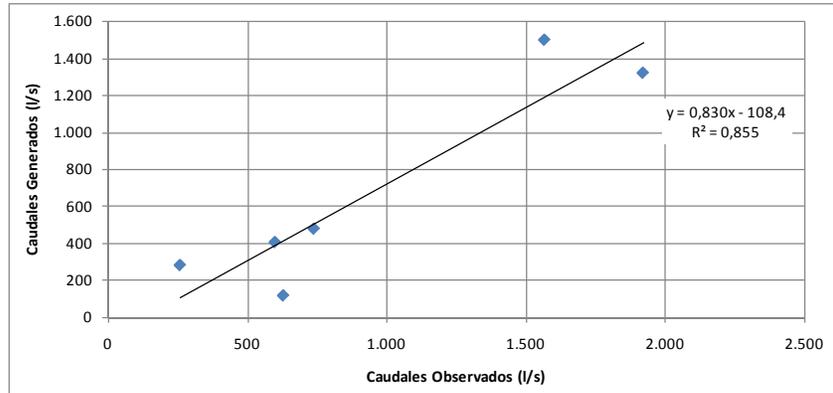
	Cuenca	UTM (WGS 84)		Elev. Media Cuenca (msnm)	Área Total (km ²)	P Media Anual (mm)	Caudal	
		NORTE	ESTE				Observado (l/s)	Calculado (l/s)
16	Canal Cuno hasta Socaire	7.386.620	631.015	4.727	138	220	165	62
11	Río Guatacondo Hasta Copaquire	7.683.722	522.308	4.347	189	179	39	75
5	Río Codpa hasta Cala Cala	7.925.348	457.079	3.901	370	162	146	130
2	Río Lluta Bajo Río Azufre	8.038.066	421.865	4.448	381	259	371	366
10	Río Piga Hasta Collacagua (Huasco)	7.793.980	521.931	4.292	398	203	143	235
3	Río Caquena	8.002.060	474.867	4.672	448	341	1.097	742
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	7.880.957	480.062	4.084	519	230	324	363
14	Río Salado Hasta Curti	7.535.382	598.591	4.285	547	180	285	237
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	7.819.950	502.993	4.214	548	178	155	232
9	Río Collacagua Hasta Peñablanca (Huasco)	7.789.862	516.829	4.294	721	186	129	348
21	Río Manflas	6.855.012	410.018	3.566	946	257	572	1.182
18	Río Lamas (Maricunga)	7.015.706	523.360	4.919	1.056	176	258	280
17	Río de la Ola (Pedernales)	7.053.685	495.396	4.026	1.219	149	629	116
1	Río Lluta Alto	8.023.749	436.092	4.345	1.327	264	1.921	1.318
4	Río San José Alto	7.952.919	439.148	3.386	1.358	148	599	404
15	Río San Pedro de Atacama	7.502.542	593.650	4.027	1.391	168	739	477
20	Río Pulido	6.882.437	433.203	3.569	1.905	225	1.567	1.497
6	Río Camarones Hasta Conanoxa	7.904.671	451.277	3.177	2.006	126	517	403
12	Río Loa Hasta Lequena	7.640.075	537.009	4.102	2.096	164	512	730
13	Río Salado	7.536.476	577.205	3.602	2.351	110	558	277
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	6.797.681	404.827	3.709	2.654	249	3.681	3.144
25	Río Carmen hasta San Félix	6.746.525	379.781	3.632	2.708	230	2.836	2.543
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	6.752.104	377.615	3.471	2.992	215	2.325	2.258
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	6.801.726	395.840	3.361	3.978	216	4.079	3.007
19	Río Jorquera	6.933.311	457.227	3.799	4.099	175	725	1.041
		Área entre 0 y 1.000 km ²						
		Área entre 1.000 y 2.000 km ²						
		Área entre 2.000 y 4.000 km ²						

A continuación se incluyen gráficos de correlaciones lineales entre los caudales observados y calculados, para cada uno de los 3 rangos de tamaño de área definidos.

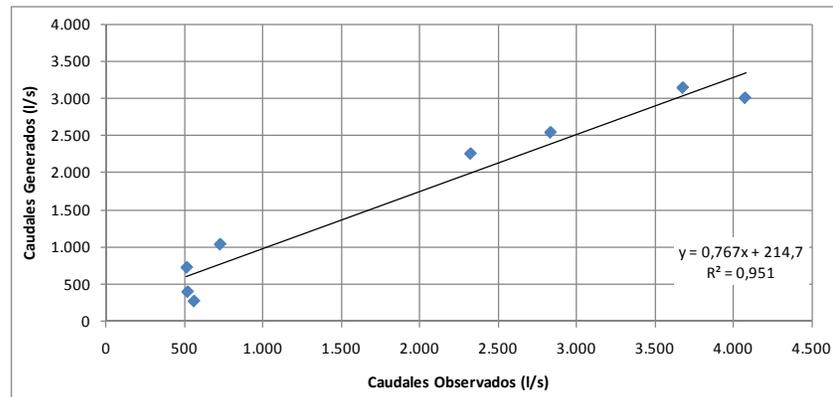
ÁREA DE LA CUENCA ENTRE 0 Y 1.000 KM²



ÁREA DE LA CUENCA ENTRE 1.000 Y 2.000 KM²



ÁREA DE LA CUENCA ENTRE 2.000 Y 4.000 KM²



De los 3 gráficos anteriores se observa que el coeficiente de correlación mejora en la medida que la superficie de la cuenca aumenta:

- 0 a 1.000 km², 11 Cuencas: R²= 0,53
- 1.000 a 2.000 km², 6 Cuencas: R²= 0,86
- Mayor que 2.000 km², 8 cuencas: R²= 0,95

a) Ubicación (Latitud) de la Cuenca

Los rangos de Latitud tomados en cuenta para el análisis son:

- **Entre Latitud 17° 30´ y 20° 30´**
- **Entre Latitud 20° 30´ y 24° 00´**
- **Entre Latitud 26° 00´ y 30° 00´**

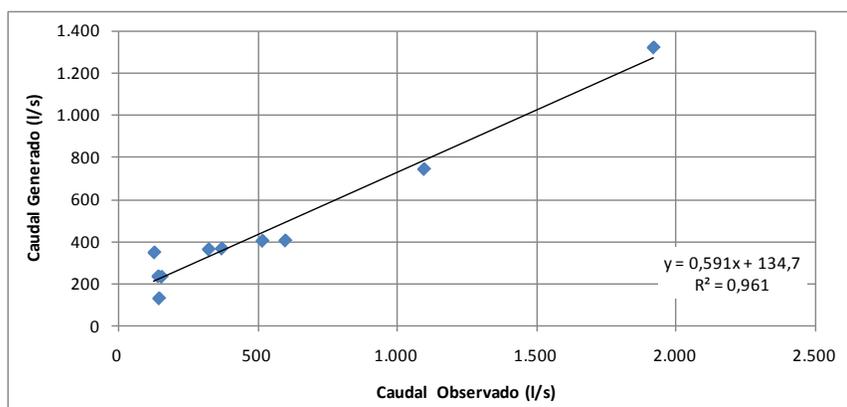
En el Cuadro 4.2-7 se incluyen los rangos y caudales calculados con la relación antes señalada.

**CUADRO 4.2-7
RANGOS Y CAUDALES CALCULADOS**

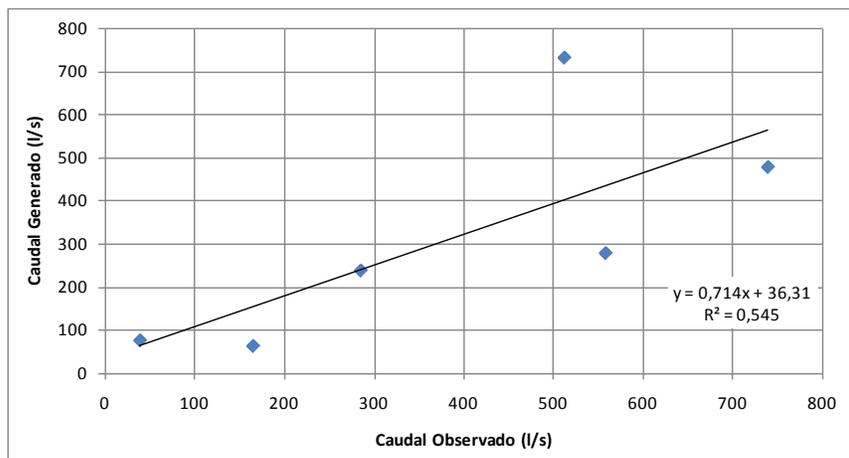
	Cuenca	UTM (WGS 84)		Elev. Media Cuenca (msnm)	Área Total (km2)	P Media Anual (mm)	Caudal	
		NORTE	ESTE				Observado (l/s)	Calculado (l/s)
1	Río Lluta Alto	8.023.749	436.092	4.345	1.327	264	1.921	1.318
2	Río Lluta Bajo Río Azufre	8.038.066	421.865	4.448	381	259	371	366
3	Río Caquena	8.002.060	474.867	4.672	448	341	1.097	742
4	Río San José Alto	7.952.919	439.148	3.386	1.358	148	599	404
5	Río Codpa hasta Cala Cala	7.925.348	457.079	3.901	370	162	146	130
6	Río Camarones Hasta Conanoxa	7.904.671	451.277	3.177	2.006	126	517	403
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	7.880.957	480.062	4.084	519	230	324	363
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	7.819.950	502.993	4.214	548	178	155	232
9	Río Collacagua Hasta Peñablanca (Huasco)	7.789.862	516.829	4.294	721	186	129	348
10	Río Piga Hasta Collacagua (Huasco)	7.793.980	521.931	4.292	398	203	143	235
11	Río Guatacondo Hasta Copaquire	7.683.722	522.308	4.347	189	179	39	75
12	Río Loa Hasta Lequena	7.640.075	537.009	4.102	2.096	164	512	730
13	Río Salado	7.536.476	577.205	3.602	2.351	110	558	277
14	Río Salado Hasta Curti	7.535.382	598.591	4.285	547	180	285	237
15	Río San Pedro de Atacama	7.502.542	593.650	4.027	1.391	168	739	477
16	Canal Cuno hasta Socaire	7.386.620	631.015	4.727	138	220	165	62
17	Río de la Ola (Pedernales)	7.053.685	495.396	4.026	1.219	149	629	116
18	Río Lamas (Maricunga)	7.015.706	523.360	4.919	1.056	176	258	280
19	Río Jorquera	6.933.311	457.227	3.799	4.099	175	725	1.041
20	Río Pulido	6.882.437	433.203	3.569	1.905	225	1.567	1.497
21	Río Manflas	6.855.012	410.018	3.566	946	257	572	1.182
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	6.801.726	395.840	3.361	3.978	216	4.079	3.007
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	6.797.681	404.827	3.709	2.654	249	3.681	3.144
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	6.752.104	377.615	3.471	2.992	215	2.325	2.258
25	Río Carmen hasta San Félix	6.746.525	379.781	3.632	2.708	230	2.836	2.543
		Entre Latitud 17° 30' y 20° 30'						
		Entre Latitud 20° 30' y 24° 00'						
		Entre Latitud 26° 00' y 30° 00'						

A continuación se incluyen gráficos de correlaciones lineales entre los caudales observados y calculados, para cada uno de los 3 rangos de ubicación según Latitud definidos.

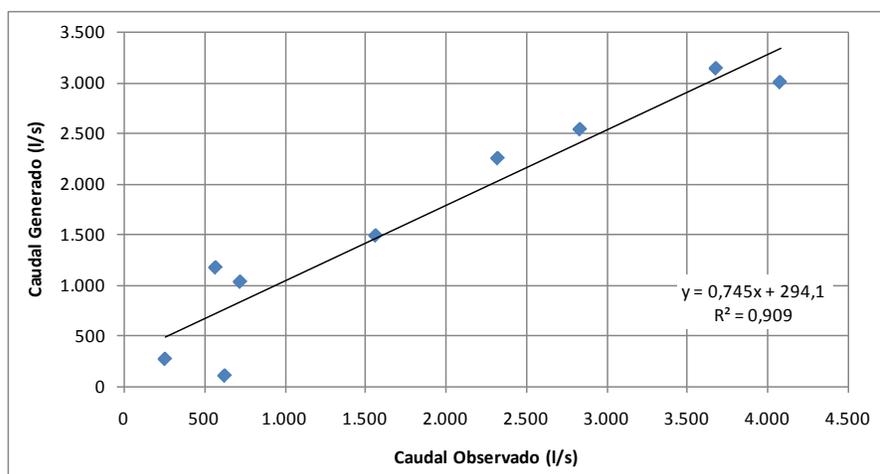
➤ **Entre Latitud 17° 30' y 20° 30'**



➤ **Entre Latitud 20° 30´ y 24° 00´**



➤ **Entre Latitud 26° 00´ y 30° 00´**



De acuerdo con las correlaciones por rangos de Latitud de ubicación de las cuencas, 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. Un resumen se incluye a continuación:

- 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

b) Altitud Media de la Cuenca

Los rangos de altitud media de la cuenca tomados en cuenta para el análisis son:

- Entre 3.000 msnm y 4.000 msnm
- Entre 4.000 msnm y 5.000 msnm

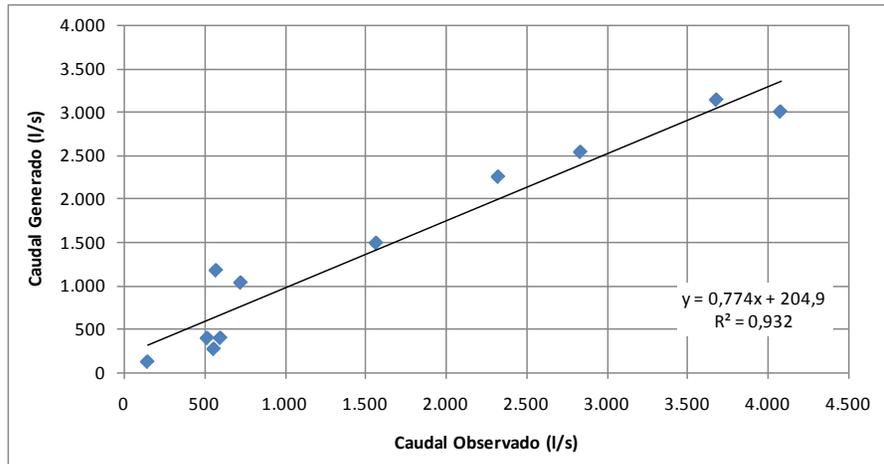
En el Cuadro 4.2-8 se incluyen los rangos y caudales calculados con la relación antes señalada.

**CUADRO 4.2-8
RANGOS Y CAUDALES CALCULADOS**

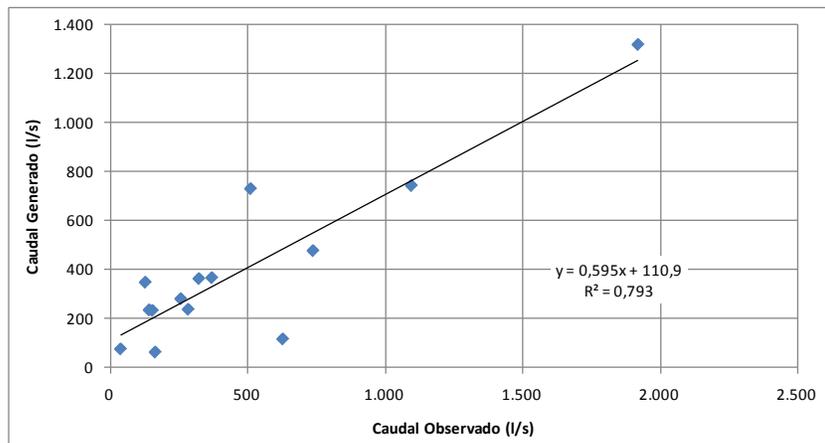
Cuenca	UTM (WGS 84)		Elev. Media Cuenca (msnm)	Área Total (km ²)	P Media Anual (mm)	Caudal	
	NORTE	ESTE				Observado (l/s)	Calculado (l/s)
6 Río Camarones Hasta Conanoxa	7.904.671	451.277	3.177	2.006	126	517	403
22 Río Tránsito hasta Río Carmen	6.801.726	395.840	3.361	3.978	216	4.079	3.007
4 Río San José Alto	7.952.919	439.148	3.386	1.358	148	599	404
24 Río el Carmen hasta Río el Tránsito	6.752.104	377.615	3.471	2.992	215	2.325	2.258
21 Río Manflas	6.855.012	410.018	3.566	946	257	572	1.182
20 Río Pulido	6.882.437	433.203	3.569	1.905	225	1.567	1.497
13 Río Salado	7.536.476	577.205	3.602	2.351	110	558	277
25 Río Carmen hasta San Félix	6.746.525	379.781	3.632	2.708	230	2.836	2.543
23 Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	6.797.681	404.827	3.709	2.654	249	3.681	3.144
19 Río Jorquera	6.933.311	457.227	3.799	4.099	175	725	1.041
5 Río Codpa hasta Cala Cala	7.925.348	457.079	3.901	370	162	146	130
17 Río de la Ola (Pedernales)	7.053.685	495.396	4.026	1.219	149	629	116
15 Río San Pedro de Atacama	7.502.542	593.650	4.027	1.391	168	739	477
7 Quebrada Camiña hasta Altusa	7.880.957	480.062	4.084	519	230	324	363
12 Río Loa Hasta Lequena	7.640.075	537.009	4.102	2.096	164	512	730
8 Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	7.819.950	502.993	4.214	548	178	155	232
14 Río Salado Hasta Curti	7.535.382	598.591	4.285	547	180	285	237
10 Río Piga Hasta Collacagua (Huasco)	7.793.980	521.931	4.292	398	203	143	235
9 Río Collacagua Hasta Peñablanca (Huasco)	7.789.862	516.829	4.294	721	186	129	348
1 Río Lluta Alto	8.023.749	436.092	4.345	1.327	264	1.921	1.318
11 Río Guatacondo Hasta Copaquire	7.683.722	522.308	4.347	189	179	39	75
2 Río Lluta Bajo Río Azufre	8.038.066	421.865	4.448	381	259	371	366
3 Río Caquena	8.002.060	474.867	4.672	448	341	1.097	742
16 Canal Cuno hasta Socaire	7.386.620	631.015	4.727	138	220	165	62
18 Río Lamas (Maricunga)	7.015.706	523.360	4.919	1.056	176	258	280
	Entre 3.000 y 4.000 msnm						
	Entre 4.000 y 5.000 msnm						

A continuación se incluyen gráficos de correlaciones lineales entre los caudales observados y calculados, para cada uno de los 2 rangos de altitud media definidos.

➤ **Entre 3.000 msnm y 4.000 msnm**



➤ **Entre 4.000 msnm y 5.000 msnm**



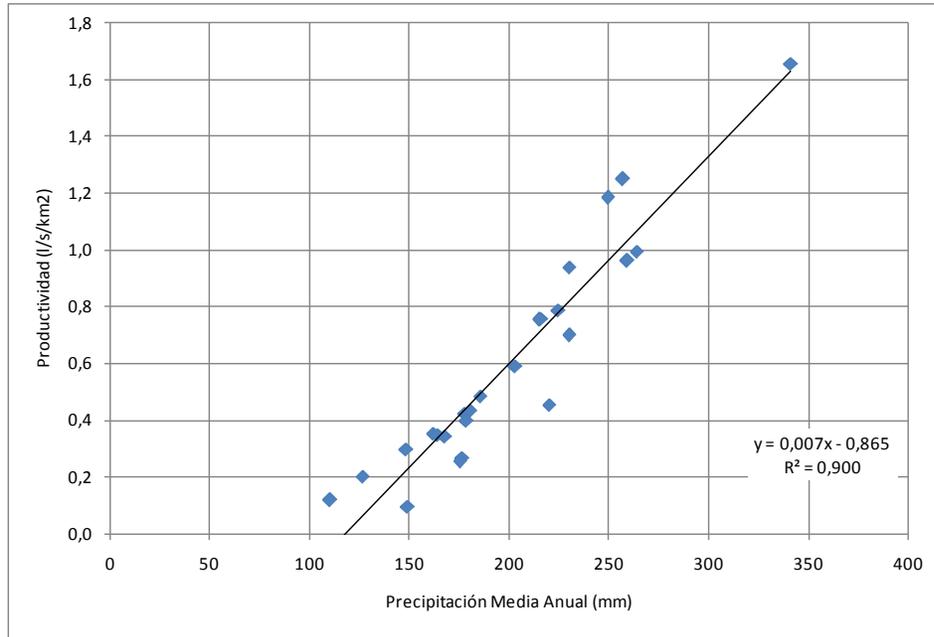
Los coeficientes de correlación son relativamente similares para ambos rangos de altitudes, pero mejoran en las cuencas con rangos de altura menores, entre 3.000 y 4.000 msnm.

- Entre 3.000 msnm y 4.000 msnm; 11 Cuencas= $R^2 = 0,93$
- Entre 4.000 msnm y 5.000 msnm; 14 Cuencas; $R^2 = 0,79$

c) Productividad de las Cuencas según Montos de Precipitaciones

A continuación se presenta un gráfico de productividad (Caudal Calculado/Área) versus Precipitaciones Medias Anuales.

PRODUCTIVIDAD VRS. PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL



Se observa claramente que la productividad (l/s/km2) aumenta con la precipitación.

d) Influencia Cuenca Altiplánica

Para efectos de analizar la validez de las relaciones "Precipitación – Escorrentía" en otras cuencas que no sean netamente altiplánicas, se ha hecho el ejercicio de aplicar la relación y compararla con los caudales de salida observados (caudales medios anuales), en las siguientes estaciones fluviométricas:

- Río Loa en Desembocadura
- Río Copiapó en Angostura
- Río Huasco en Santa Juana

Es importante destacar que la estación Huasco en Santa Juana está influenciada por el embalse Santa Juana, el cual se comenzó a construir el 25/11/1991 finalizando sus obras en Julio de 1995. De acuerdo con ello, los caudales promedios anuales se calcularon sin y con influencia del embalse Santa Juana.

En el Cuadro 4.2-9 resume los datos de cada una de las cuencas asociadas a las estaciones fluviométricas antes señaladas.

**CUADRO 4.2-9
CUENCAS CONSIDERADAS**

CUENCA	Área Total	P anual	P inv	P ver	Q salida
	km2	mm	mm	mm	Obs. l/s
Río Loa en Desembocadura	33.081	106,05	14,98	91,07	291
Río Copiapó en Angostura	18.689	99,32	89,57	9,75	428
Río Huasco en Santa Juana	7.410	211,33	202,59	8,74	5.663

Las precipitaciones medias mensuales y medias anuales se calcularon del mismo modo señalado anteriormente, es decir, tomando como base las isoyetas del Balance Hídrico.

Los resultados obtenidos se incluyen en el Cuadro 4.2-10 siguiente:

**CUADRO 4.2-10
RESULTADOS OBTENIDOS**

ID	CUENCA	Precipitaciones medias (mm)													Caudal generado (l/s)
		Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	
1	Río Loa	35,34	32,09	18,53	0,98	2,19	3,53	1,10	4,08	3,09	0,93	0,04	4,14	106,05	3780
2	Río Copiapó	0,30	1,77	5,41	5,97	14,34	26,45	21,66	16,93	4,23	1,61	0,16	0,50	99,32	0
3	Río Huasco en Sta Juana	0,45	0,39	4,89	13,11	31,50	61,36	54,50	38,06	4,07	2,08	0,42	0,51	211,33	5166

- **Río Loa (altura media de la cuenca= 1.584 msnm):** para poder hacer la comparación, habría que calcular el caudal del río en régimen natural, es decir, al caudal calculado habría que restarle, al menos, los derechos de aguas superficiales y subterráneos.
- **Río Copiapó (altura media de la cuenca= 2.194 msnm):** ocurre lo mismo que en el caso del río Loa, pero en este caso el caudal generado fue igual a cero. Ello ocurre debido a que el factor "f" es negativo, pues las precipitaciones de invierno y verano son menores que el factor "c" de la relación final de P-E.

- **Río Huasco (altura media de la cuenca= 3.591 msnm):** los caudales generados y calculados indicaría que la relación P-E sería aplicable a esta cuenca en particular. No obstante, esta cuenca se comporta más como altiplánica que no altiplánica, ya que su altura media está por sobre los 3.591 msnm.

En definitiva, en principio la relación no sería aplicable a cuencas que no son altiplánicas.

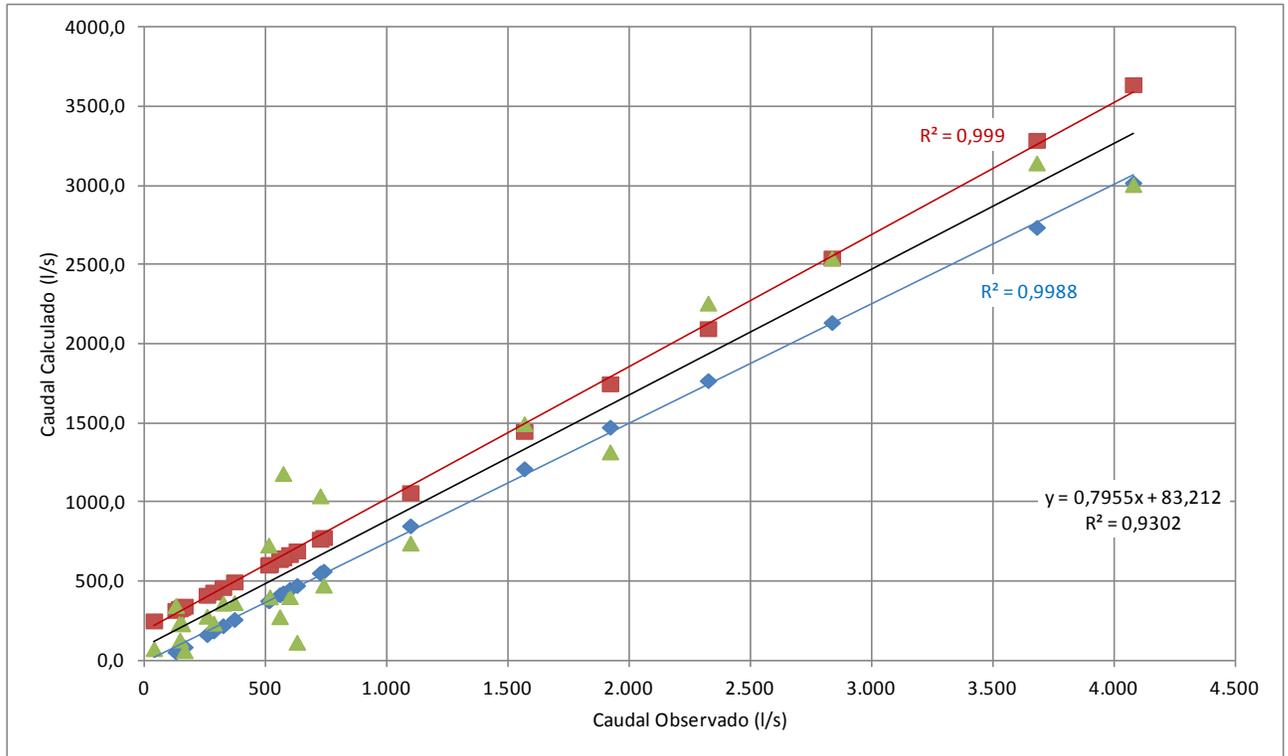
e) Intervalo de Confianza

Para efectos de determinar los intervalos de confianza de la relación P-E, se han utilizado los caudales observados y calculados de las 25 cuencas usadas en los análisis anteriores.

Se han determinado los caudales calculados con un 95% de confianza. En el Cuadro 4.2-11 se incluyen los resultados obtenidos.

**CUADRO 4.2-11
VALORES ESPERADOS, LÍMITES INFERIOR Y SUPERIOR
CON UN 95 % DE CONFIANZA**

	Nombre de la cuenca	Qcalculado (l/s)	Qobs (l/s)	Valor Esperado del Q Calculado (l/s)	Límite Inferior (l/s)	Límite Superior (l/s)	Rango (+ -) (l/s)
1	Río Lluta Alto	1.318	1.921	1611,4	1474,4	1748,4	137
2	Río Lluta bajo Río Azufre	366	371	378,4	259,7	497,0	119
3	Río Caquena	742	1.097	955,9	851,1	1060,7	105
4	Río San José alto	404	599	559,7	449,7	669,8	110
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	130	146	199,4	69,2	329,5	130
6	Río Camarones hasta Conanoxa	403	517	494,5	381,8	607,2	113
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	363	324	341,0	220,1	461,8	121
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	232	155	206,5	76,9	336,1	130
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	348	129	185,8	54,8	316,9	131
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	235	143	197,0	66,7	327,3	130
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	75	39	114,2	-22,1	250,6	136
12	Río Loa hasta Lequena	730	512	490,5	377,6	603,4	113
13	Río Salado	277	558	527,1	415,8	638,4	111
14	Río Salado hasta Curti	237	285	309,9	187,2	432,7	123
15	Río San Pedro de Atacama	477	739	671,1	564,6	777,6	107
16	Canal Cuno hasta Socaire	62	165	214,5	85,4	343,5	129
17	Río de La Ola (Pedernales)	116	629	583,6	474,4	692,8	109
18	Río Lamas (Maricunga)	280	258	288,5	164,4	412,6	124
19	Río Jorquera	1.041	725	660,0	553,1	766,8	107
20	Río Pulido	1.497	1.567	1329,8	1211,7	1447,9	118
21	Río Manflas	1.182	572	538,3	427,4	649,1	111
22	Río Tránsito hasta Río Carmen	3.007	4.079	3328,2	3018,3	3638,0	310
23	Río Tránsito hasta Angostura de Pinte	3.144	3.681	3011,5	2736,6	3286,4	275
24	Río el Carmen hasta Río el Tránsito	2.258	2.325	1932,8	1768,6	2097,0	164
25	Río Carmen hasta San Félix	2.543	2.836	2339,3	2135,7	2543,0	204
						Promedio	139



Es decir, con un 95 % de confianza se puede decir que el caudal calculado estará dentro del rango indicado en el cuadro anterior (rango promedio de variación de 139 l/s).

5. SELECCIÓN DE CUENCAS

Tal como fuera indicado en los Términos de Referencia, la selección de cuencas donde será aplicada la metodología ajustada, se divide en 2 tipos:

- Cuencas donde se aplicará la metodología ajustada, las que a su vez están relacionadas con los trabajos de terreno.
- Cuencas donde se llevará a cabo los balances hídricos.

5.1. Cuencas Aplicación Metodología

Las cuencas donde se procederá con la aplicación de la metodología son las siguientes:

**CUADRO 5.1-1
CUENCAS APLICACIÓN METODOLOGÍA**

	Nombre de la cuenca	Área total (km²)	P anual (mm)
1	Río Lluta Alto	1.326	264
2	Río Lluta bajo Río Azufre	381	259
3	Río Caquena	448	341
4	Río San José alto	1.358	148
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	370	162
6	Río Camarones hasta Conanoxa	2.006	126
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	519	230
8	Quebrada de Tarapaca hasta Sibaya	548	178
9	Río Collacagua hasta Peñablanca	722	186
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	399	203
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	189	179
12	Río Loa hasta Lequena	2.096	164
13	Río Salado	2.351	110
14	Río Salado hasta Curti	547	180

5.2. Cuencas donde se Desarrollarán los Balances Hídricos

De acuerdo con las aclaraciones especificadas en el proceso de licitación del estudio, las cuencas donde se llevarán a cabo los balances hídricos son las que se incluyen en el Cuadro 5.2-1 siguiente.

**CUADRO 5.2-1
CUENCAS BALANCES HÍDRICOS**

	Cuenca	Altura Media	Área
		(msnm)	(km2)
1	Río Lauca	4.459	2.438
2	Río Caquena	4.448	452
3	Río Isluga	4.186	1.362
4	Cariquima	4.137	1.493
5	Río Codpa Alto	3.901	370
6	Salar de Huasco	4.141	1.471
7	Cancosa	4.099	2.048
8	Río Camiña Alto	4.084	519
9	Salar de Maricunga	4.295	2.195
10	Salar de Pedernales	3.994	3.588
11	Laguna del Negro Francisco	4.546	905

6. TRABAJOS DE TERRENO

6.1. Introducción

Tal como se ha explicitado en los puntos anteriores, uno de los principales objetivos de la presente consultoría 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 (14 cuencas incluidas en las 25 usadas en la validación de la relación P-E).

Lo anterior debido a que ese parámetro es una incógnita en las relaciones ya desarrolladas. 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 6-1 se indican las estaciones fluviométricas de salida de cada una de las 14 cuencas donde se efectuaron las prospecciones geofísicas (Nano Tem).

CUADRO 6-1 ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS

ID	Código BNA	Nombre Estación	Coordenadas (WGS84/19S)		Cota (msnm)	VIGENTE	CUENCA
			Norte	Este			ASOCIADA
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

6.2. 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 las 14 cuencas donde se aplicará la metodología.

En el Anexo 1 se incluye el trabajo completo realizado, mientras que en las Figuras 6.1-1 a 6.1-9 se muestra la ubicación de cada uno de los perfiles geofísicos efectuados.

VAN 9 FIGURAS

6.3. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO GEOFÍSICO

El trabajo geofísico consistió fundamentalmente en el estudio de 14 Cuencas Altiplánicas ubicadas en las regiones I, II y XV, mediante la ejecución de 14 perfiles geofísicos (uno en cada zona), midiendo un total de 134 sondeos de Nano Transiente Electromagnético (ver Mapa 1 del Anexo 1).

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 los modelos de resistividad a lo largo de cada perfil, se realizó una diferenciación de estratos geoelectricos, dando continuidad a los modelos de sondeos adyacentes, correlacionando rangos de resistividad con estratos de diferentes características litológicas (ver Figuras I-1 a I-14 del Anexo 1).

En cada una de las cuencas 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.

Utilizando DEM SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission* de la NASA), se estimó la topografía superficial del terreno en cada una de las secciones de interés, de manera de representar de la mejor manera la posible ubicación de los cauces de agua (para ello también se usaron las fotografías tomadas en terreno), los cuales necesariamente están relacionados con el nivel estático del agua subterránea. En efecto, cuando el cauce en la sección de estudio conducía agua superficial, necesariamente los niveles estáticos del agua subterránea deben coincidir con los niveles del agua superficial en dicha sección.

En particular, en la denominada zona 13, que corresponde al Río Salado antes Junta Loa, sólo en la estación 1, se detectó la presencia de roca basal. En este caso, la base de la cuenca que impide que el agua se absorba podría corresponder al nivel arcilloso detectado en todo el perfil. Cabe señalar que la presencia de agua salada altera los valores de resistividad, y las unidades interpretadas como gravas arenosas y gravas arcillosas, podrían corresponder a rocas que en su parte superior estén

alteradas e impregnadas con agua salada y el techo de estas rocas se relacionaría con la base de la cuenca.

De acuerdo con lo anterior, esta sección no fue analizada en la determinación de la escorrentía subterránea.

La sección en la zona 14, correspondiente al Río Salado antes Junta Curti, se caracterizó por la presencia de rocas fracturadas con gravas secas y rocas fracturadas con finos saturados.

En el resto de las secciones de salida de las cuencas que fueron estudiadas, 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):

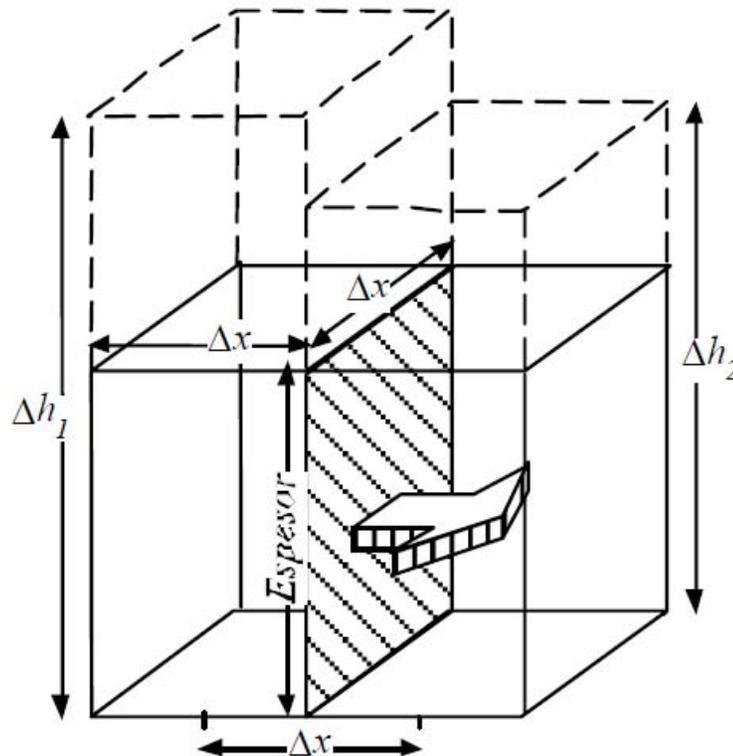
- Sedimentos superficiales
- Sedimentos finos arcillosos
- Sedimentos compactos de baja permeabilidad
- Gravas arcillosas
- Gravas, arenas y limos
- Gravas y arenas
- Gravas, ripios y arenas
- Gravas arenosas
- Gravas arcillosas
- Bolones, ripios y gravas
- Arenas arcillosas
- Arenas y gravas arcillosas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

Por último, es importante destacar que toda interpretación de sondeos NanoTEM tiene un carácter "geofísico", y debiera ser complementada con información geológica estratigráfica obtenida de pozos exploratorios que existan en el área, con el objetivo de calibrar el método y precisar los rangos de resistividad asociados a las diferentes unidades litológicas interpretadas.

7. DETERMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA

Para la determinación de los flujos subterráneos a la salida de cada una de las 13 cuencas donde será aplicada la metodología, se ha utilizado el siguiente modelo conceptual:

ESQUEMA FLUJO SUBTERRÁNEO PASANTE



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

K= permeabilidad del medio poroso

i= pendiente del agua subterránea en la sección de interés

Ω = sección del medio poroso saturado

La determinación de cada uno de los parámetros se ha hecho de acuerdo con lo consignado a continuación.

7.1. Permeabilidad

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.

A cada uno de los diferentes unidades hidrogeológicas estimadas a través de los trabajos geofísicos, se les asignó una permeabilidad, de acuerdo con:

CUADRO 7.1-1
PERMEABILIDADES ASIGNADAS A LOS RELLENOS ACUÍFEROS
DETECTADOS CON GEOFÍSICA (NanoTem)

TIPO DE RELLENO	PERMEABILIDAD		
	cm/s	m/s	m/día
Gravas, Ripios y Arena	0,01500	0,000150	12,96
Ripios, Bolones y Gravas	0,02000	0,000200	17,28
Gravas y Arenas	0,01600	0,000160	13,82
Gravas Arenosas	0,01600	0,000160	13,82
Sedimentos Superficiales	0,00200	0,000020	1,73
Gravas, Arenas y Limos	0,00100	0,000010	0,86
Arenas y Gravas Arcillosas	0,00100	0,000010	0,86
Gravas Arcillosas	0,00100	0,000010	0,86
Arenas Arcillosas	0,00020	0,000002	0,17
Arenas, Limos y Arcillas	0,00020	0,000002	0,17
Sedimentos Finos Arcillosos	0,00020	0,000002	0,17
Sedimentos Compactos de Baja Permeabilidad	0,00016	0,000002	0,14
Roca Fracturada con Finos	0,00016	0,000002	0,14

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)

Ω_i = área de la sección i (L²)

Ω_t = área total de la sección (L²)

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 (‰)

Ω_t = área total de la sección (L²)

Las permeabilidades equivalentes de cada una de las 13 secciones se incluyen en el Cuadro 7.1-2.

**CUADRO 7.1-2
PERMEABILIDADES EQUIVALENTES**

Río Lluta		
Gravas Arcillosas		
K (m/s)		0,000010
ΩT (m ²)		263
Río Lluta Bajo Río Azufre		
Gravas, Arenas y Limos		
K (m/s)		0,000010
ΩT (m ²)		481
Río Caquena		
Gravas y Arenas		
K 1 (m/s)		0,000160
$\Omega 1$ (m ²)		770

Sedimentos Finos Arcillosos	
K 2 (m/s)	0,000002
Ω 2 (m ²)	110
K eq (m/s)	0,000140
Ω T (m ²)	879
Río San José Alto	
Ripios, Bolones y Gravas	
K 1 (m/s)	0,000200
Ω 1 (m ²)	3.211
Gravas y Arenas	
K (m/s)	0,000160
Ω T (m ²)	2.026
K eq (m/s)	0,000185
Ω T (m ²)	5.237
Río Codpa hasta Cala Cala	
Gravas, Ripios y Arenas	
K 1 (m/s)	0,000150
Ω 1 (m ²)	109
Arenas Arcillosas	
K 2 (m/s)	0,000002
Ω 2 (m ²)	40
K eq (m/s)	0,000110
Ω T (m ²)	149
Río Camarones hasta Conaxa	
Gravas y Arenas	
K 1 (m/s)	0,000160
Ω 1 (m ²)	290
Arenas Arcillosas	
K 2 (m/s)	0,000002

$\Omega 2$ (m2)	532
K eq (m/s)	0,000058
ΩT (m2)	823
Quebrada Camiña hasta Altusa	
Ripios, Gravas y Arena	
K 1 (m/s)	0,000150
$\Omega 1$ (m2)	1.250
Gravas y Arenas	
K 2 (m/s)	0,000160
$\Omega 2$ (m2)	500
K eq (m/s)	0,000153
ΩT (m2)	1.749
Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	
Gravas y Arenas	
K 1 (m/s)	0,000160
$\Omega 1$ (m2)	849
Arenas y Gravas Arcillosas	
K 2 (m/s)	0,000010
$\Omega 2$ (m2)	637
K eq (m/s)	0,000096
ΩT (m2)	1.486
Río Collacagua en Peñablanca	
Gravas y Arenas	
K 1 (m/s)	0,000160
$\Omega 1$ (m2)	322
Arenas Arcillosas	
K 2 (m/s)	0,000002
$\Omega 2$ (m2)	202
K eq (m/s)	0,000099
ΩT (m2)	523

Río Piga hasta Collacagua	
Gravas y Arenas	
K 1 (m/s)	0,000160
Ω 1 (m ²)	2.424
Arenas, Limos y Arcillas	
K 2 (m/s)	0,000002
Ω 2 (m ²)	1.728
K eq (m/s)	0,000094
Ω T (m ²)	4.151
Río Huatacondo hasta Copaquire	
Ripios, Bolones y Gravas	
K 1 (m/s)	0,000200
Ω 1 (m ²)	1.130
Sedimentos Finos Arcillosos	
K 2 (m/s)	0,000002
Ω 2 (m ²)	770
K eq (m/s)	0,000120
Ω T (m ²)	1.900
Río Loa hasta Lequena	
Gravas y Arenas	
K 1 (m/s)	0,000160
Ω 1 (m ²)	424
Sedimentos Finos Arcillosos	
K 2 (m/s)	0,000002
Ω 2 (m ²)	491
K eq (m/s)	0,000075
Ω T (m ²)	915
Río Salado Antes Junta Curti	
Roca Fracturada con Finos	
K (m/s)	0,000002
Ω T (m ²)	66

Nota: K= permeabilidad (m/s); Ω = sección (m²)

Un resumen de las permeabilidades de cada una de las secciones se incluyen en el Cuadro 7.1-3 siguiente.

**CUADRO 7.1-3
RESUMEN PERMEABILIDADES**

	NOMBRE CUENCA	Permeabilidad	
		(m/s)	m/día
1	Río Lluta	0,000010	0,86
2	Río Lluta bajo Río Azufre	0,000010	0,86
3	Río Caquena	0,000140	12,12
4	Río San José Alto	0,000160	13,82
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	0,000110	9,52
6	Río Camarones hasta Conanoxa	0,000058	4,99
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	0,000153	13,21
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	0,000096	8,27
9	Río Collacagua hasta Peñablanca (Huasco)	0,000099	8,56
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	0,000094	8,14
11	Río Huatacondo hasta Copaquire	0,000120	10,35
12	Río Loa hasta Lequena	0,000075	6,50
13	Río Salado hasta Curti	0,000002	0,14

7.2. Pendiente del Agua Subterránea

7.2.1. Generalidades

En las zonas de ubicación de cada una de las secciones que se analizan, no se cuenta con información de niveles de agua subterránea, ya que no existen pozos cercanos que pudiesen servir para estimar cotas de agua subterránea.

De acuerdo con lo anterior, la pendiente del agua subterránea ha sido asignada similar a la pendiente del terreno en la sección de análisis. Para ello se ha generado la información necesaria a partir de datos de cotas de terreno disponibles en la web (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>).

La NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón, conocido como METI, han diseñado un nuevo mapa topográfico digital: **ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model)**, creado a partir de casi 1,3 millones de imágenes estéreo recogidas por el radiómetro japonés llamado **ASTER (Advanced Spaceborne**

Thermal Emission and Reflection Radiometer). Este radiómetro es uno de los cinco instrumentos de observación de la Tierra que viajan a bordo del satélite americano **Terra**, lanzado en diciembre de 1999. ASTER recoge las imágenes del espectro visible y también las regiones de longitud de onda de las radiaciones térmicas infrarrojas, con resoluciones espaciales que van desde unos 15 a 90 metros.

Hasta ahora, el mapa topográfico más completo era el ofrecido por la *Shuttle Radar Topography Mission* de la NASA, que abarcaba el 80% de la superficie de la Tierra. Sin embargo, los resultados de la misión no fueron muy precisos en el terreno escarpado y en algunas zonas desérticas. Esta misión cubría el 80% de la superficie de la Tierra, entre los 60 grados de latitud Norte y los 57 grados de latitud Sur. En cambio, ASTER GDEM amplía la cobertura a un 99%, entre los 83 grados de latitud Norte y los 83 grados de latitud Sur. Lo que está haciendo la NASA ahora es trabajar para combinar los datos de ASTER con los de la *Shuttle Radar Topography Mission* y otras fuentes y así poder producir un mejor mapa topográfico mundial. Los puntos de elevación del terreno han sido medidos cada 30 metros (píxeles de 30 m x 30 m).

El procedimiento para generar curvas de nivel en cada uno de los sectores de salida de las cuencas en análisis se explica a continuación:

7.2.2. Procedimiento Generación de Curvas de Nivel

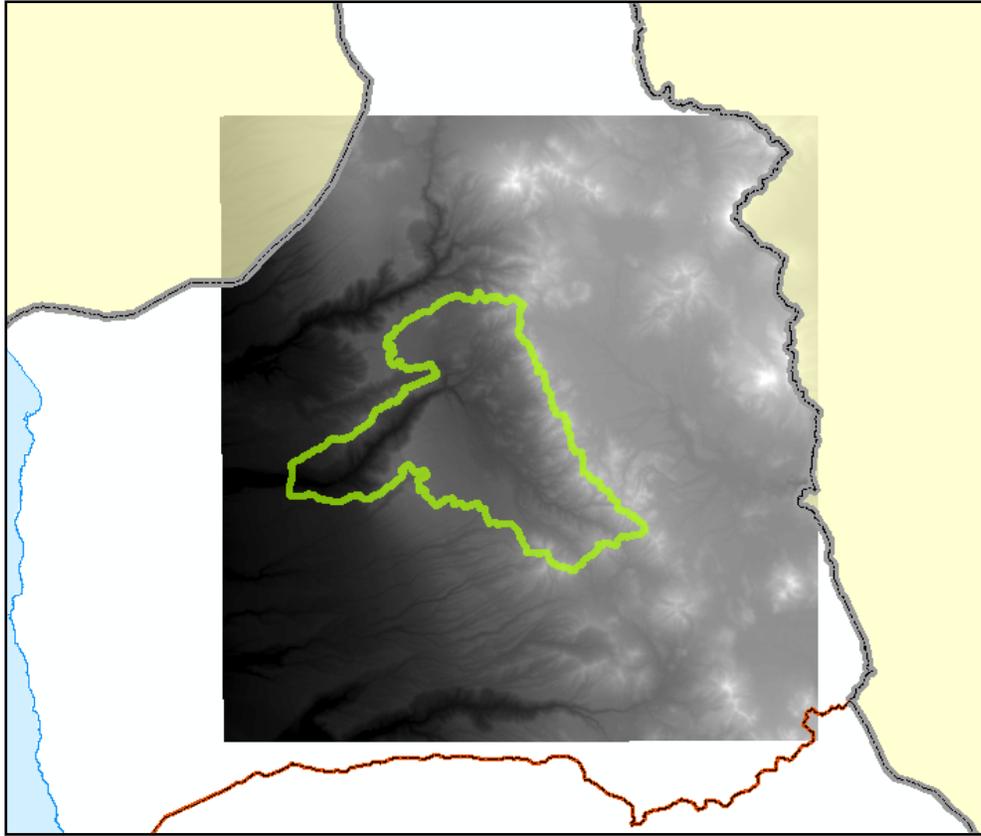
Antes de explicar el procedimiento, es importante destacar que éste se puede aplicar tanto para los DEM (Modelos Digitales de Elevación) SRTM (**S**huttle **R**adar **T**opography **M**ision) y ASTER (**A**dvanced **S**paceborne **T**hermal **E**mission and **R**eflection **R**adiometer). Es importante destacar que independiente de la zona en la se desarrolle el estudio, siempre se recomienda (en la medida de los posible) tomar puntos de control (topográficos) con elevación para verificar qué DEM se ajusta de mejor manera al área de interés.

Para la aplicación desarrollada se ha utilizado el software ArcGis 9.2 de ESRI, con DEM Aster (píxeles de 30 m x 30 m).

Una vez identificada el área de estudio y el DEM (descargado de internet) correspondiente a esa área, se genera un shape de polígono que servirá de "máscara" de corte del DEM, es decir, esta "máscara" permite cortar sólo la parte del DEM de la zona específica que se requiere trabajar y generar las curvas.

A modo de ejemplo, en la Figura 7.2-1 se puede observar que el área que abarca el DEM es algo mayor de la zona que se necesita generar las curvas de nivel (zona de color verde).

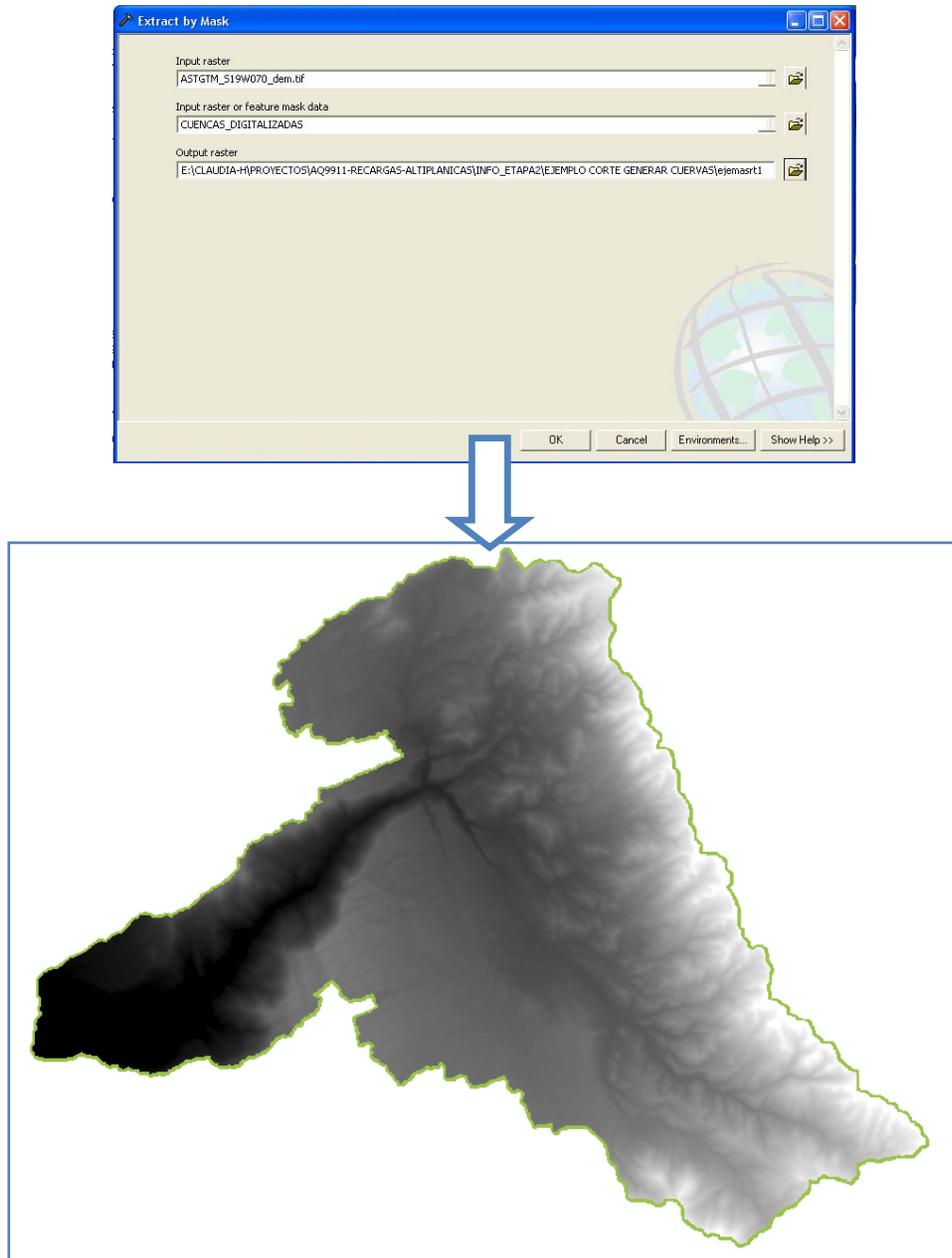
FIGURA 7.2-1
EJEMPLO, DEM ASTER Y POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO



Para el ejemplo anterior, se considerará como “mascara” de corte el shape de polígono del área de estudio. Así, se utiliza la herramienta “Extract by Mask” de la aplicación “Spatial Analyst Tools\Extraction”, con la cual se obtiene sólo la sección del DEM que interesa, asignándole un nombre y ubicación a elección.

La Figura 7.2-2 muestra la ventana de diálogo de la herramienta y el resultado del nuevo DEM.

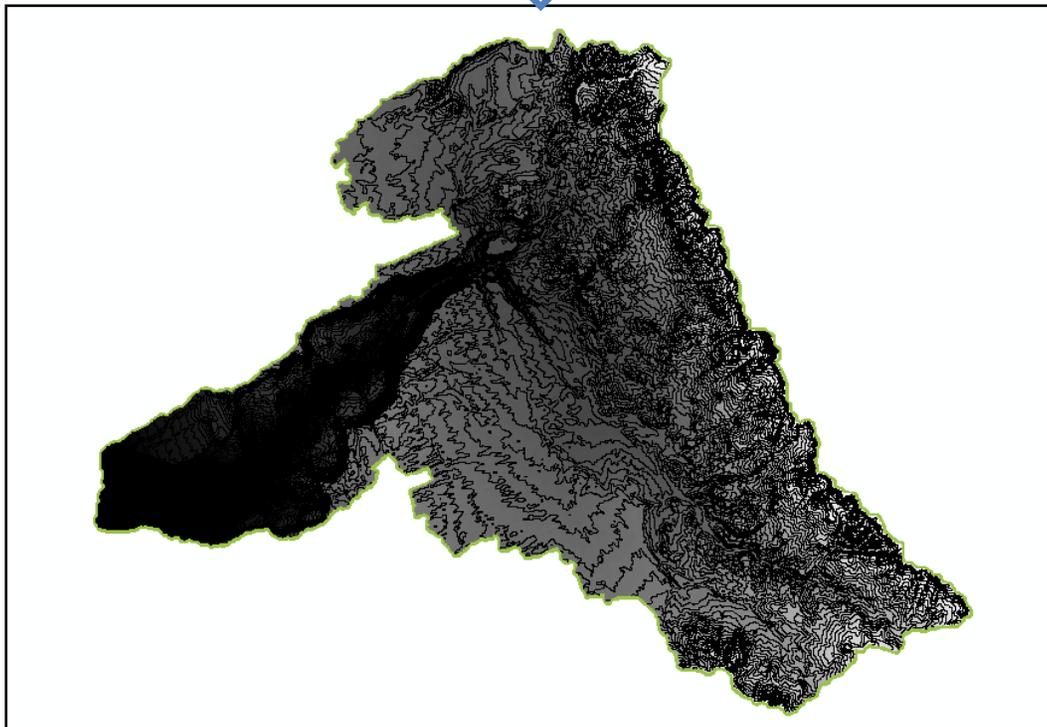
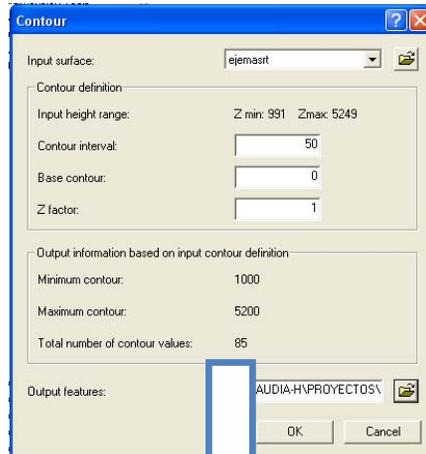
FIGURA 7.2-2
EJEMPLO, CORTE DEL DEM A TRAVÉS DE UN SHAPE DE POLÍGONO



Para generar las curvas de nivel de la zona específica de interés, se utiliza la herramienta "Contour" de la aplicación "Spatial Analyst Tools\Surface". Esta herramienta permite asignar el intervalo de las curvas que se van a generar, el nombre del shape de línea que se generara con las curvas, y la ubicación de este

shape. La Figura 7.2-3 presenta la ventana de diálogo de la herramienta y el resultado de las curvas obtenido. En este ejemplo se crearon curvas de nivel cada 50 m.

**FIGURA 7.2-3
EJEMPLO, GENERACIÓN CURVAS DE NIVEL EN EL ÁREA DE ESTUDIO**



De acuerdo con el procedimiento explicado anteriormente, las pendientes de terreno, asimiladas a la pendiente del agua subterránea, en cada una de las secciones de salida de las cuencas que se analizan son las siguientes (Figuras 7.2-4 a 7.2-16).

VAN 14 FIGURAS, FIGURA 7.2-4 A 7.2-17

Un resumen de las pendientes calculadas se incluyen en el Cuadro 7.2-1.

CUADRO 7.2-1
PENDIENTES DE TERRENO
(asimilada a la pendiente del agua subterránea)

	NOMBRE CUENCA	Pendiente
		A. S. (°/1)
1	Río Lluta	0,0920
2	Río Lluta bajo Río Azufre	0,0089
3	Río Caquena	0,0219
4	Río San José Alto *	0,0800
5	Río Codpa hasta Cala-Cala	0,0279
6	Río Camarones hasta Conanoxa	0,0104
7	Quebrada Camiña hasta Altusa	0,0269
8	Quebrada de Tarapacá hasta Sibaya	0,0320
9	Río Collacagua hasta Peñablanca (Huasco)	0,0036
10	Río Piga hasta Collacagua (Huasco)	0,0123
11	Río Guatacondo hasta Copaquire	0,0170
12	Río Loa hasta Leugena	0,0061
13	Río Salado hasta Curti	0,0643

Nota: Se aumentó la pendiente calculada debido a que ésta se evaluó en un sector donde se produce un estrechamiento

7.3. Secciones del Medio Poroso Saturado

La sección del medio poroso saturado se ha determinado a través de los resultados de la geofísica (NanoTem). En efecto, tal como fuera antes señalado, las prospecciones NanoTem permiten estimar las secciones permeables, y a su vez, determinan la profundidad del agua subterránea. Las secciones que han sido consideradas como acuíferos se incluyen en el Anexo 1 Estudio Geofísico; los valores de las secciones permeables de cada sección de salida de las cuencas que se analizan se pueden consultar en el Cuadro 7.1-2.

7.4. Caudales Subterráneos en Secciones de Salida

De acuerdo con los valores presentados en los puntos anteriores, en el Cuadro 7.4-1 se incluyen los caudales de agua subterránea que escurren en cada una de las secciones de salida de las 13 cuencas que se analizan. 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 7.4-1
CAUDALES SUBTERRÁNEOS EN SECCIONES DE SALIDA
DE LAS 13 CUENCAS QUE SE ANALIZAN**

	NOMBRE CUENCA	Permeabilidad (m/s)	Pendiente A. S. (°/1)	Sección Medio Poroso (m2)	Caudal Subterráneo (l/s)	Caudal de Salida Obs.(l/s)	Porcentaje Q sub. / Q sal. (%)
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.

En las cuencas del río Guatacondo y San José Alto los flujos subterráneos están en torno al 10 %:

Río Guatacondo: el flujo subterráneo es un 10 % del caudal de salida, no obstante el caudal subterráneo 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. Es decir, se puede establecer que esta cuenca no debiera ser considerada en los análisis recién desarrollados.

Río San José Alto: esta 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 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"), fue estimado en 100 l/s. De acuerdo con ello, el caudal estimado en esta oportunidad se acerca al modelado en el estudio indicado. Adicionalmente, las permeabilidades usadas en el modelo en la zona donde se hizo la geofísica fue:

- Permeabilidad usada en el presente estudio: $1,85 \times 10^{-4}$ m/s (15,94 m/día)
- Permeabilidad final Modelo Azapa: 2×10^{-4} m/s (17,28 m/día)

Se observa la buena concordancia que existe entre ambos valores.

8. BALANCES HÍDRICOS

Se han llevado 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 8-1 se indican las cuencas de interés.

**CUADRO 8-1
CUENCAS DONDE SE DESARROLLAN LOS BALANCES HÍDRICOS**

	Cuenca	Altura Media	Área Total
		(msnm)	(km2)
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	3.901
6	Salar del Huasco	4.165	1.471
7	Cancosa	4.173	2.048
8	Camíña Alto	519	4.084
9	Maricunga	4.295	2.195
10	Pedernales	3.992	3.588
11	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).

A continuación se presentan los balances hídricos (globales y preliminares) en cada una de las 11 cuencas indicadas en el Cuadro 8-1 anterior.

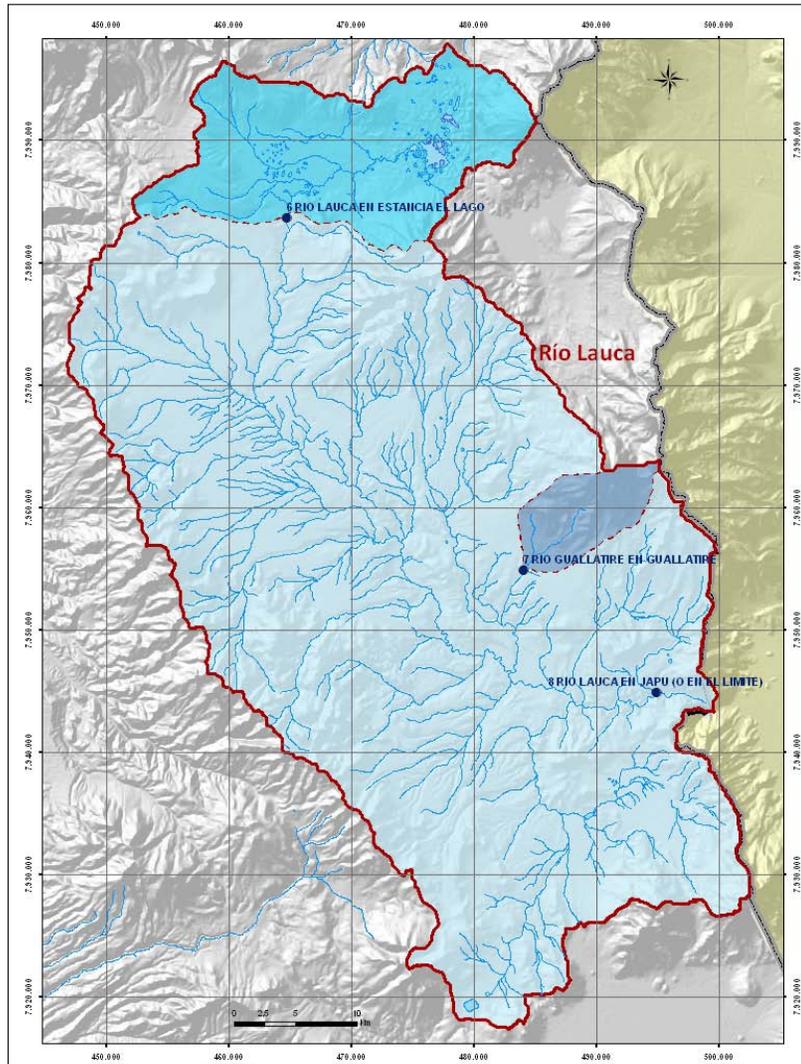
8.1. Cuenca del Río Lauca

Esta cuenca se ha dividido en 3 sub-cuencas, considerando como punto de cierre estaciones fluviométricas que cuentan con suficiente información de caudales (al menos 10 años). Las subcuencas tomadas en cuenta fueron las siguientes:

- Río Lauca en Estancia El Lago
- Río Guallatire en Guallatire
- Río Lauca en Japu

La siguiente Figura muestra la ubicación de las Subcuencas identificadas.

**FIGURA 8-1
IDENTIFICACIÓN SUBCUENCAS**



8.1.1. Balance Global de Escorrentía y Usos

En el Cuadro 8-1 se incluyen las precipitaciones obtenidas para cada subcuenca y el Cuadro 8-2 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes), para cada subcuenca.

CUADRO 8-1 PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES

				Precipitaciones medias (mm)																
ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km ²	Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno	
1	Río Lauca	6	Río Lauca en Estancia El Lago	311,33	113,80	90,78	59,61	10,96	1,07	1,19	3,69	4,07	1,60	3,09	11,30	39,75	340,91	22,58	318,33	
		7	Río Guallatire en Guallatire	64,05	113,63	96,65	59,08	8,19	1,01	1,91	5,27	4,56	2,15	3,80	8,63	37,60	342,47	23,09	319,38	
		8	Río Lauca en Japu	2062,24	76,84	65,57	39,65	4,99	0,65	1,24	3,47	3,09	1,36	2,24	5,31	25,29	229,71	14,80	214,91	

CUADRO 8-2 CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km ²	Caudal calculado	Caudal Estación*	Dda. de Agua	
							Super	Subt
1	Río Lauca	6	Río Lauca en Estancia El Lago	311,33	526	146	600*	0
		7	Río Guallatire en Guallatire	64,05	109	369	0	0
		8	Río Lauca en Japu	2062,24	1519	2690	0	80

* El caudal de la estación "Río Lauca en Estancia El Lago" se consideró a partir del año 1963, año en el cual se inició el funcionamiento del canal Lauca (600 l/s).

Con relación a las demandas, se tiene:

- Superficiales: se consideraron 600 l/s de la salida del canal Lauca medida en la estación fluviométrica "Canal Lauca en Sifón N°1".
- Subterráneas: hay derechos constituidos de mineras. Para efectos del balance, se consideró la demanda real.

Los balances por subcuencas se muestran en la Figuras 8-2 y 8-3 siguientes.

FIGURA 8-2
DISTRIBUCIÓN DEL BALANCE EN LA CUENCA

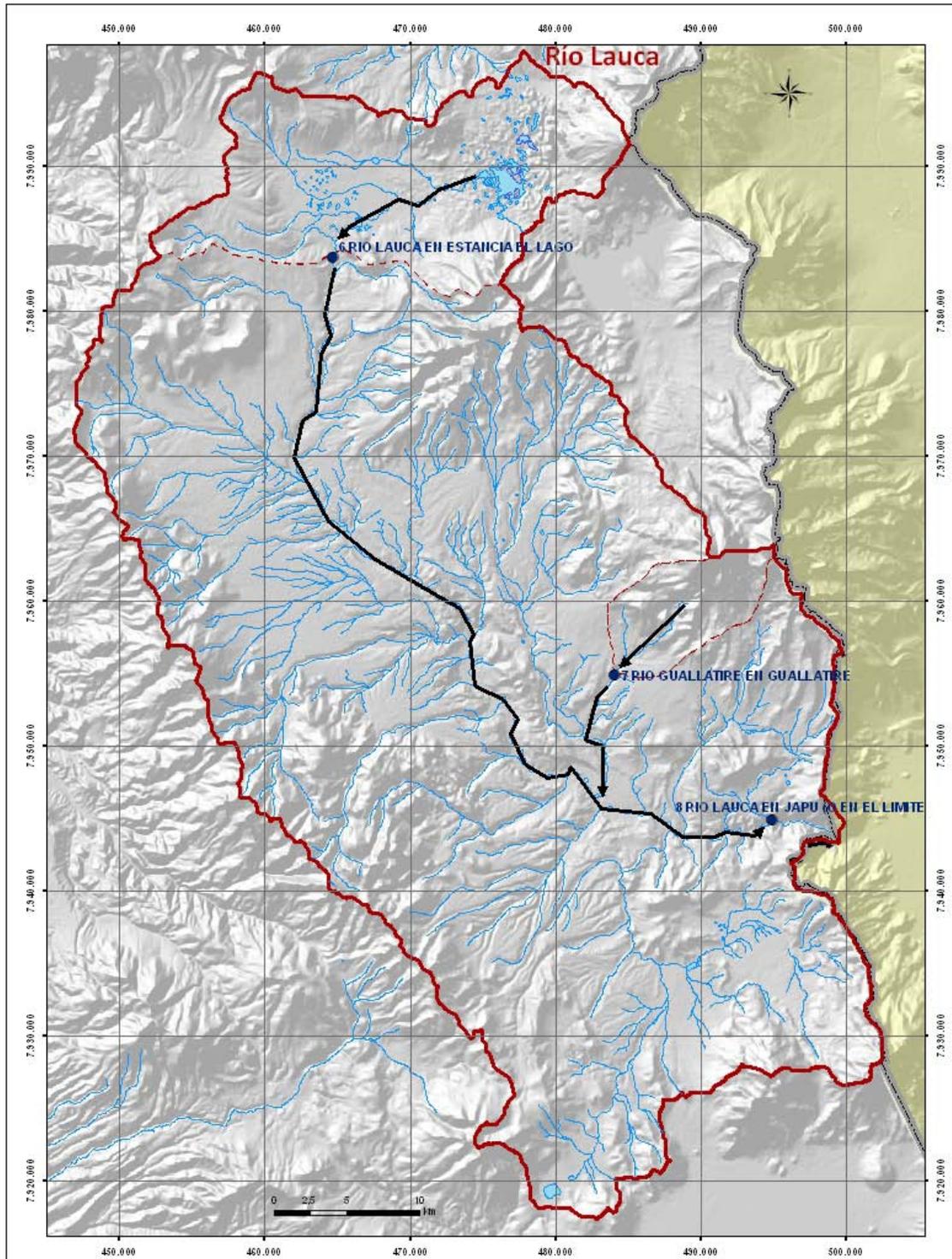
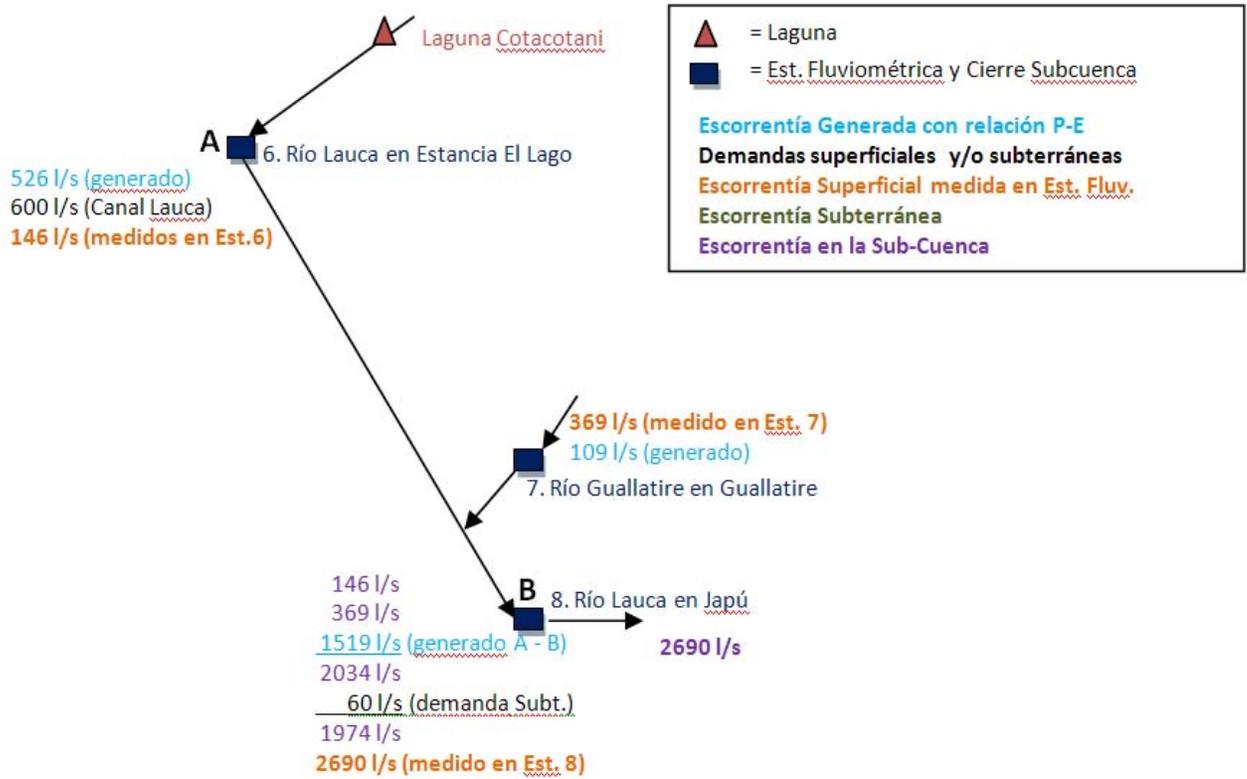


FIGURA 8-3
ESQUEMA BALANCE GLOBAL DE ESCORRENTÍA, CUENCA RÍO LAUCA



8.1.2. Resumen del Balance

Un resumen de los balances efectuados se incluye en el Cuadro 8-3.

CUADRO 8-3
RESUMEN BALANCES (l/s)

ID	CUENCA	NEst	subcuenca	Esc. Gen	Med. Est.	Uso Efec	Esc. Resul
1	Río Lauca	6	Río Lauca en Estancia El Lago	526	146		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
			Canal Lauca en Sifón N°1			600	
							146
		7	Río Guallatiré en Guallatiré	109	369		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							369
		8	Río Lauca en Japu	1519	2690		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			60	
							2690
Total recursos a la salida de la Cuenca							2690

8.1.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Lauca

- El caudal generado en la primera subcuenca (526 l/s) es claramente menor al caudal medido en la estación Lauca en Estancia El Lago (Est. N° 6), debido a la presencia del canal Lauca que extrae aproximadamente 600 l/s continuos. Si se suma el caudal medido en la estación N° 6 con el caudal del canal Lauca, y se resta las evaporaciones de la Laguna Cotacotani (200 l/s aprox.), se llega a que el caudal generado es muy similar al caudal que pasaría por el cierre de la primera subcuenca (526 l/s vrs. 546 l/s); la escorrentía total de salida no comprometida en la primera subcuenca es de 146 l/s.
- Continuando con el balance hacia aguas abajo, la escorrentía de salida en la subcuenca del río Guallatire en Guallatire es de 369 l/s.
- Finalmente, en la cuenca del Lauca hasta la estación Lauca en Japu, se produciría una escorrentía de salida de 2.690 l/s.

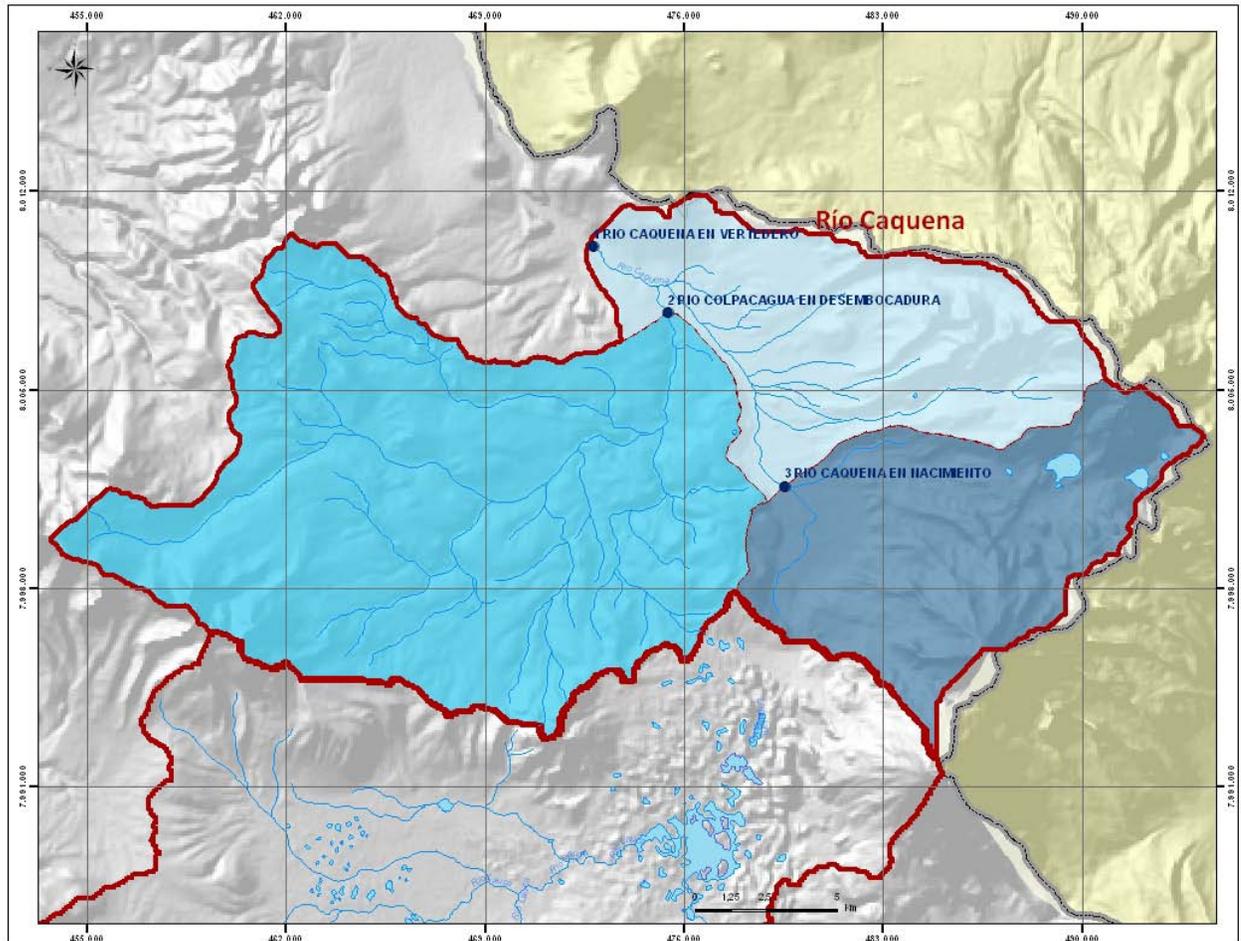
8.2. Cuenca del Río Caquena

Esta cuenca se ha dividido en 3 sub-cuencas, a saber:

- Río Caquena en Nacimiento
- Río Colpacagua en Desembocadura
- Río Caquena en Vertedero

En la Figura 8-4 se muestra la ubicación de las Subcuencas identificadas en la cuenca del río Caquena.

FIGURA 8-4
IDENTIFICACIÓN SUBCUENCAS



8.2.1. Balance Global de Escurrentía y Usos

En el Cuadro 8-4 se incluyen las precipitaciones obtenidas para cada subcuenca y el Cuadro 8-5 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes), para cada subcuenca.

**CUADRO 8-4
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Precipitaciones medias (mm)														
					Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno
2	Río Caquena	3	Río Caquena en nacimiento	103,49	110,15	89,91	64,63	10,83	1,17	2,03	4,66	5,75	1,85	4,77	11,52	40,63	348	26,28	321,61
		2	Río Colpacagua en desembocadura	246,78	109,41	88,14	61,26	10,63	1,11	1,74	3,90	5,16	1,87	4,35	11,29	39,37	338	24,40	313,81
		1	Caquena en vertedero	101,73	107,52	91,69	67,34	9,77	1,13	2,13	5,69	6,79	1,27	4,18	10,24	40,21	348	26,78	321,19

**CUADRO 8-5
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Dda. de Agua	
							Super	Subt
2	Río Caquena	3	Río Caquena en nacimiento	103,49	179	310	0	0
		2	Río Colpacagua en desembocadura	246,78	405	1.230	0	0
		1	Caquena en vertedero	101,73	175	1.010	0	0

Con relación a las demandas, se tiene:

- Superficiales: todos son de Comunidades Indígenas, por lo que no se consideraron.
- Subterráneas: no hay derechos constituidos dentro de la cuenca del Río Caquena.

Los balances por subcuencas se muestran en la Figuras 8-5 y 8-6 siguiente.

FIGURA 8-5
DISTRIBUCIÓN DEL BALANCE EN LA CUENCA

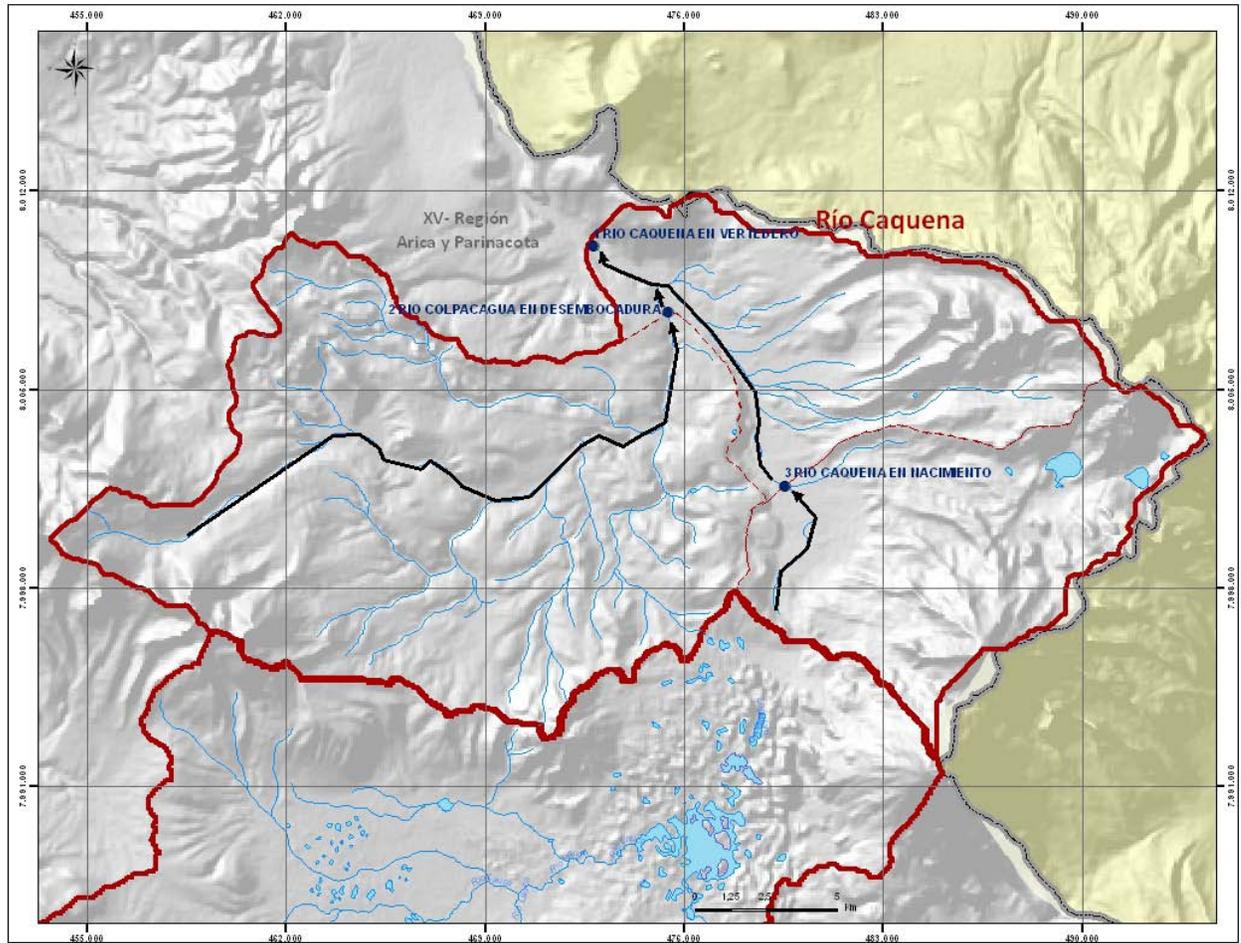
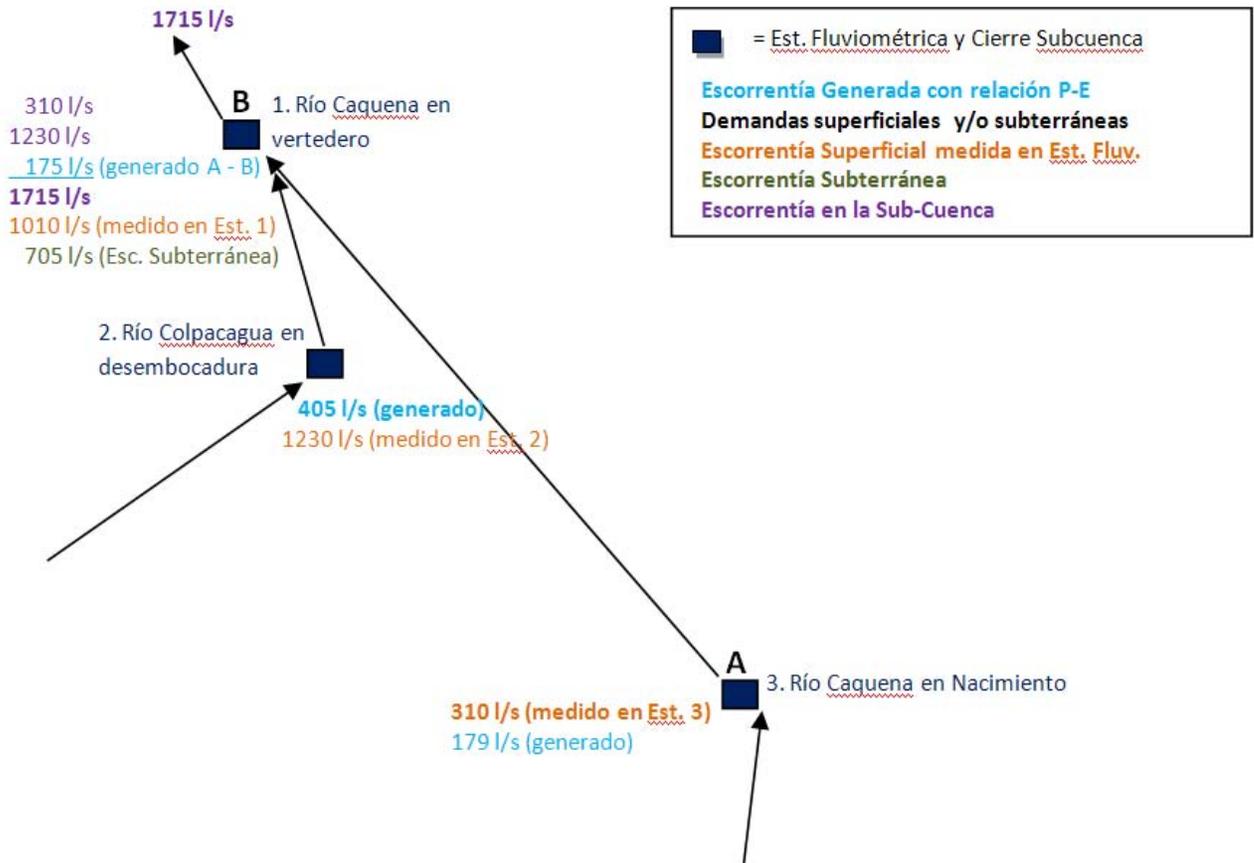


FIGURA 8-6
ESQUEMA BALANCE GLOBAL DE ESCORRENTÍA, CUENCA RÍO CAQUENA



8.2.2. Resumen del Balance

Un resumen de los balances efectuados se incluye en el Cuadro 8-6.

**CUADRO 8-6
RESUMEN BALANCES (l/s)**

ID	CUENCA	NEst	subcuenca	Esc. Gen	Med. Est.	Uso Efec	Esc. Result
2	Río Caquena	3	Río Caquena en nacimiento	179	310		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							310
		2	Río Colpacagua en desembocadura	405	1.230		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							1.230
		1	Río Caquena en vertedero	175	1.010		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							1.715
Total recursos a la salida de la Cuenca							1.715

8.2.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Caquena

- La subcuenca hasta río Caquena en Nacimiento presenta un caudal generado de 179 l/s y medido de 310 l/s, por lo que se puede asumir que en dicha cuenca el caudal de salida sería de 310 l/s.
- En la subcuenca del río Colpacagua en desembocadura, se da el resultado de que el caudal generado con la relación P-E es la tercera parte del caudal medido en la estación fluviométrica que cierra dicha cuenca (405 l/s generados vrs. 1.230 l/s medidos). De acuerdo con ello, el caudal total de salida en dicha cuenca asciende a 1.230 l/s.
- Finalmente, en el cierre de la cuenca de Caquena en Vertedero, se obtiene un caudal total de 1.715 l/s, los cuales se desglosan en 705 l/s subterráneos y 1.010 l/s superficiales, correspondientes a los caudales de salida en toda la cuenca.

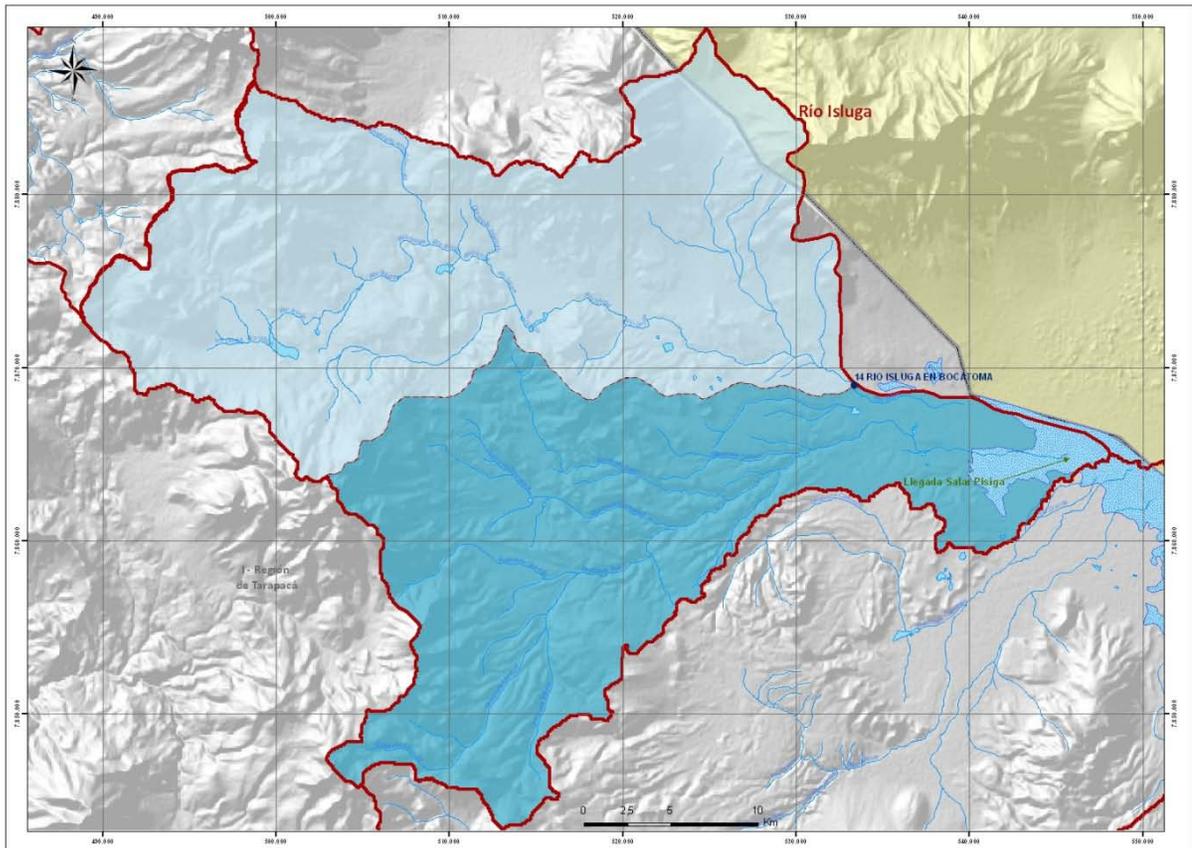
8.3. Cuenca del Río Isluga

Esta cuenca se ha dividido en 2 sub-cuenas, a saber:

- Río Isluga en Bocatoma
- Río Isluga – Salar Pisiga

En la Figura 8-7 se muestra la ubicación de las Subcuenas identificadas en la cuenca del río Isluga.

**FIGURA 8-7
IDENTIFICACIÓN SUBCUENCAS**



8.3.1. Balance Global de Escorrentía y Usos

En el Cuadro 8-7 se incluyen las precipitaciones obtenidas para cada subcuenca y el Cuadro 8-8 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes), para cada subcuenca.

**CUADRO 8-7
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Precipitaciones medias (mm)														
					Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno
1	Río Isluga	14	Río Isluga en bocatoma	630,06	86,52	69,14	38,32	5,17	1,02	1,85	4,30	1,15	1,70	1,48	2,42	18,27	231,34	15,19	216,15
			Isluga - Salar Pisiga	530,65141	74,242	55,33	31,21	4,411	0,627	1,27	3,01	0,88	1,22	1,13	2,436	14,77	190,56	11,43	179,13

**CUADRO 8-8
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Dda. de Agua	
							Super	Subt
1	Río Isluga	14	Río Isluga en bocatoma	630,06	470	507	0	0
			Isluga - Salar Pisiga	530,65141	264	--	0	0

Con relación a las demandas, se tiene:

- Superficiales: todas son de Comunidades Indígenas, por lo que no fueron tomadas en cuenta.
- Subterráneas: no hay derechos de agua constituidos dentro de la cuenca Río Isluga.
- No se ha considerado como demanda el Salar Pisiga, por ser éste el que recibe el aporte total de la subcuenca 2 (Isluga – Salar Pisiga), y es allí donde se cierra el balance.

Los balances por subcuencas se muestran en la Figuras 8-8 y 8-9 siguientes.

FIGURA 8-8
DISTRIBUCIÓN DEL BALANCE EN LA CUENCA

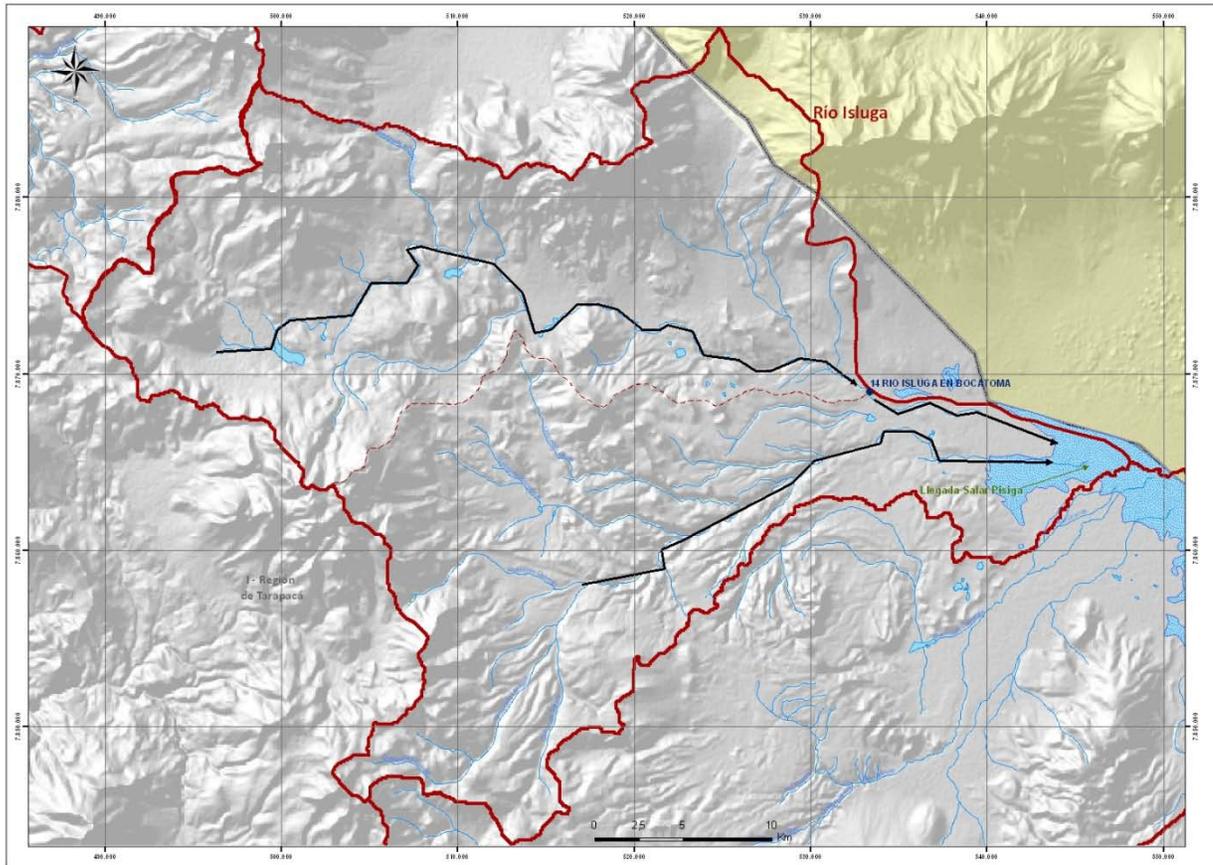
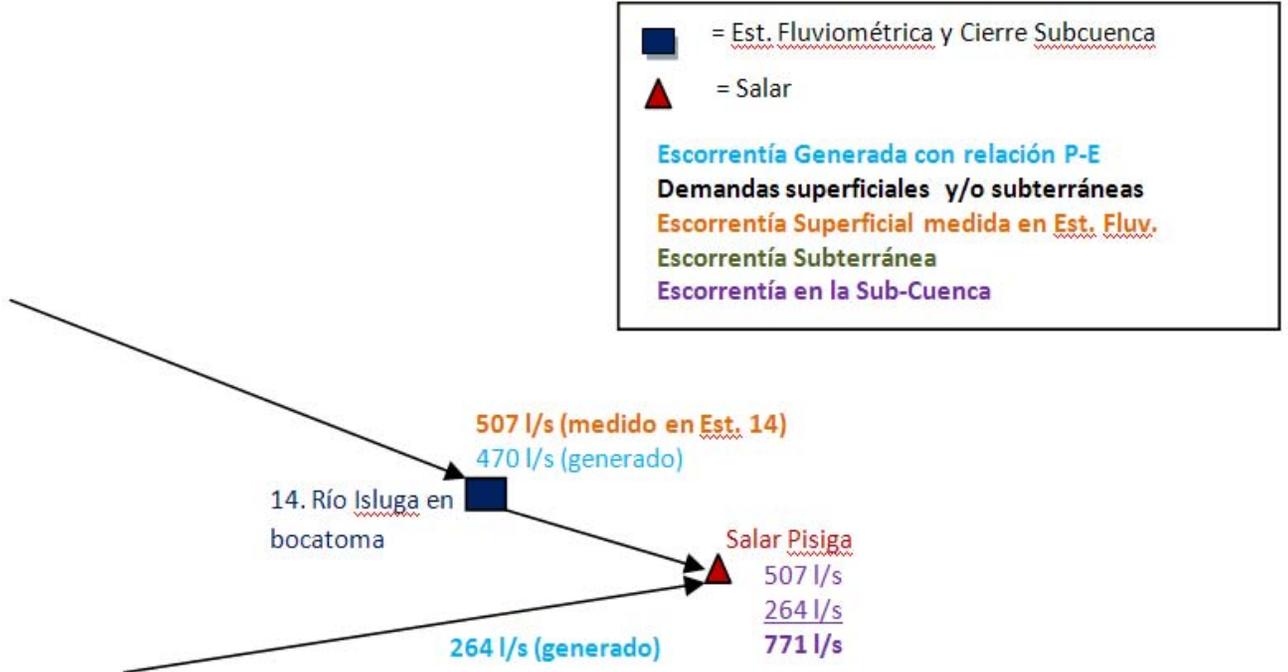


FIGURA 8-9
ESQUEMA BALANCE GLOBAL DE ESCORRENTÍA, CUENCA RÍO ISLUGA



8.3.2. Resumen del Balance

Un resumen de los balances efectuados se incluye en el Cuadro 8-9.

CUADRO 8-9
RESUMEN BALANCES (l/s)

ID	CUENCA	NEst	subcuenca	Esc. Gen	Med. Est.	Uso Efec	Esc. Result
3	Río Isluga	14	Río Isluga en bocatoma	470	507		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							507
			Río Isluga - Salar Pisiga	264	--		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							264
	Total recursos a la salida de la Cuenca						771

8.3.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Isluga

- En la subcuenca del río Isluga hasta Bocatoma el caudal de salida sería cercano a los 500 l/s (los caudales generados (totales) y medidos son similares)
- En la subcuenca ubicada al Sur de la anterior, el caudal generado asciende a 264 l/s (caudal total).
- Al Salar de Pisiga los recursos de salida serían de 771 l/s totales.

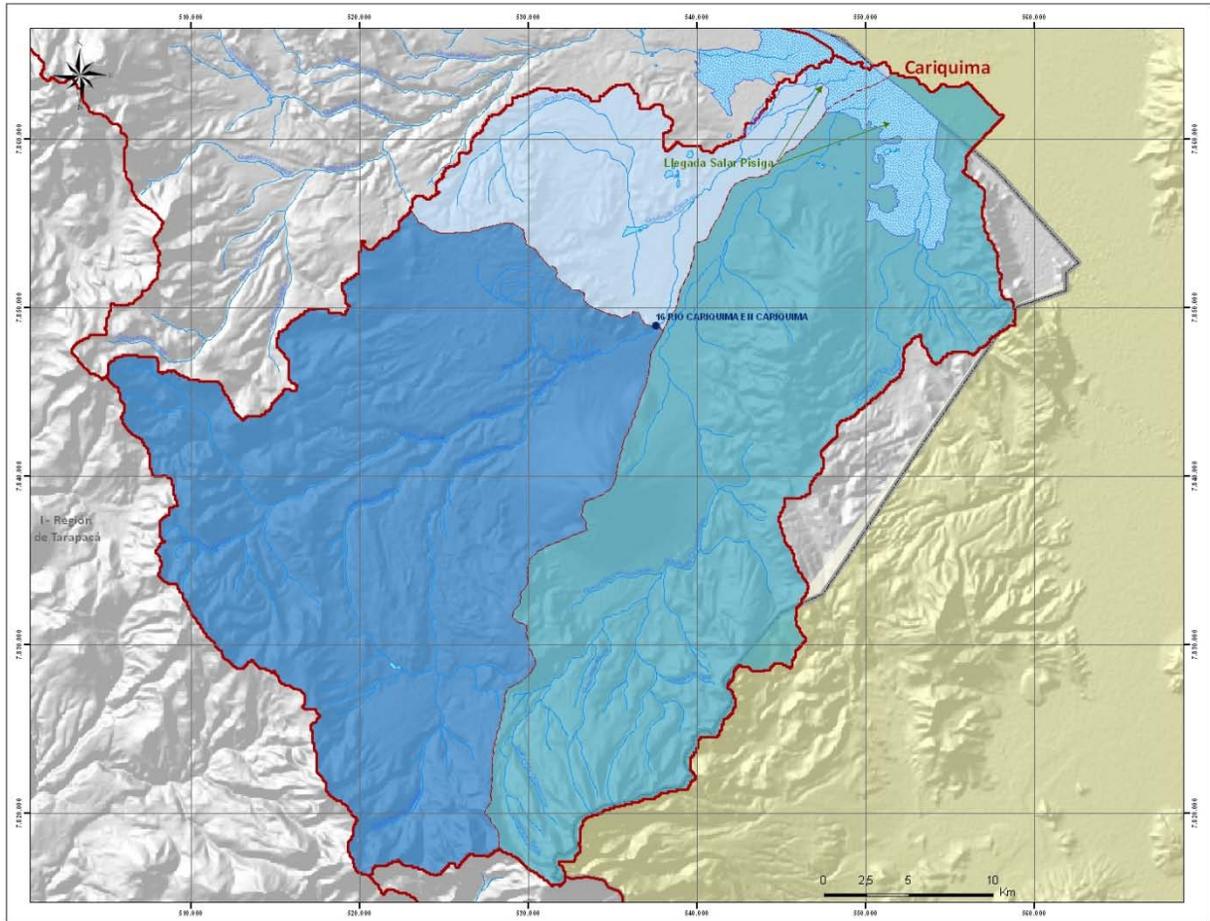
8.4. Cuenca del Río Cariquima

Esta cuenca se ha dividido en 3 sub-cuencas, a saber:

- Río Cariquima en Cariquima
- Río Grande – Salar Pisiga
- Quebrada Cococolloani – Salar Pisiga

En la Figura 8-10 se muestra la ubicación de las Subcuencas identificadas en la cuenca del río Cariquima.

FIGURA 8-10
IDENTIFICACIÓN SUBCUENCAS



8.4.1. Balance Global de Escorrentía y Usos

En el Cuadro 8-10 se incluyen las precipitaciones obtenidas para cada subcuenca y el Cuadro 8-11 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes), para cada subcuenca.

**CUADRO 8-10
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Precipitaciones medias (mm)														
					Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno
4	Río Cariquima	16	Río Cariquima en Cariquima	682,9	85,6	67,8	36,2	4,1	1,1	1,4	2,0	1,6	1,0	1,1	3,6	14,8	220,4	11,3	209,1
			Río Grande - Salar Pisiga	184,7	71,6	45,4	26,6	4,2	0,3	0,7	1,9	0,6	0,9	0,9	3,0	12,8	168,8	8,6	160,2
			Q. Chococolloani - Salar Pisiga	625,6	83,9	62,8	33,1	4,5	0,6	1,3	2,1	1,3	1,2	1,1	3,7	14,8	210,6	11,1	199,5

**CUADRO 8-11
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Dda. de Agua	
							Super	Subt
4	Río Cariquima	16	Río Cariquima en Cariquima	682,9	474	97*	0	0
			Río Grande - Salar Pisiga	184,7	72		0	0
			Q. Chococolloani - Salar Pisiga	625,6	392		0	0

* Sólo 4 años de estadísticas fluviométricas

Los balances por subcuencas se muestran en la Figuras 8-11 y 8-12 siguientes.

FIGURA 8-11
DISTRIBUCIÓN DEL BALANCE EN LA CUENCA

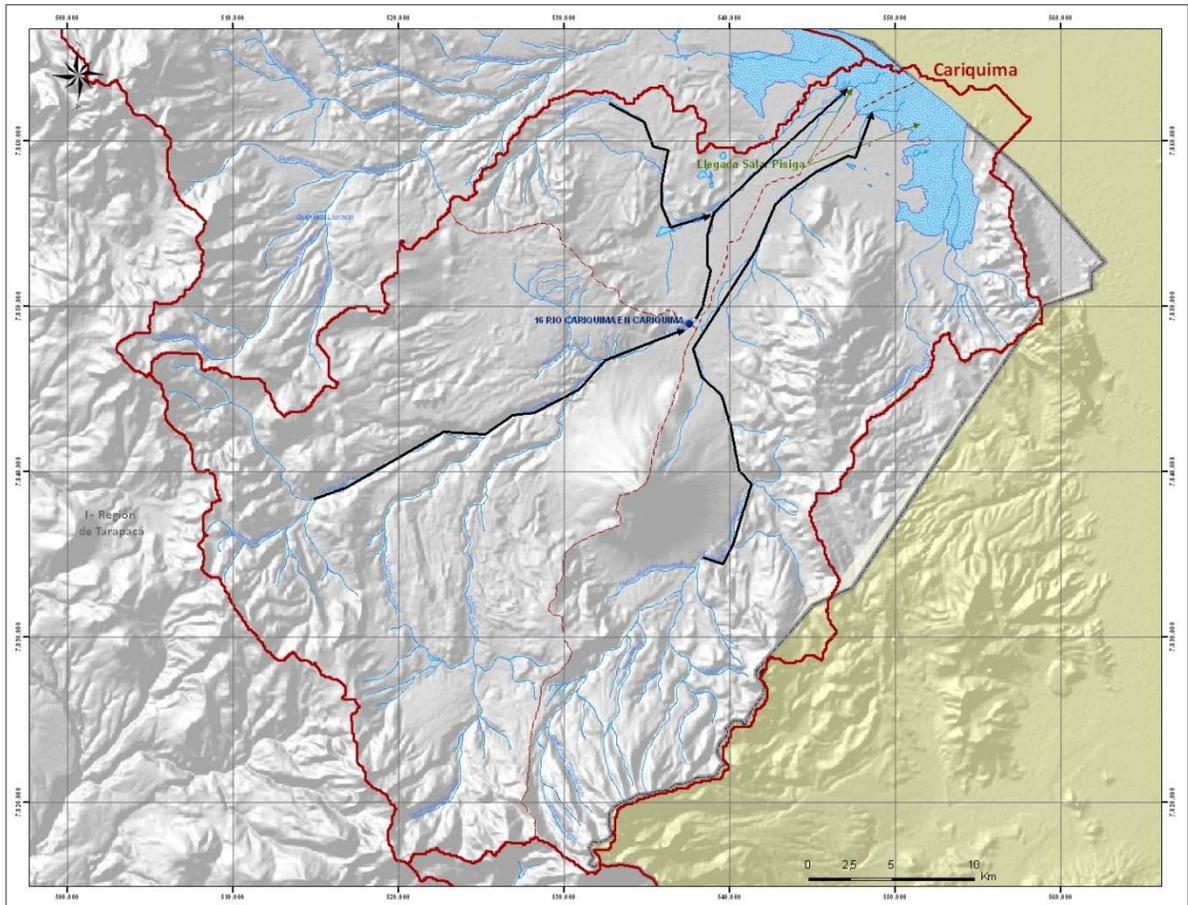
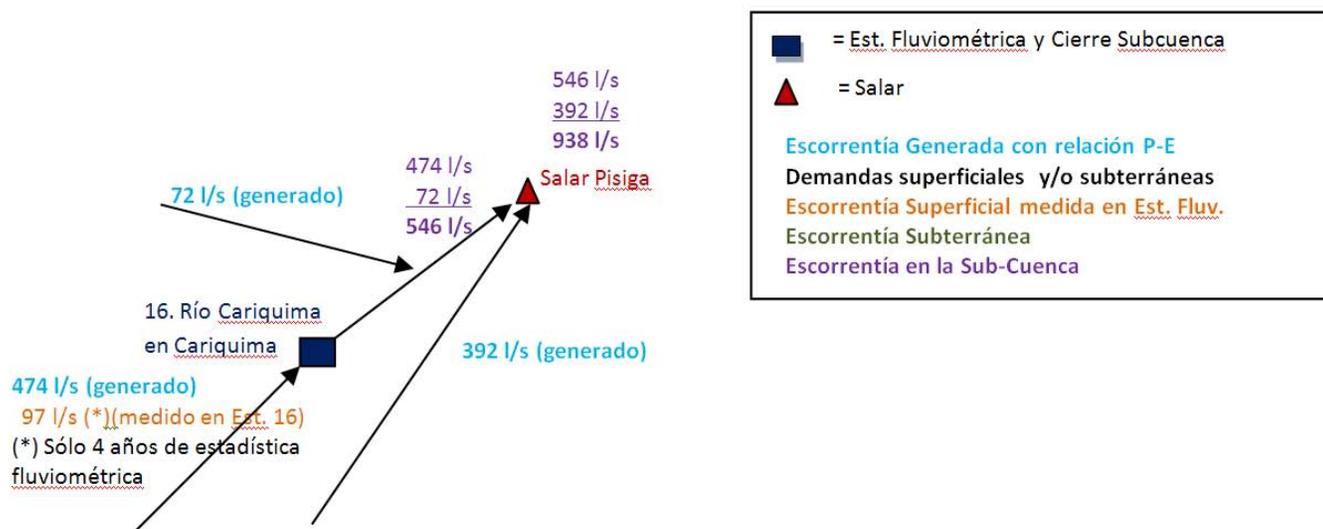


FIGURA 8-12
ESQUEMA BALANCE GLOBAL DE ESCORRENTÍA, CUENCA RÍO CARIQUIMA



8.4.2. Resumen del Balance

Un resumen de los balances efectuados se incluye en el Cuadro 8-12.

CUADRO 8-12
RESUMEN BALANCES (l/s)

ID	CUENCA	NEst	subcuenca	Esc. Gen	Med. Est.	Uso Efec	Esc. Resul
4	Río Cariquima	16	Río Cariquima en Cariquima	474	97*		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							474
			Río Grande - Salar Pisiga	72	--		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							546
			Q. Chococolloani - Salar Pisiga	392	--		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							392
			Total recursos sobrantes a la salida de la Cuenca				938

* Sólo 4 años de estadísticas fluviométricas

8.4.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Cariquima

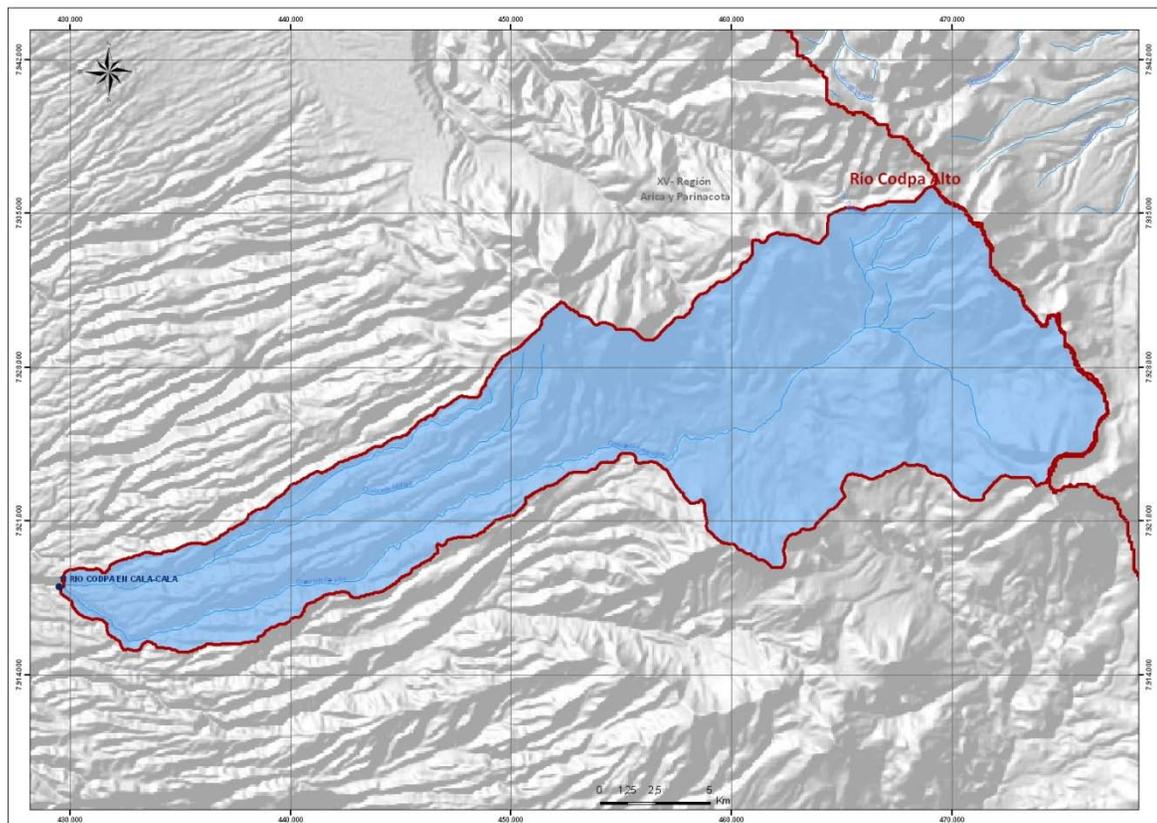
- En la subcuenca del Cariquima en Cariquima, se obtuvo un caudal generado de 474 l/s, versus 97 l/s medidos; el caudal medio anual medido considera sólo 4 años de estadística, por ello la diferencia. Es decir, en esta subcuenca el caudal de salida sería de 474 l/s.
- En la subcuenca ubicada justo al Norte de la anterior, el caudal generado asciende a 72 l/s (caudal total), mientras que en la cuenca ubicada al Este se generaron 392 l/s.
- Al Salar de Pisiga llegan 938 l/s, que sería el caudal de salida de toda la cuenca.

8.5. Cuenca del Río Codpa

En este caso se evaluó la cuenca como una sola unidad, ya que no hay estaciones fluviométricas intermedias.

En la Figura 8-13 se muestra la ubicación de la cuenca de Codpa.

**FIGURA 8-13
IDENTIFICACIÓN CUENCA CODPA**



8.5.1. Balance Global de Escorrentía y Usos

En el Cuadro 8-13 se incluyen las precipitaciones obtenidas para la cuenca y el Cuadro 8-14 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes).

**CUADRO 8-13
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Precipitaciones medias (mm)														
					Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno
5	Río Codpa	11	Río Codpa en Cala-Cala	369,5	55,8	48,7	28,7	2,2	0,2	0,8	1,6	2,4	1,2	1,1	2,1	16,1	161,0	8,5	152,5

**CUADRO 8-14
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Dda. de Agua	
							Super	Subt
5	Río Codpa	11	Río Codpa en Cala-Cala	369,5	129	140	0	0

El caudal generado y medido en la cuenca de Codpa se muestra en el siguiente esquema:

 = Est. Fluviométrica y Cierre Subcuenca

Escorrentía Generada con relación P-E

Demandas superficiales y/o subterráneas

Escorrentía Superficial medida en Est. Fluv.

Escorrentía Subterránea

Escorrentía en la Sub-Cuenca



8.5.2. Conclusiones Balance Cuenca Río Codpa

- En esta cuenca existe sólo una estación fluviométrica a la salida (Codpa en Cala Cala). Los caudales generados versus los medidos son similares (139 l/s generados y 140 l/s medidos), por lo que el caudal de salida de esa cuenca ascendería a 140 l/s.

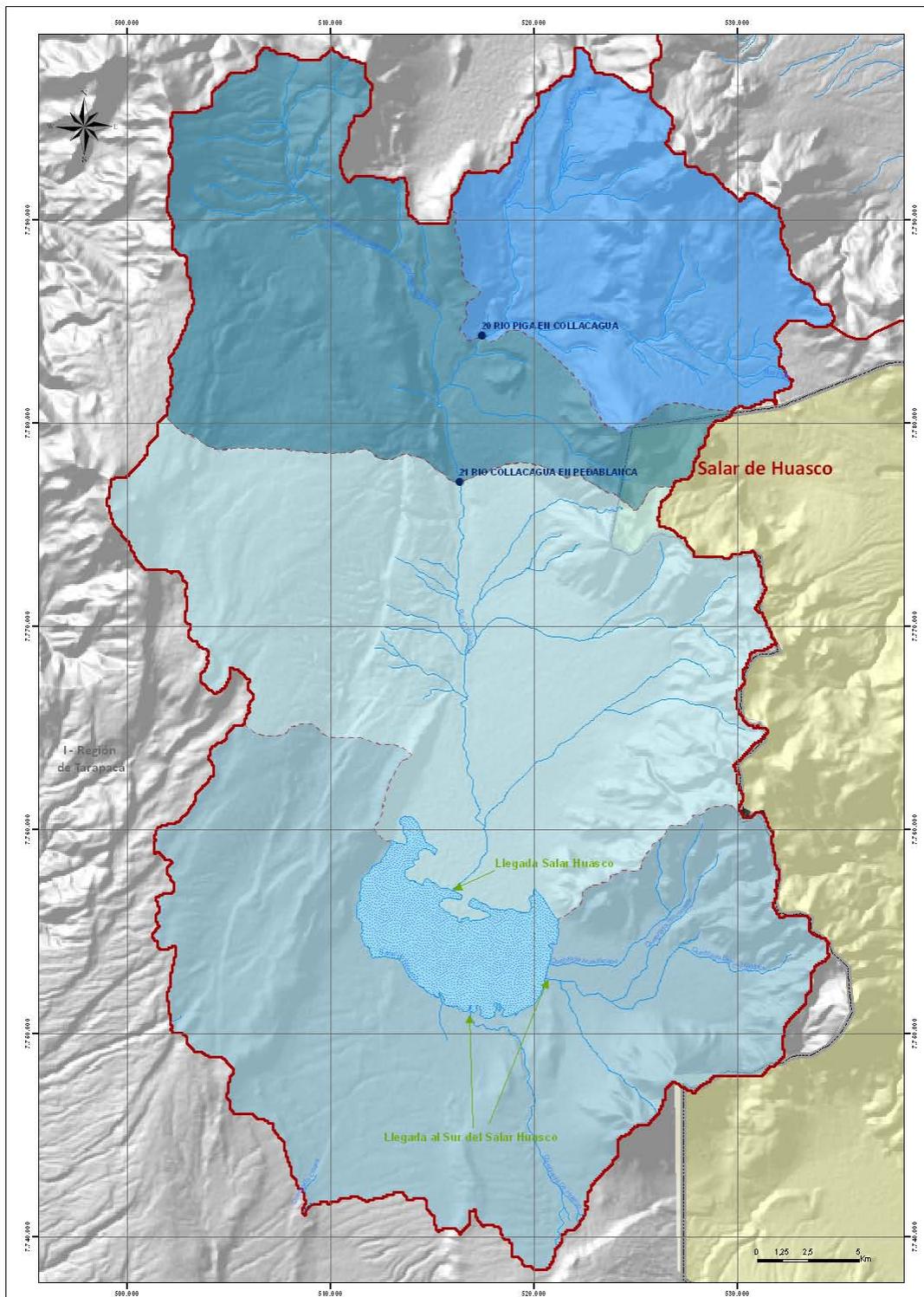
8.6. Cuenca del Río Huasco

Esta cuenca se ha dividido en 4 sub-cuencas, a saber:

- Río Piga en Collacagua
- Río Collacagua en Peñablanca
- Río Collacagua – Salar Huasco
- Llegadas al Sur del Salar del Huasco

En la Figura 8-14 se muestra la ubicación de las Subcuencas identificadas en la cuenca del río Huasco.

FIGURA 8-14
IDENTIFICACIÓN SUBCUENCAS



8.6.1. Balance Global de Escorrentía y Usos

En el Cuadro 8-15 se incluyen las precipitaciones obtenidas para cada subcuenca y el Cuadro 8-16 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes), para cada subcuenca.

**CUADRO 8-15
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Precipitaciones medias (mm)													Caudal calculado	Caudal Estación	Dda. de Agua			
					Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual			Pinv	Pvno	Super	Subt
6	Salar Huasco	20	Río Piga en Collacagua	199,3	78,1	62,8	34,4	2,6	0,8	1,7	1,1	2,9	1,3	1,9	4,1	14,9	206,8	10,5	196,3	121	130	0	0
		21	Río Collacagua en Peñablanca	290,6	62,6	50,6	27,84	2,1	0,716	1,36	0,9	3,03	1,24	1,48	3,07	12,1	167,1	9,4	157,7	109	120	0	0
			Río Collacagua-Salar Huasco	479,0	62	50,8	28,44	2,15	0,809	1,51	1	3,75	1,39	1,44	3,22	11,5	167,9	10,6	157,4	179	--	0	0
			Llegadas al Sur del Salar Huasco	501,8	60,3	48,3	28,1	2,37	0,476	1,77	1	5,31	1,72	1,15	3,08	10,8	164,4	12,7	151,7	173	--	0	0

**CUADRO 8-16
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Dda. de Agua	
							Super	Subt
6	Salar Huasco	20	Río Piga en Collacagua	199,3	121	130	0	0
		21	Río Collacagua en Peñablanca	290,6	109	120	0	0
			Río Collacagua-Salar Huasco	479,0	179	--	0	0
			Llegadas al Sur del Salar Huasco	501,8	173	--	0	0

Los balances por subcuencas se muestran en la Figuras 8-15 y 8-16 siguientes.

FIGURA 8-15
DISTRIBUCIÓN DEL BALANCE EN LA CUENCA

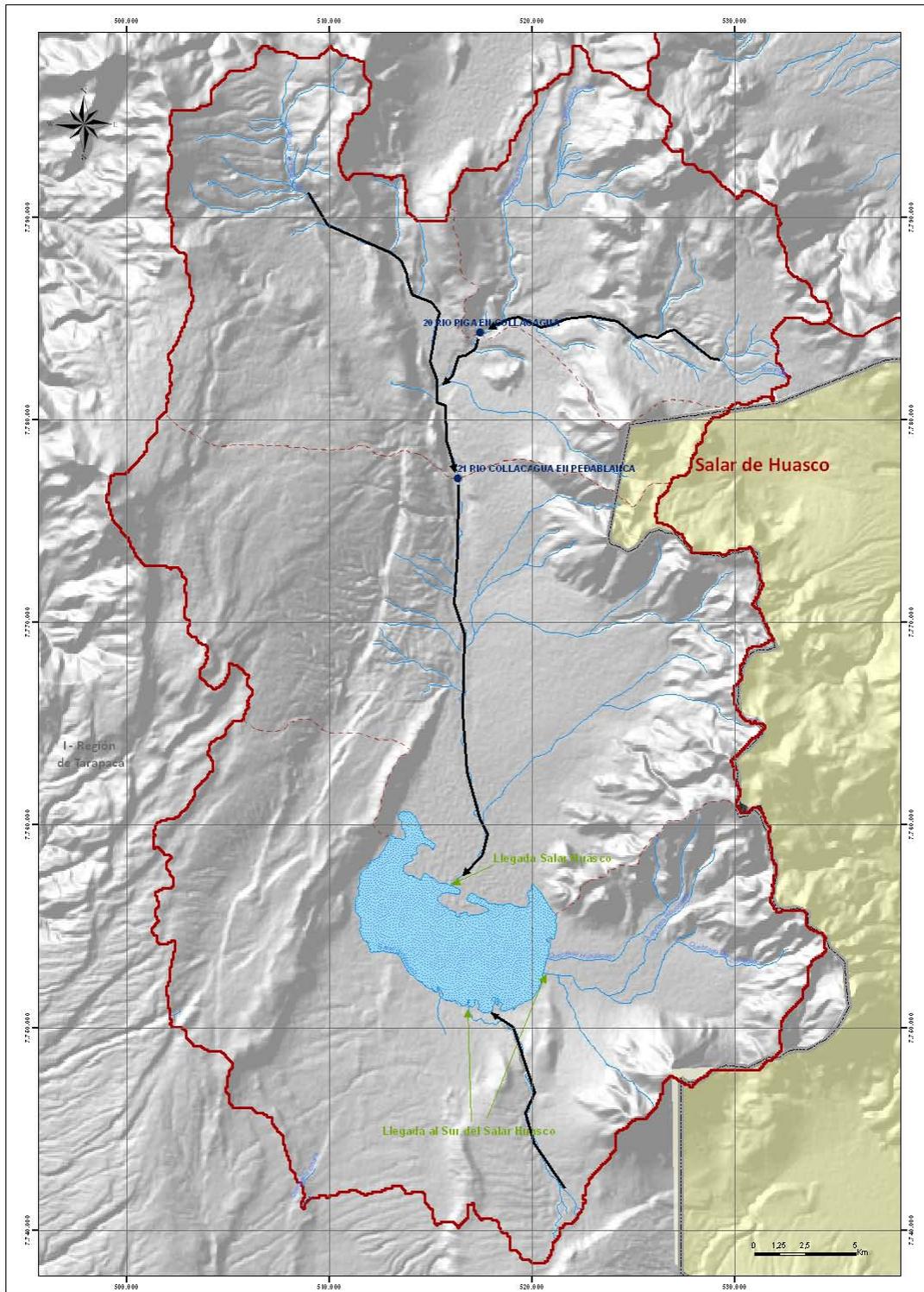
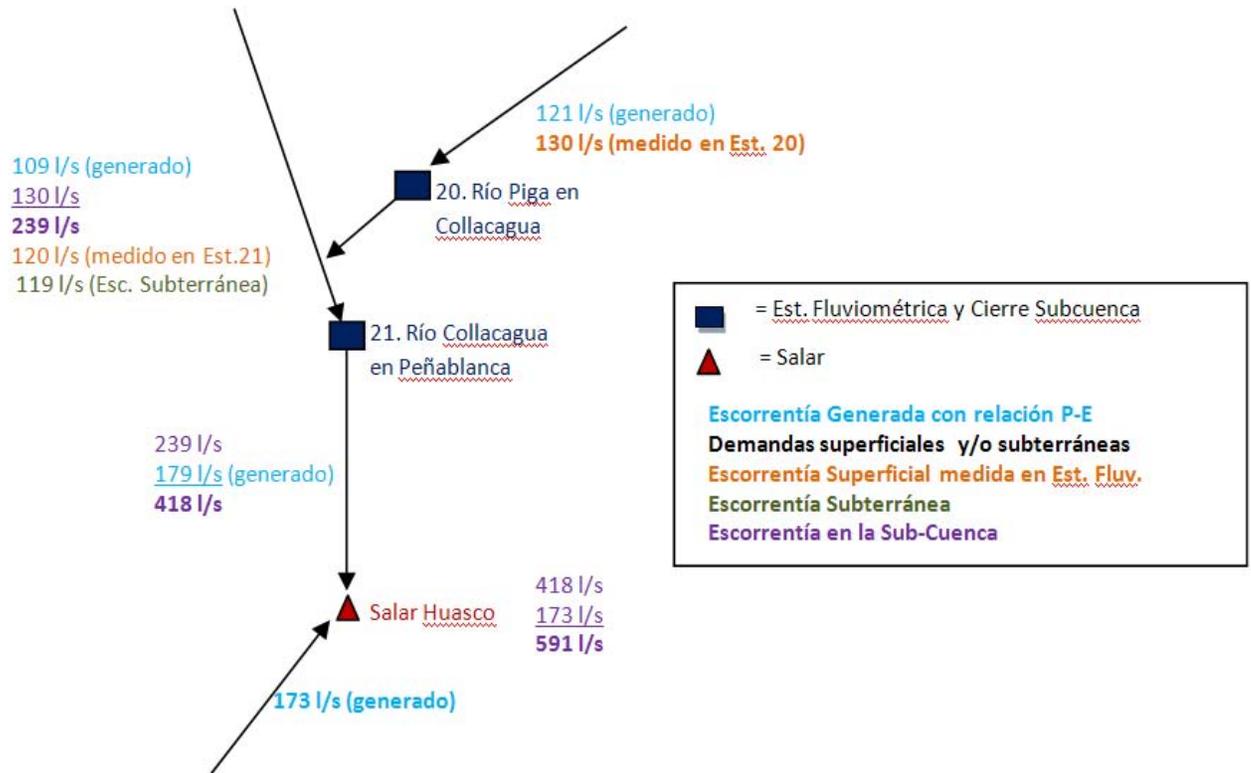


FIGURA 8-16
ESQUEMA BALANCE GLOBAL DE ESCORRENTÍA, CUENCA RÍO HUASCO



8.6.2. Resumen del Balance

Un resumen de los balances efectuados se incluye en el Cuadro 8-17.

CUADRO 8-17
RESUMEN BALANCES (l/s)

ID	CUENCA	NEst	subcuenca	Esc. Gen	Med. Est.	Uso Efec	Esc. Result
6	Salar Huasco	20	Río Piga en Collacagua	121	130		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterrneos			0	
							130
		21	Río Collacagua en Peñablanca	109	120		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterrneos			0	
							239
			Río Collacagua-Salar Huasco	179	--		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterrneos			0	
							418
			Llegadas al Sur del Salar Huasco	173	--		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterrneos			0	
							173
Total recursos a la salida de la Cuenca							591

8.6.3. Conclusiones Balance Cuenca Río Huasco

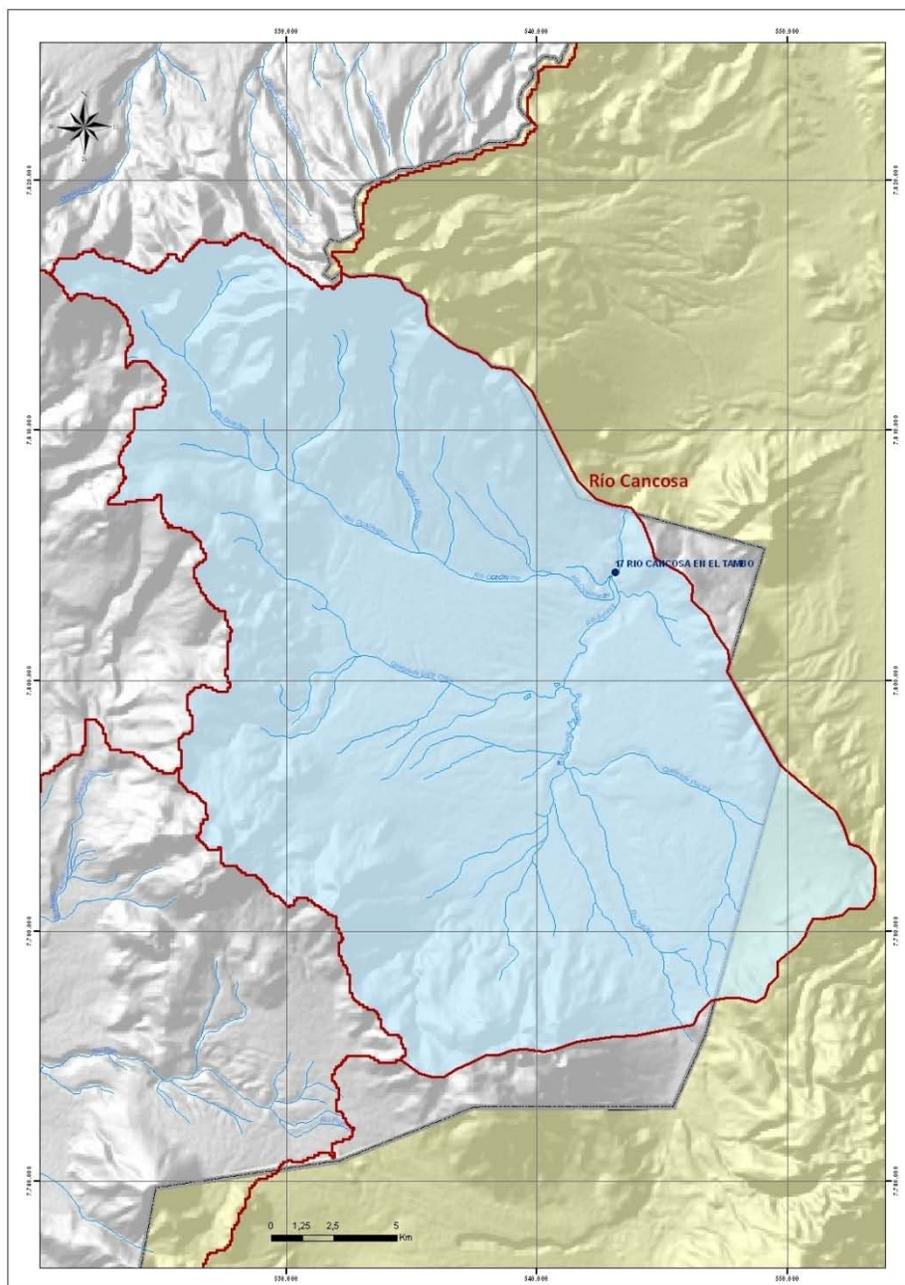
- En la subcuenca del río Piga en Collacagua, los caudales generados son similares a los medidos a la salida de la cuenca (121 l/s generados y 130 l/s medidos), por lo que el caudal de salida sería de 130 l/s.
- El balance global hasta la estación río Collacagua en Peñablanca indica que habrían 119 l/s de escorrentía subterránea y 120 l/s de escorrentía superficial a la salida de esta subcuenca (239 l/s totales).
- El caudal total que estaría llegando al Salar del Huasco, sin tomar en cuenta la cuenca ubicada al Sur del Salar, ascendería hasta los 418 l/s.
- En la subcuenca ubicada al Sur del Salar se generaron 173 l/s que estarían llegando al salar, con lo que sumado a los 418 l/s, da un caudal de 591 l/s.

8.7. Cuenca del Río Cancosa

En este caso se evaluó la cuenca como una sola unidad, ya que no hay estaciones fluviométricas intermedias.

En la Figura 8-17 se muestra la ubicación de la cuenca del río Cancosa.

FIGURA 8-17
IDENTIFICACIÓN CUENCA CANCOSA



8.7.1. Balance Global de Esorrentía y Usos

En el Cuadro 8-18 se incluyen las precipitaciones obtenidas para la cuenca y el Cuadro 8-19 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes).

**CUADRO 8-18
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Precipitaciones medias (mm)															
					Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno	
7	Río Cancosa	17	Río Cancosa en el Tambo	591,31	74,60	59,82	28,37	3,90	0,48	1,75	1,20	2,07	0,56	0,99	4,08	11,64	189,45	9,96	179,49	

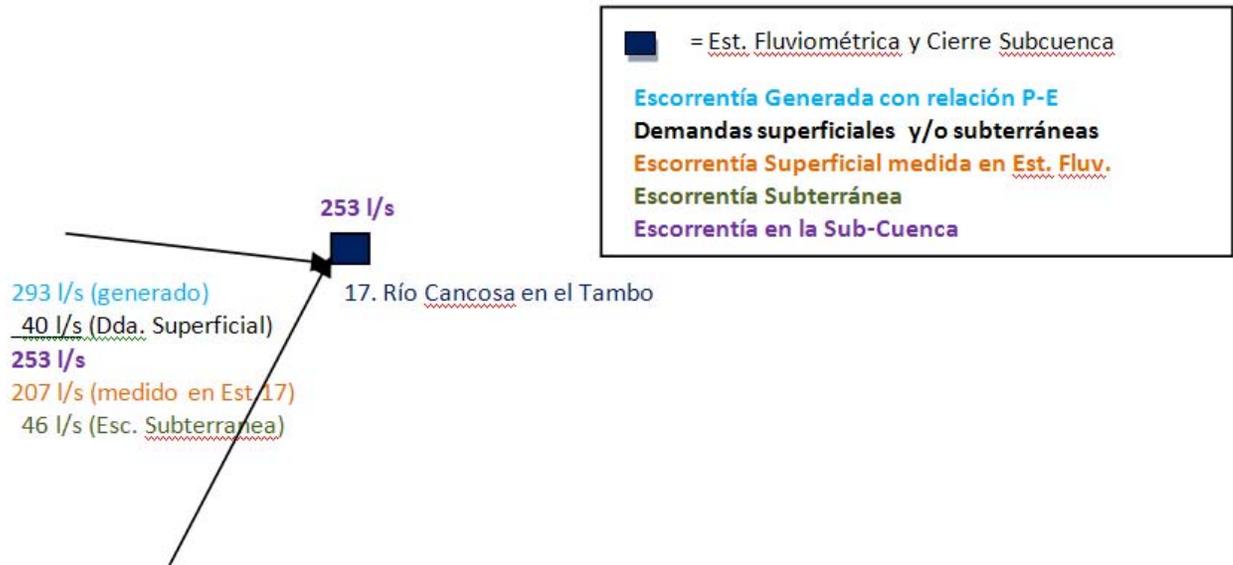
**CUADRO 8-19
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Der. de Agua	
							Super	Subt
7	Río Cancosa	17	Río Cancosa en el Tambo	591,31	295	207	40	

Con relación a las demandas, se tiene:

- Superficiales: Se presentan 2 derechos de aguas aprobados, de uso minero a nombre de "ALLY AZUFRE ANDINO S.C.M."
- Subterráneas: no hay derechos constituidos dentro de la cuenca Río Cancosa.

El balance se muestra en el siguiente esquema:



8.7.2. Conclusiones Balance Cuenca Río Cancosa

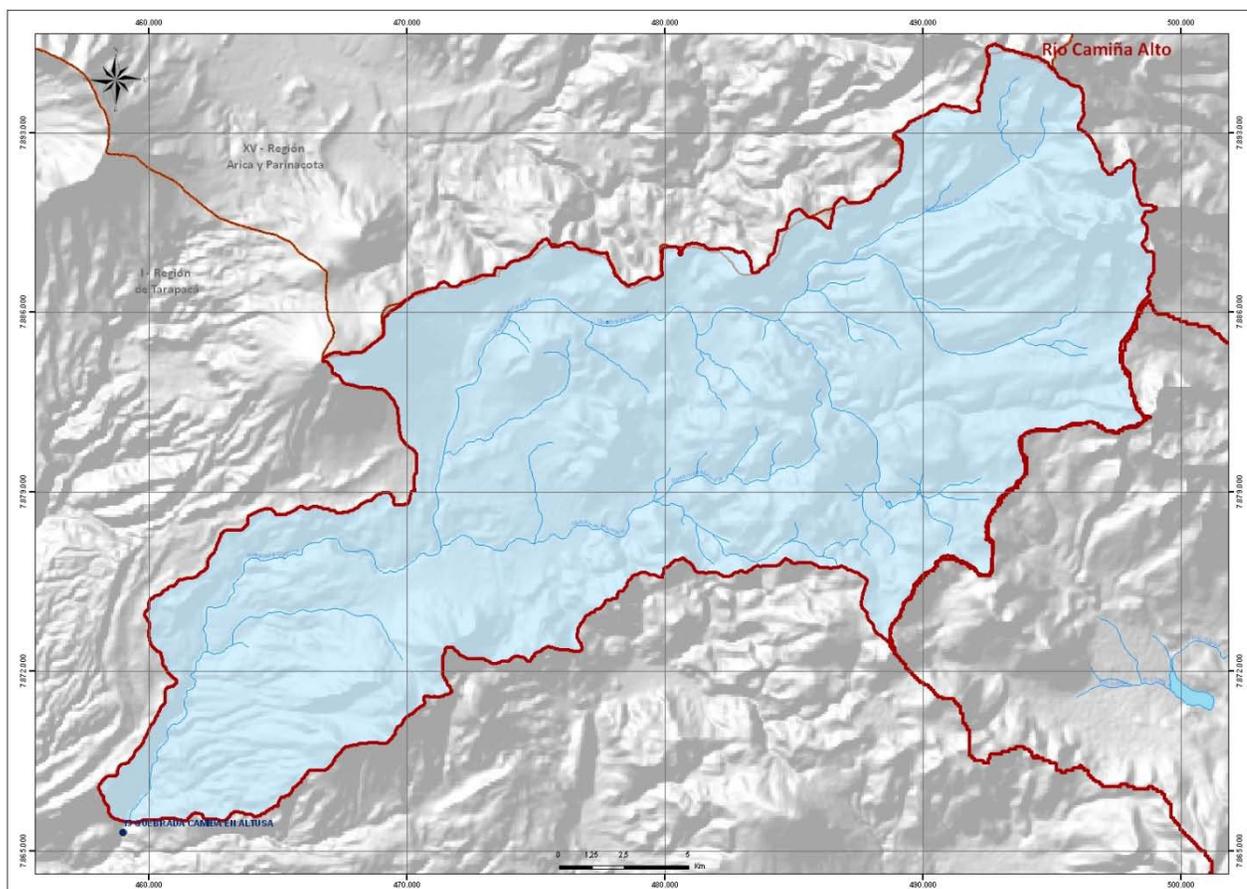
- El balance en toda la cuenca dio cuenta con un caudal de salida de 253 l/s totales. La cuenca no se subdividió en subcuencas debido a que no hay estaciones fluviométricas intermedias.
- El caudal generado menos la demanda de agua superficial en la cuenca es superior en 46 l/s al caudal medido en la estación fluviométrica a la salida, lo que significaría que habrían 46 l/s de escorrentía subterránea en la sección de cierre del balance.

8.8. Cuenca del Río Camiña

En este caso se evaluó la cuenca como una sola unidad, ya que no hay estaciones fluviométricas intermedias.

En la Figura 8-18 se muestra la ubicación de la cuenca del río Camiña.

**FIGURA 8-18
IDENTIFICACIÓN CUENCA CAMIÑA**



8.8.1. Balance Global de Esorrentía y Usos

En el Cuadro 8-20 se incluyen las precipitaciones obtenidas para la cuenca y el Cuadro 8-21 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes).

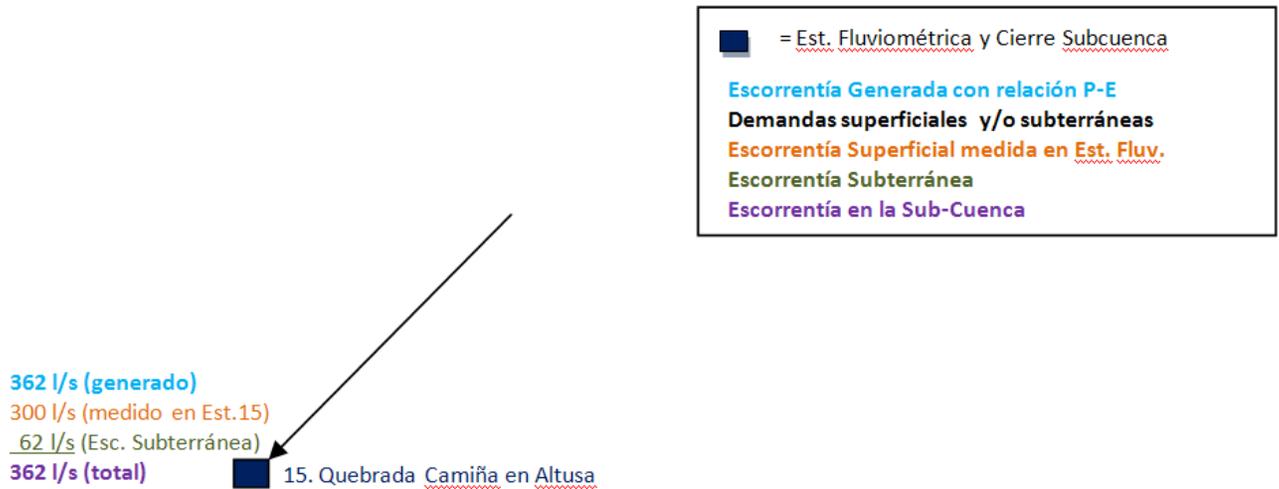
**CUADRO 8-20
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Precipitaciones medias (mm)														
					Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno
8	Río Camiña Alto	15	Quebrada Camiña en Altusa	519,25	76,18	86,82	28,14	5,41	3,12	1,18	4,82	1,97	3,91	1,64	1,01	15,78	229,97	20,40	209,57

**CUADRO 8-21
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estacion	Der. de Agua	
							Super	Subt
8	Río Camiña Alto	15	Quebrada Camiña en Altusa	519,25	362	300	0	0

El balance se muestra en el siguiente esquema:



8.8.2. Conclusiones Balance Cuenca Río Camiña

- El balance en toda la cuenca dio como caudal de salida 362 l/s totales. La cuenca no se subdividió en subcuencas debido a que no hay estaciones fluviométricas intermedias.
- La diferencia entre el caudal generado y el medido en la estación de salida de la cuenca es de 62 l/s (362 l/s generados menos 300 l/s medidos), caudal que debiera ser subterráneo en dicha sección de cierre del balance.

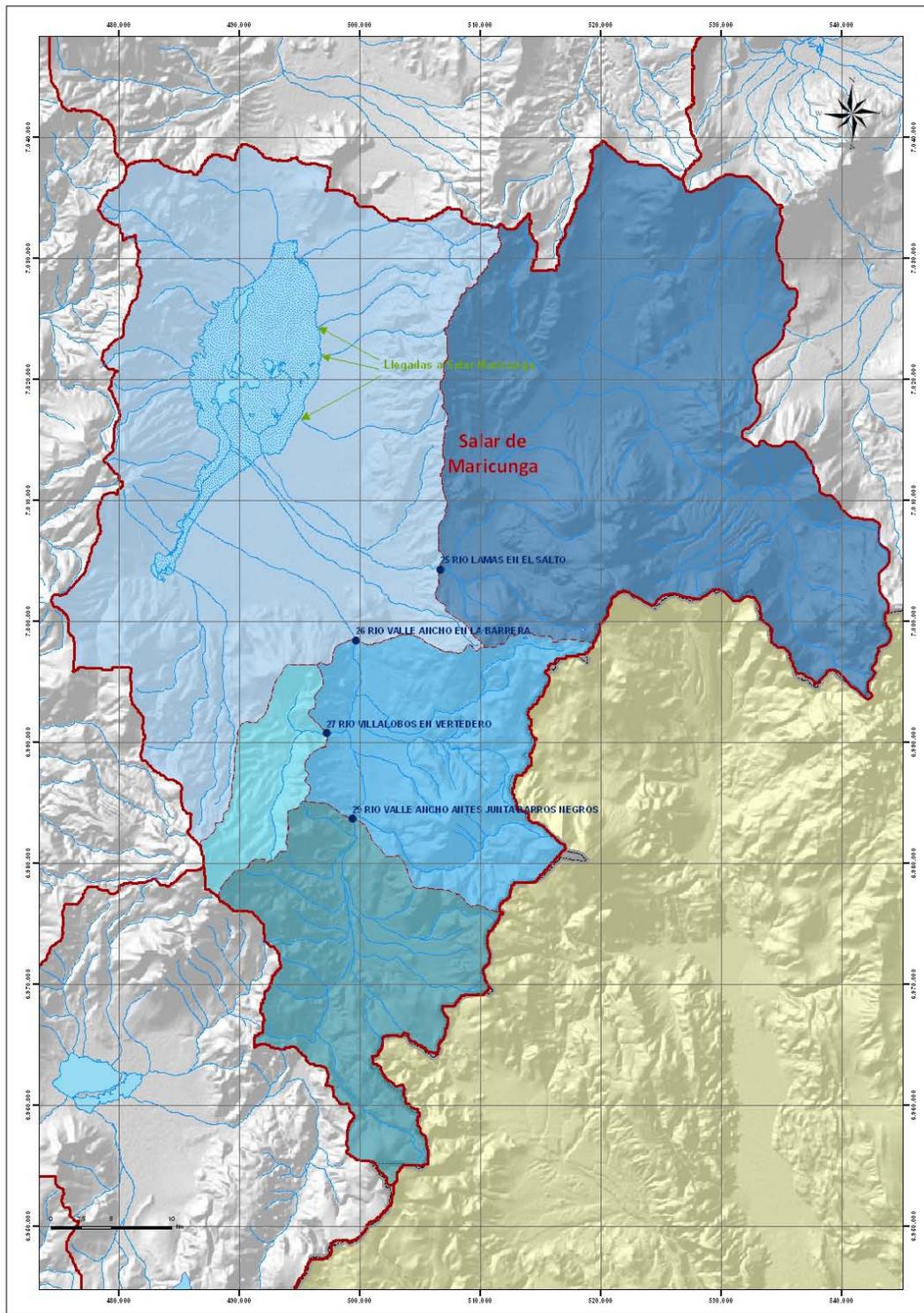
8.9. Cuenca del Salar de Maricunga

Esta cuenca se ha dividido en 5 sub-cuencas, a saber:

- Río Valle Ancho antes junta Barros Negros
- Río Villalobos en Vertedero
- Río Valle Ancho en la Barrera
- Río Lamas en El Salto
- Llegadas a Salar Maricunga

En la Figura 8-19 se muestra la ubicación de las Subcuencas identificadas en la cuenca del Salar de Maricunga.

FIGURA 8-19
IDENTIFICACIÓN SUBCUENCAS



8.9.1. Balance Global de Esorrentía y Usos

En el Cuadro 8-22 se incluyen las precipitaciones obtenidas para cada subcuenca y el Cuadro 8-23 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes), para cada subcuenca.

**CUADRO 8-22
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Precipitaciones medias (mm)														
					Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno
9	Salar de Maricunga	29	Río Valle Ancho antes junta Barros Neg	352	0,39	4,61	12,14	11,05	28,53	48,61	53,97	30,59	9,19	3,00	0,17	0,84	203	182	21
		27	Río Villalobos en Vertedero	97	0,24	5,304	12,94	9,982	26,49	45,96	54,71	28,19	9,64	2,92	0,132	0,808	197	175	22
		26	Río Valle Ancho en la Barrera	346	0,26	4,943	12,46	10,02	27,03	46,53	56,70	28,55	9,3	2,79	0,144	0,802	200	178	21
		25	Río Lamas en El Salto	1.068	0,20	4,154	10,57	8,346	23,35	39,51	54,88	24,27	7,86	2,22	0,112	0,637	176	158	18
			Llegadas a Salar Maricunga	1.100	0,13	4,21	9,996	7,136	19,7	33,38	48,02	20,46	7,42	2,08	0,073	0,543	153	136	17

**CUADRO 8-23
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Der. de Agua	
							Super	Subt
9	Salar de Maricunga	29	Río Valle Ancho antes junta Barros Neg	352	169	60	--	--
		27	Río Villalobos en Vertedero	97	40	30	--	--
		26	Río Valle Ancho en la Barrera	346	154	10	--	--
		25	Río Lamas en El Salto	1068	284	240	--	--
			Llegadas a Salar Maricunga	1100	117	--	7	1562*

* Extracción informada (l/s), según estudio SIT N° 146, de Marzo de 2008

Con relación a las demandas, se tiene:

- Superficiales: se ha considerado un derecho constituido dentro de la cuenca Salar de Maricunga, de uso minero, con una demanda de 7 l/s.
- Subterráneas: Se ha considerado una demanda de uso minero de 1.562 l/s, registrada como extracción real informada en el estudio SIT N° 146.

Los balances por subcuencas se muestran en la Figuras 8-20 y 8-21 siguientes.

FIGURA 8-20
DISTRIBUCIÓN DEL BALANCE EN LA CUENCA

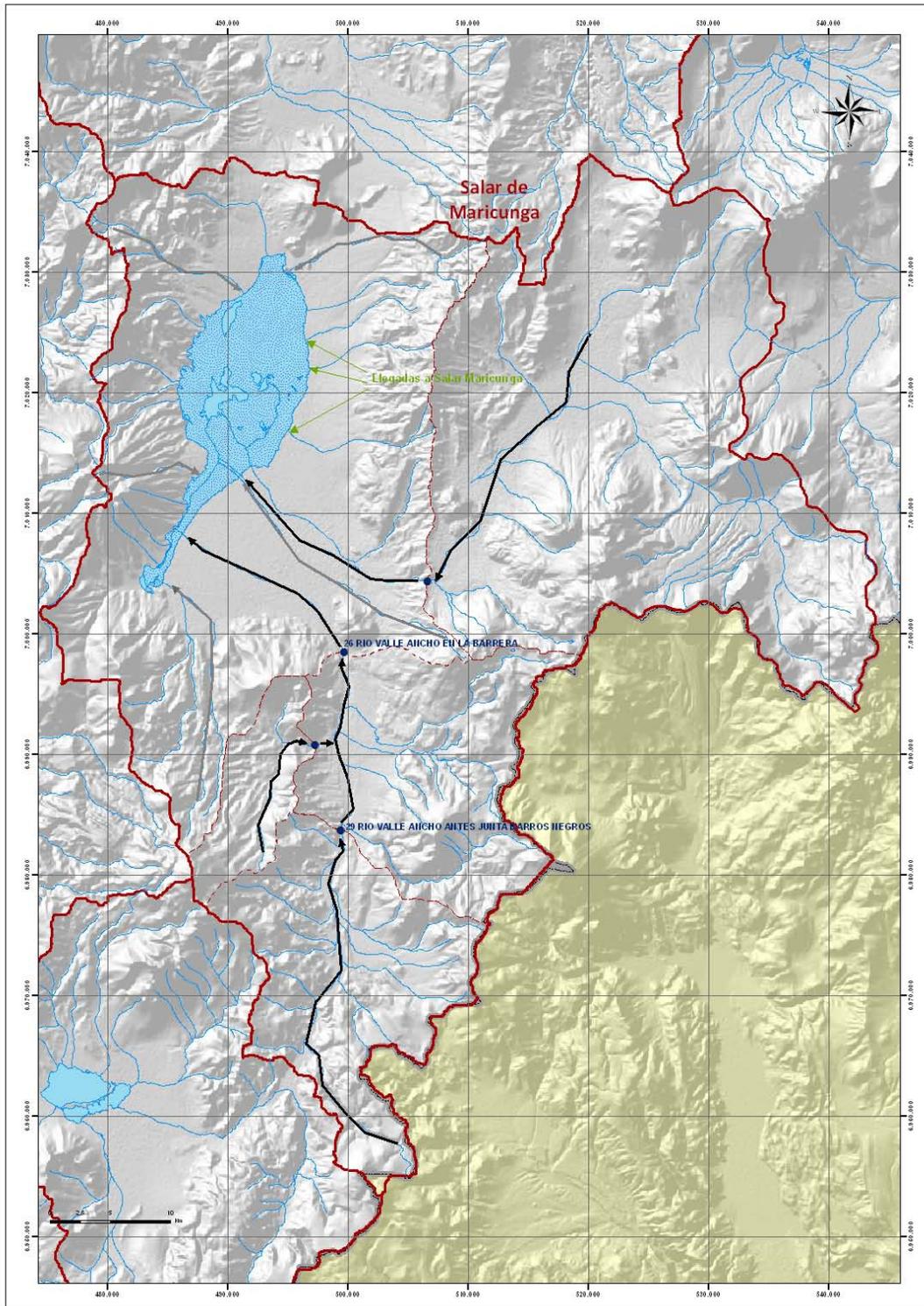
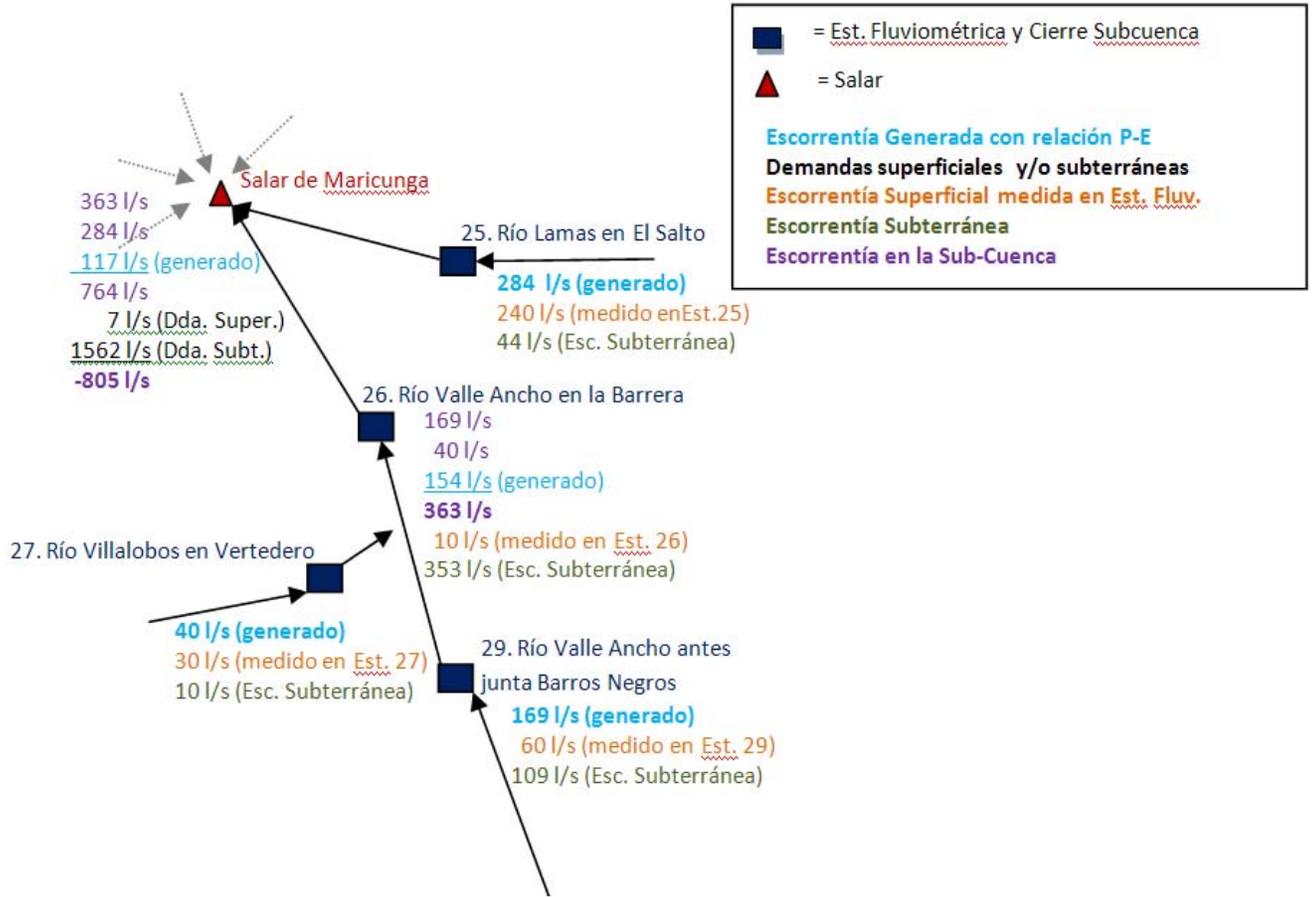


FIGURA 8-21
ESQUEMA BALANCE GLOBAL DE ESCORRENTÍA,
CUENCA SALAR DE MARICUNGA



8.9.2. Resumen del Balance

Un resumen de los balances efectuados se incluye en el Cuadro 8-24.

CUADRO 8-24
RESUMEN BALANCES (l/s)

ID	CUENCA	NEst	subcuenca	Esc. Gen	Med. Est.	Uso Efec	Esc. Result
9	Salar de Maricunga	29	Río Valle Ancho antes junta Barros Negros	169	60		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							169
		27	Río Villalobos en Vertedero	40	30		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							40
		26	Río Valle Ancho en la Barrera	154	10		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							363
		25	Río Lamas en El Salto	284	240		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							284
			Llegadas a Salar Maricunga	117	--		
			Usos Superficiales			7	
			Usos Subterráneos			1562	
							-805
			Balance Final				-805

8.9.3. Conclusiones Balance Cuenca Salar de Maricunga

- El balance en la primera subcuenca da cuenta de un caudal total (generado) de 169 l/s, de los cuales 109 l/s sería escurrimiento subterráneo (caudal superficial medido en la estación río Valle Ancho antes Juntas Barros Negros de 60 l/s).
- La subcuenca río Villalobos en Vertedero aporta 40 l/s a la cuenca global, de los cuales 10 l/s sería flujo subterráneo que escurre por la sección de salida (30 l/s medidos en la estación fluviométrica río Villalobos en Vertedero).
- Continuando hacia aguas abajo, en la sección correspondiente a la estación fluviométrica río Valle Ancho en la Barrera, se refleja un caudal total de 363 l/s, de los cuales 353 l/s sería escurrimiento subterráneo (10 l/s medidos en la estación fluviométrica de cierre).
- En la subcuenca río Lamas en El Salto, se generó un caudal total de 284 l/s, y el medido en el cierre de esa cuenca es de 240 l/s, lo que significa que por dicha sección escurre un caudal subterráneo de 44 l/s.
- Hecho el balance por subcuencas, los caudales totales que llegan al Salar de Maricunga suman 764 l/s.
- El resultado del balance global requiere de un mayor análisis específico.

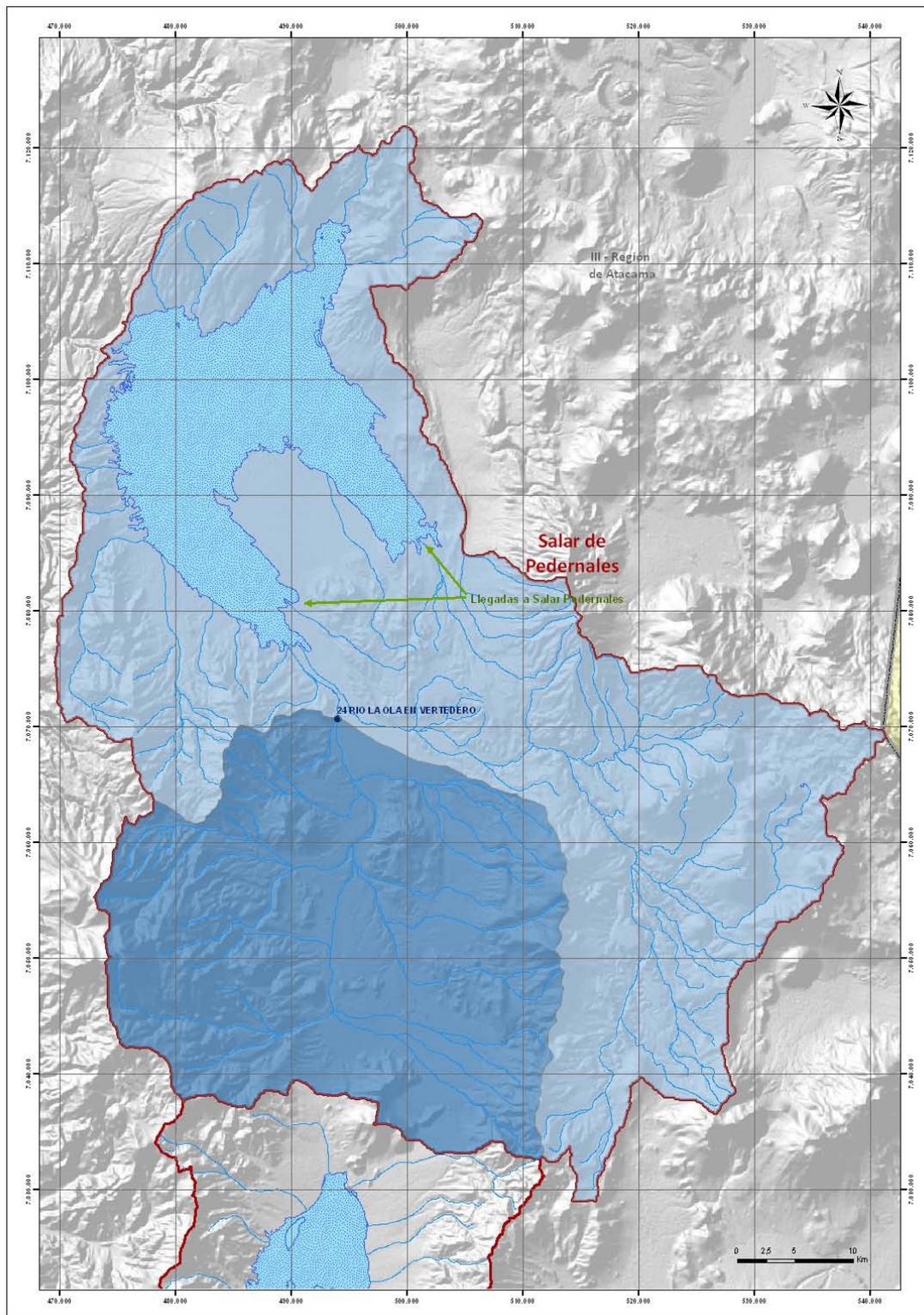
8.10. Cuenca del Salar de Pedernales

Esta cuenca se ha dividido en 2 sub-cuencas, a saber:

- Río La Ola en Vertedero
- Llegada al Salar de Pedernales

En la Figura 8-22 se muestra la ubicación de las Subcuencas identificadas en la cuenca del Salar de Pedernales.

FIGURA 8-22
IDENTIFICACIÓN SUBCUENCAS



8.10.1. Balance Global de Esorrentía y Usos

En el Cuadro 8-25 se incluyen las precipitaciones obtenidas para cada subcuenca y el Cuadro 8-26 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes), para cada subcuenca.

**CUADRO 8-25
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

Precipitaciones medias (mm)																			
ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno
10	Salar de Pedernales	24	Río La Ola en vertedero	1134	0,10	3,75	8,68	5,92	17,32	28,59	57,95	18,04	6,49	1,54	0,06	0,36	149	134	15
			Llegadas a Salar Pedernales	2008	0,07	3,63	8,386	5,88	17,43	28,57	59,32	17,71	6,62	1,5	0,086	0,339	150	136	14

**CUADRO 8-26
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Der. de Agua	
							Super	Subt
10	Salar de Pedernales	24	Río La Ola en vertedero	1.134	108	580	80	77
			Llegadas a Salar Pedernales	2.008	206	--	--	70

Con relación a las demandas, se tiene:

- Superficiales: se ha considerado un derecho constituido dentro de la subcuenca "Río La Ola en vertedero", de uso minero, con una demanda de 80 l/s. Dentro de la subcuenca "Llegadas a Salar Pedernales", todas las demandas superficiales son de Comunidades Indígenas, por lo que no fueron tomadas en cuenta.
- Subterráneas: se ha considerado una demanda de uso minero real de 147 l/s.
- En el Salar Pedernales se presenta una demanda de subterránea de uso minero, registrada en el estudio SIT N°146, el cual entrega la siguiente información:

Estudio SIT N°146, marzo 2008					
Región	Cuenca	SubCuenca	Empresa Minera	Total Derecho Consuntivo Informado (l/s)	Extracción Informada (l/s)
III	Pedernales	Pedernales	Codelco División Salvador	493	798

Los balances por subcuencas se muestran en la Figuras 8-23 y 8-24 siguientes.

FIGURA 8-23
DISTRIBUCIÓN DEL BALANCE EN LA CUENCA

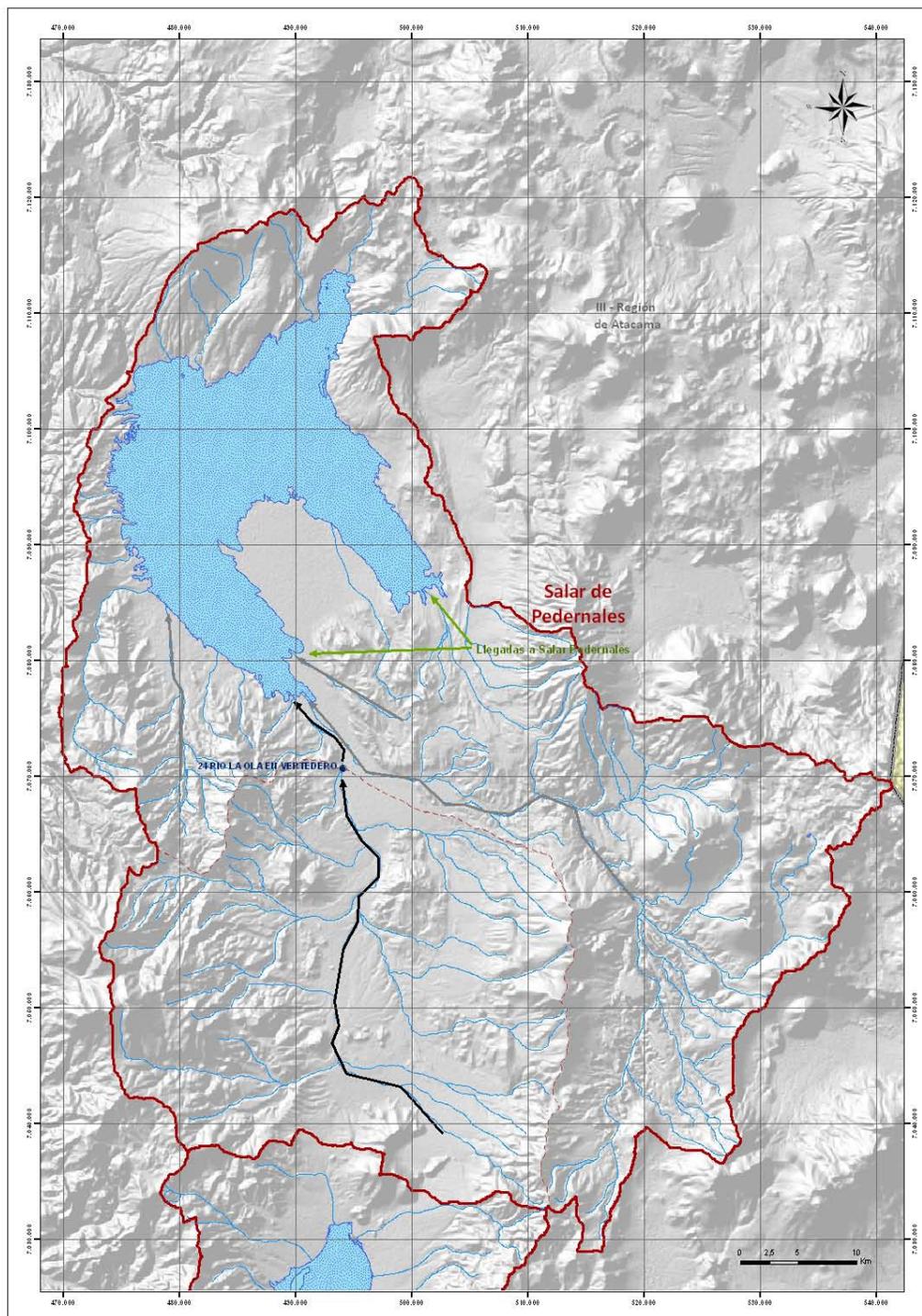
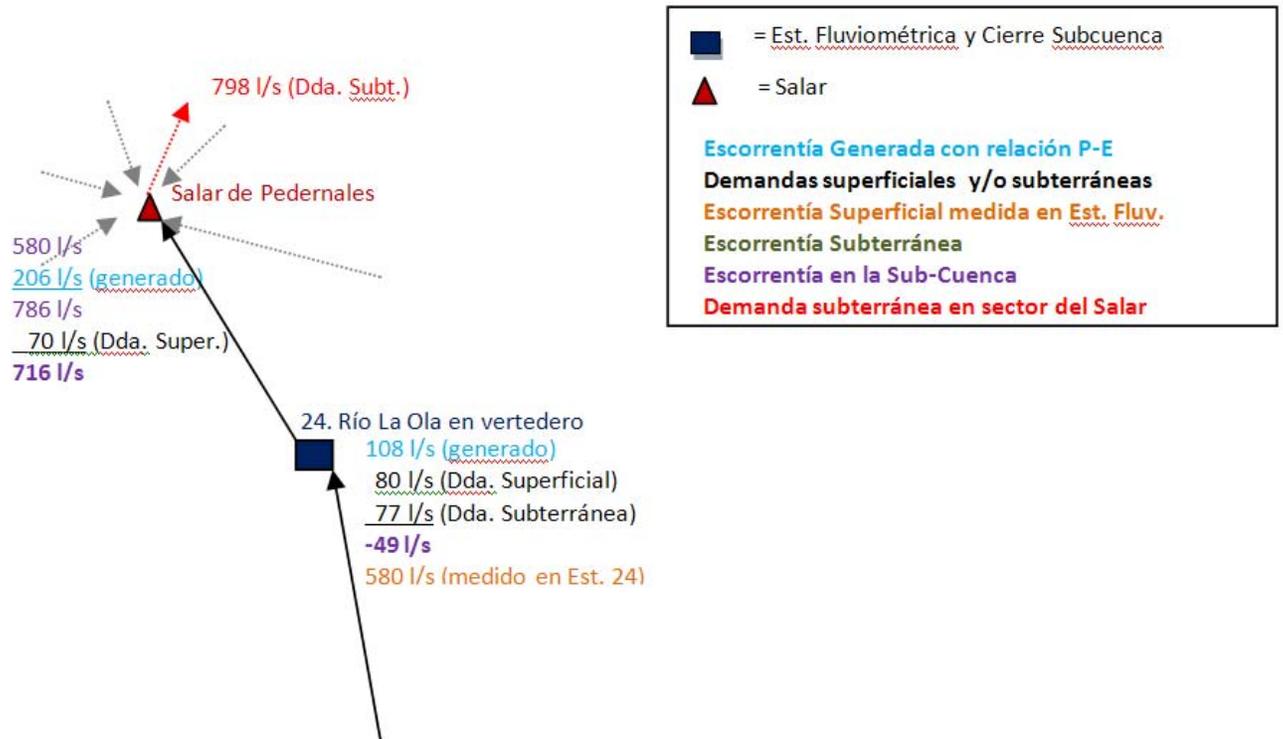


FIGURA 8-24
ESQUEMA BALANCE GLOBAL DE ESCORRENTÍA,
CUENCA SALAR DE PEDERNALES



8.10.2. Resumen del Balance

Un resumen de los balances efectuados se incluye en el Cuadro 8-27.

**CUADRO 8-27
RESUMEN BALANCES (l/s)**

ID	CUENCA	NEst	subcuenca	Esc. Gen	Med. Est.	Uso Efec	Esc. Result
10	Salar de Pedernales	24	Río La Ola en vertedero	108	580		
			Usos Superficiales			80	
			Usos Subterráneos			77	
							580
			Llegadas a Salar Pedernales	206	--		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			70	
							716
			Total recursos a la llegada del Salar				716

8.10.3. Conclusiones Balance Cuenca Salar de Pedernales

- El balance en la primera subcuenca (hasta río La Ola en Vertedero), da cuenta de un caudal total (generado) de 108 l/s, y medido en la estación de 580 l/s. Se presenta una demanda de 157 l/s, lo que significa que el caudal de salida de esa subcuenca sería de 580 l/s.
- De acuerdo con el balance hacia aguas abajo, el caudal que llega al Salar de Pedernales es de 716 l/s.

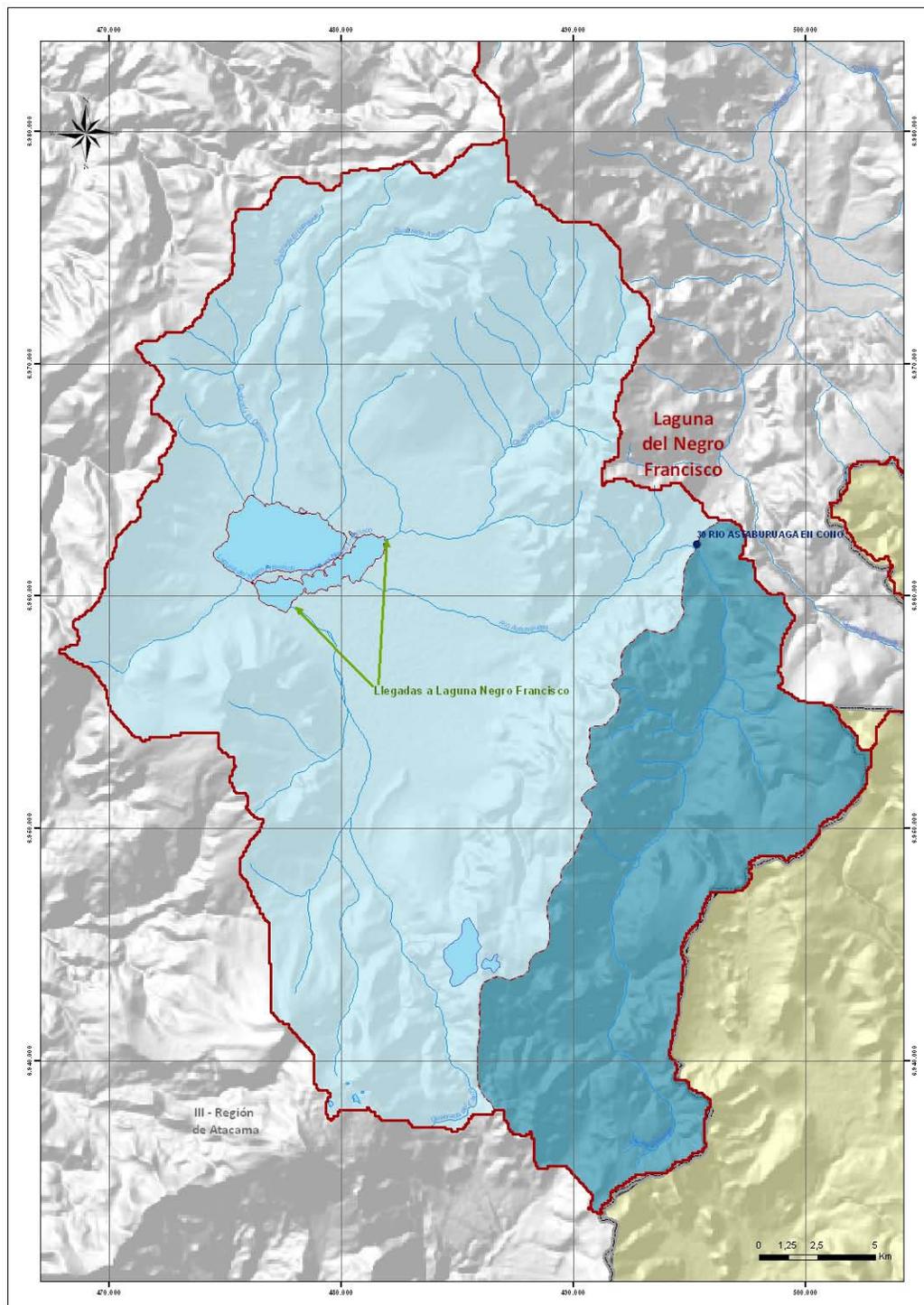
8.11. Cuenca Laguna Negro Francisco

Esta cuenca se ha dividido en 2 sub-cuencas, a saber:

- Río Astaburuaga en Cono
- Llegada a Laguna Negro Francisco

En la Figura 8-25 se muestra la ubicación de las Subcuencas identificadas en la cuenca del Salar de Pedernales.

FIGURA 8-25
IDENTIFICACIÓN SUBCUENCAS



8.11.1. Balance Global de Esorrentía y Usos

En el Cuadro 8-28 se incluyen las precipitaciones obtenidas para cada subcuenca y el Cuadro 8-29 presenta el caudal calculado según la relación P-E, y los derechos de agua superficiales y subterráneos (relevantes), para cada subcuenca.

**CUADRO 8-28
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES, ANUALES Y ESTACIONALES**

Precipitaciones medias (mm)																			
ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Pene	Pfeb	Pmar	Pabr	Pmay	Pjun	Pjul	Pago	Psep	Poct	Pnov	Pdic	Panual	Pinv	Pvno
11	Laguna Negro Francisco	30	Río Astaburuaga en Cono	216	0,52	4,34	12,28	12,53	32,00	54,30	54,24	34,20	9,42	3,27	0,23	0,97	218	197	22
			Llegadas a Laguna Negro Francisco	670	0,42	4,431	11,8	11,16	28,31	48,48	49,76	30,51	9,01	3,06	0,194	0,87	198	177	21

**CUADRO 8-29
CAUDALES CALCULADOS, MEDIDOS Y DERECHOS DE AGUA**

ID	CUENCA	NEst	Subcuenca	Área km2	Caudal calculado	Caudal Estación	Der. de Agua	
							Super	Subt
11	Laguna Negro Francisco	30	Río Astaburuaga en Cono	216	138	240	--	--
			Llegadas a Laguna Negro Francisco	670	292	--	--	105

Con relación a las demandas, se tiene:

- Superficiales: no se registran derechos de aguas constituidos en la cuenca "Laguna Negro Francisco".
- Subterráneas: Se ha considerado una demanda de uso minero real de 105 l/s.

Los balances por subcuencas se muestran en la Figuras 8-26 y 8-27 siguientes.

FIGURA 8-26
DISTRIBUCIÓN DEL BALANCE EN LA CUENCA

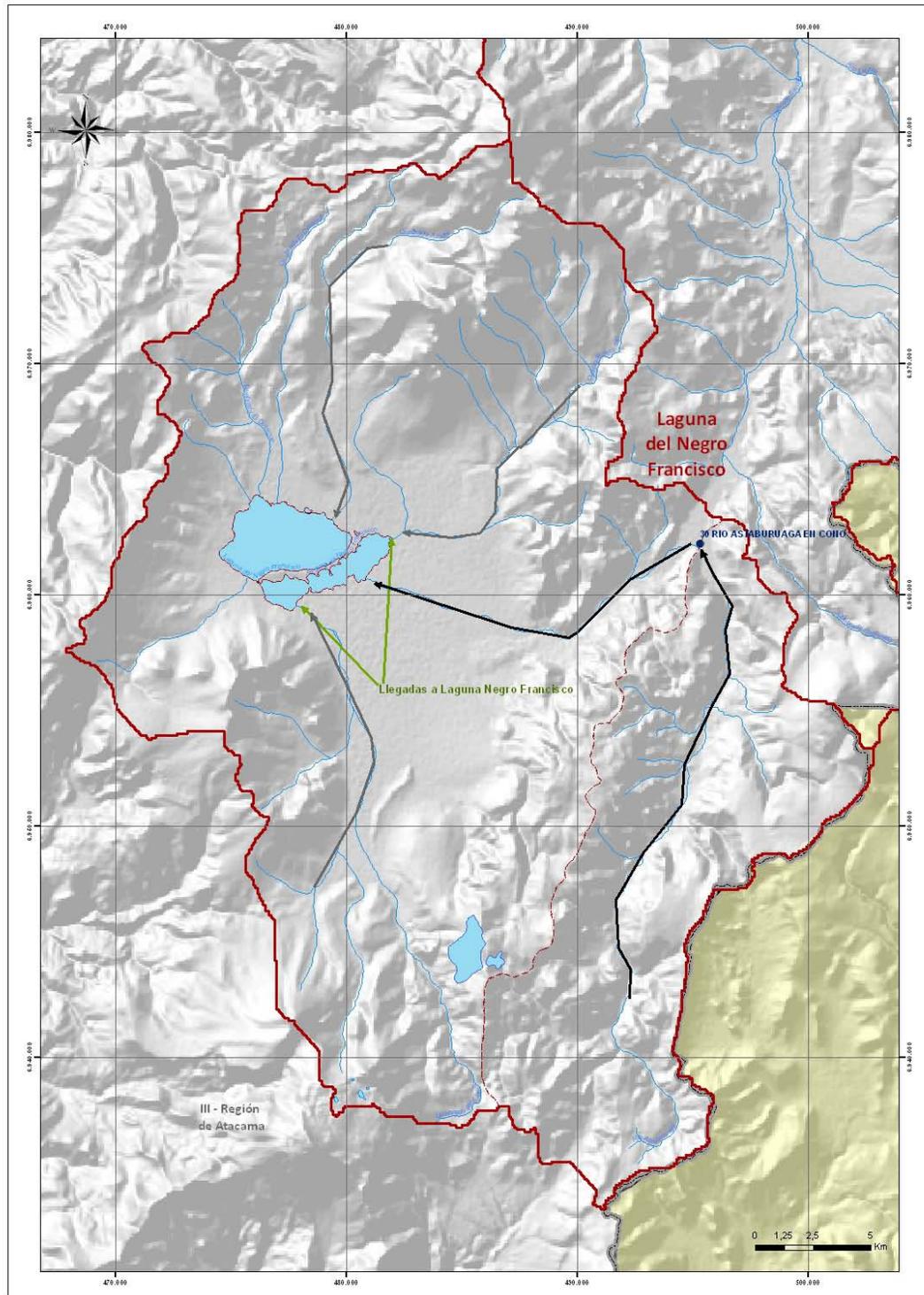
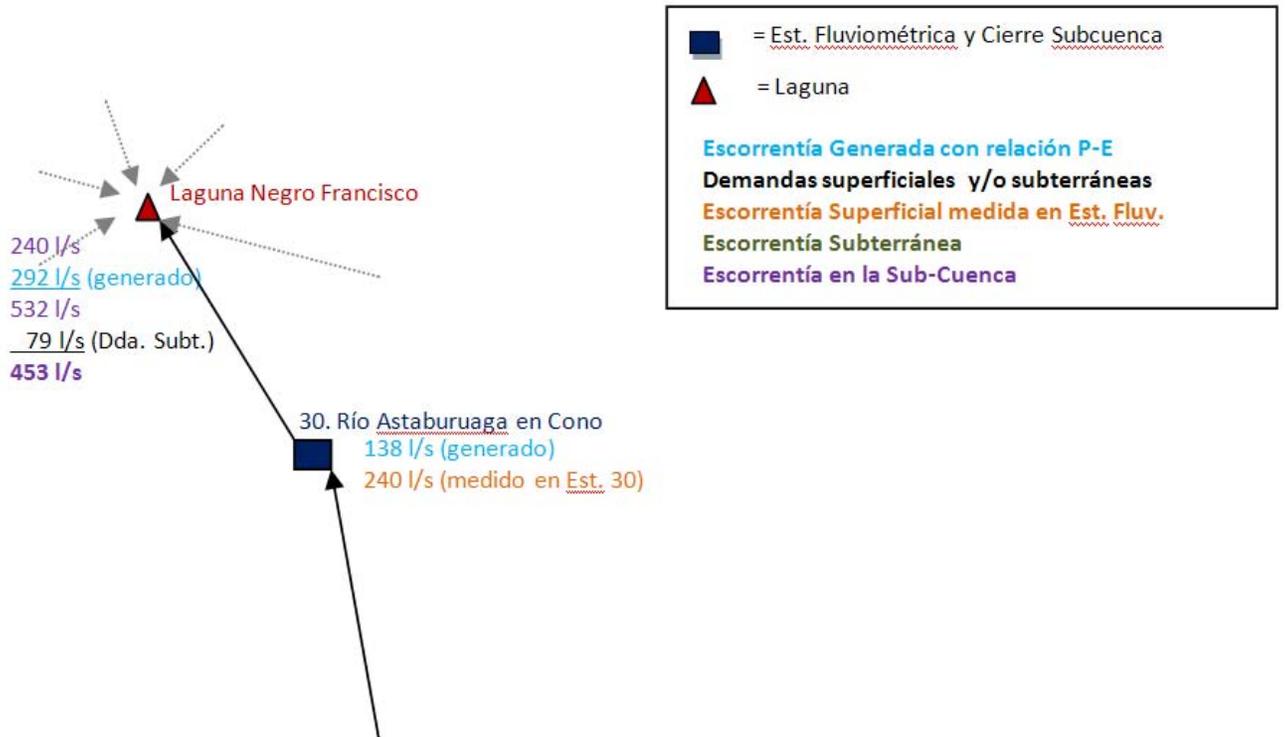


FIGURA 8-24
ESQUEMA BALANCE GLOBAL DE ESCORRENTÍA,
LAGUNA NEGRO FRANCISCO



8.11.2. Resumen del Balance

Un resumen de los balances efectuados se incluye en el Cuadro 8-30.

**CUADRO 8-30
RESUMEN BALANCES (l/s)**

ID	CUENCA	NEst	subcuenca	Esc. Gen	Med. Est.	Uso Efec	Esc. Result
11	Laguna Negro Franci	30	Río Astaburuaga en Cono	138	240		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			0	
							240
			Llegadas a Laguna Negro Francisco	292	--		
			Usos Superficiales			0	
			Usos Subterráneos			79	
							453
	Total recursos a la salida de la Cuenca						453

8.11.3. Conclusiones Balance Laguna Negro Francisco

- El balance en la primera subcuenca da cuenta de un caudal total (generado) de 138 l/s, y un caudal medido en la estación fluviométrica río Astaburuaga en Cono de 240 l/s; ello indica que el caudal de salida de la subcuenca es de 240 l/s.
- En la siguiente y última subcuenca se generaron 292 l/s totales; sumando los 240 l/s de la subcuenca anterior y restando la demanda de agua subterránea de 79 l/s, se llega a que el caudal de salida sería de 453 l/s totales.

8.12. Análisis de los Caudales Generados y Observados en las Cuencas y Subcuencas

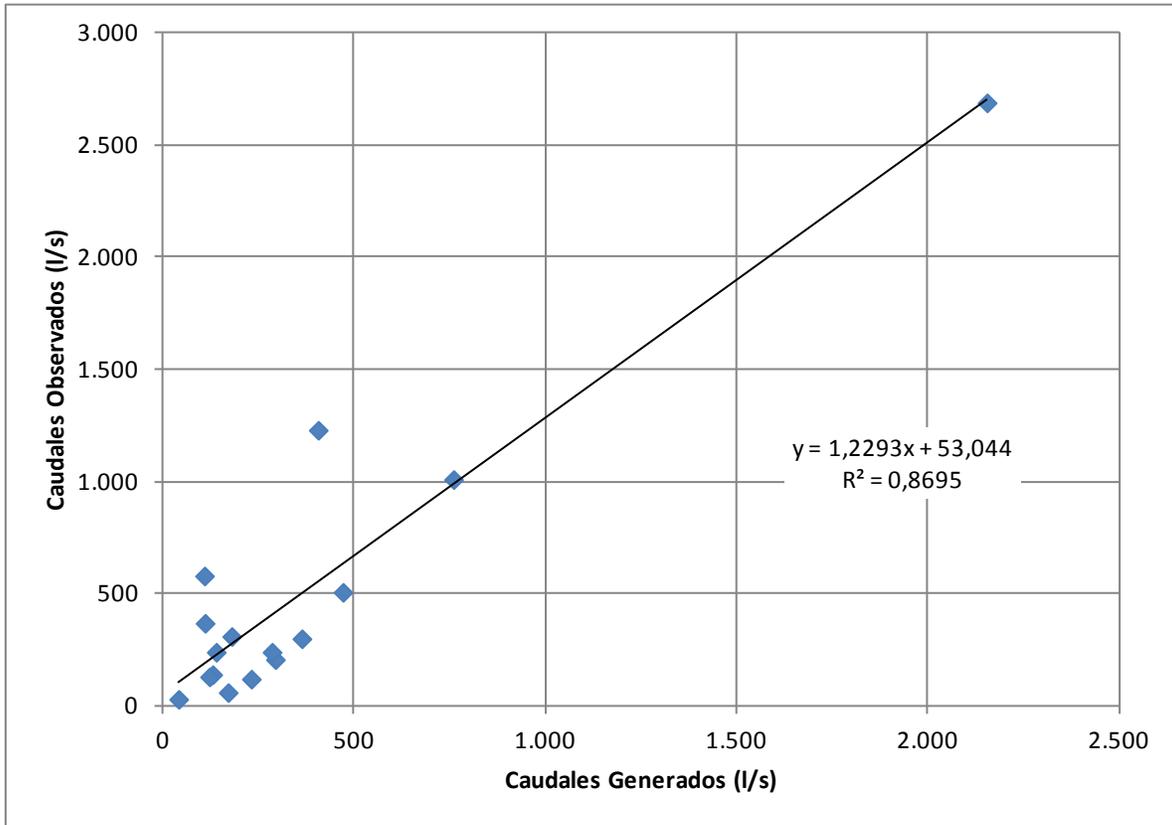
En el Cuadro 8.12-1 se incluyen los caudales generados y observados en cada una de las subcuencas incluidas en los balances.

CUADRO 8.12-1
CAUDALES GENERADOS Y OBSERVADOS EN
SUBCUENCAS BALANCES HÍDRICOS

ID	Cuenca	SubCuenca	Área	Panual	Qcalculado	Qmedido	Nota
			(km ²)	(mm)	(l/s)	(l/s)	
1	Río Lauca	Río Lauca en Estancia El Lago	311	341	526	146	a)
		Río Guallatire en Guallatire	64	342	109	369	
		Río Lauca en Japu	2.062	230	2.154	2.690	
2	Río Caquena	Río Caquena en Nacimiento	103	348	179	310	
		Río Colpacagua en Desembocadura	247	338	405	1.230	
		Caquena en Vertedero	102	348	759	1.010	
3	Río Isluga	Río Isluga en Bocatoma	630	231	470	507	
		Isluga - Salar Pisiga	531	191	264	--	
4	Río Cariquima	Río Cariquima en Cariquima	683	220	474	97	b)
		Río Grande - Salar Pisiga	185	169	72	--	
		Q. Chococolloani - Salar Pisiga	626	211	392	--	
5	Río Codpa	Río Codpa en Cala-Cala	370	161	129	140	
6	Salar Huasco	Río Piga en Collacagua	199	207	121	130	
		Río Collacagua en Peñablanca	291	167	230	120	
		Río Collacagua-Salar Huasco	479	168	179	--	
		Cuenca al Sur del Salar	502	164	173	--	
7	Río Cancosa	Río Cancosa en el Tambo	591	189	293	207	
8	Río Camiña Alto	Quebrada Camiña en Altusa	519	230	362	300	
9	Salar de Maricunga	Río Valle Ancho antes junta Barros Negros	352	203	169	60	
		Río Villalobos en Vertedero	97	197	40	30	
		Río Valle Ancho en la Barrera	346	200	154	10	c)
		Río Lamas en El Salto	1.068	176	284	240	
		Llegadas a Salar Maricunga	1.100	153	117	--	
10	Salar de Pedernales	Río La Ola en Vertedero	1.134	149	108	580	
		Llegadas a Salar Pedernales	2.008	150	206	--	
11	Laguna Negro Francisco	Río Astaburuaga en Cono	216	218	138	240	
		Llegadas a Laguna Negro Francisco	670	198	292	--	
Notas		a) No se considera en la correlación; canal Lauca saca 600 l/s					
		b) No se considera en la correlación; Estadística de Q obs. de sólo 4 años					
		c) No se considera en la correlación; Caudal subterráneo importante					

En la Figura 8.12-1 se muestra un gráfico con la correlación lineal entre los caudales generados y observados.

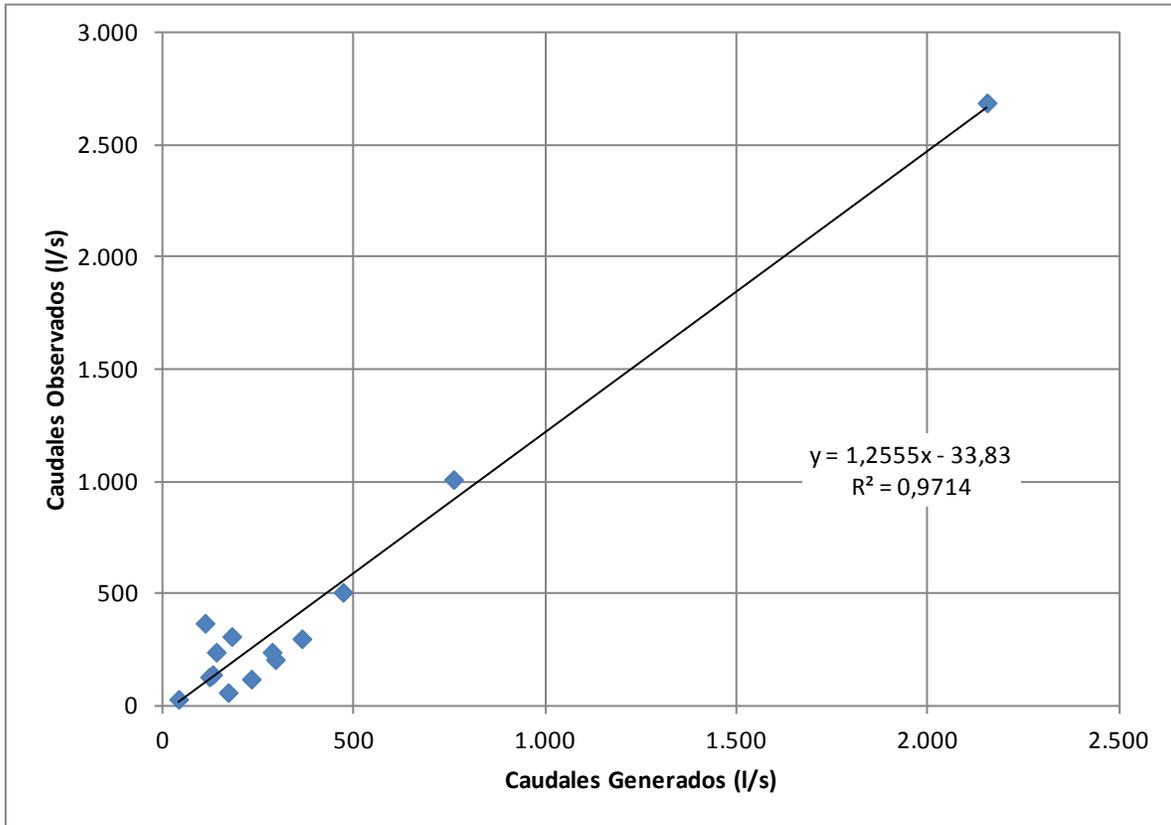
FIGURA 8.12-1
CORRELACIÓN ENTRE CAUDALES GENERADOS Y OBSERVADOS
SUBCUENCAS BALANCE HÍDRICO



Se puede observar 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, se obtiene un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,97$.

FIGURA 8.12-2
CORRELACIÓN ENTRE CAUDALES GENERADOS Y OBSERVADOS
SUBCUENCAS BALANCE HÍDRICO (eliminando 2 subcuencas)



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

9. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

9.1. Introducción

En el presente capítulo se entrega en detalle la estructura del Sistema de Información Geográfica (SIG) desarrollado e implementado para este estudio.

La presente implementación se constituye para la DGA-MOP en una herramienta que, principalmente, facilita la visualización, consulta y procesamiento de los resultados obtenidos en el estudio.

Es importante señalar que la presente implementación sólo consideró el ordenamiento y sistematización de la información generada en el estudio, mediante el desarrollo de proyectos en la plataforma ArcGIS 9.3 de ESRI.

A continuación se presenta en detalle una descripción de la información que conforma la presente implementación SIG.

9.2. Plataforma Computacional

Mediante la elaboración de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se facilita las labores de recolección, análisis, gestión y representación de datos espaciales.

La representación de la información recopilada se muestra en una serie de capas temáticas, con lo cual es posible realizar un análisis de los datos obtenidos.

De esta forma, el SIG funciona como una base de datos con información geográfica, la cual se encuentra asociada a través de un identificador común a la información representada gráficamente en un mapa digital. Por lo tanto, se pueden conocer los atributos de un tema, seleccionándolo y realizando una consulta, como también, realizar una pregunta directamente en la base de datos.

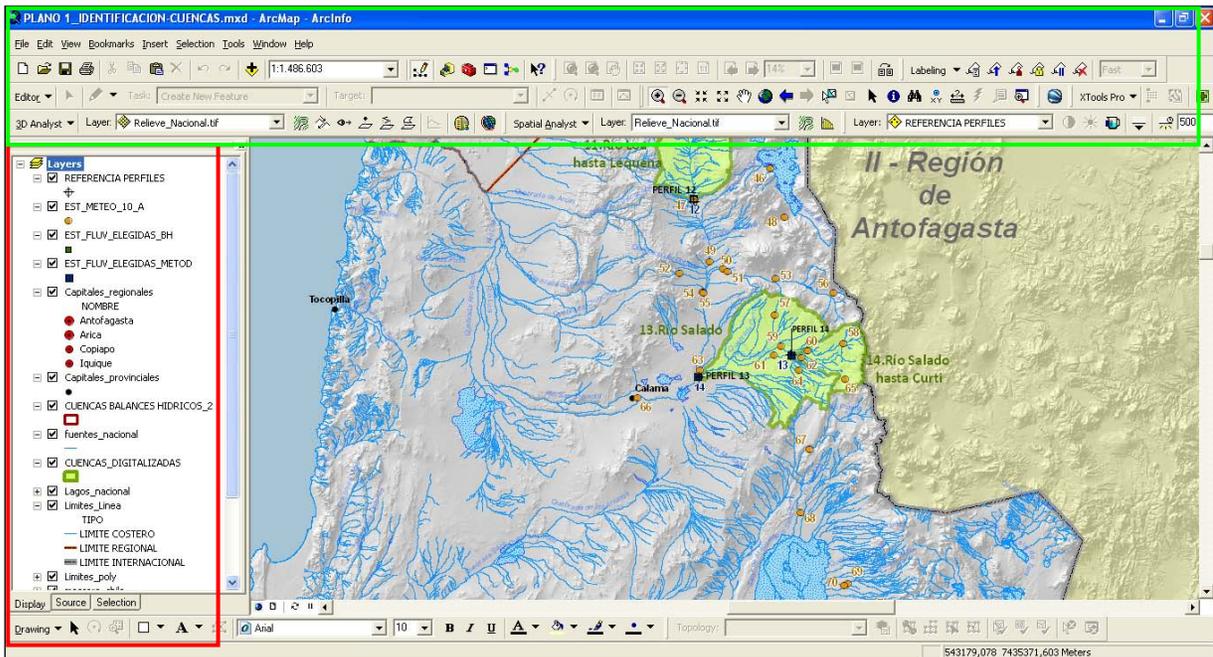
Para la elaboración del Sistema de Información Geográfica implementado en el presente estudio se ha utilizado el Software ArcGIS 9.3, desarrollado por la empresa ESRI.

Dada la estructura del software, esta implementación se ha sistematizado en varios proyectos a nivel global del área de estudio (XV, I, II y III regiones). Cada proyecto recibe un nombre que lo identifica con el tema e información que contiene.

La extensión de cada proyecto es *.mxd, y puede ser abierto desde el software, o directamente, dando doble clic sobre el ícono que los representa.

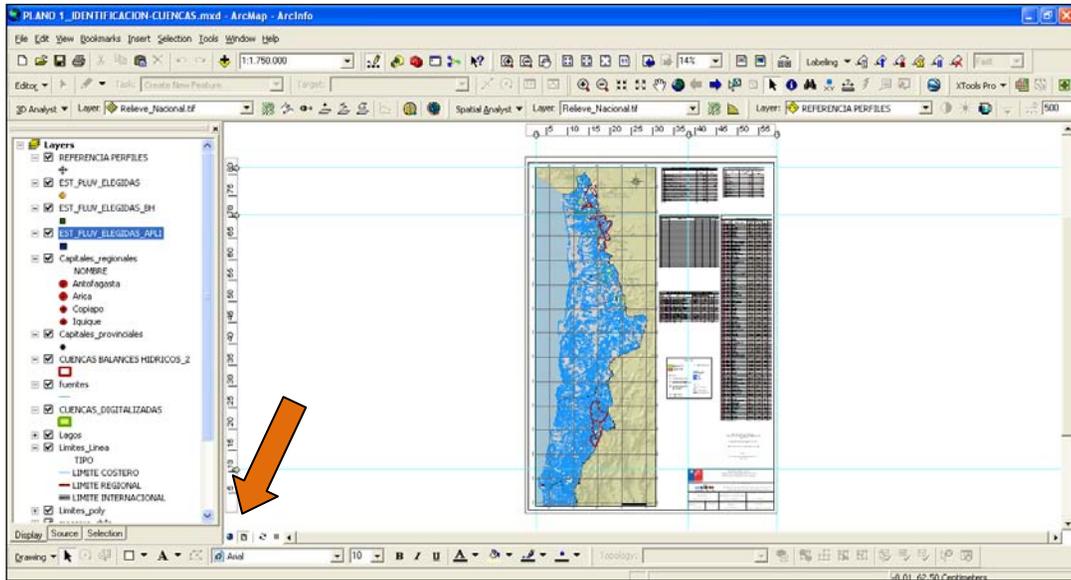
El ambiente de trabajo es el módulo ArcMap, donde es posible representar gráficamente los datos espaciales, los cuales se organizan en la tabla de contenidos (en rojo en la Figura 9-1), donde cada elemento desplegado corresponden a una capa de información también llamada layer o shape (denominación de los archivos nativos de ArcGIS).

FIGURA 9-1
VENTANA PRINCIPAL DEL MÓDULO ARCMAP



Además, en la parte superior se encuentran los menús colgantes y las distintas barras de herramientas (en verde) para el trabajo de los datos. También se puede visualizar el Layout que es la representación para impresión que contiene elementos típicos de una composición cartográfica como el Norte, la simbología, la escala gráfica y la grilla de coordenadas, además de las fuentes de información y el Datum origen del sistema de coordenadas en las cuales se representa dicho mapa.

**FIGURA 9-2
VISTA DEL LAYOUT**



Para cambiar de una vista a otra solo se debe elegir entre “Data View” o “Layout View”, comandos que se encuentran en la parte inferior izquierda de la vista, los cuales están señalados en la Figura 9-2.

Otro aspecto importante de señalar es que, utilizando el botón secundario sobre los layer en la vista de contenidos, es posible desplegar las Tablas de atributos asociadas a cada uno de los layer, que representa una de las mayores características de los SIG: almacenamiento de información asociada a datos espaciales (ver Figura 9-3).

**FIGURA 9-3
VISTA DE LA TABLA DE ATRIBUTOS**

PK	Station	#3	St. Esquina	Estacion	UTM X	UTM Y	Altitud	Área	Relevante	Perim	Perim	Perim	Perim	Perim	Perim
1	1		1	1	1084532	444744	4092	440	0	93.082422	67.955837	49.893827	32.514136	0.577744	1
2	2		2	2	1040475	432005	4093	34	0	102.63464	65.416164	59.345663	7.439344	1.364976	2.30
3	3		3	3	1007704	425430	4093	30	0	97.434439	60.41205	46.177437	5.044445	0.743389	2.3
4	4		4	4	1000404	419952	3992	40	0	78.06444	64.21214	49.246763	4.294764	0.440077	2.27
5	5		5	5	1000705	416954	4439	30	0	122.827537	67.12395	79.659522	10.739565	1.297411	2.55
6	6		6	6	7999303	444439	4337	28	0	78.059561	66.33975	49.330111	4.23224	0.349592	2.77
7	7		7	7	7999450	435352	4064	30	0	133.73171	100.970395	75.21846	15.000762	2.004439	2.66
8	8		8	8	7999216	437750	4564	20	0	103.103734	101.195138	63.739031	13.044763	0.557340	4.10
9	9		9	9	7997944	440793	4052	39	0	76.978461	67.246329	50.252204	5.139812	0.553396	1
10	10		10	10	7997487	437424	4474	34	0	120.387895	103.734330	62.597747	13.348936	1.322893	4.1
11	11		11	11	7997309	437628	4931	29	0	103.839372	99.573792	56.900477	10.990377	0.977641	1.84
12	12		12	12	7995823	440742	4444	37	0	120.002704	95.446934	62.197449	7.93504	1.474723	3.2
13	13		13	13	7992749	430814	4555	37	0	121.040465	96.47761	64.756131	14.119742	1.74504	3.5
14	14		14	14	7997713	435378	4547	35	0	102.435304	101.3028	52.151004	10.2924	1.17443	2.96
15	15		15	15	7997762	440463	3674	38	0	64.493209	57.744811	54.049660	0.224247	0.111994	2.10
16	16		16	16	7996520	442301	3437	40	0	54.55624	51.5424	26.421395	1.537071	0.34444	1.1
17	17		17	17	7956447	444447	3379	38	0	64.582497	52.83217	33.712527	0.294997	0.395122	1.13
18	18		18	18	7964449	446453	39	36	0	6.239393	6.183817	0.427447	0	0	0.01
19	19		19	19	7954447	439444	4290	39	0	90.290429	80.297411	64.933559	5.254992	0.695322	1
20	20		20	20	7954449	444457	341	25	0	0.379592	0.389304	0.22099	0.059344	0	0
21	21		21	21	7944420	447004	3074	30	0	93.543992	73.32439	24.044237	0.429200	0.044416	0
22	22		22	22	7939560	453100	4052	27	0	93.031000	76.96911	49.291033	0.499204	0.692380	0.70
23	23		23	23	7937544	429422	2051	41	0	6.087611	6.271809	1.040271	0.150137	0.02439	0
24	24		24	24	7909531	449302	2351	35	0	32.330400	36.479413	7.931927	0.134434	0	0.00
25	25		25	25	7908680	448340	4290	34	0	72.020949	100.744522	29.849209	1.049200	1.026	0
26	26		26	26	7871080	420954	1903	22	0	45.643440	39.51978	21.490244	1.039333	0.272727	1.19
27	27		27	27	7841892	454104	2494	32	0	6.450400	16.473915	2.113933	1.795227	0	0.21
28	28		28	28	7820853	440713	2074	22	0	93.144444	93.149222	81.049794	0.379467	0.272727	0.40
29	29		29	29	7809524	437401	2204	31	0	11.222136	7.951131	4.476903	0.049416	0.05274	0.07
30	30		30	30	7804464	454307	1925	32	0	63.031732	41.571757	37.237947	2.397611	0.272727	1.35
31	31		31	31	7804461	446135	3077	34	0	32.785791	39.445131	14.757171	0.464422	1.444422	0.52
32	32		32	32	7795440	457404	4025	24	0	64.144171	39.445037	23.740333	2.393033	0.004	0.59
33	33		33	33	7793402	444424	3933	25	0	67.013105	64.297443	46.497427	2.549427	0.330427	0.90
34	34		34	34	7791325	437371	2097	32	0	7.131717	34.000444	32.737451	0.74332	0	0.47
35	35		35	35	7782000	430930	4025	44	0	94.777467	43.049292	22.829292	1.425981	0.61	1.2
36	36		36	36	7781275	437371	2575	37	0	6.934335	3.650332	0.046504	0.207463	0	0.44
37	37		37	37	7780115	437446	2077	24	0	2.873717	1.65522	1.392004	0.102439	0	0.23
38	38		38	38	7764200	433300	174	31	0	1.040741	0.810801	0	0.044400	1.076101	0.02
39	39		39	39	7730494	433347	1764	33	0	24.079344	20.741004	3.240443	0.095745	0.144494	0.39
40	40		40	40	7724774	440952	2051	30	0	6.049704	2.819781	0.070903	0.049416	0.049416	0.14
41	41		41	41	7495495	533304	1744	29	0	36.044313	37.907492	33.933992	0.40939	1.773993	2.10
42	42		42	42	7493404	530722	1429	29	0	62.93404	42.499344	36.240443	1.62574	1.040934	2.74
43	43		43	43	7474240	520955	1744	29	0	15.247392	47.385137	24.51	1.720449	2.05222	3.04
44	44		44	44	7462200	517792	1709	23	0	37.099499	41.960916	32.210304	0.109204	0.11222	2.44
45	45		45	45	7421300	516404	1729	23	0	74.177432	71.27132	62.18274	1.890492	2.209394	0.4
46	46		46	46	7406295	516404	1324	17	0	29.240974	31.492033	20.440974	0.144411	0.12449	1.05
47	47		47	47	7407174	474404	4474	13	0	21.306760	23.144445	16.644371	0.544311	1.2444	1.14
48	48		48	48	7377574	451000	3322	45	0	1.937416	5.92471	5.092203	0.500351	0.110403	0.3

Cabe destacar que de las funcionalidades que dispone el software ArcGIS, sólo se emplearon aquellas herramientas asociadas a los componentes de Vistas, Tablas y Layout.

9.3. Base Cartográfica

La presente implementación utilizó como base cartográfica la Cartografía Regular del IGM en escala 1:50.000, referida a coordenadas UTM, con origen en el Datum WGS 84 Huso 19.

La información utilizada de la fuente citada fue la siguiente:

Información base:

- Límites Administrativos
- Ciudades
- Hidrografía
- Lagos y Lagunas
- Vialidad
- Geología
- Estaciones Fluviométricas, Pluviométricas y Evaporimétricas
- Isoyetas BH e Isoyetas PUC

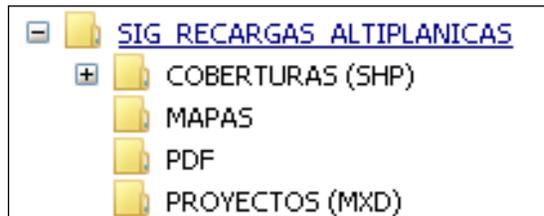
Información generada:

- Cuencas de Aplicación y Balance Hídrico.
- Elección de Estaciones Fluviométricas, Pluviométricas y Evaporimétricas.
- Ubicación de Derechos de Agua.
- Subcuencas consideradas en la cuencas de Balance Hídrico.
- Geología, sección en las cuencas de Balance Hídrico.
- Determinación de Zonas 1 y 2 de permeabilidad según características de las unidades geológicas de las cuencas.
- Imágenes, y Curvas de nivel en la salida de las cuencas de Aplicación.

9.4. Instalación de la Aplicación SIG

La aplicación del Sistema de Información Geográfica se encuentra organizada en un directorio principal denominado SIG_RECARGAS_ALTIPLANICAS, el cual tiene una estructura de directorios que contienen los proyectos de ArcGIS, las coberturas o shapes, los mapas obtenidos y archivos *.pdf que contienen información a la que se puede acceder desde uno de los proyectos del SIG.

ESTRUCTURA GENERAL DEL SIG



Para utilizar la aplicación basta con copiar la carpeta principal del SIG en cualquier directorio del pc, luego entrar en la carpeta PROYECTOS (MXD) que contiene los proyectos y dar clic al proyecto seleccionado para ingresar al módulo ArcMap de ArcGIS. Lo anterior se debe a que todos los proyectos están configurados para que el direccionamiento de los archivos que lo componen sea relativo. En caso de tener algún problema se recomienda copiar toda la carpeta directamente en el disco C.

Cabe comentar que todos los proyectos no requieren del uso de ninguna extensión adicional para su ejecución.

9.5. Diseño y Organización SIG

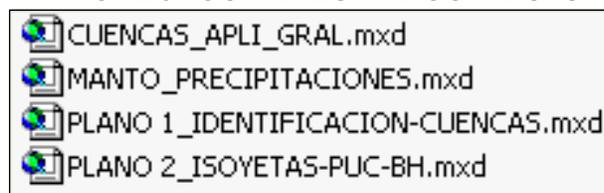
9.5.1. Diseño Lógico y Conceptual

Con el objetivo de permitir 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.

Para la consulta de las bases de datos gráfica y alfanumérica asociada del SIG se utilizó el software ArcGIS 9.3 de Esri.

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

PROYECTOS INTEGRADOS AL SIG



Cada uno de los proyectos está conformado por una vista donde están cargados todos las coberturas de cada uno de los temas y además, cada proyecto tiene un Layout donde se muestra la composición cartográfica de del tema específico.

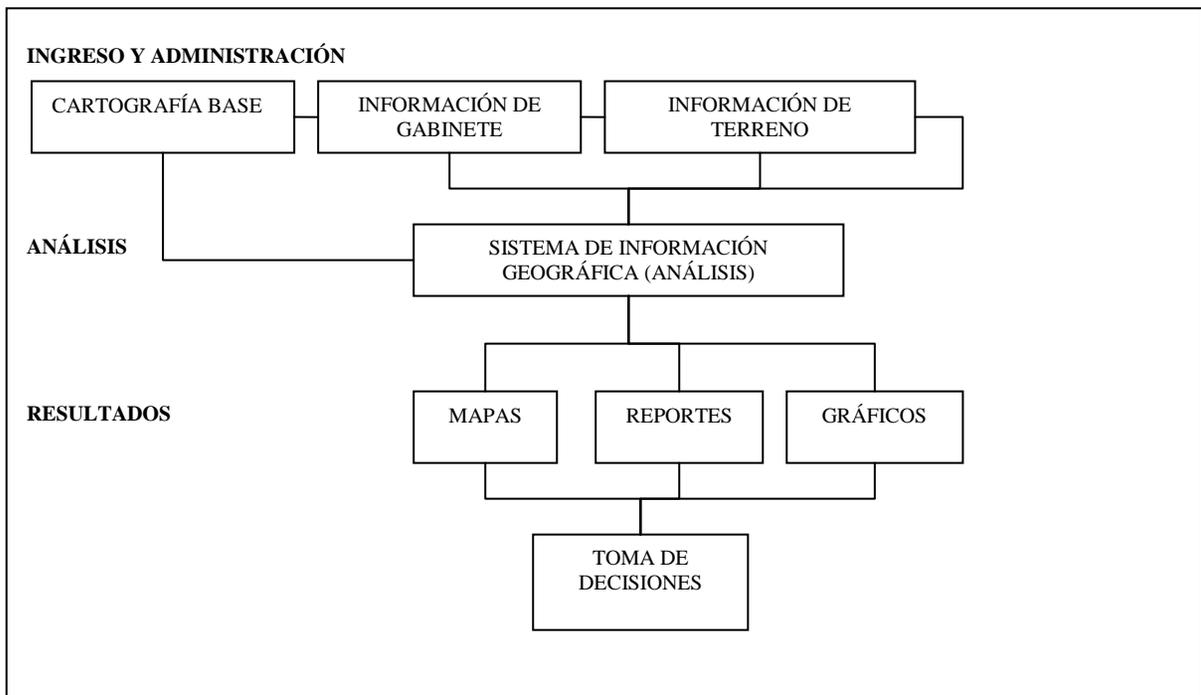
Se debe destacar que el proyecto "CUENCAS_APLI_GRAL", se presenta como un proyecto de aplicación ya que tiene incorporado en una de sus capas, la herramienta de "hyperlink" que permite establecer un enlace directo a un documento pdf, con información complementaria.

El diseño conceptual y lógico general adoptado para el SIG, se presenta en la Figura 9-4.

Según se observa en esa figura, el diseño conceptual considera el ingreso de información al SIG a través de 3 formas: Cartografía base, Levantamiento de información en gabinete y terreno, conformándose de esta forma las bases de datos gráficas y alfanuméricas de las cuencas específicas.

Realizada la implementación física del SIG en el software ArcGIS 9.3, es factible aprovechar sus potencialidades como herramienta de administración, visualización y caracterización de datos espaciales.

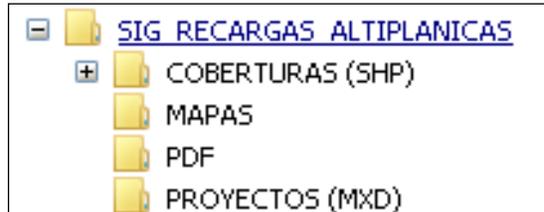
**FIGURA 9-4
DISEÑO CONCEPTUAL SIG**



9.5.2. Estructura de Directorios

Como se explicó anteriormente, toda la información está contenida en la carpeta principal del SIG llamada "SIG_RECARGAS_ALTIPLANICAS". Dentro de ella se han dispuesto cuatro directorios principales: COBERTURAS (shp), MAPAS, PROYECTOS (mxd) y PDF.

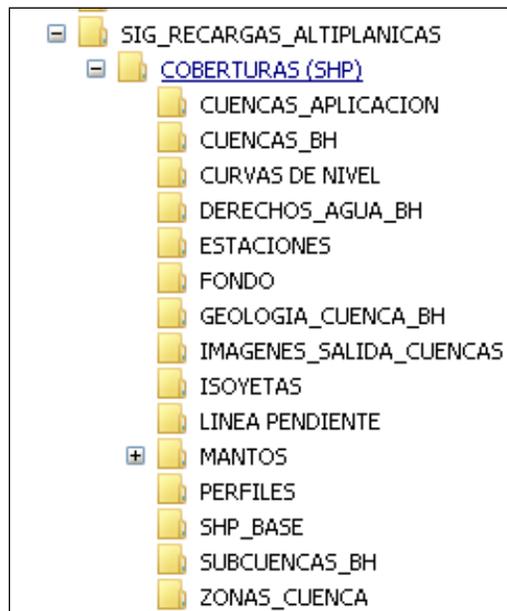
DIRECTORIOS DENTRO DEL SIG



En el directorio MAPAS se encuentran las composiciones cartográficas en formato pdf.

Para el caso de la información temática presentada en el SIG, en el directorio COBERTURAS (SHP) se ha dispuesto las carpetas temáticas utilizadas para la composición de los proyectos. La estructura definida se muestra en la Figura 9-5.

FIGURA 9-5
ESTRUCTURA DE CARPETAS PARA CADA CAPA TEMÁTICA



Según se muestra en la figura anterior, la estructura de la información se organiza dentro del directorio COBERTURAS (SHP), en carpetas temáticas, que en su interior se encuentran las capas relacionada al tema de la carpeta.

Dentro de la carpeta COBERTURAS (SHP), además de la información temática, existe una carpeta llamada "FONDO", la cual posee shapes derivados que sólo se utilizan para una mejor representación de los mapas, y en sí no contienen información relevante como SIG.

Las carpetas con información temática se encuentran nombradas descriptivamente, como por ejemplo, las carpetas "CUENCAS_APLICACION" y "CUENCAS_BH" que contienen los shape de cuencas utilizadas para la aplicación y las utilizadas para el balance hídrico respectivamente. Para ver el detalle se presenta el Cuadro 9-1 con las capas o shapes que contiene cada carpeta y que han sido utilizados en la presentación de los proyectos que se entregan en el SIG. Mientras el Cuadro 9-2 presenta las capas o shapes adicionales. Estos shape adicionales contienen información que se ha generado en el transcurso del estudio y que podría ser útil en análisis y representaciones futuras. En dichos cuadros se entrega una descripción genérica de cada uno de los archivos, junto con la fuente de información y una breve descripción.

CUADRO 9-1 CAPAS O SHAPES, UTILIZADOS EN LOS PROYECTOS DEL SIG, POR CARPETA

Carpeta	Shape o Capa	Fuente	Descripción
CUENCAS_APLICACION	CUENCAS_DIGITALIZADAS	CGF-AQUATERRA	Límite y ubicación de las 14 cuencas consideradas en la aplicación de la metodología
	01_RIO_LLUTA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	02_RIO_LLUTA_BAJO_AZUFRE	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	03_RIO_CAQUENA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	04_RIO_SAN_JOSE_ALTO	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	05_RIO_CODPA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	06_RIO_CAMARONES	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	07_QUEB_CAMINA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	08_QUEB_TARAPACA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	09_RIO_COLLACAGUA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	10_RIO_PIGA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	11_RIO_HUTACONDO	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	12_RIO_LOA_LEQUENA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	13_RIO_SALADO	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	14_RIO_SALADO_CURTI	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	15_RIO_SAN PEDRO_ATACAMA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	16_CANAL_CUNO_SOCAIRE	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	17_RIO_DE_LA_OLA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	18_RIO_LAMAS	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	19_RIO_JORQUERA	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	20_RIO_PULIDO	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	21_RIO_MANFLAS	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	22_RIO_TRANSITO_RIO_CARMEN	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	23_RIO_TRANSITO_ANG_PINTE	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
	24_RIO_EL_CARMEN_RIO_TRANS	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca
25_RIO_CARMEN_SAN_FÉLIX	CGF-AQUATERRA	Límete de la cuenca	
CUENCAS_BH	CUENCAS_BALANCES_HIDRICOS_2	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite y ubicación de las 11 cuencas consideradas para balance hídrico
	1_LAUCA_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	2_CAQUENA_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	3_RIO_ISLUGA_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	4_CARIQUIMA_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	5_CODPA_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	6_SALAR_HUASCO_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	7_CANCOSA_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	8_CAMIÑA_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	9_MARICUNGA_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
	10_SALAR_PEDERNALES_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca
11_LAG_NEGRO_FCO_BH	DGA-CGF-AQUATERRA	Límite de la cuenca	
ESTACIONES	EST_FLUV_ELEGIDAS_APLI	CGF-AQUATERRA	Ubicación de las 14 estaciones Fluviométricas elegidas para las cuencas de Aplicación
	EST_FLUV_ELEGIDAS_BH	CGF-AQUATERRA	Ubicación de las estaciones Fluviométricas elegidas para las cuencas de Balance Hídrico
	EST_PLUV_ELEGIDAS	CGF	Ubicación de las 102 estaciones Pluviométricas elegidas para hacer el manto de precipitación
ISOYETAS	BH_isoyetas	DGA	Trazado de las isoyetas del Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987)
	PUC_Isoyetas	DGA	Trazado de las isoyetas del Estudio SIT N° 157, 2008.
MANTOS	contorno_prep	AQUATERRA	Límite utilizado para realizar el manto de precipitación
	manto_prep	AQUATERRA	Raster del manto de precipitación (pixeles de 1000 m)
PERFILES	REFERENCIA_PERFILES	AQUATERRA	Referencia de la ubicación del trazado de los perfiles geofísicos
	ciudades	DGA	Principales centros urbanos de la zona de estudio
SHP_BASE	fuentes	DGA	Red hidrográfica de la zona de estudio
	Lagos	DGA	Lagos de la zona de estudio
	limites_linea	DGA	Límites administrativos en formato de línea
	limites_poly	DGA	Límites administrativos en formato de polígono
	Red_VialChile	DGA	Red Vial de la zona de estudio
FONDO	Sudamerica	DGA	Límites de Sudamérica (polígonos)
	mascara_chile	DGA	Marcara de Chile, delimitación mar-continente.
	Relieve_Nacional	DGA	Imagen tif, de la representación del relieve de Chile

CUADRO 9-2 CAPAS O SHAPES, ADICIONALES, POR CARPETA

Carpeta	Shape o Capa	Fuente	Descripción
GEOLOGIA_CUENCAS_BH	01_GEO_LAUCA	DGA	Geología de la cuenca 01 de balance hídrico
	02_GEO_CAQUENA	DGA	Geología de la cuenca 02 de balance hídrico
	03_GEO_ISLUGA	DGA	Geología de la cuenca 03 de balance hídrico
	04_GEO_CARIQUIMA	DGA	Geología de la cuenca 04 de balance hídrico
	05_GEO_CODPA	DGA	Geología de la cuenca 05 de balance hídrico
	06_GEO_HUASCO	DGA	Geología de la cuenca 06 de balance hídrico
	07_GEO_CANCOSA	DGA	Geología de la cuenca 07 de balance hídrico
	08_GEO_CAMIÑA	DGA	Geología de la cuenca 08 de balance hídrico
	09_GEO_MARICUNGA	DGA	Geología de la cuenca 09 de balance hídrico
	10_GEO_PEDERNALES	DGA	Geología de la cuenca 10 de balance hídrico
	11_GEO_NEGROFCO	DGA	Geología de la cuenca 11 de balance hídrico
DERECHOS_AGUA_BH	DEMANDAS_AGUA_SUBT_wgs	CIRH-DGA	Puntos de ubicación de los derechos de aguas Subterráneos ubicados en la zona de estudio en datum WGS-84
	DEMANDAS_AGUA_SUPER01_wgs	CIRH-DGA	Puntos de ubicación de los derechos de aguas Superficial ubicados en la primera región, en datum WGS-84
	DEMANDAS_AGUA_SUPER03_wgs	CIRH-DGA	Puntos de ubicación de los derechos de aguas Superficial ubicados en la tercera región, en datum WGS-84
	DEMANDAS_AGUA_SUPER15_wgs	CIRH-DGA	Puntos de ubicación de los derechos de aguas Superficial ubicados en la decimo quinta región, en datum WGS-84
ZONAS_CUENCAS_BH	01_ZONAS_LAUCA	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 01 de balance hídrico
	02_ZONAS_CAQUENA	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 02 de balance hídrico
	03_ZONAS_ISLUGA	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 03 de balance hídrico
	04_ZONAS_CARIQUIMA	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 04 de balance hídrico
	05_ZONAS_CODPA	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 05 de balance hídrico
	06_ZONAS_HUASCO	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 06 de balance hídrico
	07_ZONAS_CANCOSA	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 07 de balance hídrico
	08_ZONAS_CAMIÑA	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 08 de balance hídrico
	09_ZONAS_MARICUNGA	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 09 de balance hídrico
	10_ZONAS_PEDERNALES	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 10 de balance hídrico
	11_ZONAS_NEGROFCO	AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de la cuenca 11 de balance hídrico
	ZONAS_CUENCAS_APLI	CGF-AQUETERRA	Zonas 1 y 2 de las cuencas de aplicación
SUBCUENCAS_BH	01_SC_LAUCA_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	02_SC_CAQUENA_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	03_SC_ISLUGA_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	04_SC_CARIQUIMA_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	05_SC_CODPA_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	06_SC_HUASCO_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	07_SC_CANCOSA_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	08_SC_CAMIÑA_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	09_SC_MARICUNGA_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	10_SC_PEDERNALES_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
	11_SC_NEGROFCO_BH	AQUETERRA	Subcuencas generadas en la cuenca para realizar el balance hídrico
CURVAS DE NIVEL	cuevas_cuenca_01	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 01, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_02	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 02, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_03	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 03, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_04	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 04, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_05	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 05, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_06	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 06, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_07	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 07, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_08	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 08, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_09	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 09, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_10	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 10, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_11	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 11, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_12	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 12, (base imagen ASTERDEM)
	cuevas_cuenca_13	AQUETERRA	Curvas de nivel cada 2,5 m, en la salida de la cuenca de aplicación 13, (base imagen ASTERDEM)
LINEA PENDIENTES	pendiente_salida_cuencas	AQUETERRA	Trazado considerado para el calculo de la pendiente en las salidas de las cuencas consideradas para la aplicación
IMÁGENES_SALIDA_CUENCAS	Sal_Cuenca01	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca02	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca03	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca04	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca05	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca06	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca07	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca08	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca09	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca10	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca11	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca12	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca13	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.
	Sal_Cuenca14	AQUETERRA-GE	Imagen Google Earth, referenciada, de la salida de la cuenca.

9.5.3. Base de Datos y Diseño de Tablas

a) Base de Datos

Las bases de datos y alfanuméricas que integran el SIG mantienen el formato nativos del software ArcGIS denominados shapefile.

Este archivo almacena tanto las características geométricas y atributos de los datos espaciales. De acuerdo a ello la cobertura de ArcGIS está compuesta por cinco archivos:

archivo.shp
archivo.dbf
archivo.shx
archivo.sbx
archivo.prj

b) Diseño de Tablas

Las bases de datos de atributos, que integran este SIG, poseen una estructura de archivo dbf, la cual se organiza en campos (columnas) y registros (filas).

Las tablas de atributos de las coberturas y las tablas con la información alfanumérica asociada se pueden unir dinámicamente mediante una unión (join) entre ellas. Es decir, la unión de la gráfica con las bases de datos se realiza en forma virtual, de manera de proteger ambas bases ante eventuales pérdidas de registros por una mala manipulación accidental. Esto permite un uso no dependiente de la base de datos alfanumérica y la base de datos gráfica en la gestión de actualización de las bases de datos. No obstante lo anterior, para consultas de tipo espacial, la unión de tablas, asocia la base de datos gráfica con la alfanumérica para dar respuesta a las consultas.

Es importante destacar que las bases de datos generadas en el estudio son de tipo lineal.

9.5.4. Presentación de Resultados

Para cada uno de los proyectos implementados se construyeron Layouts en formato A1, que permiten la representación gráfica de los resultados generados.

Cabe mencionar que para la representación de los diferentes temas, se generaron simbologías de extensión .lyr que permiten su reconstrucción. Estos archivos se encuentran almacenados en la carpeta de cada cobertura y el nombre de cada archivo es similar al del respectivo tema.

9.5.5. Planos Temáticos

Los planos temáticos impresos se adjuntan al informe, y son los siguientes:

- PLANO 1 Identificación de Cuencas.
- PLANO 2 Isoyetas Balance Hídrico e Isoyetas Estudio PUC.

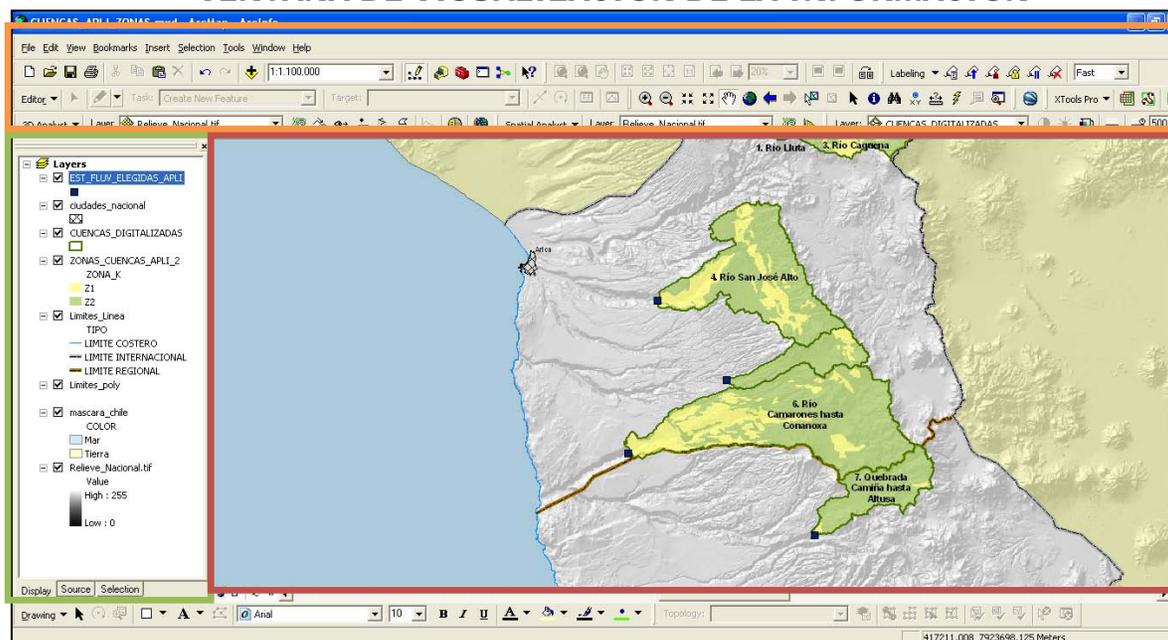
Los planos se presentan en formato A1.

9.5.6. Visualización de la Información en el SIG

A modo de ejemplo de la visualización de información que presenta el SIG, a continuación se muestran las partes principales de la vista que se despliega al abrir cada proyecto, y la forma en que se visualiza la información de la base de datos y documentos pdf.

Al abrir alguno de los proyectos se despliega una ventana del SIG como la que muestra la Figura 9-6.

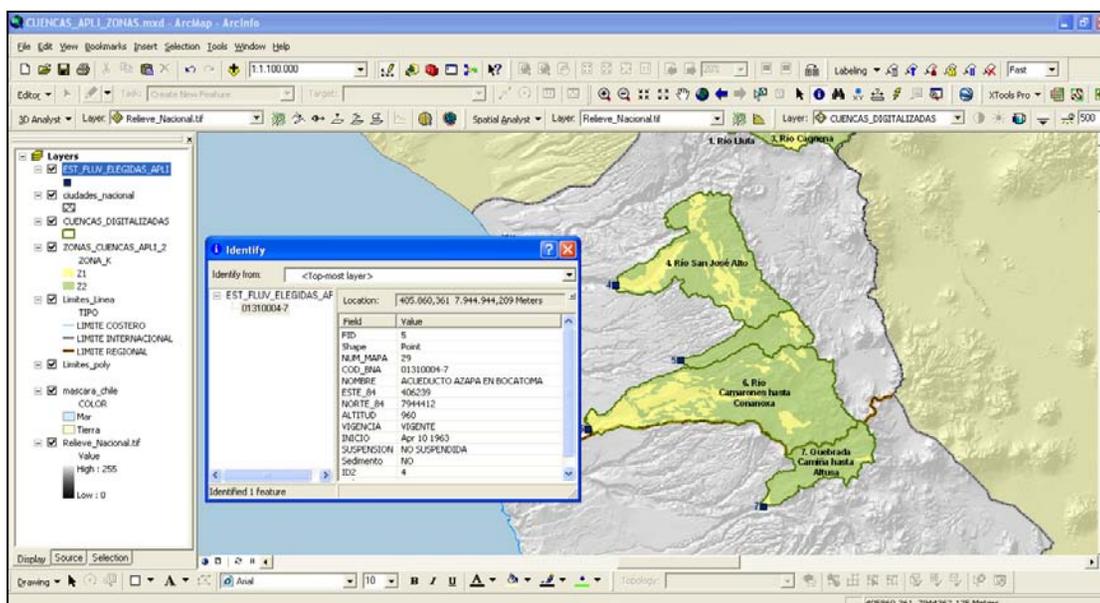
FIGURA 9-6
VENTANA DE VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN



En esta ventana se encuentra una vista principal donde se visualiza la información (marco en rojo) de las capas. En la parte superior de la ventana se presentan las barras de herramientas del programa (marco naranja), y en el sector izquierdo está el listado de las capas que se muestran en la vista (marco verde). Cada capa tiene una simbología acorde a lo que se quiera representar en el mapa de la vista.

Una de las formas para acceder a la información y la base de datos, es utilizar la herramienta "Identify" que en la barra de herramienta corresponde al botón ; con esto se puede ver toda la información de la base general de datos para un objeto, sea este punto, línea o polígono que se seleccione (ver Figura 9-7). Otra manera es ir directamente a la base de atributo de la capa, como ya se ha mencionado anteriormente.

**FIGURA 9-7
VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN
DE LA BASE DE DATOS ATRAVÉS DE LA HERRAMIENTA "Identify"**

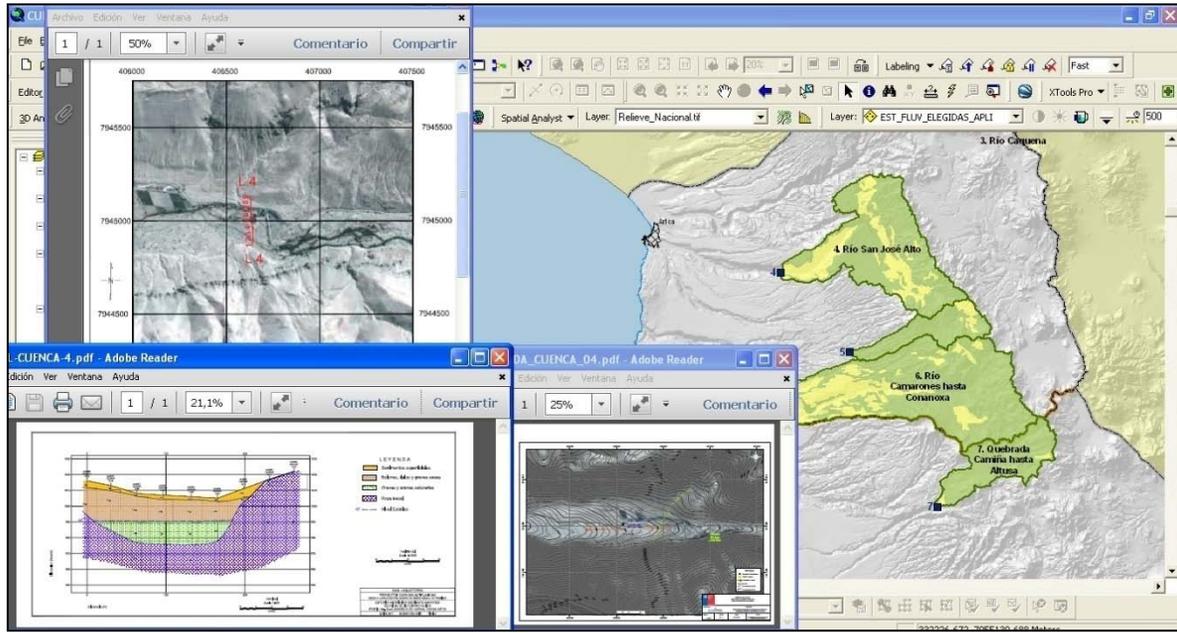


Un punto importante de destacar es que dentro de la base de atributos de la capa "EST_FLUV_ELEGIDAS_APLI" se incorporó una columna con información para realizar "link" a la información relativa a los perfiles realizados para cada cuenca de aplicación, al cual se puede acceder directamente en la vista (Data View) a través de

la herramienta "hyperlink" (). Estos archivos se presentan en formato pdf y se encuentran en la carpeta PDF, donde se puede acceder directamente ellos; la aplicación se encuentra activa en el proyecto "CUENCAS_APLI_GRAL". Como se muestra en la Figura 9-8, estos archivos contienen un mapa con la ubicación del

perfil en terreno, el perfil estratigráfico y una figura del trazado donde se calculó la pendiente.

FIGURA 9-8
VISUALIZACIÓN DEL ARCHIVOS PDF ASOCIADOS A CADA ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA



Para obtener un mejor funcionamiento de la herramienta “hyperlink”, se recomienda instalar la carpeta principal “SIG_RECARGAS_ALTIPLÁNICAS” directamente en la unidad C.

10. RESUMEN Y CONCLUSIONES

10.1. 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

- 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.
- 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 km², 11 cuencas, $R^2 = 0,53$; de 1.000 a 2.000 km², 6 cuencas, $R^2 = 0,86$; mayor a 2.000 km², 8 cuencas, $R^2 = 0,95$).

- 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

- 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).
- Se validó que la productividad de una cuenca altiplánica (l/s/km²) aumenta con la precipitación media anual.
- 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).
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.

10.2. 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.