



MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

**EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÁNEOS EN CUENCAS DE LA REGIÓN
DE ATACAMA UBICADAS ENTRE EL RÍO
COPIAPÓ Y LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

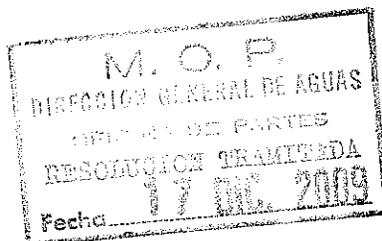
INFORME TÉCNICO

DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN
DE RECURSOS HÍDRICOS

S.D.T. N° 276

Santiago, Agosto 2009

REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DEPTO. ADM. DE RECURSOS HIDRICOS
XPY/FRL/frl



REF.: Aprueba El Estudio "Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en cuencas de la Región de Atacama ubicadas entre el río Copiapó y la Región de Antofagasta"

=====

SANTIAGO,

17 DIC. 2009

D.G.A. N° 4110 / EXENTA

VISTOS: El estudio "Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en cuencas de la Región de Atacama ubicadas entre el río Copiapó y la Región de Antofagasta", S.D.T. N° 276 de agosto de 2009; y las atribuciones que me confiere el artículo 300 letra c) del Código de Aguas.

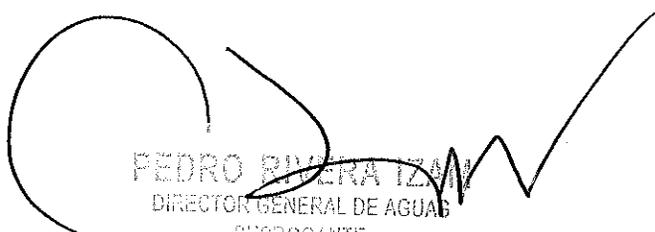
RESUELVO:

- 1.- **APRUÉBASE** el Estudio denominado "Evaluación de Los Recursos Hídricos Subterráneos en cuencas de la Región de Atacama ubicadas entre el río Copiapó y la Región de Antofagasta", S.D.T. N° 276 de agosto de 2009.
- 2.- **COMUNÍQUESE** la presente resolución a los Srs. Secretarios Regionales Ministeriales de Obras Públicas de la Región de Atacama, a los Departamentos de la Dirección General de Aguas y Oficina Regional de la Dirección General de Aguas de la Región de Atacama.

ANÓTESE Y COMUNÍQUESE



6952843055


PEDRO RIVERA IZQUIERDO
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS
SUBROGANTE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

INDICE

1 Introducción	2
2 Hidrología	4
2.1 Análisis de precipitación	4
3 Caracterización hidrogeológica	16
3.1 Marco fisiográfico	17
3.2 Marco geológico	19
3.3 Unidades hidrogeológicas	25
3.4 Recarga	30
3.5 Salar de Pedernales	35
4 Resumen y Conclusiones	37
ANEXOS	39
Demanda de aguas subterráneas	

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años la demanda por recursos hídricos se ha intensificado, aumentando el ingreso de solicitudes relacionadas con la adquisición y ejercicio de derechos y aprovechamiento de aguas, situación que debe resolver la Dirección General de Aguas (DGA). Ante este caso, los estudios de evaluación hidrogeológica e hidrológica y los modelos de simulación, ya sea de recursos superficiales como subterráneos, constituyen herramientas fundamentales de apoyo a la resolución de las solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas.

De acuerdo a los objetivos planteados, los estudios permitirán en un primer término consolidar la información disponible de las áreas en cuestión, de manera que puedan ser consultadas tanto por usuarios internos como externos, a su vez, servirán de apoyo a la resolución de solicitudes relacionadas con los derechos de aprovechamiento en dichas zonas.

Este estudio fue realizado en base a información oficial de la DGA más otros antecedentes de dominio público, en este sentido es importante señalar que el estudio no consideró nuevos trabajos ni la aplicación de modelos de simulación, por lo que los resultados deben ser considerados como una primera aproximación en base a información existente.

Más aun, la caracterización hidrogeológica se realizó en base a la información extractada del mapa geológico de Chile, escala 1:1000000 (SERNAGEOMIN, 2002), por lo que no se incluyen otros antecedentes y estudios a escala mas detallada. El sistema de coordenadas utilizado en los mapas y figuras de este informe corresponden a coordenadas UTM, Datum Provisional Sudamericano 1956, Zona 19 Sur.

El área de estudio (figura 1.1) corresponde a las cuencas comprendidas entre el límite sur de la Región de Antofagasta y la cuenca del río Copiapó. El área esta constituida por tres tipos de cuencas, altiplánicas, costeras e intermedias.

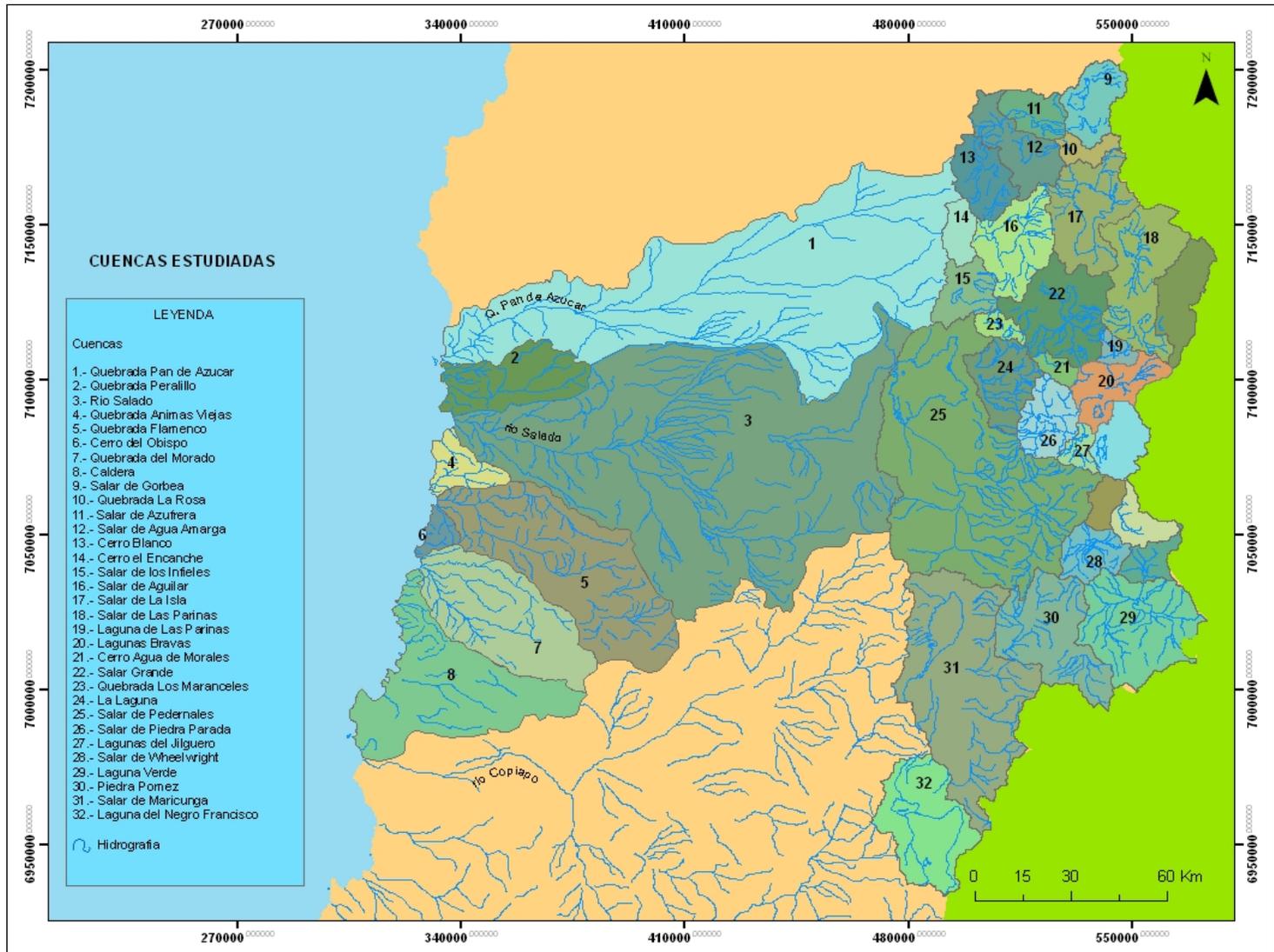


Figura 1.1. Ubicación área de estudio y cuencas analizadas.

2 HIDROLOGÍA

A continuación se presenta un análisis hidrológico de las cuencas en estudio. Este que se enfoca principalmente en las precipitaciones ya que en cuanto a los escurrimientos superficiales estos presentan un carácter endorreico. Las aguas de los ríos de importancia que existen en algunas cuencas altiplánicas como el Lamas y La Ola son captadas casi en su totalidad mucho antes de llegar a infiltrarse en la zona baja donde se encuentran los Salares.

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 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 el mapa de isoyetas de la zona.

La extensión y relleno de las estadísticas se realizó cuidadosamente con el fin de lograr una buena caracterización, ya que al contar con poca información es necesario disminuir la incertidumbre que se asocia a los registros pluviométricos, corrigiendo errores sistemáticos que son generados por distintas causas.

2.1 Análisis de precipitación

Para la caracterización del régimen de precipitaciones se consideraron las estaciones existentes en la zona altiplánica de la II y III Región dependientes de la DGA. En un principio se revisó la información disponible a nivel regional y posteriormente se realizó el relleno y extensión de la estadística, de tal forma que las estaciones más cercanas a la zona de estudio posean una cantidad de años considerables que permitan obtener el valor del modulo pluviométrico para cada estación. Finalmente se realizó un estudio del gradiente de precipitaciones para poder trazar el mapa de Isoyetas.

Información Disponible: Se realizó un catastro de las estaciones ubicadas en la II y III Región en los registros de la Dirección General de Aguas del M.O.P. Del total de estaciones pluviométricas existentes se seleccionaron aquellas cuya información disponible fuera de una extensión y calidad adecuadas para realizar un óptimo relleno.

En la tabla 2.1 se indica información general de las estaciones meteorológicas de las que se recolectó su información, incluyendo el nombre de la estación, el código BNA o según corresponda a la fuente de información, coordenadas UTM, altitud y estado de operación.

A continuación en la figura 2.1 se presenta un mapa con la ubicación de las estaciones pluviométricas ubicadas en la II y III Región que fueron utilizadas para este estudio.

Tabla 2.1. Información general de estaciones meteorológicas recopiladas.

Nº	FUENTE	CODIGO BNA	Estación	UTM ESTE	UTM NORTE	ALT. [msnm]
83	DGA II	02500019-6	Socaire	613.485	7.391.129	3.251
84	DGA II	02500020-K	Peine	595.346	7.381.030	2.480
85	DGA II	02500021-8	Talabre	613.735	7.421.435	3.600
86	DGA II	02510006-9	San Pedro de Atacama	582.197	7.466.520	2.450
87	DGA II	02510007-7	Río Grande	585.833	7.495.117	3.250
88	DGA II	02700001-0	Sierra Gorda	467.247	7.468.888	1.616
89	DGA II	02710002-3	Baquedano	414.749	7.419.946	1.032
90	DGA II	02710003-1	Antofagasta	358.725	7.389.982	50
91	DGA II	02942001-7	Aguas Verdes	403.389	7.190.650	1.600
92	DGA II	02943001-2	Tal Tal	350.886	7.189.130	9
93	DGA III	03210001-5	Las Vegas	433.668	7.048.423	2.115
94	DGA III	03340001-2	Caldera	364.472	7.005.403	10
95	DGA III	03404002-8	Jorquera en la Guardia	426.140	6.920.990	1.800
96	DGA III	03414002-2	Iglesia Colorada	414.913	6.883.987	1.950
97	DGA III	03421004-7	Manflas	403.428	6.887.592	1.410
98	DGA III	03430006-2	Lautaro Embalse	401.640	6.906.043	1.110
99	DGA III	03430007-0	Los Loros	391.670	6.920.731	950
100	DGA III	03431004-1	Elibor Campamento	380.052	6.933.547	745
101	DGA III	03441001-1	Pastos Grandes	445.477	7.002.327	2.000
102	DGA III	03450004-5	Copiapó	368.152	6.970.357	370
103	DGA III	03604001-7	El Totoral	308.035	6.914.149	150
104	DGA III	03701001-4	Canto de Agua	311.782	6.884.651	250

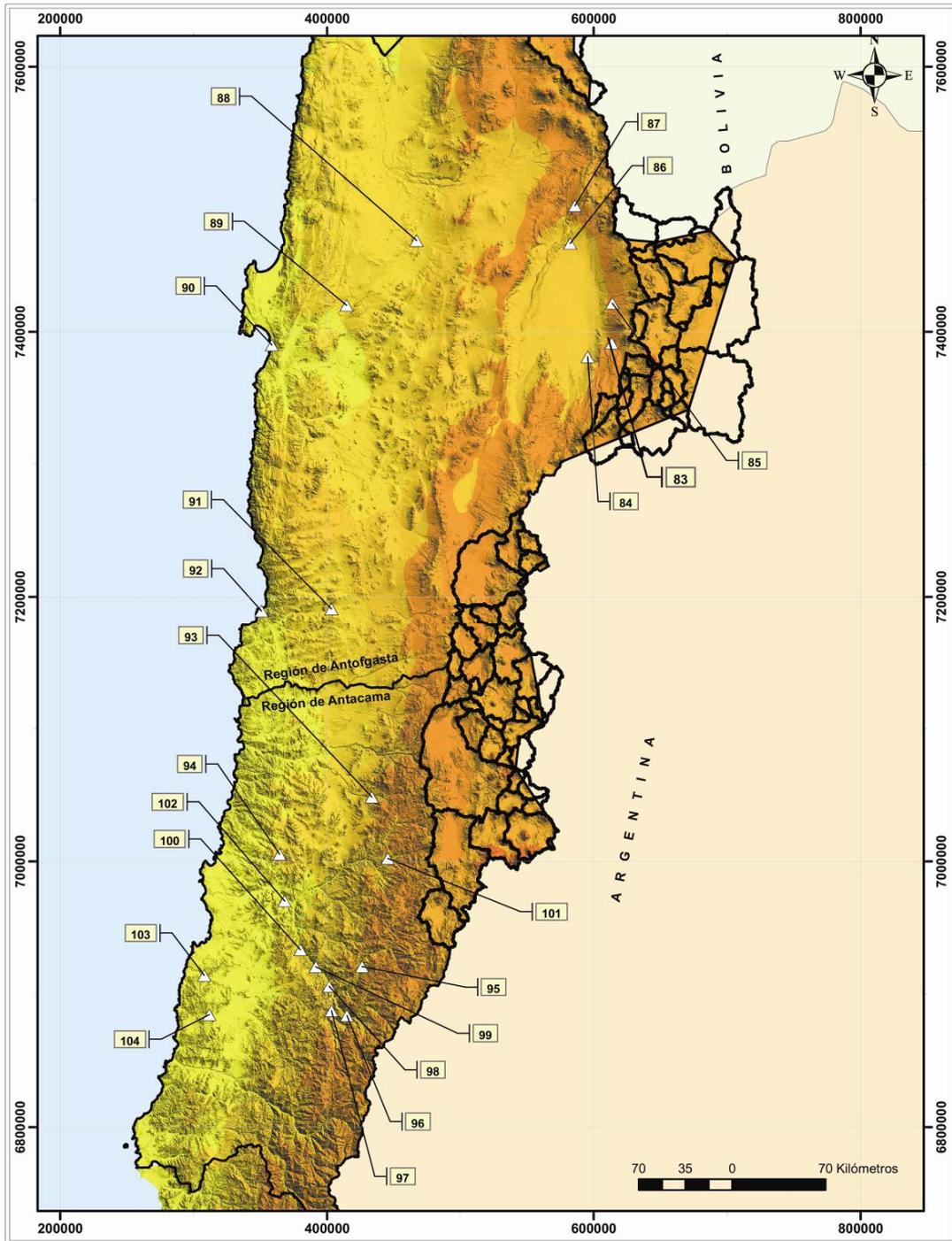


Figura 2.1. Ubicación estaciones meteorológicas II y III Región.

Relleno y Extensión de Estadísticas: El relleno y extensión de la estadística se realizó mediante dos metodologías, la primera consiste en un modelo de regresión lineal que preserva los parámetros estadísticos originales de la muestra a rellenar y la segunda consiste en rellenar y extender mediante el patrón pluviométrico. La primera metodología se considera mejor que el relleno por extensión mediante el patrón pluviométrico, sin embargo presenta el inconveniente que solo permite rellenar aquellos años en que existe información concurrente con dos estaciones base. A continuación se explican las dos metodologías utilizadas en este estudio, en el que además se incluye la corrección de estadística pluviométrica mediante el método de CDA (Curvas Doble Acumulada).

Para el relleno por modelo regresión lineal se utilizo la siguiente expresión:

$$Y_i^* = \alpha_i \cdot P1_i + \beta_i \cdot P2_i + \sqrt{1 - R^2} \cdot \varepsilon_i \cdot S_y$$

Donde Y_i^* representa el valor de precipitación rellenado en el mes i , $P1_i$ y $P2_i$ corresponde a la precipitación en el mes i en 2 estaciones cercanas o con características hidrológicas similares ($P1$ y $P2$). Los parámetros α y β de la ecuación de regresión son calculados a partir de la información común existente entre la estación a rellenar y las 2 estaciones de relleno, de manera de minimizar la suma del cuadrado de las diferencias entre los valores registrados de la variable (Y_i) y los que se obtendrían si estos fueran calculados por la ecuación de regresión (Y_i^*). El término adicional ($\sqrt{1 - R^2} \cdot \varepsilon \cdot S_y$) se agrega con objeto de que la serie rellenada conserve la varianza de la serie original, pues en ausencia de este término los valores rellenados se ubicarían todos alineados en la recta definida por los parámetros α y β , disminuyendo así la varianza de la distribución de probabilidad de la variable Y .

La selección del par de estaciones ($P1$ y $P2$) utilizadas en el relleno, se realizó en base a los coeficientes de correlación entre estaciones y sus características geográficas. El coeficiente de correlación mínimo que se aceptó fue de $R = 0,85$ en un periodo de registro común no inferior a 5 años. En forma paralela se verificó que las estaciones escogidas presentaran características geográficas similares, tanto en cercanía como altitud.

En la tabla 2.2 se muestra el cambio de los parámetros estadísticos originales con respecto a los rellenados mediante el método de correlación múltiple descrito anteriormente, donde no se observan cambios importantes en los estadígrafos estimados.

Tabla 2.2. Valores de los parámetros estadísticos originales y rellenados.

Nº	Estación	INFORMACION ORIGINAL				INFORMACION RELLENADA		
		Alt[ms nm]	Años compl.	Prom. [mm]	Desv. [mm]	Años compl.	Prom. [mm]	Desv. [mm]
83	Socaire	3.251	29	42	36	31	44	37
84	Peine	2.480	29	22	20	29	22	20
85	Talabre	3.600	11	66	44	26	68	51
86	San Pedro de Atacama	2.450	25	25	22	25	25	22
87	Río Grande	3.250	26	74	59	33	78	60
88	Sierra Gorda	1.616	12	1	2	12	1	2
89	Baquedano	1.032	19	2	3	19	2	3
90	Antofagasta	50	28	4	7	28	4	7
91	Aguas Verdes	1.600	16	8	12	16	8	12
92	Tal Tal	9	22	9	14	22	9	14
93	Las Vegas	2.115	20	35	61	25	35	55
94	Caldera	10	14	15	36	27	20	30
95	Jorquera en la Guardia	1.800	35	47	42	35	47	42
96	Iglesia Colorada	1.950	17	52	62	35	53	54
97	Manflas	1.410	33	47	51	37	46	49
98	Lautaro Embalse	1.110	38	32	37	39	36	46
99	Los Loros	950	32	36	49	34	38	50
100	Elbor Campamento	745	28	30	43	34	27	40
101	Pastos Grandes	2.000	36	31	35	36	31	35
102	Copiapó	370	33	19	30	35	18	29
103	El Totoral	150	19	29	45	28	33	44
104	Canto de Agua	250	19	32	51	34	31	43

Una vez realizado el relleno con la metodología anterior se procedió con el método de curvas doble acumuladas (CDA), solo en caso que sea necesario, ya que solo aquellos años que presenten cambios abruptos en el análisis de consistencia, debido a falta de información, serán rellenados y/o corregidos. Extender solo con las CDA es poco recomendable, pues dado la forma en que se construye el patrón (promedio de precipitación en varias estaciones) causa una pérdida de la variabilidad inherente a este tipo de series, ya que atenúa la aleatoriedad.

Se construye la CDA de la estación en estudio y el patrón de las estaciones vecinas, versus un patrón común para la zona, en este caso se amplía la estadística de la estación en estudio según la siguiente expresión:

$$P_X = \frac{M_X}{M_A} * P_A$$

Donde:

P_x : precipitación no medida en estación que se desea extender durante año i .

P_a : precipitación media en la estación patrón durante el año i .

M_x : pendiente de la CDA para la estación de estudio.

M_a : pendiente de la CDA para la estación patrón.

X : subíndice que indica la estación de interés que se desea extender.

A : subíndice que indica la estación patrón de mayor registro estadístico.

Según la distribución geográfica y la homogeneidad de datos se procedió a construir tres patrones para efectuar el análisis de las CDA. La elección de la estación patrón de una cuenca se realizó con el siguiente criterio:

- Se agruparon las estadísticas año a año de una serie de n estaciones representativas del área en estudio, en lo posible superior a tres. Con estas n estaciones se determinan las precipitaciones promedio para cada año y la información generada se acumula.
- Con los datos acumulados promedio por año, que corresponde a una primera aproximación a lo que se denominó estación patrón, se establece un análisis de doble masa entre estos valores y los valores acumulados de cada estación componente de dicho promedio.
- Si las n estaciones, no presentan tendencias con quiebre, se asume que el valor promedio anual de las n estaciones seleccionadas, corresponde a los valores representativos de la estación patrón.

Es importante destacar este método debe ser utilizado con cautela en zonas montañosas, dado que un régimen de precipitación mixto puede dejar sin valides los supuestos CDA, sin embargo en la zona altiplánica este fenómeno no tiene mayor importancia. Por otra parte se considera como un quiebre de la tendencia de los datos aquel que comprenda una cifra mayor o igual a cinco años agrupados en una tendencia, de esta forma se evita la incorporación de quiebres que en la realidad no representan errores sistemáticos. La técnica clásica de comparación de las curvas doble masa o doble acumulada funciona bajo la hipótesis de que si se producen cambios abruptos en una estación con respecto a otras estaciones, entonces existiría algún tipo de error que puede afectar las mediciones.

La figura 2.2 se presenta la distribución temporal de las Estaciones patrón de III Región. Esta tendencia es la que deberían seguir las estaciones que se ubican al interior del área de estudio.

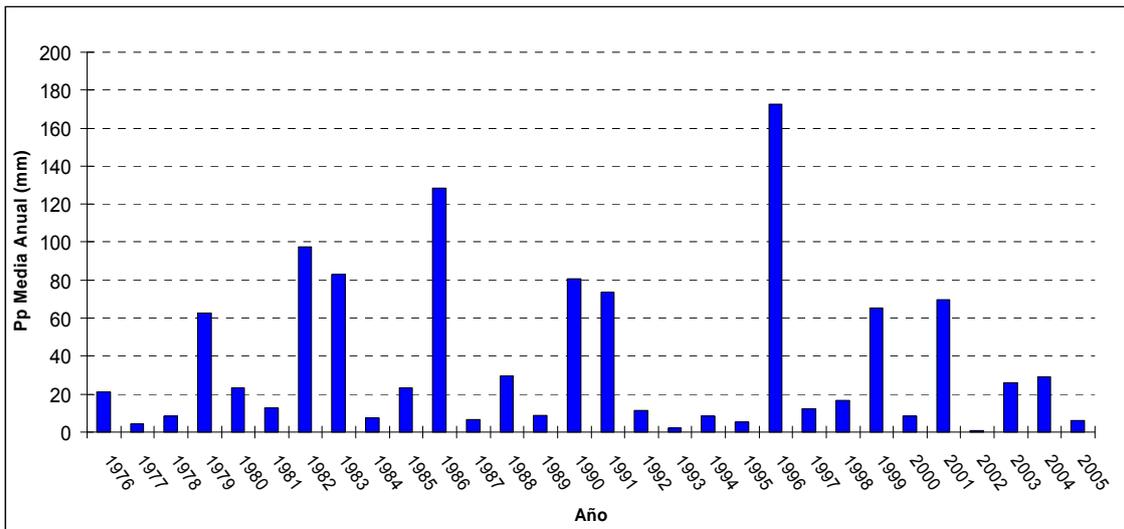


Figura 2.2. Distribución temporal de pp patrón limite II Región y cuenca Copiapó.

La figura 2.3 presenta dos gráficos, los que inicialmente muestran un comportamiento lineal y proporcional con respecto al patrón, no se observaron tendencias agrupadas en un mínimo 5 años, por lo que se considera que no existen cambios significativos en las estaciones descritas a continuación. Los gráficos que se muestran corresponden a los más representativos.

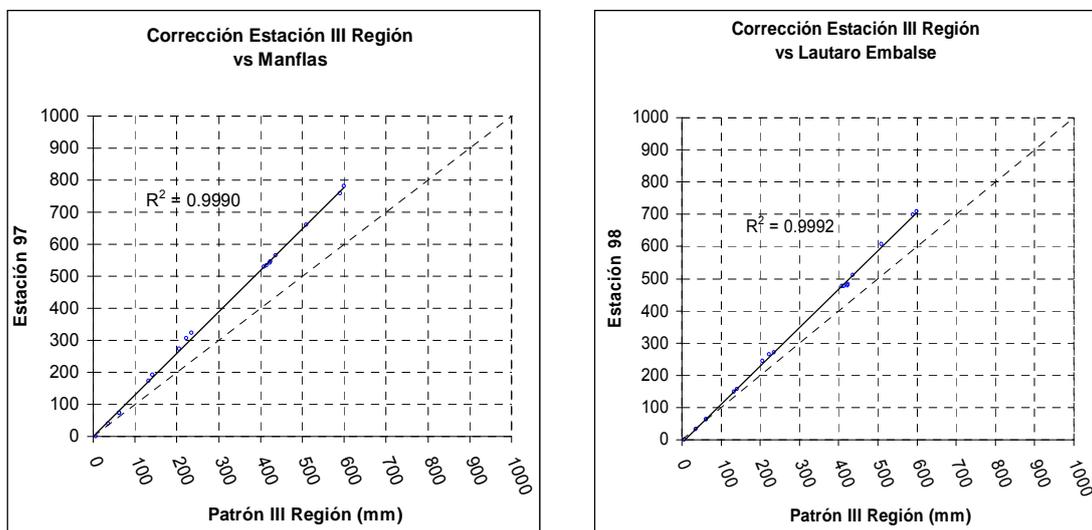


Figura 2.3. Curvas doble masa acumulada cuencas en estudio.

Tabla 2.3. Estaciones disponibles en la zona de estudio y precipitación media.

Nº	BNA	Nombre Estación	UTM Este	UTM Norte	Altitud msnm	Pp mm
92	02943001-2	Tal tal	350.886	7.189.130	9	11
67	02105014-8	Cupo	570.641	7.554.915	3.600	70
93	03210001-5	Las Vegas	433.668	7.048.423	2.115	35
94	03340001-2	Caldera	364.472	7.005.403	10	20
95	03404002-8	Jorquera en la Guardia	426.140	6.920.990	1.800	47
96	03414002-2	Iglesia Colorada	414.913	6.883.987	1.950	53
97	03421004-7	Manflas	403.428	6.887.592	1.410	46
98	03430006-2	Lautaro Embalse	401.640	6.906.043	1.110	36
99	03430007-0	Los Loros	391.670	6.920.731	950	38
100	03431004-1	Elibor Campamento	380.052	6.933.547	745	27
101	03441001-1	Pastos Grandes	445.477	7.002.327	2.000	31
102	03450004-5	Copiapó	368.152	6.970.357	370	18
103	03604001-7	El Totoral	308.035	6.914.149	150	33
104	03701001-4	Canto de Agua	311.782	6.884.651	250	31

Gradiente de Precipitación: Según los valores medios anuales de cada estación realizó el análisis del comportamiento espacial de la precipitación. En la figura 2.5 se muestra al aumento del gradiente con la altura. Se observan dos grupos con similar tendencia en el gradiente de precipitación. El primer gradiente de precipitación está determinado por las estaciones de menor altura, esto se debe a que el comportamiento en la costa presenta una tendencia distinta a las estaciones que se ubican más al centro.

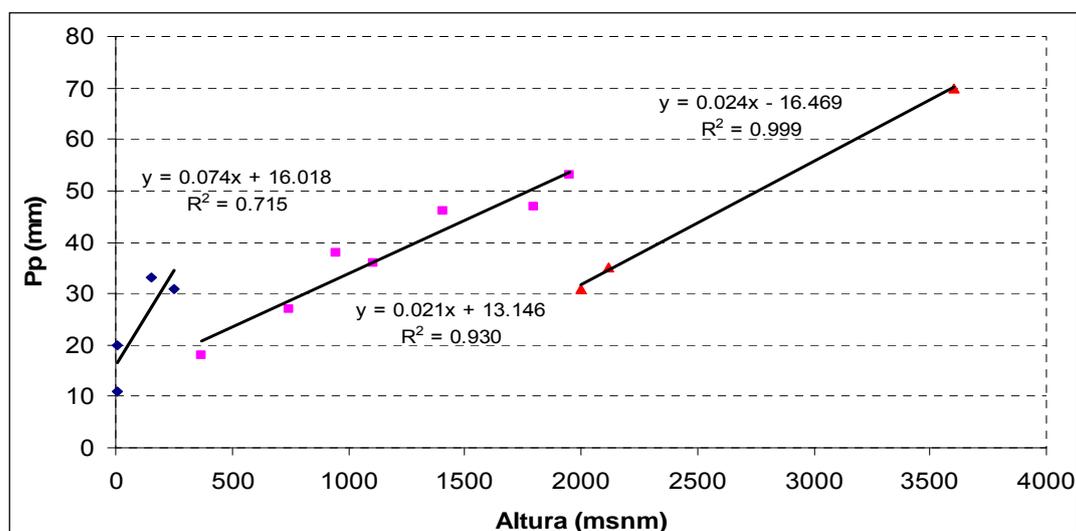


Figura 2.5. Gradiente de precipitación entre límite II Región y cuenca del Copiapó.

De la figura 2.5 se puede concluir que el comportamiento de la precipitación queda agrupado principalmente en dos tendencias. El primer grupo se observa que entre 0 y 200 msnm la precipitación aumenta 74 mm cada 100 m, dado la influencia que ejerce la costa. El segundo grupo se ubica entre 200 y 2.000 msnm y aumentan 21 mm cada 100 m. Las estaciones ubicadas más al interior no coinciden con la tendencia de las estaciones ubicadas al centro, sin embargo entre ellas se observa un gradiente de 24 mm cada 100 m.

Una vez que se realiza el análisis del gradiente de precipitación en la zona se procede a dibujar el mapa de isoyetas en la zona. En la figura 2.6 se presenta el mapa que se obtiene principalmente obedeciendo a los gradientes más cercanos, ya que no se cuenta con ninguna estación ubicada al interior de la zona de estudio.

Una vez que se conoce el comportamiento del gradiente de precipitaciones en la zona se procede con el trazado de las isoyetas. El trazado preliminar se obtiene mediante el uso del software SURFER 8.0 con el método de interpolación de Kriging, y posteriormente se corrige con la base topográfica generando un mapa que concuerde con el efecto orográfico y los valores registrados por todas las estaciones.

Una vez obtenido el trazado de las isoyetas en la zona se estimó la precipitación media anual en total las cuencas trazadas por la DGA en la zona de estudio. La manera de obtener la precipitación fue cuantificar el área que describen las isoyetas más cercanas en la cuenca y obtener un promedio ponderado según el área de influencia en la zona, esta metodología se considera más correcta que la metodología de los polígonos de Thiessen, ya que al trazar los polígonos de Thiessen el gradiente de precipitación no se considera para la obtención de la precipitación media espacial en la zona de estudio. En la tabla 2.4 se muestran los resultados obtenidos para cada cuenca.

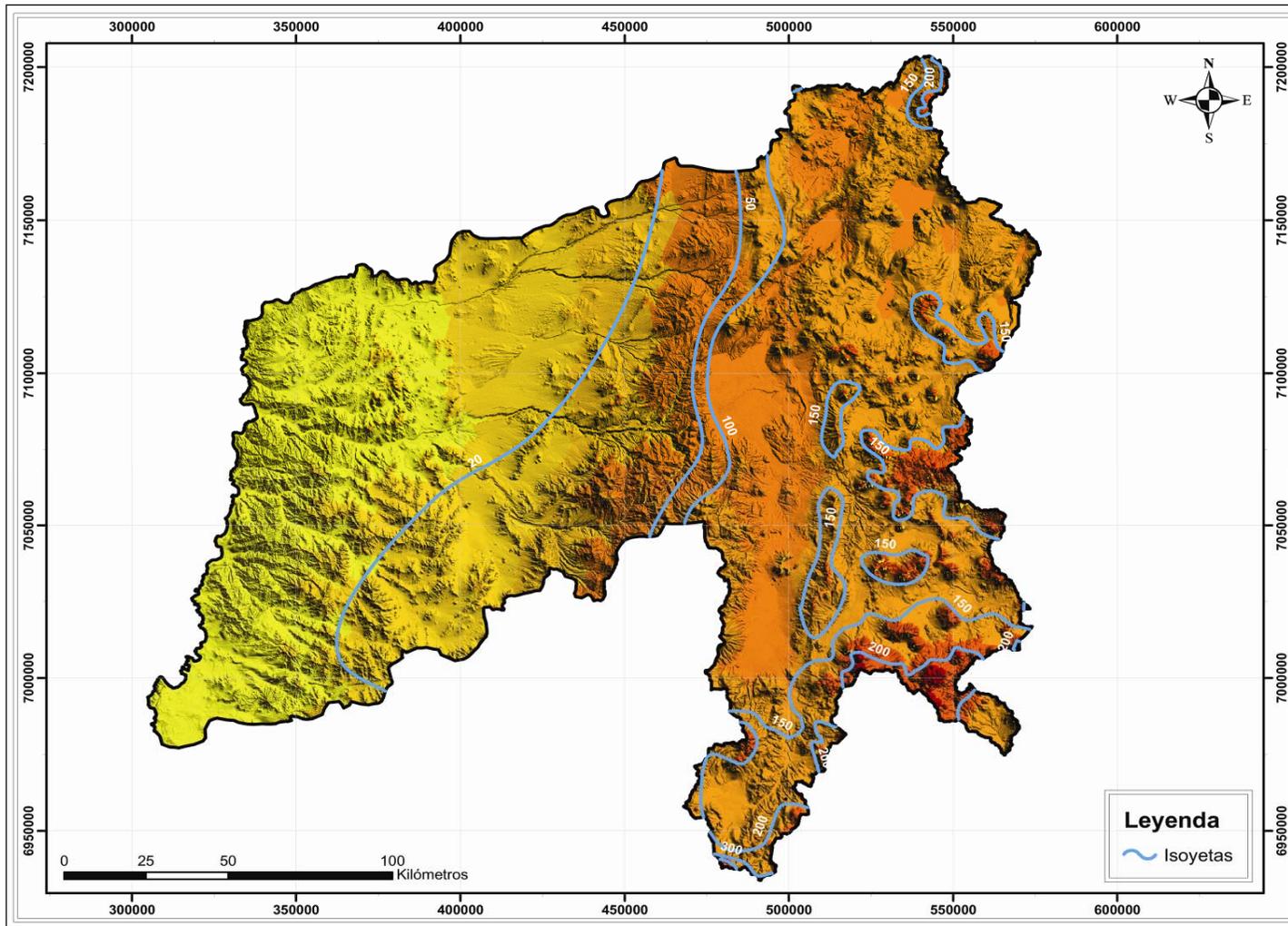


Figura 2.6. Mapa de isoyetas zona de estudio.

Tabla 2.4. Precipitación media anual en cada cuenca en zona de estudio.

Nombre cuencas	Pp_{MediaAnual} (mm)
Quebrada Pan de Azúcar	20
Río Salado	20
Quebrada Peralillo	10
Quebrada Animas Viejas	10
Quebrada Flamenco	10
Cerro del Obispo	10
Quebrada del Morado	10
Caldera	10
Salar de Gorbea	135
Salar de Azufrera	135
Salar de Agua Amarga	135
Quebrada La Rosa	125
Cerro Blanco	125
Cerro El Encanche	125
Salar de La Isla	125
Salar de Aguilar	125
Salar de Los Infieles	125
Salar de Las Parinas	130
Salar Grande	130
Quebrada Los Maranceles	125
Cerro Agua de Morales	130
La Laguna	133
Salar de Piedra Parada	125
Laguna de Las Parinas	130
Lagunas Bravas	130
Laguna del Jilguero	130
Salar de Wheelwright	130
Laguna Verde	150
Piedra Pómez	150
Salar de Maricunga	160
Laguna del Negro Francisco	150

3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El siguiente capítulo presenta una caracterización general de las propiedades hidrogeológicas de las cuencas ubicadas entre el límite sur de la II Región y la cuenca del río Copiapó. La caracterización hidrogeológica se realizó en base a la información geológica, extractada del mapa geológico de Chile, escala 1:1.000.000 (Sernageomin, 2002). Los principales estudios se señalan a continuación:

- Aguirre, I. y Venegas, M. (2005). Hidrogeología de la cuenca Salar de Pedernales, Región de Atacama (Escala 1:100.000). Carta Geológica de Chile, Serie Hidrogeología, N° 3. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Castro Bravo, S. (1982). Estudio geológico e hidrogeológico del sector norte del Salar de Pedernales y de las áreas Cerro Doña Inés, Salar de los Infieles y Llano de las Vicuñas, III Región Atacama. Memoria de Título, Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.
- Iriarte, S.; Ugalde, I. y Venegas, M. (1998). Hidrogeología de la Cuenca Laguna del Negro Francisco, Región de Atacama (Escala 1:100.000). Documentos de Trabajo, N° 10. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Iriarte, S. (1999). Mapa Hidrogeológico de la Cuenca Salar de Maricunga: Sector Salar de Maricunga, Región de Atacama (Escala 1:100.000). Documentos de Trabajo, N° 13. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Montti Cabrera, S. (1973). Estudio hidrogeológico de la Cuenca del río Salado en la provincia de Atacama. Memoria de Título, Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.
- Santibáñez I. y Venegas M. (2006). Mapa Hidrogeológico de la Cuenca Campo de Piedra Pómez-Laguna Verde, Región de Atacama (Escala 1:100000). Carta Geológica de Chile, Serie Hidrogeología, N° 4. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (2002). Mapa Geológico de Chile (Escala 1:1.000.000).
- Suazo Córdova, H. (2000). Modelación hidrogeológica preliminar del área de Pampa Pantanillo, Altiplano III Región. Memoria de Título, Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.
- Venegas, M., Iriarte, S. y Aguirre, I. (2000). Mapa Hidrogeológico de la Cuenca Salar de Maricunga: Sector Ciénaga Redonda, Región de Atacama (Escala 1:100.000). Documentos de Trabajo, N° 18. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- CPH Consultores (2004), Estudio de Modelación Hidrogeológica-Cuenca del Salar de Pedernales.

Es importante enfatizar que la caracterización presentada corresponde a una estimación preliminar de los recursos, desarrollada a partir de metodologías simplificadas. En este contexto, sus resultados deben considerarse como una primera aproximación de la situación de los recursos hídricos subterráneos.

3.1 Marco fisiográfico

La siguiente caracterización fisiográfica de la zona de estudio se basó principalmente en el trabajo de Castro (1982), quien señala la existencia de 5 grandes unidades fisiográficas orientadas aproximadamente en dirección norte-sur. Estas unidades son el resultado de procesos tectónicos, erosión y sedimentación conjugados con ciclos de actividad volcánica e intrusiva.

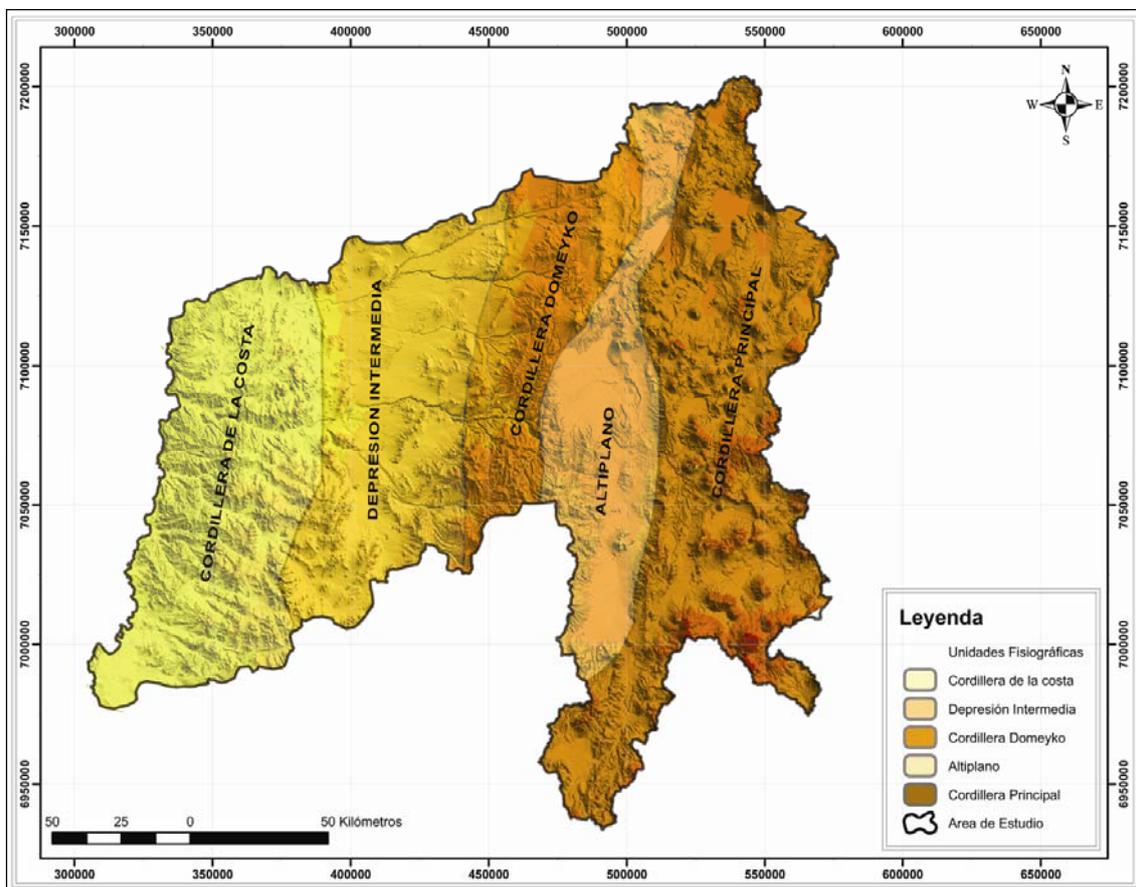


Figura 3.1. Unidades fisiográficas.

Desde el Océano Pacífico hacia el este las unidades son:

Cordillera de la Costa: Constituida por un cordón montañoso orientado en dirección norte-sur con elevaciones de hasta 1.200 msnm y cuyas rocas son esencialmente pre-Terciarias, en general impermeables. Esta barrera, que se mantiene probablemente desde el Terciario Superior, es interrumpida por la quebrada Pan de Azúcar, el río Salado, y otras quebradas menores en el área de estudio.

Depresión Intermedia: En general corresponde a un plano inclinado hacia el oeste, que se ubica entre el borde oriental de la Cordillera de la Costa y el borde occidental de la Cordillera de Domeyko. En su extremo occidental alcanza alturas de alrededor de 800 msnm y en su extremo oriental alcanza los 2.500 msnm. No constituye una depresión regular, sino que corresponde a subcuencas separadas unas de otras por cadenas transversales, y a veces longitudinales, de macizos pre-Terciarios, que normalmente quedan ocultos por rellenos Cenozoicos, o bien, afloran en forma de cerros isla.

Cordillera de Domeyko: Corresponde a un cordón montañoso orientado en dirección NNE-SSW, que en el área de estudio alcanza alturas de alrededor de 5.000 m.s.n.m. En el extremo norte de la zona de interés dominan las volcánicas Cenozoicas, mientras que hacia el sur dominan rocas pre-Terciarias. La presencia de esta Cordillera ha cerrado el paso del agua proveniente desde el este, posibilitando el desarrollo de cuencas hidrológicamente cerradas.

Altiplano: Corresponde a una zona de sedimentación irregular cerrada al oeste por la Cordillera de Domeyko y al este por la Cordillera Principal. Está compuesta por cuencas interiores con desarrollo de salares y otras con drenaje imperfecto, que se encuentran separadas por cadenas transversales que a menudo corresponden a volcánicas Terciarias. El Altiplano alcanza elevaciones máximas de alrededor de 4.200 msnm.

Cordillera Principal: Corresponde a una cadena montañosa con altitudes máximas sobre los 6.000 msnm. En esta unidad ocurren una gran cantidad de conos volcánicos que han provisto a las depresiones altiplánicas ubicadas al oeste de la misma, de relleno volcánico-sedimentario muy reciente.

3.2 Marco geológico

La Cordillera de la Costa está constituida principalmente por rocas Paleozoicas y Mesozoicas, esencialmente impermeables.

La Depresión Intermedia posee, a grandes rasgos, una suave pendiente hacia el oeste y constituye un graben bien desarrollado, a veces interrumpido por cordones transversales y longitudinales, donde se ubican las terrazas continentales de gravas del Terciario Superior (Gravas de Atacama), con intercalación de episodios ignimbríticos (Mortimer, 1973).

Hacia el oriente el relieve se torna abrupto y se eleva para constituir la Cordillera de Domeyko. Según Chong (1973) se trata de un horst de zócalo en compresión de núcleo granítico Paleozoico y un revestimiento Triásico-Jurásico, de comportamiento prácticamente impermeable.

En la zona oriental de la Cordillera de Domeyko y hacia el este, en los dominios de los terrenos altiplánicos, se encuentran los volcanes y sus depósitos asociados del Mioceno y Plioceno, que cubren a las rocas más antiguas.

Las rocas presentes en la Cordillera Principal, corresponden al volcanismo más reciente y poseen edades Plio-cuaternarias. Este volcanismo ha cerrado cuencas antes abiertas hacia el Océano Pacífico, posibilitando la existencia de las cuencas altiplánicas, que dependiendo de cuán cerradas en términos hidrogeológicos determinan el desarrollo de salares, típicos del Norte Grande chileno (Henríquez y Montti, 1976).

3.2.1 Unidades de rocas

La zona de estudio se encuentra constituida principalmente por rocas estratificadas e intrusivas que van desde el Paleozoico hasta el Cenozoico, concentrándose principalmente en el Mesozoico (zona costera) y el Cenozoico (zona cordillerana). La figura 3.2 presenta un extracto del mapa Geológico de Chile, escala 1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2002), de la zona de interés.

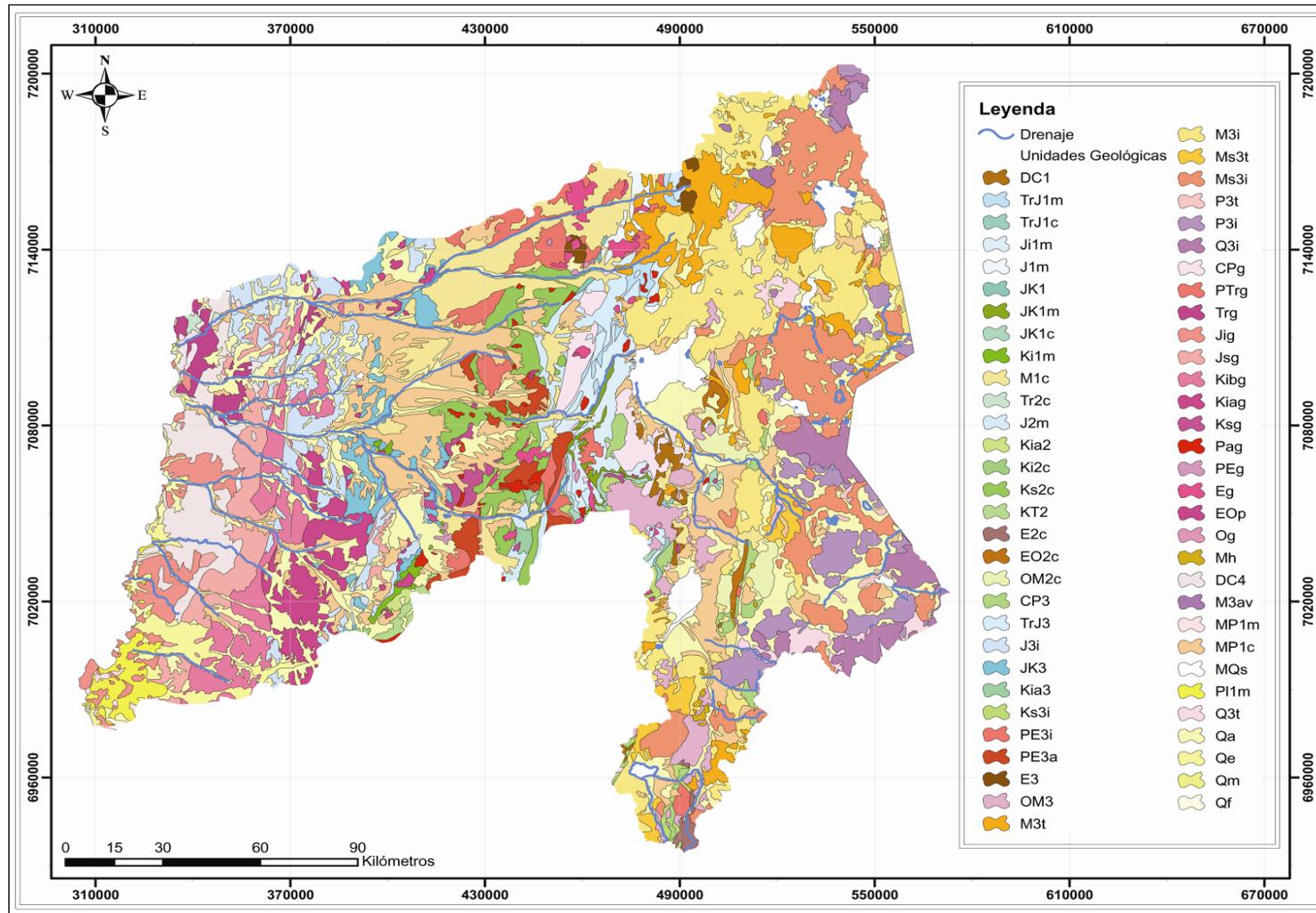


Figura 3.2. Mapa geológico de la zona de estudio.

A continuación se presentan las secuencias existentes en el área de interés, divididas en secuencias sedimentarias, volcanosedimentarias, volcánicas, intrusivas y metamórficas.

Secuencias Sedimentarias

- *DC1 Secuencias sedimentarias marinas, en parte transicionales (Devónico – Carbonífero):* areniscas cuarzo-feldespáticas, lutitas micáceas, conglomerados.
- *TrJ1m Secuencias sedimentarias marinas litorales y transicionales (Triásico – Jurásico Inferior):* areniscas cuarcíferas, ortoconglomerados, calizas fosilíferas, lutitas y limolitas calcáreas con intercalaciones volcánicas subordinadas.
- *TrJ1c Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres (Triásico – Jurásico Inferior):* conglomerados, areniscas cuarcíferas y feldespáticas y lutitas carbonosas con intercalación de tobas riolíticas y lavas basálticas.
- *Ji1m Secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma (Jurásico Inferior – Medio):* calizas, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas; basaltos almohadillados.
- *J1m Secuencias sedimentarias marinas carbonatadas y clásticas (Jurásico – Cretácico Inferior):* calizas, lutitas, areniscas calcáreas, para-conglomerados, niveles de yeso e intercalaciones volcánicas subordinadas.
- *JK1 Secuencias sedimentarias transicionales (Jurásico Superior – Cretácico Inferior):* areniscas, lutitas, calizas, conglomerados.
- *JK1m Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales (Jurásico Superior – Cretácico Inferior):* calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas.
- *JK1c Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y eólicas, en parte transicionales (Jurásico Superior – Cretácico Inferior):* areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados rojos.
- *Ki1m Secuencias sedimentarias marinas litorales (Cretácico Inferior):* calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas.
- *Ks1c Pórfidos andesíticos-dioríticos, dacíticos y riolíticos (Cretácico Superior).*
- *M1c Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales (Mioceno Inferior – Medio):* gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas.

Secuencias Volcanosedimentarias

- *Tr2c Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales (Triásico Medio – Superior):* rocas epiclásticas fosilíferas, calizas estromatolíticas, lavas, brechas y tobas andesíticas a riolíticas.
- *J2m Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas (Jurásico):* lavas y brechas, andesíticas y basálticas, calizas y areniscas marinas fosilíferas.

- *Kia2 Secuencias sedimentarias y volcánicas (Cretácico Inferior alto – Cretácico Superior bajo)*: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas.
- *Ki2c Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas (Cretácico Inferior – Cretácico Superior)*: brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoítas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fósil; localmente calizas fosilíferas marinas en la base.
- *Ks2c Secuencias sedimentarias continentales aluviales y lacustres (Cretácico Superior)*: conglomerados, brechas, areniscas y limolitas rojas con intercalación de tobas riolíticas y lavas andesíticas.
- *KT2 Secuencias volcanosedimentarias (Cretácico Superior – Terciario Inferior)*: areniscas, paraconglomerados, lavas andesíticas y dacíticas, intercalaciones de ignimbritas, limolitas y calizas.
- *E2c Secuencias volcanosedimentarias (Eoceno)*: brechas sedimentarias y volcánicas, areniscas e intercalaciones de tobas.
- *EO2c Secuencias volcanosedimentarias (Eoceno – Oligoceno)*: brechas volcanoclásticas, tobas cineríticas y areniscas tufáceas, intercalaciones evaporíticas (yeso), limolitas y calizas lacustres.
- *OM2c Secuencias volcanosedimentarias (Oligoceno – Mioceno)*: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.

Secuencias Volcánicas

- *CP3 Secuencias volcánicas continentales (Carbonífero – Pérmico)*: lavas, domos, tobas y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas. Incluye cuerpos hipabisales riolíticos.
- *TRJ3 Secuencias volcánicas continentales y transicionales (Triásico – Jurásico Inferior)*: lavas, domos, brechas, basálticos a riolíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados.
- *J3i Secuencias volcánicas continentales y marinas (Jurásico)*: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.
- *JK3 Secuencias volcánicas (Jurásico Superior – Cretácico Inferior)*: lavas basálticas a riolíticas, domos, brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marinas.
- *Kia3 Secuencias y complejos volcánicos continentales (Cretácico Inferior alto)*: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias.
- *Ks3i Secuencias volcanosedimentarias continentales (Cretácico Superior)*: rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas.
- *PE3i Secuencias y complejos volcánicos continentales (Paleoceno – Eoceno Inferior)*: lavas y domos, andesítico-basálticos a dacíticos, con intercalaciones de rocas piroclásticas y epiclásticas.

- *PE3a Secuencias y complejos volcánicos continentales ácidos (Paleoceno – Eoceno Inferior):* domos y rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas asociados a calderas de colapso.
- *E3 Secuencias y centros volcánicos continentales (Eoceno):* lavas y brechas basálticas a andesíticas con intercalaciones de rocas piroclásticas y domos riolíticos.
- *OM3 Secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos (Oligoceno – Mioceno):* lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesíticos a riolíticos.
- *M3t Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso (Mioceno Inferior – Medio).*
- *M3i Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas (Mioceno Inferior – Medio):* lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas.
- *Ms3t Ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos piroclásticos asociados a estratovolcanes (Mioceno Superior).*
- *Ms3i Centros y secuencias volcánicas (Mioceno Superior):* lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.
- *P3t Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados (Plioceno).*
- *P3i Centros volcánicos (Plioceno):* lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesítico-basálticas.
- *Q3i Estratovolcanes y complejos volcánicos (Cuaternario):* lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos.

Rocas Intrusivas

- *CPg Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de moscovita (Carbonífero – Pérmico).*
- *PTrg Granitos hololeucocráticos, pórfidos graníticos y granodioritas de biotita (Pérmico – Triásico).*
- *Trg Granitos leucocráticos, monzo y sienogranitos de biotita y muscovita, granodioritas y dioritas de biotita y hornblenda, pórfidos hipabisales (Triásico).*
- *Jig Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita (Jurásico Inferior).*
- *Jsg Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda (Jurásico Medio – Superior).*
- *Kibg Monzodioritas y dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodioritas y tonalitas (Cretácico Inferior bajo).*

- *Kiag Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita (Cretácico Inferior alto – Cretácico Superior bajo).*
- *Ksg Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda; pórfidos andesíticos y dioríticos (Cretácico Superior).*
- *Pag Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y granitos de hornblenda y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos, asociados a mineralización tipo pórfido cuprífero y chimeneas de brechas (Paleoceno).*
- *PEg Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita, dioritas, gabros y pórfidos riolíticos y dacíticos, asociados a mineralización de Cu-Au (Paleoceno – Eoceno).*
- *Eg Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos (Eoceno).*
- *EOp Pórfidos granodioríticos, monzoníticos, dioríticos, dacíticos y riolíticos de biotita y hornblenda, portadores de mineralización de tipo 'Pórfido cuprífero gigante' (Eoceno – Oligoceno).*
- *Og Granodioritas, monzogranitos, tonalitas, dioritas de hornblenda y biotita; gabros (Oligoceno).*
- *Mh Pórfidos dacíticos, andesíticos, monzodioritas y dioritas de hornblenda, piroxeno y biotita (Mioceno).*

Rocas Metamórficas

- *DC4 Metaareniscas, filitas, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange' (Devónico – Carbonífero).*

3.2.2 Depósitos no consolidados

Corresponden a unidades de baja compacidad depositadas entre el Mioceno Inferior y el Holoceno.

- *M3av Depósitos de avalancha volcánica asociados a colapso parcial de estratovolcanes (Mioceno Inferior – Medio): depósitos de remoción en masa gravitacionales.*
- *MP1m Secuencias sedimentarias marinas transgresivas (Mioceno Superior – Plioceno): areniscas, limolitas, coquinas, conglomerados, calizas y fangolitas.*
- *MP1c Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales (Mioceno Superior – Plioceno): conglomerados, areniscas y limolitas.*
- *MQs Depósitos evaporíticos (Mioceno – Cuaternario): sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.*

- *Pl1m Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas (Pleistoceno):* coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos.
- *Q3t Depósitos de flujo piroclástico, localmente soldados (Cuaternario).*
- *Qa Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres (Pleistoceno – Holoceno):* gravas, arenas y limos.
- *Qe Depósitos eólicos (Pleistoceno – Holoceno):* arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes tanto activos como inactivos.
- *Qm Depósitos litorales (Pleistoceno – Holoceno):* arenas y gravas de playas actuales.
- *Qf Depósitos fluviales (Pleistoceno – Holoceno):* gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.

3.3 Unidades hidrogeológicas

Las unidades y formaciones hidrogeológicas corresponden 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.

De esta manera se definieron cuatro unidades hidrogeológicas en base a la delimitación de secuencias geológicas del mapa geológico de Chile y a la permeabilidad, capacidad de almacenamiento y calidad de las aguas asociada a cada una de estas. Las unidades hidrogeológicas se dividieron en principio según se ubicaran en zonas de rellenos sedimentarios no consolidados o en rocas.

Para los acuíferos ubicados en rellenos sedimentarios no consolidados se definieron dos 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, es posible encontrar (dependiendo del grado de fracturamiento y de consolidación de las rocas) diferentes características hidrogeológicas para una misma unidad, pero en este estudio el potencial de cada unidad se asigna según el comportamiento general del área de estudio. Las unidades hidrogeológicas definidas se presentan en la figura 3.3.

3.3.1 Unidades hidrogeológicas en rellenos sedimentarios no consolidados

Unidad con alta importancia hidrogeológica: Se presenta principalmente en los depósitos aluviales del Neógeno y el Cuaternario. Se debe destacar que a pesar de estar agrupadas dentro de la misma unidad hidrogeológica, los depósitos aluviales de las cuencas exorreicas presentan un potencial menor a las cuencas endorreicas del altiplano, debido a que cuentan con una menor recarga.

Los depósitos aluviales actuales (Cuaternarios) corresponden a gravas y arenas (regularmente seleccionadas, de variada composición y de una esfericidad y redondeamiento moderados) soportadas por una matriz de arena fina a limo. Los depósitos aluviales del Neógeno corresponden a gravas, arenas y limos moderadamente consolidados, mal seleccionados y e variada composición, con mal redondeamiento y esfericidad, asociados a sistemas de drenaje y abanicos antiguos.

En esta unidad se agrupan unidades sedimentarias marinas del Cenozoico reciente y depósitos eólicos del Cuaternario, y aunque existe poca información, dada su descripción geológica se estima poseen buenas características de almacenamiento y transmisividad de agua, aunque es necesario realizar estudios más detallados para conocer sus potencias y fuentes de recarga, además del riesgo de presentar intrusión salina.

Las unidades geológicas asociadas a esta unidad hidrogeológica son las secuencias sedimentarias marinas transgresivas del Mioceno Superior al Plioceno (*MP1m*), las secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales del Mioceno Superior al Plioceno (*MP1c*), las secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas del Pleistoceno (*PI1m*), los depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres del Pleistoceno al Holoceno (*Qa*), los depósitos eólicos del Pleistoceno al Holoceno (*Qe*), los depósitos litorales del Pleistoceno al Holoceno (*Qm*), y los depósitos fluviales del Pleistoceno al Holoceno (*Qf*).

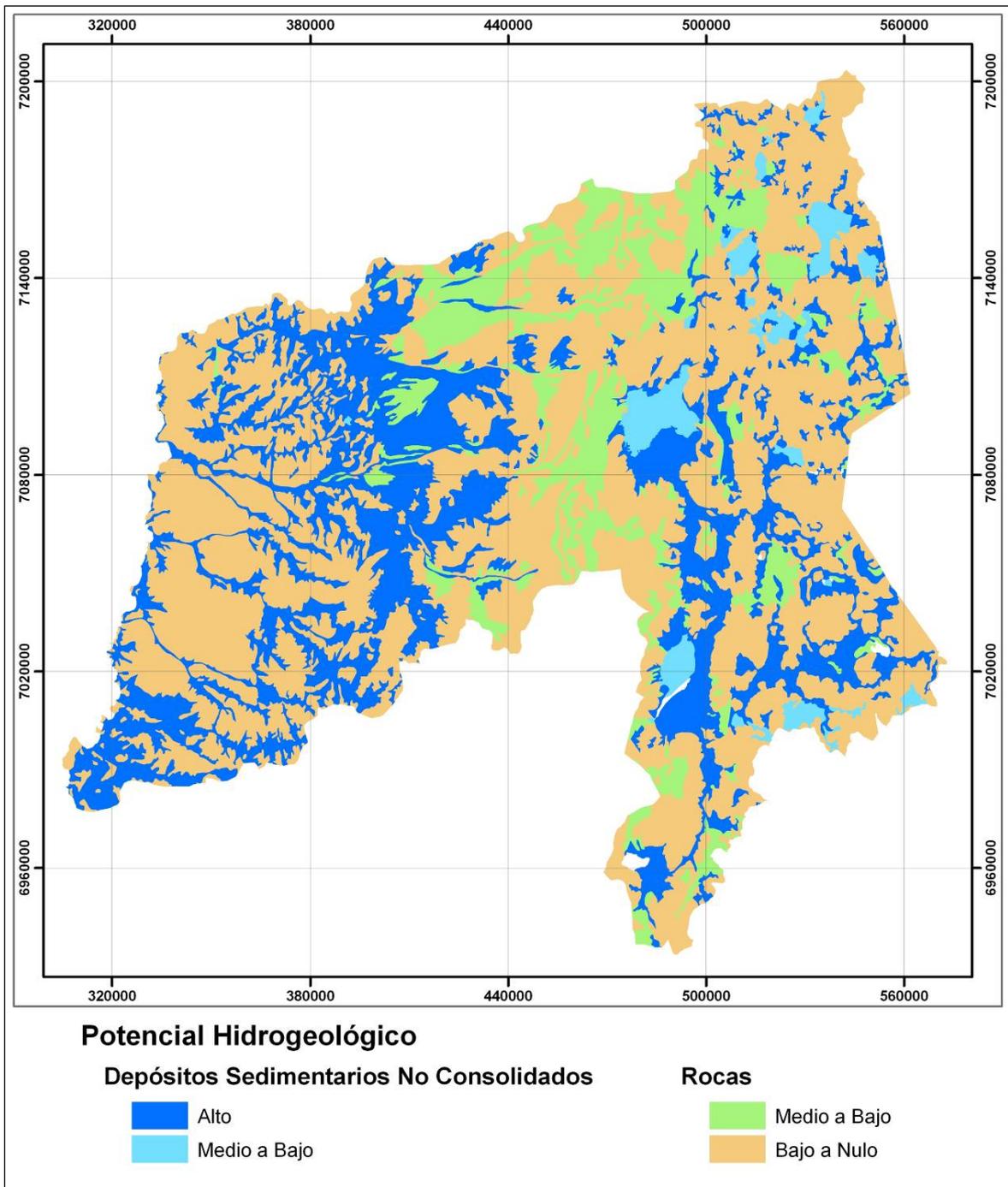


Figura 3.3. Unidades hidrogeológicas definidas para el área de estudio.

Unidad con importancia hidrogeológica media a baja: Dentro de esta unidad se ubican los depósitos de remoción en masa del Terciario a Cuaternario, los cuales poseen una reducida potencia y una capacidad media de almacenar y transmitir agua debido a su heterogeneidad litológica y granulométrica; los depósitos de flujo piroclástico del Cuaternario, que poseen potencias reducidas y una moderada transmisividad y capacidad para almacenar debido a la presencia de ceniza fina; y los depósitos evaporíticos, que en general presentan pequeñas potencias y gran salinidad del agua.

Las unidades geológicas asociadas a esta unidad hidrogeológica son los depósitos evaporíticos del Mioceno al Cuaternario (*MQs*), y los depósitos de flujo piroclástico localmente soldados del Cuaternario (*Q3t*).

3.3.2 Unidades hidrogeológicas en roca

Unidad con importancia hidrogeológica media a baja: Las unidades geológicas asignadas a esta unidad hidrogeológica agrupan principalmente rocas sedimentarias del Mesozoico además de unidades volcánicas y sedimentarias del Mioceno. Corresponde a porciones de roca, meteorizadas y/o fracturadas que almacenan agua en distintas proporciones.

Las unidades geológicas asociadas a esta unidad hidrogeológica son las secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres del Triásico al Jurásico Inferior (*TrJ1c*), las secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma del Jurásico al Cretácico Inferior (*Ji1m*, *JK1m*), las secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y eólicas, en parte transicionales del Jurásico Superior al Cretácico Inferior (*JK1c*), las secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales del Mioceno Inferior a Medio (*M1c*), las secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso del Mioceno Inferior a Medio (*M3t*), los depósitos de avalancha volcánica asociados a colapso parcial de estratovolcanes del Mioceno Inferior a Medio (*M3av*), las ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos piroclásticos asociados a estratovolcanes del Mioceno Superior (*Ms3t*) y los depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados del Plioceno (*P3t*).

Unidad con importancia hidrogeológica nula a baja: Corresponden a rocas con un alto grado de consolidación y poca presencia de fracturas, por lo que poseen poca capacidad de almacenar y transmitir agua. Además, se agrupan en esta unidad hidrogeológica las unidades geológicas de las que no se tiene información suficiente para clasificarlas, las cuales se ubican principalmente en las cuencas exorreicas, que es la zona donde menos estudios hidrogeológicos se han realizado.

El que una unidad geológica esté clasificada dentro de esta unidad hidrogeológica no significa que en algunos lugares puntuales, producto de un mayor fracturamiento, pueda presentar mayores potenciales hidrogeológicos en algunas zonas puntuales.

Las unidades geológicas asociadas a esta unidad hidrogeológica son secuencias sedimentarias marinas, en parte transicionales del Devónico al Carbonífero (*DC1*), secuencias sedimentarias marinas Triásico al Cretácico (*TrJ1m*, *J1m*, *Ki1m*), secuencias sedimentarias transicionales del Jurásico Superior al Cretácico Inferior (*JK1*), pórfidos andesíticos-dioríticos, dacíticos y riolíticos del Cretácico Superior (*Ks1c*), secuencias sedimentarias y volcánicas continentales y marinas del Mesozoico (*Tr2c*, *J2m*, *Kia2*, *Ki2c*), secuencias sedimentarias continentales aluviales y lacustres del Cretácico Superior (*Ks2c*), secuencias volcanosedimentarias del Cretácico Superior al Mioceno (*KT2*, *E2c*, *EO2c*, *OM2c*), secuencias volcánicas continentales, marinas o transicionales del Carbonífero – Pérmico, Mesozoico y Paleógeno (*CP3*, *TRJ3*, *J3i*, *JK3*, *Kia3*, *Ks3i*, *PE3i*, *PE3a*, *E3*), secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos del Oligoceno al Mioceno (*OM3*), complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas del Mioceno Inferior a Medio (*M3i*), centros y secuencias volcánicas del Mioceno Superior (*Ms3i*), centros volcánicos del Plioceno (*P3i*), estratovolcanes y complejos volcánicos del Cuaternario (*Q3i*), rocas intrusivas (*CPg*, *PTrg*, *Trg*, *Jig*, *Jsg*, *Kibg*, *Kiag*, *Ksg*, *Pag*, *PEg*, *Eg*, *EOp*, *Og*, *Mh*), y rocas metamórficas del Devónico – Carbonífero (*DC4*).

3.4 Recarga

La recarga de los acuíferos en la zona de estudio se produce principalmente por los aportes de la precipitación la cual varía su magnitud dependiendo si la cuenca es costera, intermedia o altiplánica.

A continuación se realiza 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:

$$R_L = Pp \cdot C_E \cdot C_I \cdot A_{RL}$$

Donde, Pp es la precipitación media de la cuenca, C_E es un coeficiente de escorrentía, C_I es un coeficiente de infiltración que depende del grado de permeabilidad y consolidación de la unidad hidrogeológica analizada y A_{RL} corresponde a la 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, A_{RD} :

$$R_D = Pp \cdot C_I \cdot A_{RD}$$

3.4.1 Caracterización de sectores

Para los sectores de Quebrada Pan de Azúcar y el río Salado, la recarga ocurre principalmente en la cordillera de Domeyko, donde el agua es captada por rocas parcialmente consolidadas las cuales pueden presentar potenciales hidrogeológicos moderados dependiendo de su grado de fracturamiento.

En la zona de la Depresión Intermedia se encuentran rellenos de material aluvial del Mioceno Superior y actuales, los cuales cubren todo el ancho de la cuenca. La presencia de abundante material arcilloso en la matriz de estos rellenos les confiere en general una baja permeabilidad, a excepción de estratos en que, por efecto de aguas residuales o por precipitaciones, poseen un material seleccionado, de mayor permeabilidad.

En la zona de la Cordillera de la Costa se producen afloramientos de rocas volcánicas del Mesozoico e intrusivas del Mesozoico – Paleozoico, las cuales constituyen una barrera impermeable que es cortada por quebradas que son rellenadas por material aluvial del Mioceno Superior y el Cuaternario. Dichos rellenos de material aluvial, producto del angostamiento producido por la presencia de rocas impermeables posee una mejor selección en sus materiales, por lo que presenta un mayor potencial hidrogeológico que los rellenos de la Depresión Intermedia.

La recarga del sector de Pan de Azúcar es 1513728 metros cúbicos por año, y para el sector de río Salado es de 3468960 metros cúbicos por año.

En las cuencas costeras de la zona de estudio, la recarga se produce en la Cordillera de la Costa, donde es recolectada por rocas del Mesozoico – Paleozoico, que presentan una baja capacidad de conducción y almacenamiento de aguas subterráneas asociada a su fracturamiento superficial. Dicha recarga es conducida a rellenos aluviales actuales (Cuaternarios) asociados a quebradas, por lo que presentan poco desarrollo areal.

La recarga para estos sectores es:

- Quebrada Peralillo, 157680 metros cúbicos por año.
- Quebrada Animas Viejas, 63072 metros cúbicos por año.
- Quebrada Flamenco, 126144 metros cúbicos por año.
- Cerro del Obispo, 31536 metros cúbicos por año.
- Quebrada Del Morado, 126144 metros cúbicos por año.
- Caldera, 504576 metros cúbicos por año.

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 bajas.

La recarga para estas cuencas son:

- Salar de Gorbea, 3658176 metros cúbicos por año.
- Salar de Azufrera, 2554416 metros cúbicos por año.
- Salar de Agua Amarga, 4005072 metros cúbicos por año.
- Quebrada La Rosa, 883008 metros cúbicos por año.
- Cerro Blanco, 2869776 metros cúbicos por año.
- Cerro El Encanche, 1072224 metros cúbicos por año.
- Salar de La Isla, 8798544 metros cúbicos por año.
- Salar de Aguilar, 6401808 metros cúbicos por año.
- Salar de Los Infieles, 2144448 metros cúbicos por año.
- Salar de Las Parinas, 7600176 metros cúbicos por año.
- Salar Grande, 7158672 metros cúbicos por año.
- Quebrada Los Maranceles, 662256 metros cúbicos por año.
- Cerro Agua de Morales, 662256 metros cúbicos por año.
- La Laguna, 2869776 metros cúbicos por año.
- Salar de Piedra Parada, 3595104 metros cúbicos por año.
- Laguna de Las Parinas, 883008 metros cúbicos por año.
- Lagunas Bravas, 3216672 metros cúbicos por año.
- Laguna del Jilguero, 946080 metros cúbicos por año.
- Salar de Wheelwright, 3122064 metros cúbicos por año.
- Laguna Verde, 11289888 metros cúbicos por año.
- Piedra Pómez, 7537104 metros cúbicos por año.
- Salar de Maricunga, 38158560 metros cúbicos por año.
- Laguna del Negro Francisco, 11037600 metros cúbicos por año.

En el caso de los sectores acuíferos Salar de Azufrera, Salar de Agua Amarga y Salar de Gorbea se efectuaron estudios por los petitionarios así como por la DGA con el fin de estimar los recursos hídricos subterráneos presentes en estas cuencas. Para aquella estimación no se contaba con la información y antecedentes hidrológicos e hidrogeológicos que se dispone ahora, lo que llevó a una delimitación distinta de cuencas y a otros cálculos de recarga para estos sectores acuíferos, estableciéndose un caudal de explotación no acorde con la realidad. Con la información recopilada y procesada para este estudio se logra un mejor y más completo conocimiento hidrológico e hidrogeológico de esta zona, por lo que se determina un nuevo valor de recarga distinto al señalado en los Informes Técnicos anteriores. En la tabla 3.1 se presentan los cálculos de recarga total por precipitación para cada cuenca.

Tabla 3.1. Recarga por cuenca.

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)
Queb. Pan de Azúcar	5886440000	4776440000	1110000000	20	0.03	0.06	0.00545256	0.04223744	0.04769	48
Río Salado	7528750000	4784750000	2744000000	20	0.03	0.06	0.005462	0.104414	0.109876	110
Quebrada Peralillo	739000000	483000000	256000000	10	0.03	0.06	0.0002756	0.00487	0.005146	5
Quebrada Animas Viejas	284460000	183486670	100973329	10	0.03	0.06	0.0001047	0.0019211	0.0020258	2
Quebrada Flamenco	2205920000	2081055459	124864540	10	0.03	0.06	0.00118782	0.002375	0.003563	4
Cerro del Obispo	122810000	50297251	72512748	10	0.03	0.06	0.0000287	0.00137	0.001408	1
Quebrada del Morado	1451330000	1283064924	168265075	10	0.03	0.06	0.0007323	0.0032	0.003933	4
Caldera	1759950000	954595043	805354956	10	0.03	0.06	0.00054486	0.0153225	0.015867	16
Salar de Gorbea	363811403	314105530	49705872	135	0.13	0.3	0.05244056	0.0638346	0.1162751	116
Salar de Azufrera	250170225	215377934	34792290	135	0.13	0.3	0.03595779	0.04468188	0.080639	81
Salar de Agua Amarga	461752973	417015800	44737172	135	0.13	0.3	0.06962164	0.0574535	0.1270752	127
Quebrada La Rosa	128895951	121394751	7501200	125	0.13	0.3	0.01876584	0.00891981	0.0276856	28
Cerro Blanco	379264228	348212543	31051685	125	0.13	0.3	0.0538285	0.03692409	0.090752	91
Cerro El Encanche	176331055	169806717	6524338	125	0.13	0.3	0.0262496	0.0077582	0.0340078	34
Salar de La Isla	736399107	576523458	159875648	125	0.13	0.3	0.08912201	0.19011088	0.2792329	279
Salar de Aguilar	590238383	482394754	107843629	125	0.13	0.3	0.07457111	0.1282387	0.202809	203
Salar de Los Infieles	304625270	284688042	19937227	125	0.13	0.3	0.0440085	0.0237077	0.0677162	68
Salar de Las Parinas	829678899	729477919	100200978	130	0.13	0.3	0.11727714	0.12391674	0.2411938	241
Salar Grande	781104342	686847105	94257237	130	0.13	0.3	0.1104234	0.1165662	0.2269897	227
Queb. Los Maranceles	107058251	103011289	4046961	125	0.13	0.3	0.015924	0.0048123	0.020736	21
Cerro Agua de Morales	89427004	82823443	6603560	130	0.13	0.3	0.01331541	0.0081665	0.02148192	21
La Laguna	456868397	442102988	14765408	133	0.13	0.3	0.07271652	0.0186815	0.091398	91
Salar de Piedra Parada	380575664	327092123	53483540	125	0.13	0.3	0.0505636	0.063598	0.1141618	114
Laguna de Las Parinas	95591130	84192916	11398213	130	0.13	0.3	0.01353558	0.01409596	0.02763155	28

Tabla 3.1 (continuación). Recarga por cuenca.

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)
Lagunas Bravas	408031501	374564518	33466982	130	0.13	0.3	0.06021823	0.04138801	0.101606	102
Laguna del Jilguero	112866240	102104891	10761349	130	0.13	0.3	0.01641527	0.01330837	0.0297236	30
Salar de Wheelwright	292265222	243637582	48627639	130	0.13	0.3	0.03916928	0.0601369	0.099306	99
Laguna Verde	1001738788	862776759	138962028	150	0.13	0.3	0.160047	0.19829057	0.35833762	358
Piedra Pómez	918736915	863396947	55339968	150	0.13	0.3	0.1601621	0.07896685	0.23912895	239
Salar de Maricunga	2194515505	1608614376	585901128	160	0.13	0.3	0.31829508	0.89178254	1.21007762	1210
Laguna del Negro Francisco	905325615	758595235	146730379	150	0.13	0.3	0.14072115	0.20937554	0.35009669	350

3.5 Salar de Pedernales

Para el sector del Salar de Pedernales se cuenta con información más detallada debido a los estudios hidrogeológicos realizados por consultoras para algunos peticionarios de la zona, los que fueron entregados a la DGA como antecedentes, permitiendo conocer más en profundidad la situación de los recursos hídricos presentes. Actualmente, CODELCO División El Salvador extrae aproximadamente 650 l/s del Tranque La Ola, producto de aguas que se captan de los cauces superficiales río La Ola y río Juncalito, los cuales tienen una escorrentía media anual aproximada de 478 l/s y 417 l/s respectivamente. Debido a las extracciones, después del sector del tranque (donde debido a la morfología de la cuenca, las importantes escorrentías que se generan desde las cabeceras de la cuenca por el sur, fluyen en dirección norte hasta este estrechamiento que se extiende entre el Llano Leoncito y La Ola) el único flujo que existe es el subterráneo, que asciende aproximadamente a 200 l/s (calculado a partir de la geometría acuífera interpretada de la prospección geofísica realizada con Transiente Electromagnético), esto implica que prácticamente todo el recurso proveniente del Sector Sur es utilizado para satisfacer la demanda de aguas superficiales cuyo acopio es el tranque, por lo tanto, los recursos disponibles serán solo los que se generan en el Sector Norte propiamente tal. Ahora, utilizando la metodología de los coeficientes de infiltración y escorrentía para calcular la recarga del Sector Norte, se tiene que esta es del orden de 13150512 m³/año. Los cálculos se muestran en la tabla 3.2, mientras que en la figura 3.4 se muestra la delimitación de los Sectores Norte y Sur del Salar de Pedernales y la ubicación del Tranque la Ola.

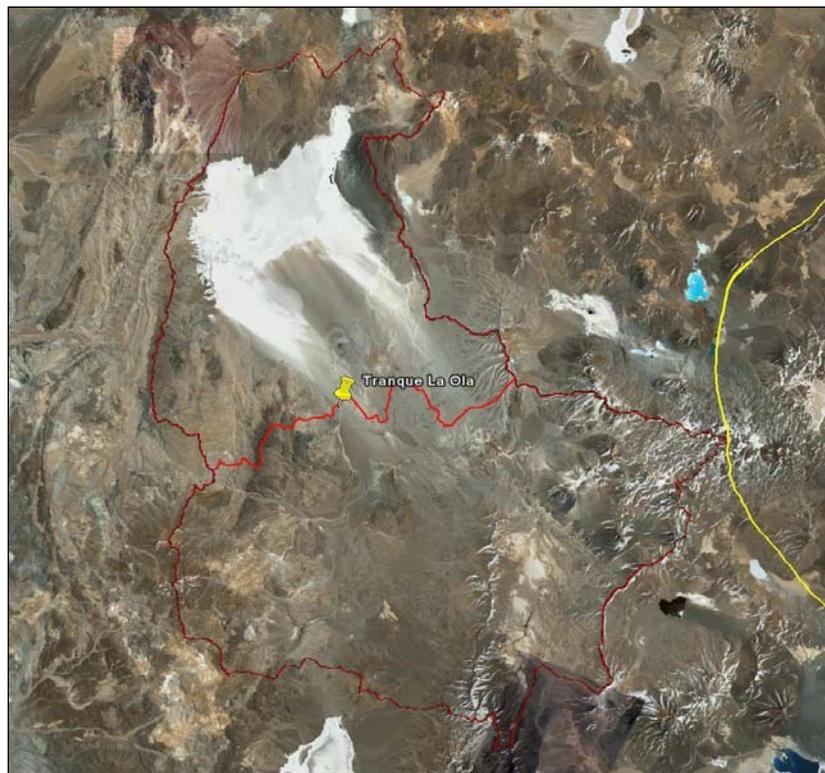


Figura 3.4. Delimitación Salar de Pedernales.

Tabla 3.2. Calculo de recarga Salar de Pedernales Sector Norte.

Banda de altura (msnm)	Unidad litológica	Tipo de recarga	Área (km ²)	PP. (mm)	Ce	Ci	Recarga (l/s)	Recarga (m ³ /año)
3282-3500	Dep. Sed. recientes	Directa	69.8	95		0.28	58.8	1854316.8
	Rocas intrusivas	Lateral	10.2		0.13	0.04	0.16	5045.76
	Dep. Sed. antiguos	Directa	225.5			0.2	135.8	4282588.8
	Rocas Sed. e ignimbritas	Lateral	38.7		0.13	0.12	1.8	56764.8
	Salar, calizas	Lateral	327.6		0.13	0.08	10.2	321667.2
	Ignimbritas	Directa	2.5			0.16	1.2	37843.2
3500-4000	Dep. Sed. recientes	Directa	93.2	105		0.28	86.8	2737324.8
	Rocas intrusivas	Lateral	157.7		0.13	0.04	2.7	85147.2
	Dep. Sed. antiguos	Directa	125.7			0.2	83.7	2639563.2
	Rocas Sed. e ignimbritas	Lateral	301.5		0.13	0.12	15.6	491961.6
	Salar, calizas	Lateral	12.8		0.13	0.08	0.4	12614.4
	Ignimbritas	Directa	0.6			0.16	0.3	9460.8
4000-4500	Dep. Sed. recientes	Directa	4	120		0.28	4.2	132451.2
	Rocas intrusivas	Lateral	16.4		0.13	0.04	0.3	9460.8
	Dep. Sed. antiguos	Directa	10			0.2	7.6	239673.6
	Rocas Sed. e ignimbritas	Lateral	92.8		0.13	0.12	5.5	173448
	Salar, calizas	Lateral	1.5		0.13	0.08	0.06	1892.16
4500-5000	Rocas intrusivas	Lateral	2	133	0.13	0.04	0.04	1261.44
	Rocas Sed. e ignimbritas	Lateral	23.9		0.13	0.12	1.6	50457.6
5000-5140	Rocas Sed. e ignimbritas	Lateral	0.9	142	0.13	0.12	0.06	1892.16
TOTAL			1517.3				417	13150512

Si a esta recarga se suma el caudal pasante proveniente del Sector Sur (200 l/s), la recarga total de recursos hídricos subterráneos para el Sector Norte es de 19457712 m³/año.

El Sector Sur posee características geológicas que le confieren un significativo porcentaje de superficies impermeables, presentándose una situación en que la escorrentía que se genera en este sector producto de las precipitaciones en su zona alta, fluye por estrechos cauces con poco desarrollo de relleno sedimentario fluvial, y por acuíferos también de reducido tamaño asociados a estos rellenos, donde los efectos de embalsamiento son despreciables y que claramente están muy vinculados hidrogeológicamente a los escurrimientos superficiales. Es decir, el Sector Sur se comporta virtualmente como una zona de transferencia de sus recursos hídricos hacia el Sector Norte.

4 RESUMEN Y CONCLUSIONES

La caracterización de los recursos subterráneos de las cuencas presentados en este estudio se puede dividir en dos temas principales, el primero corresponde a la caracterización hidrológica y la segunda a la caracterización hidrogeológica.

La caracterización hidrológica se enfoca en las precipitaciones ya que los escurrimientos superficiales son virtualmente nulos en esta zona. La estimación de la precipitación media anual sobre las cuencas es completa e incluyó la totalidad de la información pluviométrica disponible. A su vez, la caracterización hidrogeológica se realizó con el mapa geológico de Chile (Sernageomin, 2002), escala 1:1000000 y otros estudios realizados para el área.

La recarga a los acuíferos forma parte del ciclo hidrológico y corresponde a los recursos que se infiltran en el suelo y son almacenados por distintos períodos de tiempo. En la zona norte de Chile la recarga tiene su principal fuente en las precipitaciones ocurridas en los meses de verano a grandes alturas, en el llamado “invierno boliviano”, ya que en los meses de invierno y bajo los 2.500 msnm, casi no se registran eventos de lluvias.

Se han realizado cálculos de recarga con otras metodologías para algunas cuencas que se incluyen en este estudio, sin embargo estos cálculos no contaban con la información hidrológica e hidrogeológica con que se cuenta ahora, lo que condujo a estimaciones distintas en cuanto a la delimitación de cuencas y cantidad de agua factible de ser explotada sustentablemente. Por lo tanto este estudio ofrece un mejor conocimiento de la situación de los recursos hídricos subterráneos en la zona.

En la tabla 4.1 se muestran las recargas estimadas de las cuencas analizadas en este estudio.

Tabla 4.1. Recargas por cuenca.

NOMBRE	RECARGA TOTAL (METROS CUBICOS POR AÑO)
Queb. Pan de Azúcar	1513728
Río Salado	3468960
Quebrada Peralillo	157680
Quebrada Animas Viejas	63072
Quebrada Flamenco	126144
Cerro del Obispo	31536
Quebrada del Morado	126144
Caldera	504576
Salar de Gorbea	3658176
Salar de Azufrera	2554416
Salar de Agua Amarga	4005072
Quebrada La Rosa	883008
Cerro Blanco	2869776
Cerro El Encanche	1072224
Salar de La Isla	8798544
Salar de Aguilar	6401808
Salar de Los Infieles	2144448
Salar de Las Parinas	7600176
Salar Grande	7158672
Queb. Los Maranceles	662256
Cerro Agua de Morales	662256
La Laguna	2869776
Salar de Piedra Parada	3595104
Laguna de Las Parinas	883008
Lagunas Bravas	3216672
Laguna del Jilguero	946080
Salar de Wheelwright	3122064
Laguna Verde	11289888
Piedra Pómez	7537104
Salar de Maricunga	38158560
Laguna del Negro Francisco	11037600

El Salar de Pedernales Sector Norte tiene una recarga de 19457712 m³/año.