

H011- 4104
C1



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

INFORME TÉCNICO

“ACTUALIZACIÓN DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS QUE ALIMENTAN VEGAS Y BOFEDALES, CUENCA DEL RÍO CAQUENA, REGIÓN DE TARAPACÁ”

**REALIZADO POR:
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Centro de Información Recursos Hídricos
Área de Documentación

S.D.T. N°162

DICIEMBRE DE 2003

INDICE

1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	2
2. <u>OBJETIVOS Y ALCANCES</u>	2
3. <u>CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA</u>	3
A) ÁREA DE ESTUDIO	3
B) ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS	4
C) VEGETACIÓN	7
D) ÁREAS PROTEGIDAS BAJO LA RESOLUCIÓN DGA N°909 DE 1996	8
4. <u>ANÁLISIS HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DE CAQUENA</u>	9
5. <u>METODOLOGÍA DE TRABAJO</u>	14
A) CRITERIOS APLICADOS ANTERIORMENTE	14
A.1 DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS QUE ALIMENTAN VEGAS BOFEDALES DE LAS REGIONES DE TARAPACÁ Y ANTOFAGASTA, DGA, 1996	14
A.2 ACTUALIZACIÓN DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS QUE ALIMENTAN VEGAS Y BOFEDALES, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, DGA, 2001	15
B) DELIMITACIÓN ACUÍFERO ALIMENTADOR DEL BOFEDAL DE CAQUENA	17
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	21
7. <u>ANEXOS</u>	22

1. INTRODUCCIÓN

El Código de Aguas de 1981 no consideró la conservación de los humedales altoandinos (vegas y bofedales) del norte de Chile, ecosistemas únicos de alta vulnerabilidad a la disponibilidad hídrica. Dicha situación ha puesto en riesgo su sustentabilidad y la supervivencia de las comunidades indígenas del altiplano, para quienes estos humedales tiene una importancia cultural y económica.

La Dirección General de Aguas, conciente de lo anterior, promovió la modificación del Código de Aguas en 1992 con lo cual se prohibió la explotación de sus acuíferos alimentadores. En 1996 se protegió legalmente un área aproximada de 2909 km² entre la I y II región.

Posteriormente, CONADI I Región, a través de diversos análisis y estudios, concluyó y luego comunicó a la DGA que algunas vegas y bofedales que eran sustento de comunidades indígenas no se encontraban adecuadamente protegidas o no estaban protegidas del todo.

Lo anterior es el caso del Bofedal de Caquena, situado en el pueblo del mismo nombre, que con una extensión aproximada a 21 km² no fue considerado en la protección de 1996.

Así, el presente estudio se refiere a una actualización de la delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales en la I Región, en el sentido de proteger el sector del Bofedal de Caquena el cual se ubica en la zona altiplánica de dicha región.

2. OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo general de este estudio es efectuar una actualización de la delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales de la I Región del país en el sentido de anexar la zona acuífera que corresponde al Bofedal de Caquena.

Como objetivos específicos se tienen:

- Identificar los límites de la cobertura vegetal del Bofedal de Caquena
- Establecer una metodología ad-hoc a la información hidrogeológica disponible para la delimitación de la zona acuífera del Bofedal de Caquena.
- Delimitar los límites de los acuíferos alimentadores de dicho bofedal
- Generar la cartografía correspondiente a dicha delimitación.

3. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA

a) Área de estudio

En la figura 1 se aprecia la zona de estudio situada en la parte nororiental de la Región de Tarapacá, definida por los límites hidrológicos de la cuenca de Caquena hasta el límite fronterizo con la República de Bolivia, en la localidad de Tacata.

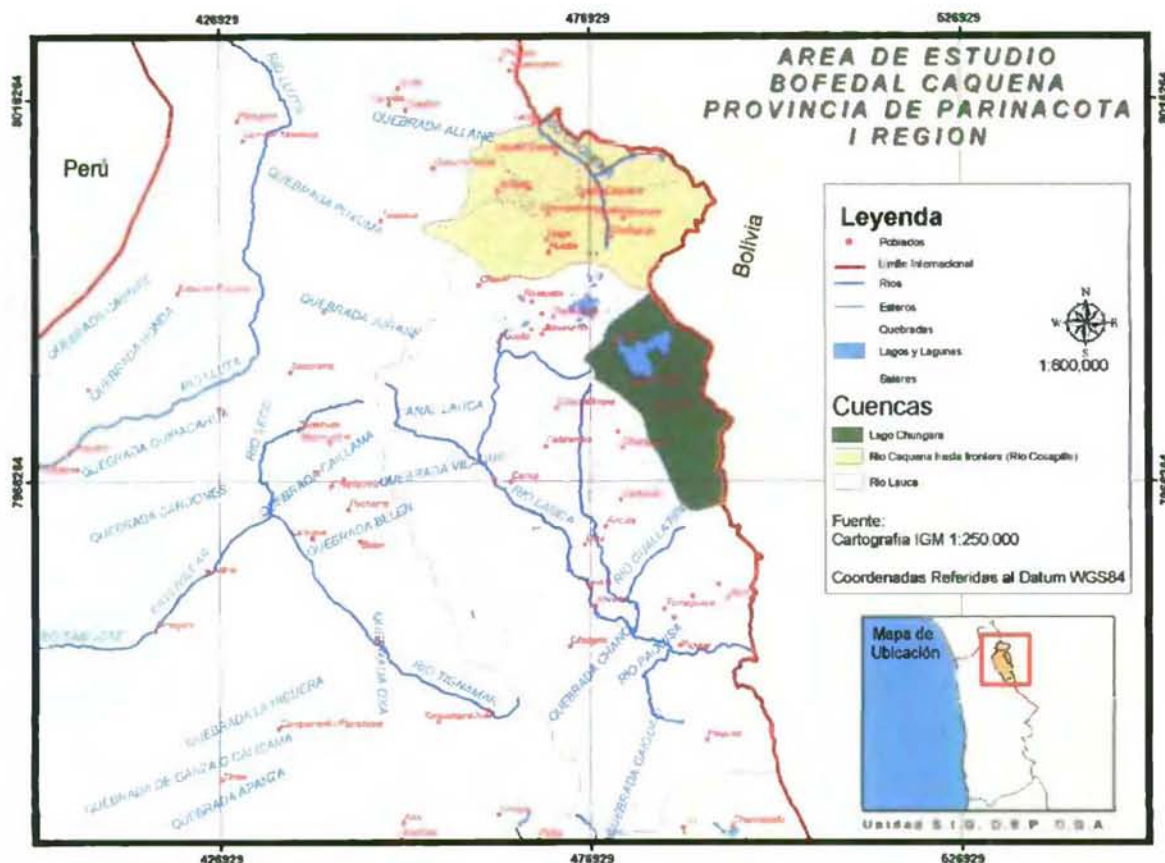


Figura 1. Área de estudio.

La cuenca del río Caquena pertenece al sistema de cuencas altiplánicas de la I Región, ocupa la parte nororiente de la provincia de Parinacota y drena finalmente hacia Bolivia. Limita al este con Bolivia; al norte con las cuencas altiplánicas de río Uchusuma, Coplas, Putani y Cosapilla; al este con la cuenca del río Lluta; al sur con la cuenca del río Lauca y al sureste con la cuenca del Lago Chungará.

En la figura 5 se aprecia un detalle de la cuenca de Caquena considerada en el tramo de interés de 25 km.

b) Antecedentes Hidrológicos y climáticos

La tabla 1 entrega las principales características morfométricas y climatológicas:

Tabla 1. Características morfométricas y climatológicas cuenca río Caquena

Cuenca	: Río Caquena
Altura promedio	: 4333 m s.n.m.
Superficie	: 546 km ²
Precipitaciones	: 355,4 mm/año
Evaporación potencial	: 741 mm/año
Temperatura media anual	: 2,4°C

Desde el punto de vista orográfico, la cuenca se caracteriza por su meseta altiplánica y por la cordillera de los Andes, que constituye su límite poniente.

El clima predominante es el de estepa de altura, con temperatura media anual bajo los 3°C, con excepción de su parte nor-oriental, que sobrepasa los 5°C. En las altas cumbres que bordean la cuenca existe clima de hielo por efecto de altura. Es una zona de alta pluviosidad, cuyas precipitaciones sobrepasan los 300 mm de precipitación anual.

Su principal curso corresponde al río Caquena que nace al poniente de los nevados de Payachatas, entre ambos conos volcánicos, de allí recorre exclusivamente por territorio chileno en dirección sureste noroeste por 25 km, tramo en el cual se le agrega el caudal de su tributario, el río Colpacagua, que drena el sector suroeste de la cuenca. En su curso, el río Caquena baña un ancho valle cubierto de bofedales y su cauce, a partir del sector de Tacata, se convierte en línea fronteriza entre Chile y Bolivia por otros 25 km, dentro de los cuales recibe por el lado chileno el importante aporte del río Cosapilla que produce un cambio en el nombre del río principal, que pasa a llamarse Cosapilla. Se interna en el país vecino de Bolivia y recorre en el Altiplano 20 km más antes de unirse con el río Uchusuma.

Los principales tributarios, Colpacagua y Cosapilla, así como el propio río Caquena, presentan un régimen de escurrimiento permanente con un período de crecidas coincidentes con el período de lluvias, luego uno de estiaje que alcanza su valor mínimo en los meses de primavera, durante el cual los ríos son alimentados por el afloramiento de vertientes recargadas por la infiltración de las precipitaciones concentradas en los meses del Invierno Boliviano, así como, por el derretimiento lento de las nieves precipitadas sobre los 5.000 m s.n.m..

La caracterización pluviométrica de la cuenca se realiza a partir de la estación pluviométrica Caquena y para un período entre 1961/62-1997/98.

Tabla 2. Datos estación pluviométrica cuenca río Caquena

Estación Pluviométrica	Código	Coordenadas		Altitud
		UTM E	UTM N	
Caquena	1001050-0	478832	8004246	4400

Para el período considerado el promedio de precipitación anual es de 355,4 mm¹

El análisis de frecuencia de las estadísticas depuradas y corregidas entrega los resultados presentados a continuación.

Tabla 3. Precipitaciones anuales (mm) Estación Caquena: resumen de análisis de frecuencia¹

Estación	95%	85%	50%	20%	5%
Caquena	81,9	124,9	256,1	458,8	800,5

Estos datos dan cuenta de una fuerte variabilidad interanual de las precipitaciones, caracterizado por años extremadamente lluviosos que elevan el promedio anual del registro sobre la probabilidad 50% en al menos 100 mm.

Respecto del régimen fluviométrico se han considerado dos estaciones, Caquena en Nacimiento, que como su nombre lo indica se sitúa en la cabecera del río Caquena, al costado oeste del bofedal en la depresión más baja del sector. Y Caquena en Vertedero, situada en las cercanías del límite del área de estudio y de la frontera con Bolivia, ésta última estación incluye los aportes del río Colpacagua. (Tabla 4)

Tabla 4. Datos estaciones fluviométricas cuenca río Caquena

Estación Fluviométrica	Código	Coordenadas		Altitud
		UTM E	UTM N	
Caquena en Nacimiento	01001001-2	480600	8000560	4385
Caquena en Vertedero	01001002-0	468233	8013452	4280

Las estadísticas corregidas y depuradas de caudales medios mensuales y anuales, fueron sometidas a un análisis de frecuencia, cuyos resultados se muestran a continuación en las figuras 2 y 3¹.

¹ Actualización Recursos hídricos para restablecimiento de derechos ancestrales indígenas, I y II regiones, DGA, octubre de 2000

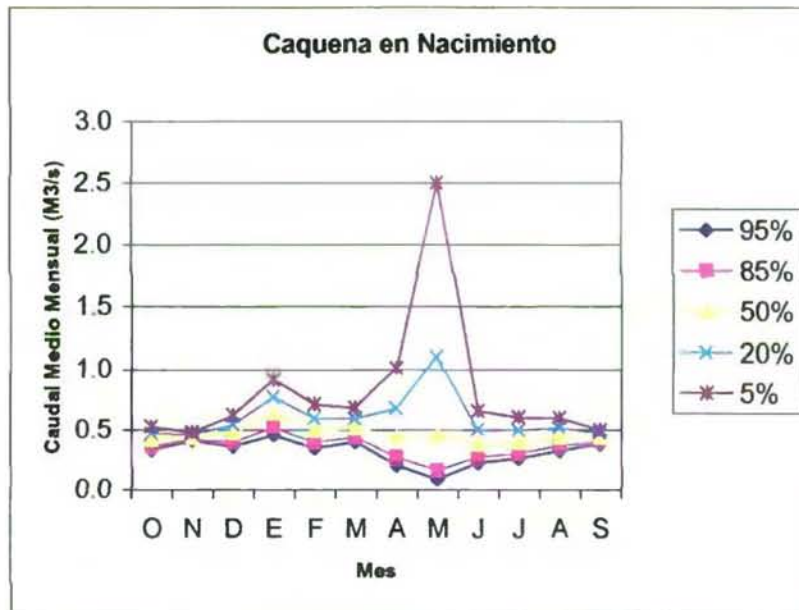


Figura 2. Curvas de variación estacional caudales medios mensuales, Estación Caquena en Nacimiento

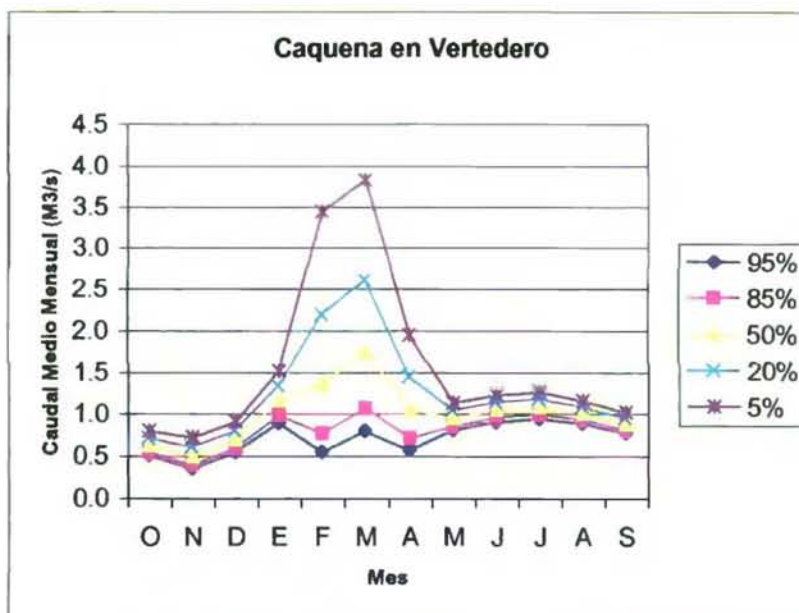


Figura 3. Curvas de variación estacional caudales medios mensuales, Estación Caquena en Vertedero.

Ambas estaciones presentan distintos regímenes hidrológicos de acuerdo con las características de sus cuencas de aporte. Caquena en Nacimiento no posee una cuenca de aporte de consideración y por lo tanto no tiene una red de drenaje desarrollada, por otro lado, los suelos están compuestos de sedimentos volcánicos del cuaternario con escasa consolidación superficial, extremadamente permeables que facilitan la infiltración de la mayor parte de las precipitaciones. En este sentido, los máximos observables para una frecuencia superiores al 50% se presentan durante el

mes de mayo, es decir, con al menos tres meses de desfase respecto del período de máximas precipitaciones (enero a febrero). Lo anterior indica que los principales caudales registrados por esta estación se componen principalmente de los afloramientos de la napa subterránea, mismos que dan origen al bofedal. Hay que dejar en claro que las precipitaciones a que nos referimos son aquellas producidas durante el llamado invierno Boliviano, y que pueden ser líquidas o en forma de nieve debido a que estas últimas sufren una rápida fusión (algunos días) hasta una altura aproximada a los 4750 m s.n.m., cota correspondiente a la línea de isoterma cero (Balance Hidrológico Nacional). En resumen, se puede concluir que en este sector las recargas son depositadas rápidamente sobre el acuífero, el que podría llegar a extenderse bajo esta cota.

Por su parte, la estación Caquena en Vertedero presenta valores máximos para frecuencias superiores al 50% a partir de enero, y se extienden hasta abril con un máximo en marzo. Este comportamiento está ligado al aporte superficial del río Colpacagua, cuya cuenca de drenaje, correspondiente al sector occidental de la cuenca, no infiltraría tanto como el sector este anteriormente indicado. Los suelos de este sector están compuestos mayoritariamente de rocas volcánicas terciarias consolidadas y bajo porcentaje de fracturamiento. Lo anterior explicaría la simultaneidad de máximos con el período de máximas precipitaciones, sin embargo, la componente nival de este sector (sobre los 4750 m s.n.m.), más la subterránea del sector oriente de la cuenca, prolongarían los caudales altos de la estación Caquena en Vertedero hasta marzo.

Finalmente hay que indicar que el desfase observado en la estación Caquena en Nacimiento no es perceptible en la estación Caquena en Vertedero debido principalmente a la acción reguladora del bofedal, que con una extensión de aproximadamente 20.8 km² y una tasa de consumo promedio anual de 0.8 l/s/ha², consume alrededor de 1664 l/s.

c) Vegetación

La vegetación altiplánica, rica en variedad, y permanente a causa de las precipitaciones, está condicionada por el clima.

En el área de estudio predomina la vegetación de estepa andina, constituida fundamentalmente por gramíneas de los tipos "paja brava" y "paja blanca". Sobre los 4500 m s.n.m. y hasta el límite vegetacional, la densidad del pajonal disminuye y aparecen pequeñas comunidades o ejemplares aislados de Llaretta y Queñoa.

En los sectores bajos y con escurrimiento permanente de agua, se desarrollan formaciones vegetacionales de bofedales.

² Estimación de requerimientos hídricos de humedales del norte de Chile, S.D.T. N°96, DGA, 2001

Los bofedales tienen una enorme importancia para la zona ya que permiten mantener el pastoreo durante los meses en que se secan las gramíneas forrajeras de la estepa.

La cobertura vegetal del bofedal de Caquena ha sido medida a partir de la interpretación en falso color sobre una imagen satelital del sector. LANDSAT Bandas: 7,4,1, año 1989, arrojando un total de 2079 ha, como lo muestra la figura 4.

d) Áreas protegidas bajo la Resolución DGA N°909 DE 1996

La resolución DGA N°909 de 1996 que identifica y delimita los acuíferos que alimentan las áreas de vegas y bofedales en las regiones de Tarapacá y Antofagasta, cubre en la I Región un total de 335,03 km², lo cual corresponde al 0.57 % del área de la región.

En la figura 4 se identifican con color rojo los acuíferos protegidos por esta resolución en el área de estudio (Cuenca río Caquena).

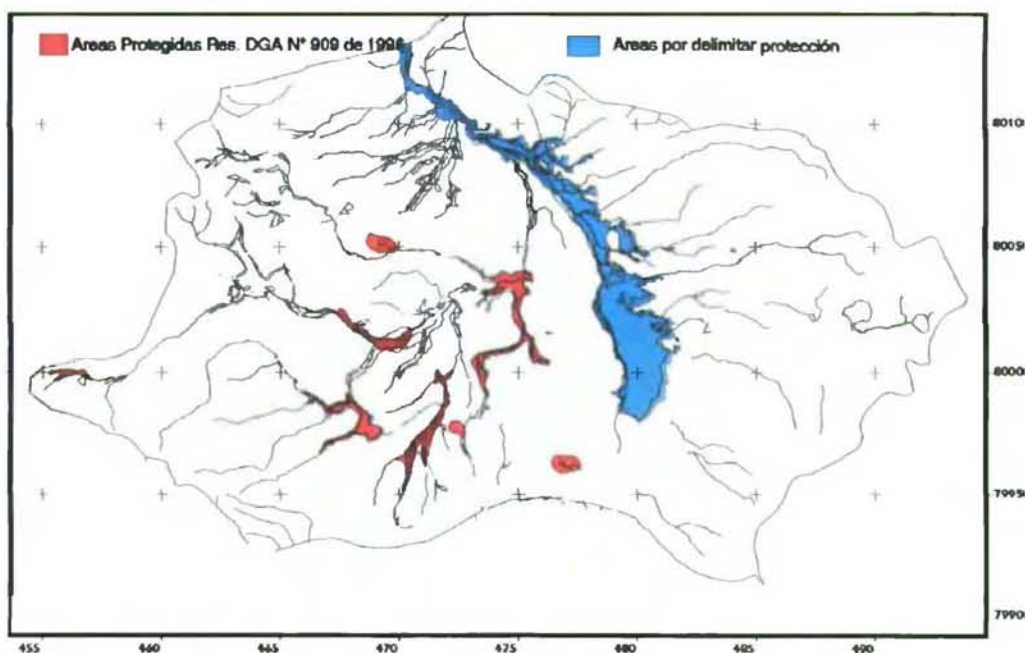


Figura 4. Acuíferos protegidos y áreas por proteger en área de estudio.

La tabla 5 resume las áreas protegidas en la zona de estudio y la cobertura vegetal por proteger del bofedal de Caquena.

Tabla 5. Áreas de Acuíferos protegidos en zona de estudio

Cuenca	Área de Cuenca (km ²)	Área de acuíferos protegidos (km ²)	Área de cobertura bofedal a proteger (km ²)
Caquena	546,03	9,33	20.79

4. ANÁLISIS HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DE CAQUENA

Los componentes disueltos que caracterizan las distintas fuentes de agua provienen de la alteración sobre la litología de la cuenca de drenaje, cuando las distintas formaciones están bien separadas en la cuenca, cada una de ellas provee aguas de alteración que reflejan la litología de su sector. En este sentido, el estudio geoquímico sobre los cursos de agua en cuencas con escasa o nula información geológica subsuperficial permite establecer el grado de correlación con la geología de superficie.

Por lo general, las cuencas altiplánicas del norte del país, como la de Caquena, presentan un alto grado de complejidad geológica e hidrogeológica debido principalmente a la dinámica estructural y al volcanismo asociado que les dieron origen. Esta variedad se traduce en una amplia gama de acuíferos, entre los cuales encontramos los conformados por rocas volcánicas fracturadas, formaciones volcano-sedimentarias y rellenos cuaternarios de distinta naturaleza. Entre ellos, solo para el caso de acuíferos cuaternarios, la geología de superficie permite identificar con alguna seguridad la cobertura espacial dentro de una cuenca.

El presente análisis hidroquímico de las aguas de la cuenca de Caquena se realiza como una manera de identificar posibles fuentes de alimentación de los acuíferos que sostienen el principal sistema de vegas y bofedales situado en el sector este de la cuenca. Para ello, durante el mes octubre del 2003, se realizó un muestreo químico e isotópico de los principales escurrimientos y afloramientos de agua dentro de la cuenca según se indica en la figura 5 y tabla 7 de anexos.

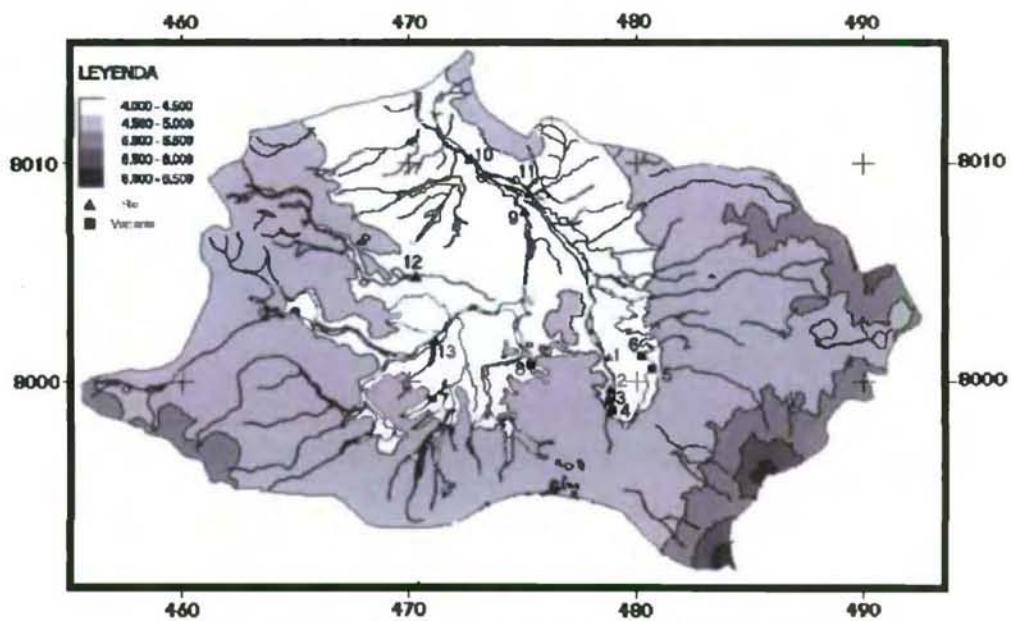


Figura 5. Ubicación puntos de muestreo en área de estudio

Los resultados analíticos de esta campaña de muestreo se resumen en las tablas 7 y 8 de anexos, a partir de los cuales es posible establecer que las aguas superficiales de la cuenca tienen los siguientes tipos químicos:

- Bicarbonatadas con proporción variable de Na y Ca, y predominancia del Na sobre Ca (C3, C5, C6, C7, C8, C9, C12 y C13)
- Sulfatadas con predominancia de Mg (C1, C2 y C4)
- Cloruradas sódicas (C10 y C11)

Esta clasificación puede observarse en la figura 6, siguiente

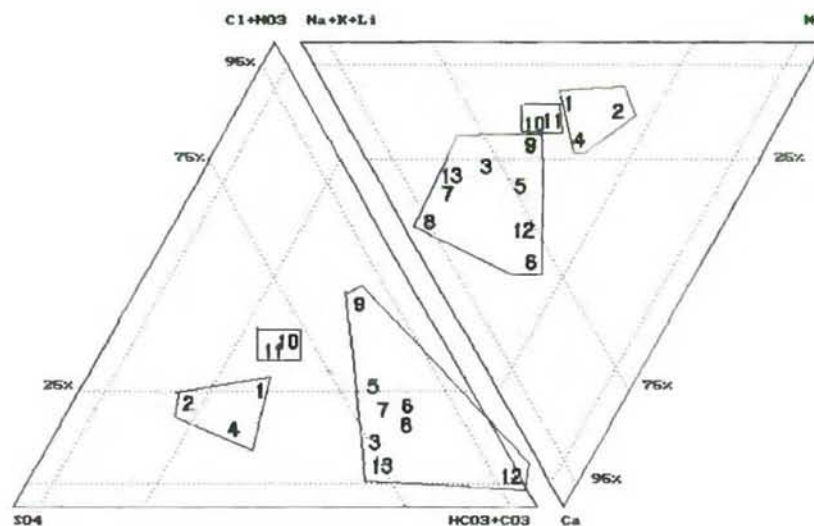


Figura 6. Clasificación química de las aguas

No obstante lo anterior, desde el punto de vista evolutivo de un agua que se evapora, estas mismas muestras pueden clasificarse en dos únicos grupos, las que siguen una vía Sulfatada Alcalina (SA) como C1, C2, C4, C5, C6, C9, C10 y C11, y las de Vía Carbonatada (CB) como C3, C8, C12 y C13, figura 7.

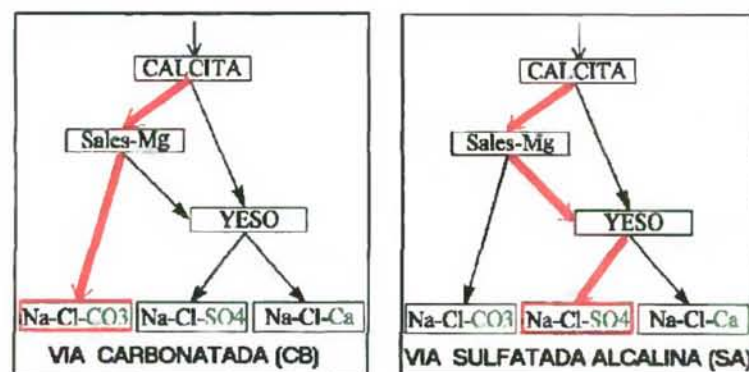


Figura 7. Vías Evolutivas presentes en la cuenca de Caquena

- Vía carbonatada (CB): la precipitación de silicatos de magnesio no logra desviar la evolución del agua debido a su alta proporción de carbonato y bicarbonato.
- Vía sulfatada alcalina (SA): la solución empieza su evolución por la vía carbonatada pero la precipitación de silicatos de magnesio corta esta vía, permitiendo al calcio concentrarse hasta llegar a la precipitación del yeso. A este punto, el sulfato predomina sobre calcio y se llega a una salmuera sulfatada.

Lo interesante de esta última clasificación es que no se considera solamente las concentraciones de los componentes, como en las clasificaciones tradicionales, sino también sus cambios cuando el agua se evapora. En este caso, ambas vías evolutivas representan dos sectores bien definidos de la cuenca y muestran una clara relación con la geología de superficie correspondiente, ver figura 8. El grupo de muestras de vía sulfatada alcalina representa la parte oriental de la cuenca con predominancia de material volcánico cuaternario, presumiblemente con mineralizaciones sulfuradas y azufre. En este caso el agua de alteración adquiere sulfato, por oxidación de azufre o de sulfuros, en una cantidad importante en comparación con la proporción de bicarbonato. Las conductividades, entre los 300 a los 1100 mg/l, son comparativamente más altas respecto del otro grupo.

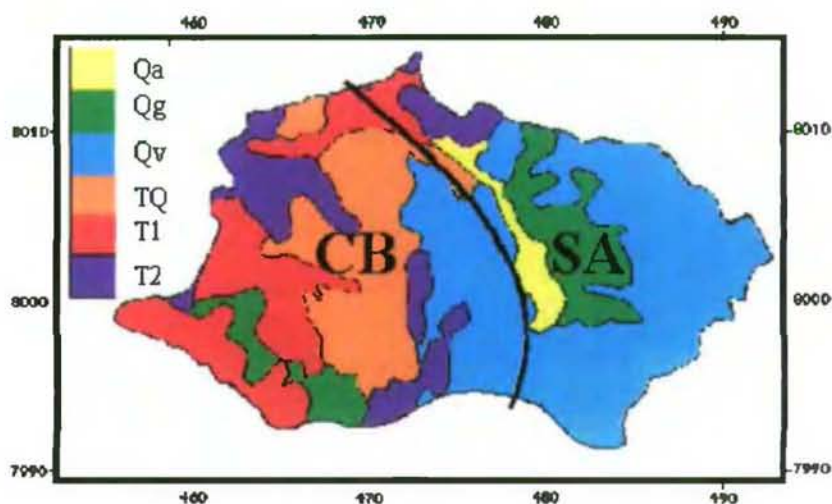


Figura 8. Distribución de las Vías Evolutivas presentes en la cuenca de Caquena

En el sector occidental se encuentran exclusivamente vías carbonatadas, no obstante, existe una composición litológica mixta entre rocas volcánicas del terciario y sedimentarias del terciario-cuaternario. En este caso los componentes del agua dependen principalmente de la alteración de silicatos por el ácido carbónico aportado por la atmósfera, el aporte de sulfato por mineralizaciones sulfuradas o sulfato es mínimo en comparación con el bicarbonato. Las salinidades son bajas, entre 100 y 200 mg/l.

La situación anteriormente descrita nos permite establecer que la fuente de agua principal que sustentaría el bofedal en estudio, proviene del drenaje subterráneo del

sector oriental de la cuenca, ya que la composición única de las aguas de este bofedal es del tipo SA. No descartamos los posibles aportes desde el sector occidental de la cuenca, sin embargo, estos serían poco significativos en comparación a la fuente principal. Esta hipótesis es coincidente con la evidencia isotópica la cual indica que las muestras de agua del sector CB son mucho más evaporadas que las del sector con vía SA, a pesar de tener comparativamente mucho menores salinidades. Prácticamente se puede decir que la salinidad en estas aguas proviene en su mayoría a la propia concentración por evaporación. En la figura 9 siguiente, se indica el contenido isotópico de las muestras de agua separadas en los dos grupos de acuerdo a su vía evolutiva:

- A.- CB. Aguas del sector occidental, cursos y afloramientos
- B.- SA., Aguas del sector oriental, curso superficial del bofedal y afloramientos de orilla

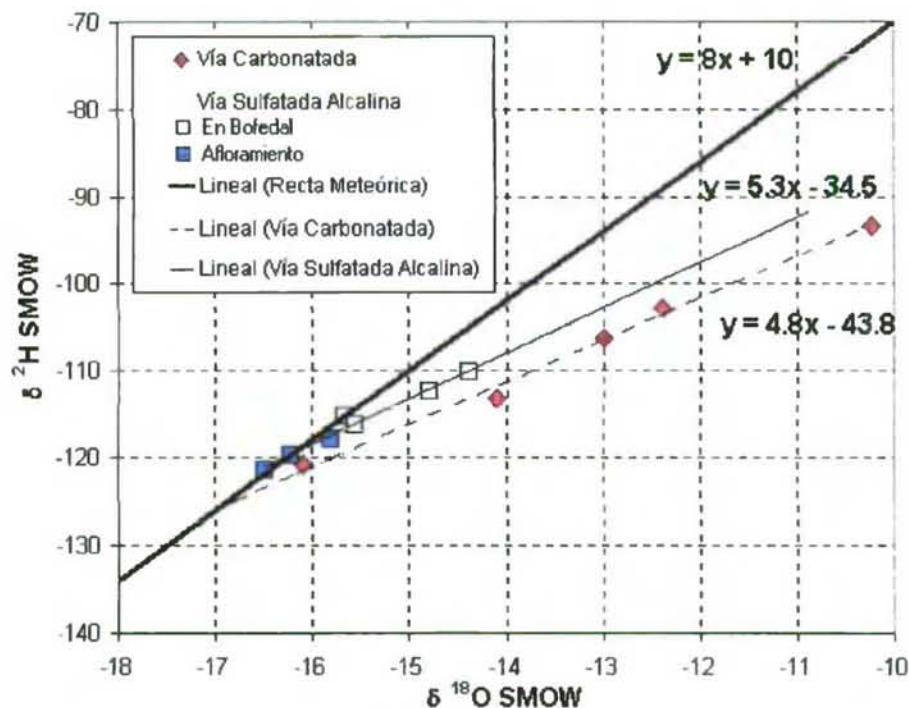


Figura 9. Contenido Isotópico en las aguas de la cuenca de Caquena

En este gráfico queda claramente definido que las fuentes de agua que sustentan mayoritariamente el bofedal provienen del sector oriental de la cuenca. Más aún, es posible establecer una clara diferenciación en las propiedades de infiltración y de permeabilidades entre ambos sectores indicados, en este sentido, el sector oriental tendría una rápida infiltración de las precipitaciones y una posterior escorrentía subterránea, indicado por la cercanía de los afloramientos a la recta meteórica mundial. En sectores de gran pendiente como la existente en este sector (10%) la profundización de los acuíferos es asociada a una significativa transmisividad. Por el contrario, las

aguas del sector occidental o de vía carbonatada, aunque tendrían un contenido isotópico inicialmente menor de acuerdo con el desplazamiento hacia abajo de su recta de evaporación, muestran una significativa evaporación. Esta característica estaría indicando un flujo subterráneo subsuperficial en los cursos del río, probablemente desconectado del flujo regional, con procesos de afloramientos e infiltración sucesivos debido a singularidades geográficas, variedad litológica y permeabilidades asociadas. No obstante, existiría una diferencia significativa de permeabilidades respecto del sector oriental.

Por otro lado, el desplazamiento por debajo de la recta de evaporación de las aguas del sector occidental en comparación con las aguas del sector oriental, también estaría indicando una diferencia en la altura de recarga, siendo las aguas que alimentan el bofedal las que poseen un menor contenido isotópico a pesar que este sector de la cuenca posee una mayor altura para la captación de precipitaciones. Lo anterior estaría indicando que la recarga mayoritaria de los acuíferos alimentadores estaría relacionada a los sectores más bajos de la subcuenca, aún por debajo de la isoterma cero. En este sentido, es razonable considerar que la máxima altura de infiltración para la recarga de estos acuíferos podría corresponder a la delimitación hidrológica del sector sur de la subcuenca oriental, altura que alcanza los 4.600 m s.n.m..

Finalmente y de acuerdo a lo indicado anteriormente, en la figura 10 siguiente, se presenta esquema conceptual de la hidrogeología presente y las fuentes de alimentación del bofedal de Caquena.

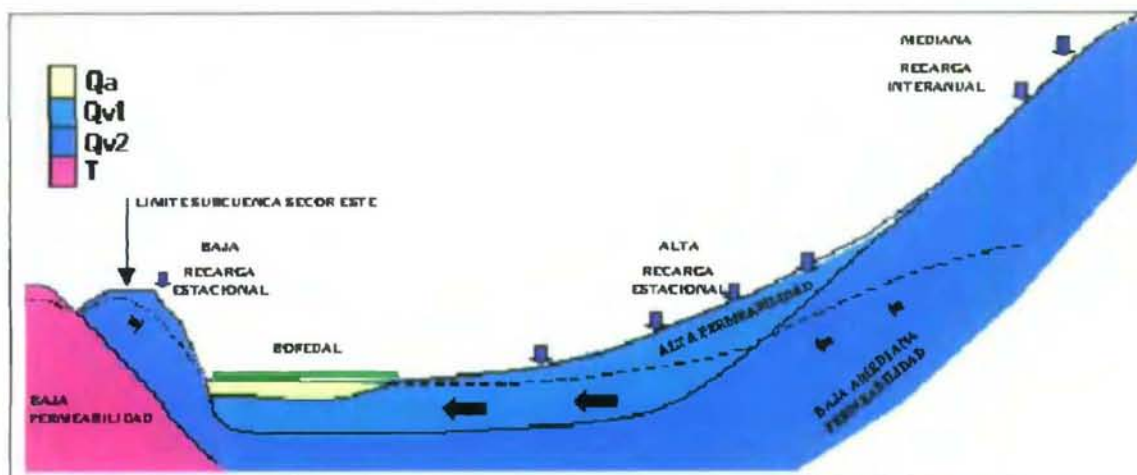


Figura 10. Esquema conceptual hidrogeológico sector este de la cuenca

Dos principales zonas hidrológicas han sido definidas para el sector acuífero inserto en la formación Qv1: la zona aluvial y el piedemonte. La distribución de estas dos zonas puede inferirse al analizar el esquema de la figura. La zona aluvial corresponde a las elevaciones de menor altura sobre la cual se encuentra el bofedal y la región piedemonte que se proyecta hacia el sector montañoso de mayor pendiente. En la zona alta, está formada en gran medida por basalto fracturado de flujos volcánicos. La formación de basalto es altamente permeable, con una buena capacidad

de almacenamiento, y es considerada como el componente principal del acuífero. En las áreas más cercanas a la base de las montañas se intercalan con las de sedimento continental de origen morrénico y arena, extendiéndose por debajo de los depósitos aluviales del valle.

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

a) Criterios aplicados anteriormente

De la recopilación de antecedentes, surgen dos estudios de la DGA que consideraron la delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales en la I y II región del país.

- Delimitación de acuíferos que alimentan vegas bofedales de las regiones de Tarapacá y Antofagasta, S.D.T. N°4, DGA, 1996
- Actualización delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales, Región de Antofagasta, S.I.T. N°76, DGA, 2001.

a.1 Delimitación de acuíferos que alimentan vegas bofedales de las regiones de Tarapacá y Antofagasta, DGA, 1996

Los criterios de delimitación aplicados se basaron en la clasificación que distingue las vegas localizadas en quebradas y las ubicadas en planicies y/o salares:

- *Vegas en Quebradas*: distinguiéndose
 - o *Quebradas alimentadas por aguas superficiales provenientes de precipitaciones*: en este caso la delimitación en la mayoría de las situaciones, correspondía al contacto litológico entre las unidades de relleno aluvial y las unidades de roca presente, como también el de la hoya aportante.
 - o *Quebradas alimentadas por acuíferos*: se consideró sólo aquellas quebradas originadas por vertientes, cuya delimitación es similar a las incluidas en el punto anterior hacia aguas debajo de la zona de recarga ubicada en el área de nacientes. La diferencia se origina en la delimitación de las zonas de recarga.
- *Vegas en Planicies y/o Salares*: La delimitación de éstas resulta un tanto más compleja. En estos casos la delimitación de las áreas de prohibición consideró todos los antecedentes hidrogeológicos disponibles y de acuerdo a un criterio conservador, se definió el límite de estas áreas en los puntos donde la probabilidad de influencia de una captación sobre una vega fuese la mínima.

Cabe destacar que la mayoría de las delimitaciones en el caso de los salares, tiene un carácter de inferido y esto se observa en los mapas correspondientes con la simbología adecuada.

a.2 Actualización delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales, Región de Antofagasta, DGA, 2001

Teniendo definidos los límites de la vega, se determinó una distancia desde el perímetro de ésta que defina el área del acuífero que protege la vega. El criterio para determinar esta distancia depende de la clasificación de la vega en cuanto al tipo de acuífero que la alimenta (salar, llanura, quebradas, etc.). Como criterio general, se definió un área de protección de la vega sobre la base de criterios hidrogeológicos particulares de cada una. Cuando correspondía, dependiendo de la clasificación de la vega, se determinó una distancia tal que un bombeo produzca en el límite de la vega un descenso del nivel freático que no afecte significativamente la condición histórica de la vega.

Se asumió como descenso máximo para la zona de estudio el valor de 25 cm, según un estudio sobre el sector sur del salar de Atacama.

Dentro del análisis de cada caso, se tuvo en cuenta condiciones anisotrópicas de relevancia, por lo que no necesariamente la distancia en torno a la vega resultó constante, y en cuyo caso se evaluó el efecto de un bombeo en diferentes puntos en torno a la vega. También se tuvo en cuenta la geología del acuífero, la cual en muchos casos limitó el área a proteger.

Para determinar la distancia a que se produce el descenso de 25 cm, se recurrió a la hidráulica de pozos, para lo cual se deben conocer los parámetros de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero. Es necesario, entonces, para estimar estos parámetros, tener información de estratigrafía y pruebas de bombeo de pozos, y en los acuíferos que no se disponga de esta información, se estimó a partir de sectores similares desde el punto de vista hidrogeológico. El caudal de bombeo que se utilice para el cálculo de descenso es acorde con el acuífero analizado, considerando condiciones de recarga y escurrimiento subterráneo a partir de estudios existentes, pruebas de bombeo y observaciones de terreno. Una vez definida la distancia desde la vega a partir de la cual una extracción de agua subterránea no la afecte, se delimitó el área que protege a la vega, para lo cual también se han considerado las condiciones hidrogeológicas de borde que acotan esta delimitación.

Para los casos de vegas alimentadas por escurrimientos subsuperficiales, el criterio general será de proteger la fuente de recarga de la vega, que puede limitarse en algunos casos sólo al cauce en que se encuentra la vega o a un área de recarga definida por una cuenca hidrográfica.

Antecedentes técnicos:

Para definir las áreas delimitadas de las vegas y bofedales a proteger de acuerdo con la metodología considerada, se han utilizado algunos antecedentes técnicos para apoyar el trabajo de delimitación. Estos antecedentes se refieren a

- Información recopilada en terreno detallada en cada ficha con su fotografía
- Cartografía IGM escala 1: 50.000
- Fotografías aéreas
- Estudios hidrogeológicos que aportan información que permitió analizar con mayor detalle algunos sistemas acuíferos
- Información de pozos de bombeo de la zona, la cual fue obtenida principalmente de los expedientes de derechos de agua y áreas de exploración
- Estudios realizados anteriormente

La información de los pozos es útil e importante para dimensionar el acuífero a partir de la estratigrafía y profundidad de los pozos, y de las pruebas de bombeo, de donde además se obtienen los parámetros para calcular el radio de influencia, que son la transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

Para algunos pozos, el análisis de la prueba de bombeo fue realizada especialmente para este proyecto, mientras que en otros casos los parámetros se obtuvieron directamente de algunos de los estudios nombrados.

Para la delimitación del acuífero se definió un radio de influencia de acuerdo a la metodología expuesta, es decir, una distancia a la vega tal que un bombeo no produzca un descenso mayor a 25 cm. Se utilizó la ecuación modificada de Theis, en que el descenso (Δ) a una distancia x del pozo está dado por:

$$\Delta = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \ln \left(\frac{2.24 \cdot T \cdot t}{x^2 \cdot S} \right)$$

Q = Caudal de bombeo (m³/día)

T = Transmisividad (m²/día)

T = Tiempo de bombeo (días)

x = Distancia al pozo (radio de influencia (m))

S = Coeficiente de almacenamiento

Δ = Descenso (m)

La distancia a que se produce el descenso señalado queda dependiente del tiempo de bombeo, variable subjetiva que dependerá del uso particular que se le dé a cada pozo que se construya y/o explote en cada sector.

En vista de lo anterior, y considerando que el radio de influencia varía significativamente durante el comienzo del bombeo y durante un periodo de tiempo largo (más de 1 año),

para determinar la distancia X según la fórmula anterior, ésta se aplicó para diferentes tiempos de bombeo y se adoptó un tiempo tal que esta variable pasa a ser poco significativa en el cálculo de la distancia X a que se produce el descenso de 25 cm, tiempo que resulta en todos los casos superior a 10 años.

Para cada sector se utilizó los parámetros T, Q y S de pozos cercanos y de zonas hidrogeológicamente homogéneas. En muchos casos no se tuvo información de pozos cercanos, utilizándose parámetros obtenidos de pozos más lejanos de zonas similares.

b) Delimitación Acuífero alimentador del Bofedal de Caquena

Dada las características inalteradas de la zona de estudio no existen pozos en explotación ni información de exploraciones hidrogeológicas disponibles, sin embargo, a partir de los análisis efectuados en el presente informe, es posible extraer los siguientes criterios suficientes para aplicar una metodología mixta entre la utilizada en el estudio "Actualización delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales, Región de Antofagasta, DGA, 2001" y los resultados del análisis efectuado a los antecedentes técnicos hidrológicos, hidroquímicos e isotópicos del presente informe. De acuerdo con lo anterior, se han definido dos criterios fundamentales para la delimitación:

- **Delimitación Hidrológica:** En este caso y sobre la base de los antecedentes, es posible concluir que la recarga principal del acuífero se proyecta sobre la vertiente este de la subcuenca oriental de Caquena, teniendo como límite la cota isoterma cero (4750 m s.n.m.). En este sentido, se asume factible que el acuífero alimentador se extienda bajo esa cota. Por otro lado, la recarga proveniente de la vertiente oeste, de esta subcuenca, no representaría un aporte significativo al funcionamiento del bofedal, al menos hasta la descarga del tributario Colpacagua. En este caso, el límite de la subcuenca oriental se encuentra relativamente cercano y representa un buen criterio para la delimitación. Hacia el sur, el límite hidrológico posee una altura no mayor a los 4600 m s.n.m., valor inferior a los 4750 m s.n.m. de la cota isoterma cero. Consecuentemente se asume que este último valor representa un buen criterio para definir la delimitación, al igual que sucede en el límite noreste de esta subcuenca.
- **Delimitación Hidrogeológica:** En este caso, aunque como ya se dijo no se dispone de información de pozos para la cuenca de Caquena, es posible definir parámetros elásticos para el acuífero, sobre la base de datos obtenidos en pozos localizados en las mismas formaciones geológicas pero de otras cuencas del norte del país. En este sentido, un análisis bibliográfico arrojó los siguientes resultados:

Tabla 6. Parámetros elásticos de acuíferos y cálculos de radios de protección

	Q (l/s)	Q (m3/día)	k (m/día)	espesor (m)	T(m2/día)	t (días)	Delta (m)	S	Radio de Influencia R (m)
Qv	50	4320	100	50	5000	9125	0.25	0.1	5190
T	25	2160	1	50	50	9125	0.25	0.1	3083

Como se puede apreciar, la tabla también presenta los resultados de aplicar la metodología utilizada para la actualización de delimitaciones efectuada el año 2001 y detallada en el punto a.2. Para ello se asumió un caudal de extracción acorde al orden de las trasmisividades.

Finalmente, en las figuras 11 y 12 se indica el trazado de la delimitación para el bofedal de Caquena, identificando por tramo el criterio utilizado.

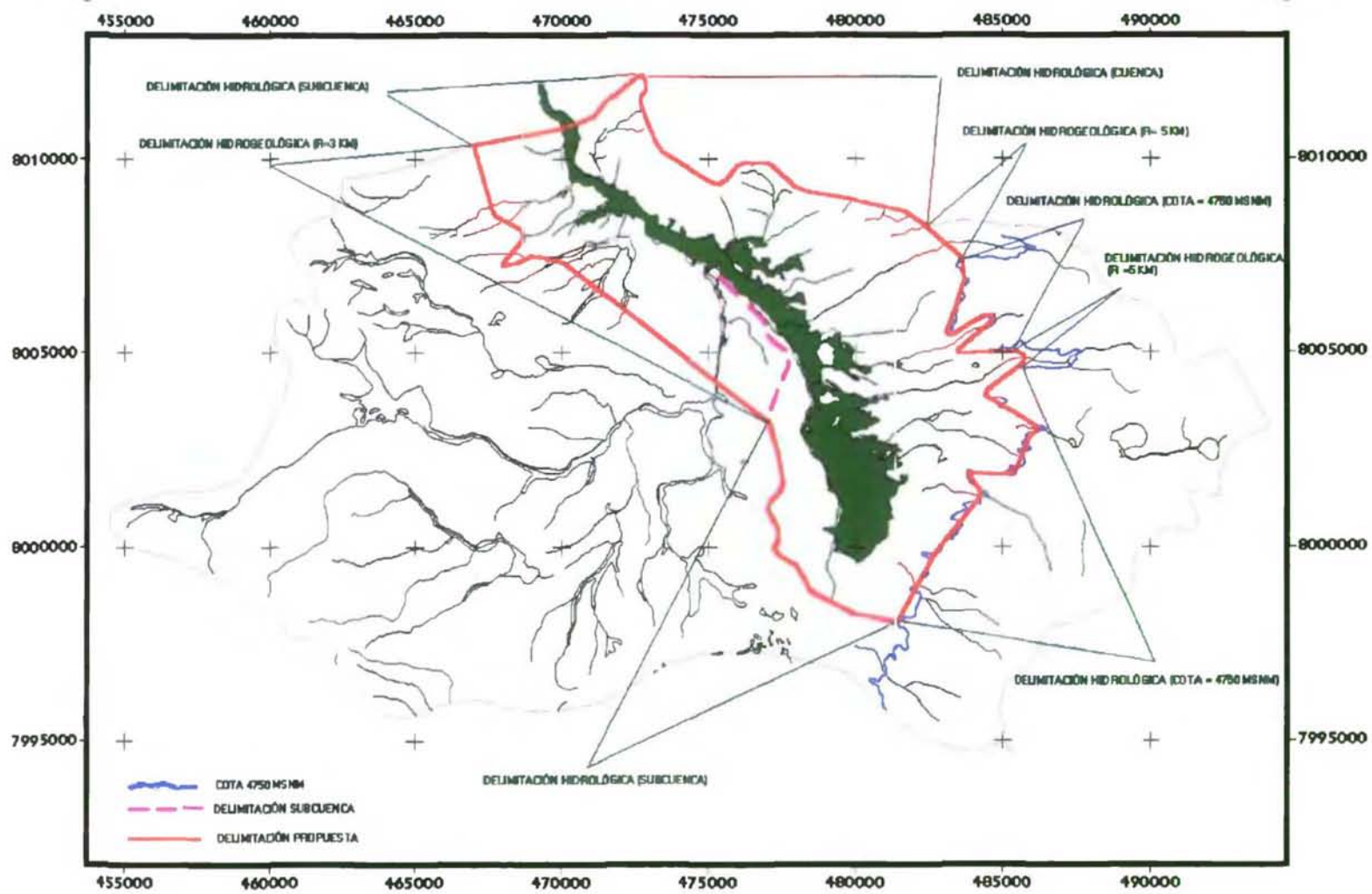


Figura 11. Delimitación de áreas de protección de acuíferos que alimentan el bofedal de Caquena y criterios utilizados

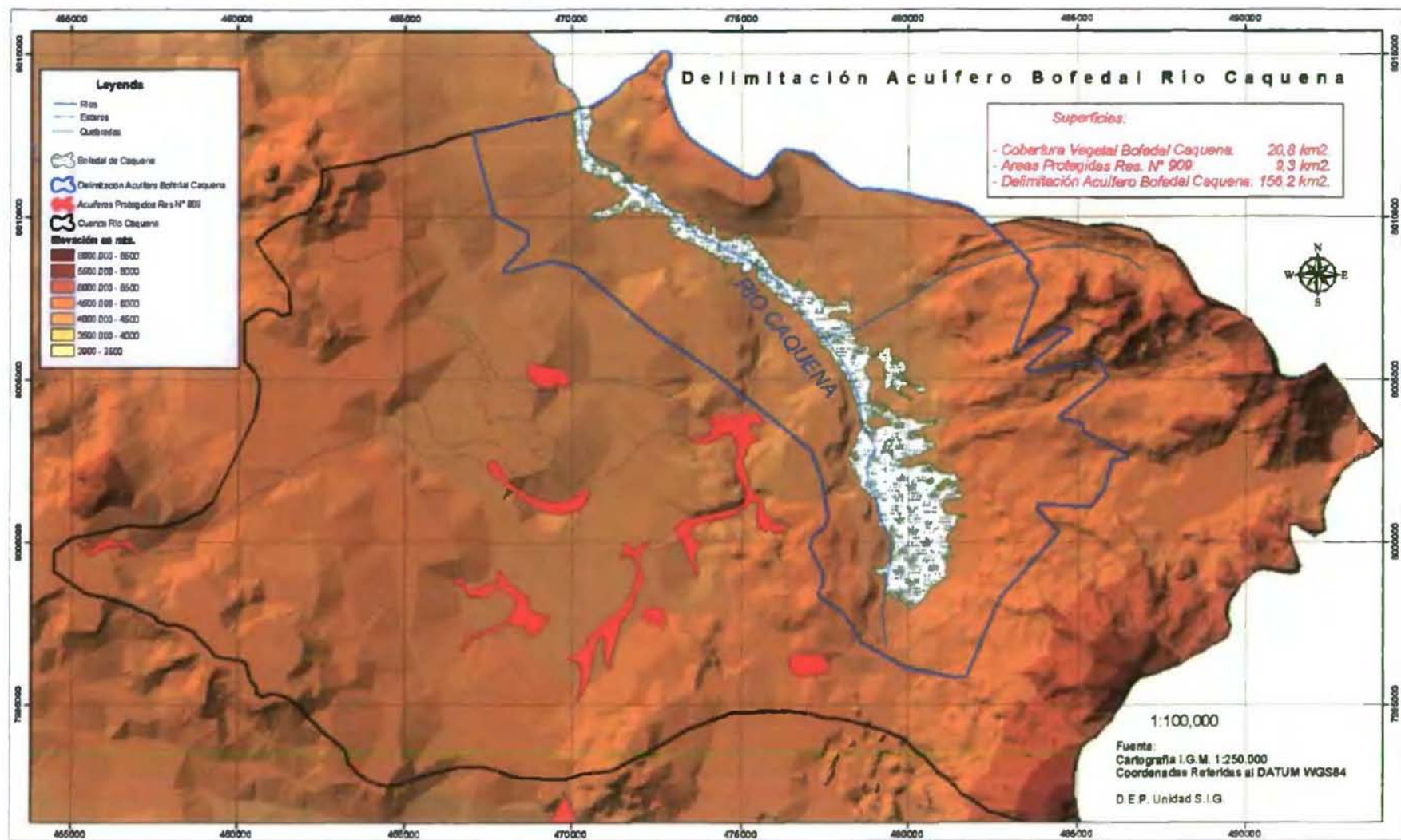


Figura 12. Mapa cartográfico con la delimitación de acuíferos

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Actualización Recursos hídricos para restablecimiento de derechos ancestrales indígenas, I y II regiones, DGA, octubre de 2000.
2. Estimación de requerimientos hídricos de humedales del norte de Chile, S.D.T. N°96, DGA, 2001
3. Análisis crítico de la red fluviométrica nacional, I Región, DGA, septiembre de 1983
4. Actualización delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales, Región de Antofagasta, S.I.T. N°76, DGA, diciembre de 2001
5. Delimitación de acuíferos de vegas y bofedales de las regiones de Tarapacá y Antofagasta, S.D.T N°4, DGA, 1996
6. Resolución DGA N° 909 de 1996.
7. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones – Chile, S.I.T. N°51, Risacher F., 1999
8. Geografía de Chile, I.G.M., 1983
9. Balance Hídrico Nacional, DGA, 1987.

7. ANEXOS

Muestra N°	UTM			Fecha	T° C	pH	Cond uS/cm	Balance iónico (%)	Clasificación	Vía
	E	N	Altura							Evolutiva
C1	479152	8000971	4433	22-10-03	12.1	7.14	1328	6	Mg-Na-(Ca) / SO4-HCO3-Cl	SA
C2	479205	7999372		22-10-03	15.5	6.9	956	4	Mg-Na-(Ca) / SO4-(HCO3)-(Cl)	SA
C3	479340	7999073	4435	22-10-03	15.4	7.15	85.4	3	Na-Ca-(Mg) / HCO3-(SO4)-(Cl)	CB
C4	479435	7998717	4486	22-10-03	11.2	7.07	321	1	Mg-Na-(Ca) / SO4-HCO3-(Cl)	SA
C5	481267	8000578	4450.8	22-10-03	10.5	6.78	306	6	Na-Ca-Mg / HCO3-Cl-(SO4)	SA
C6	480384	8001519	4469	22-10-03	13.2	7.59	233	6	Ca-Na-(Mg) / HCO3-(Cl)-(SO4)	SA
C7	470669	7998782	4470	24-10-03	5.7	7.45	59.1	28	Na-Ca-(Mg) / HCO3-(Cl)-(SO4)	-
C8	475651	8000827	4435	24-10-03	13.80	7.49	114	6	Na-Ca / HCO3-(Cl)-(SO4)	CB
C9	475459	8007776	4316	24-10-03	12.90	8.22	1350	6	Na-Mg-(Ca) / HCO3-Cl-(SO4)	SA
C10	472895	8010117	4274	24-10-03	12.30	8.22	1460	2	Na-Mg-(Ca) / Cl-HCO3-SO4	SA
C11	475777	8008795	4294	24-10-03	16.60	8.19	1457	4	Na-Mg-(Ca) / Cl-SO4-HCO3	SA
C12	470336	8004895	4396	24-10-03	11.50	7.78	55	2	Ca-Na-(Mg) / HCO3-(Cl)	CB
C13	471132	8001886	4393	24-10-03	17.60	7.59	121	4	Na-Ca-(Mg) / HCO3-(SO4)-(Cl)	CB

SA = Vía Evolutiva Sulfatada Alcalina
CB = Vía Evolutiva Carbonatada

Tabla 7. Puntos de muestreo, clasificación química y vías evolutivas.

Muestra N°	As	B	CO3=	HCO3-	Cl-	SO4=	Ca++	Mg++	K+	Na+	NO3-	PO4-3	Li	SiO2	¹⁸ O	² H	STD
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	δ ^o /∞ SMOW	δ ^o /∞ SMOW	mg/l
C1	0.125	2	0.00	289.78	119.84	257.94	38.30	77.40	16.37	129.40	0.12	0.32	0.236	99.73	-15.67	-115.30	1036.5
C2	0.010	1	0.00	125.22	69.96	246.25	28.70	62.47	10.60	63.30	0.12	0.24	0.086	91.59	-15.56	-116.30	703.69
C3	0.008	1	0.00	30.41	3.81	9.24	4.10	2.07	4.35	6.71	0.02	0.20	0.004	84.35	-16.09	-120.80	148.46
C4	0.030	1	0.00	63.80	18.01	74.13	13.09	16.41	5.78	22.43	0.02	0.31	0.020	92.04	-15.81	-118.00	310.17
C5	0.004	1	0.00	103.75	27.36	27.94	19.95	10.61	6.50	28.70	0.10	0.42	0.064	106.51	-16.48	-121.50	338.33
C6	0.004	1	0.00	101.96	18.70	17.96	26.09	7.12	4.29	17.71	0.12	0.30	0.015	88.42	-16.21	-119.80	288.43
C7	0.002	1	0.00	26.24	4.85	6.51	3.20	0.86	1.10	6.40	0.05	0.07	0.006	65.04	-15.23	-118.30	116.97
C8	0.015	1	0.00	47.70	6.23	9.01	8.57	0.63	0.77	13.83	0.09	0.06	0.002	44.96	-14.09	-113.20	135.11
C9	0.100	4	0.00	370.28	207.81	77.27	62.72	58.21	14.94	139.97	0.08	0.16	0.280	80.73	-12.99	-106.30	1019.3
C10	0.090	3	0.00	311.85	196.38	223.74	55.50	71.22	19.22	149.48	0.09	0.18	0.347	78.92	-14.38	-110.30	1113.3
C11	0.110	3	0.00	299.92	186.33	241.98	56.40	74.37	19.72	148.08	0.14	0.23	0.351	85.71	-14.80	-112.40	1120.9
C12	0.007	1	0.00	93.02	3.12	1.00	13.27	4.57	2.79	12.98	0.05	0.06	0.016	55.82	-10.23	-93.20	189.14
C13	0.009	1	0.00	50.68	3.12	14.83	6.95	2.15	1.73	14.60	0.09	0.05	0.026	62.69	-12.38	-102.80	160.07

Tabla 8. Puntos de muestreo, análisis químicos y análisis isotópicos.