



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

**ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN HIDROLÓGICA E  
HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL SALAR DE  
MARICUNGA, III REGIÓN**

**REALIZADO POR:**

**DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

**S.D.T. N° 225**

**MARZO DE 2006**

## **Equipo de Trabajo**

Ing. Luis Rojas B.

Ing. Carlos Salazar M.

# INDICE

1. OBJETIVOS	3
2. ANTECEDENTES	3
3. DESCRIPCIÓN GENERAL	4
3.1 CUENCA DEL SALAR DE MARICUNGA	4
3.2 SUBCUENCA DE CIÉNAGA REDONDA	6
4. BALANCE HIDRICO	7
4.1 BALANCE EN RÉGIMEN NATURAL POR ZONAS Y ÁREAS DE INTERÉS	8
4.1.1 SUBCUENCA DE CIENAGA REDONDA	8
4.1.2 CUENCA DEL SALAR DE MARICUNGA	12
4.2 BALANCE CONSIDERANDO USOS	15
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	17
ANEXO	19

## 1. OBJETIVOS

El presente informe tiene como objetivo principal realizar un análisis de la situación hidrológica e hidrogeológica de la cuenca del Salar de Maricunga, ubicada en el altiplano de la tercera región.

Como objetivos específicos se plantean:

- Determinar el balance hídrico de la cuenca y de su subcuenca aportante desde el sur, denominada Ciénaga Redonda.
- Determinar la factibilidad de constituir nuevos derechos de aprovechamientos de aguas subterráneas correspondientes a las solicitudes ND-0302-455; ND-0302-456; ND-0302-555; ND-0302-556.
- Resolver las materias técnicas insertas en las oposiciones a dichas solicitudes.

## 2. ANTECEDENTES

Para la realización de la presente minuta se ha tenido en consideración los siguientes antecedentes:

- a.) Balance Hídrico de Chile. DGA, 1987
- b.) Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas I,II,III Regiones- Chile. SIT N° 51, 1999
- c.) Mapa Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Maricunga. Sernageomin 2000.
- d.) Informes Técnicos expedientes ND-0302-249; ND-III-262; ND-III-265
- e.) Diagnóstico Sobre Disponibilidad de Agua Subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Salar de Maricunga. INVEREX, sin fecha.
- f.) Estudio Hidrogeológico Ciénaga Redonda, II Región. Inversiones El Sauce S.A., enero 2001.
- g.) Minuta Técnica DARH Resumen, sin número
- h.) Topografía STRM del USGS de resolución 90m (aprox. Escala 1:100.000)
- i.) Google Earth.

La información contenida en estos antecedentes ha permitido caracterizar razonablemente la situación hidrogeológica de la zona de estudio, a partir de la cual se ha obtenido una evaluación cuantitativa de los recursos hídricos disponibles.

Específicamente el estudio f.), aportado por el titular de las solicitudes en cuestión, contiene una buena caracterización hidrogeológica de la subcuenca de Cienaga Redonda, apoyada principalmente en estudios geofísicos (gravimétricos y SEV), así como, una evaluación alternativa de la recarga de esta subcuenca basada en la metodología del Balance Hídrico de Chile de 1987, sin embargo, la estimación de flujos pasantes en un orden de 1.5 m<sup>3</sup>/s por una sección de paso en la Quebrada de Cienaga Redonda, principal argumento utilizado para justificar los caudales solicitados, no son consistentes con los resultados de la metodología anterior.

Por su parte el estudio e), aportado por el oponente, contiene una caracterización general de la zona basada en estudios anteriores, algunos de ellos presentes en el listado del presente informe, así como, una reinterpretación de pruebas de bombeo para la definición de constantes elásticas del acuífero de Cienaga Redonda, sin embargo, el principal argumento de oposición tiene relación con el balance hídrico de la cuenca, a partir del cual se establece que los derechos de agua actualmente constituidos coparían tanto la recarga a nivel de la subcuenca de Cienaga Redonda como en la totalidad de la Cuenca de Maricunga. En este caso, las principales inconsistencias se encuentran en el tratamiento dado a los derechos de aguas, ya sea porque en el balance de la cuenca del Salar de Maricunga se contabilizan derechos constituidos en la cuenca vecina de la Laguna del Negro Francisco, o porque no se aplican los criterios de la DGA respecto de los usos previsible.

De acuerdo con lo anterior, el presente informe consistirá en una caracterización del comportamiento hidrogeológico de Cienaga Redonda, en la realización de balances hídricos en condiciones naturales y con uso, así como la realización de balances a nivel de cuenca.

### **3. DESCRIPCION GENERAL**

#### **3.1 Cuenca del Salar de Maricunga**

La cuenca del salar de Maricunga es la segunda cuenca cerrada más grande de la Tercera Región después de la cuenca del Salar de Pedernales, sin embargo, su delimitación hidrológica presenta ciertas incertidumbres en su parte oriental. En el estudio b.-), se toman en consideración diferentes criterios geomorfológicos a partir de los cuales se deducen dos posibles delimitaciones hidrológicas, alcanzando posibles coberturas espaciales de 2200 y 3050 km<sup>2</sup> respectivamente. Por otra parte, el Balance Hídrico Nacional de 1987 establece sobre la base de cartografía IGM escala 1:500.000 un área total de 2620 km<sup>2</sup>.

Para efectos del presente informe se ha procedido a establecer la delimitación hidrológica sobre la base de la información topográfica digital dispuesta por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), equivalente a una resolución de escala 1:100.000. El área obtenida alcanza los 2550 km<sup>2</sup>, ver figura N°1.

Como se indicó anteriormente, la cuenca de Maricunga es de tipo endorreica y en su zona terminal contiene un salar tipo playa con numerosos cuerpos de agua salinos. La evaporación desde las zonas húmedas y lagunas cierra el balance hidrológico de la cuenca, no existen antecedentes que indiquen lo contrario. Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura de salar:	3760 m
- superficie del salar:	145 km <sup>2</sup>
- superficie de las lagunas:	6 km <sup>2</sup> (0,15 km <sup>2</sup> para la laguna Santa Rosa)
- precipitaciones:	120 mm/año
- evaporación potencial:	1200 mm/año
- temperatura media:	4°C

La geología de la cuenca es una variedad de formaciones volcánicas, rocas plutónicas y terrenos sedimentarios. El salar es una costra de halita (NaCl) y yeso (CaSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O) con pequeñas lagunas generalmente adyacentes a la orilla. Los principales aportes de aguas superficiales al salar están dados por 7 arroyos ubicados entre 4000 y 4500 m de altura y que se infiltran aguas abajo, alimentando napas subterráneas. Al extremo suroeste del salar existe una pequeña laguna independiente: la laguna Santa Rosa. Esta laguna descarga hacia el sector norte del salar por un canal cuyo caudal se incrementa con los aporte subterráneos hasta alcanzar en promedio los 163 l/s (SIT N° 51,1999), alimentando un complejo sistema lagunar. Ver figura N°2.

De acuerdo con el estudio SIT N°51 de 1999, las aguas de aporte al salar de Maricunga presentan una gran variedad de composiciones químicas. Sin embargo, reducidas a sus vías evolutivas, se distingue dos grandes grupos:

- aguas diluidas (STD < 1 g/l) de vía evolutiva sulfatada (y algunas de vía carbonatada) que deben sus componentes disueltos a la alteración de las rocas de la cuenca de drenaje.
- aguas salobres (1 < STD < 4 g/l) de vía evolutiva cálcica que han redissuelto antiguas salmueras residuales de tipo Na-Ca /Cl.

La laguna Santa Rosa, al sur del salar contiene los dos tipos de aguas, sulfatadas y cálcicas, reflejando así una gran complejidad hidrológica. Las salmueras del salar son todas de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl y pertenecen a la vía cálcica. Proviene de la evaporación de mezclas de aguas de aporte del sur y del este de la cuenca. El canal que une la laguna Santa Rosa con el salar recibe la mayor parte de su agua de vertientes difusas y vegas a lo largo de su curso. El rebalse de la laguna Santa Rosa contribuye poco a su caudal. Salmueras del extremo norte del salar parecen provenir

de aguas del sur del salar, lo que sugiere un movimiento general del flujo hacia el norte, posiblemente debido a una leve pendiente o inclinación de la cuenca de sur a norte.

Desde el punto de vista hidroquímico, se desprende que existe un aporte significativo de aguas subterráneas desde el este de la cuenca hacia el Salar, de tipo Na+Ca/Cl, que determina la composición final de las salmueras en las lagunas terminales del salar, alejándose de la composición sulfatada que tienen los aportes provenientes desde el sur de la cuenca. Esta misma conclusión se deduce a partir de la configuración de los afloramientos en el salar, los cuales se ubican principalmente entre la orilla este hasta el canal recolector situado al oeste del salar. Finalmente cabe señalar que la significancia de estos aportes se reflejan en el hecho de que a pesar de la alta tasa de evaporación los afloramientos generan un flujo permanente hacia el canal colector.

### **3.2 Subcuenca de Ciénaga Redonda**

La subcuenca de Cienaga Redonda tiene una extensión aproximada de 857 km<sup>2</sup> y aporta su escorrentía al Salar de Maricunga desde el sureste. Su red de drenaje posee una quebrada central de recorrido norte-sur conformado por un angosto valle central de algunos cientos de metros y aproximadamente 35 kilómetros de largo, que se desarrolla entre el límite hidrológico con la cuenca del Negro Francisco y su desembocadura a la cubeta terminal de la cuenca de Maricunga. El escurrimiento por la quebrada es intermitente, con sectores secos producto de la infiltración y sectores con escurrimiento superficial debido al afloramiento de parte de la recarga que no puede ser conducida por el acuífero. En estas singularidades hidrogeológicas, de origen estructural y litológico, se generan tramos con escurrimiento superficial permanente, en donde aparecen humedales que constituyen una importante fuente de evapotranspiración y que actúan como reguladores de la escorrentía total disponible hacia aguas abajo. Los principales aportes superficiales hacia la quebrada corresponden a los riachuelos Barros Negros y Villalobos, con caudales promedios que alcanzan los 74 y 42 l/s respectivamente.

Un aspecto particularmente relevante para el balance hídrico de la subcuenca de Cienaga Redonda, es su delimitación hidrogeológica con la cuenca de la Laguna del Negro Francisco. La quebrada del río Astaburuaga, perteneciente a la cuenca vecina, posee una dirección de drenaje de sureste a noreste hacia la cabecera de Cienaga Redonda, sin embargo, los flujos superficiales del río son desviados en su desembocadura en dirección sur, hacia la Laguna del Negro Francisco. Esta delimitación hidrológica es producto de la configuración topográfica generada por la acumulación preferencial de los flujos masivos de alta energía eyectados por la quebrada Astaburuaga sobre la cabecera de Cienaga Redonda. Niemeyer<sup>1</sup> reportó que en periodos de crecida parte del río rebalsa hacia Cienaga Redonda. De lo

---

<sup>1</sup> Niemeyer, H. 1968. Estudio de las cuencas cerradas de la cuenca de Copiapó. Ministerio de Obras Publicas y Transportes, Dirección de Riego

anterior, se desprende que la cabecera del valle constituye un sector litológico continuo situado entre ambas cuencas, y por tanto la delimitación hidrogeológica no necesariamente coincide con la hidrológica.

Desde el punto de vista geoquímico, los flujos superficiales salientes desde Ciénaga Redonda hacia la cubeta del salar, tienen vía evolutiva sulfatada neutra y son coherentes con la composición litológica de su cuenca superficial predominantemente volcánica. No obstante, se destaca el hecho que la vertiente occidental sea la que aporta la mayor parte del SO<sub>4</sub>. La vertiente oriental, compuesta por rocas volcánicas más puras, produce aguas carbonatadas y sulfatadas alcalinas, con bajo y moderado contenido de SO<sub>4</sub> respectivamente. Ver figura N° 3

#### **4 BALANCE HIDRICO**

Dada la naturaleza endorreica del sistema hídrico, y a que los derechos en cuestión se localizan dentro de la subcuenca de Ciénaga Redonda, el análisis se efectúa de acuerdo a zonas convenientemente delimitadas, de modo de definir la disponibilidad de aguas, tanto a nivel local como a nivel de la cuenca completa.

Se presentan los resultados de un análisis hidrológico en condiciones de régimen natural, que comienza con la cuantificación de la escorrentía total disponible por zonas, superficial y subterránea, así como, la evaporación desde el salar que cierra el balance hídrico. Posteriormente se realiza un nuevo balance en el que se incluye todos los usos asociados a los derechos constituidos sobre la cuenca.

En relación con los antecedentes hidrológicos se ha utilizado la caracterización de precipitaciones y de evapotranspiración del estudio f.), que considera la información hidrológica regional hasta el año 1999. Así mismo, se utiliza el promedio aritmético de la estadística fluviométrica disponible, sin descontar los usos existentes, de los cuales no se tiene antecedentes.

En las tablas números 1 a la 4 del Anexo se presentan los derechos de agua constituidos y en trámite, superficiales y subterráneos, que anteceden a los derechos de agua solicitados en la cuenca de Maricunga. En ellas se indican también los derechos de agua constituidos y en trámite en la cuenca de la Laguna del Negro Francisco, sólo con el objeto de aclarar su exclusión en el balance de la cuenca del Salar de Maricunga.

En la figura N° 4 se presenta un mapa con la zonificación propuesta, las cuales han sido definidas por criterios hidrológicos e hidrogeológicos. En este sentido, la justificación para definición de la zona Z0 radica en que aún cuando es parte de la cuenca de la Laguna del Negro Francisco ésta aporta escorrentía subterránea hacia la cabecera de Ciénaga Redonda. La zona Z1 define la subcuenca de cabecera de Ciénaga Redonda y se prolonga hasta un poco después de las estaciones fluviométricas de Barros Negros antes junta con Valle Ancho y Valle Ancho antes

junta con Barros Negros. La zona Z2 corresponde a la subcuenca baja de Ciénaga Redonda y se extiende hasta su desembocadura, en las cercanías de la estación fluviométrica Valle Ancho en Barrera. La zona Z3, corresponde al resto de la cuenca aportante al salar de Maricunga, descontada la subcuenca de Ciénaga Redonda. Finalmente, la zona Z4 corresponde al área del Salar.

En el mismo gráfico n°4, se incluye también un detalle con la ubicación de los pozos con derechos de agua subterránea constituidos y en trámite, detallados en las tablas del anexo. Respecto de los derechos de agua superficiales, la ubicación y los caudales involucrados se encuentran asociados a las estaciones fluviométricas próximas.

#### 4.1 Balance en Régimen Natural por Zonas y Áreas de Interés

##### 4.1.1 Subcuenca de Ciénaga Redonda

###### 4.1.1.1 Zona Z1

###### 4.1.1.1.1 Recarga

Un primer parámetro hidrológico para establecer el balance de la zona Z1 corresponde a la escorrentía subterránea aportante desde la zona Z0, para ello, en primera instancia, se ha calculado la escorrentía total generada por Z0 de acuerdo con el siguiente cuadro:

Z0							
Banda de Altura msnm	Area Km2	Altura Promedio msnm	Temp °C	Precipitación mm	Evapotransp mm	Escorrentía	
						mm	m3/s
4200-4400	5.8	4300	-0.1	130	124.5	5.5	0.001
4400-4600	35.4	4500	-1.5	150	135.4	14.6	0.016
4600-4800	47.6	4700	-2.9	170	140.5	29.5	0.045
4800-5000	91.8	4900	-4.3	190	137.3	52.7	0.153
5000-5200	20.5	5100	-5.7	210	123.2	86.8	0.056
5200-5400	4.4	5300	-7.1	230	96.0	134.0	0.019
<b>TOTAL</b>	<b>205.5</b>						<b>0.291</b>

La escorrentía obtenida resulta comparable respecto a los 340 l/s de caudal medio registrado en la estación fluviométrica "Río Astaburuaga en el Cono", situada a la salida de la zona Z0. Lo anterior permite asumir que el aporte subterráneo por esta vía hacia Ciénaga Redonda es poco significativo. Sin perjuicio de lo anterior, la situación cambia a partir del momento en que el río ingresa a los sedimentos de la cabecera de la cuenca de Ciénaga Redonda y se desvía hacia la Laguna del Negro Francisco, por cuanto comienza un proceso de infiltración hacia el acuífero, que por razones de continuidad litológica y cota, podrían constituir algún aporte subterráneo hacia Ciénaga Redonda.

Se han utilizado dos metodologías para estimar el orden de magnitud de este posible aporte subterráneo hacia Ciénaga Redonda; un cálculo directo por medio de parámetros hidrogeológicos, y en forma indirecta, mediante una determinación de la escorrentía total generada. En ambos casos el sector de interés corresponde al de emplazamiento de los pozos de expedientes señalados en d.), situados entre 2 y 4 km aguas abajo de la delimitación hidrológica.

*i. Flujo pasante*

Utilizando la información incluida en los expedientes indicados, los parámetros hidrogeológicos recopilados para el cálculo son:

- Gradiente Hidráulico  $i = 0.0027$ , obtenido a partir de la cota piezométrica de los pozos.
- Transmisibilidad  $T = 3245 \text{ m}^2/\text{día}$ , promedio estimado según pruebas de bombeo
- Ancho del Valle  $L = 800 \text{ m}$ , obtenido de la cartografía disponible

El flujo subterráneo pasante, según estos datos, alcanza los 80 l/s.

En la figura n° 5, sobre un perfil topográfico del sector se ilustra la situación hidrogeológica descrita con anterioridad.

*ii. Escorrentía Total Cabecera Ciénaga Redonda*

En el cuadro siguiente se detalla el cálculo correspondiente, y en la Figura N°6, se indica el área de aporte considerada.

CABECERA CIENAGA REDONDA							
Banda de Altura msnm	Area Km2	Altura Promedio msnm	Temp °C	Precipitación mm	Evapotransp mm	Escorrentía	
						mm	m3/s
4200-4400	7.3	4300	-0.1	130	124.5	5.5	0.001
4400-4600	15.1	4500	-1.5	150	135.4	14.6	0.007
4600-4800	21.8	4700	-2.9	170	140.5	29.5	0.020
4800-5000	20.2	4900	-4.3	190	137.3	52.7	0.034
5000-5200	5.3	5100	-5.7	210	123.2	86.8	0.015
5200-5400	0.6	5300	-7.1	230	96.0	134.0	0.002
<b>TOTAL</b>	<b>70.3</b>						<b>0.080</b>

Respecto de estos resultados, se puede indicar que el aporte subterráneo desde la cuenca de la Laguna del Negro Francisco no sería significativo en condiciones de régimen natural, por cuanto el flujo pasante se explicaría debido a la escorrentía total generada dentro de la cabecera de Ciénaga Redonda. Sin perjuicio de lo anterior, cabe señalar

también, tal cual se indicó con anterioridad, que dicha condición es producto de una situación de equilibrio piezométrico cercana a la delimitación hidrológica y a la desembocadura del río Astaburuaga en cabecera, pero que podría cambiar drásticamente bajo una condición de explotación intensiva en el sector.

Ahora bien, la recarga propia de la zona Z1 (incluido el sector de cabecera), queda determinada según la tabla siguiente:

Z1							
Banda de Altura msnm	Area Km2	Altura Promedio msnm	Temp °C	Precipitación mm	Evapotransp mm	Escorrentía	
						mm	m3/s
4000-4200	48.7	4100	1.3	110	109.5	0.5	0.001
4200-4400	108.2	4300	-0.1	130	124.5	5.5	0.019
4400-4600	127.3	4500	-1.5	150	135.4	14.6	0.059
4600-4800	91.2	4700	-2.9	170	140.5	29.5	0.085
4800-5000	63.6	4900	-4.3	190	137.3	52.7	0.106
5000-5200	28.6	5100	-5.7	210	123.2	86.8	0.079
5200-5400	18.3	5300	-7.1	230	96.0	134.0	0.078
<b>TOTAL</b>	<b>485.9</b>						<b>0.427</b>

#### 4.1.1.1.2 Descargas

Las descargas se producen a través de la evapotranspiración de los humedales y por las descargas superficiales y subterráneas hacia la zona Z2.

En Z1 existen dos sectores con cobertura significativa de humedales, a los cuales se les ha denominado H1 y H2, de 2.1 y 1 km<sup>2</sup> respectivamente. Utilizando una tasa de evapotranspiración media anual de 0.5 l/s/Há, la evaporación alcanzaría los siguientes valores:

Humedal	Area (km <sup>2</sup> )	Evapotranspiración (l/s)
H1	2.1	104
H2	1	49
<b>TOTAL</b>	<b>3.1</b>	<b>153</b>

#### 4.1.1.1.3 Balance

Despejada de la ecuación de balance, la escorrentía total de salida de Z1 queda definida por:

$$E_{ts} = 427 - 153 = 274 \text{ l/s}$$

De éste caudal, 130 l/s corresponden a la suma de los caudales medios controlados en las estaciones de control Barros Negros y Valle Ancho, y 144 l/s a la escorrentía subterránea hacia la zona Z2.

#### 4.1.1.2 Zona Z2

##### 4.1.1.2.1 Recargas

Las recargas corresponden a la escorrentía total saliente desde Z1 (274 l/s), más la escorrentía generada dentro de Z2 que esta determinada según la siguiente tabla:

Z2							
Banda de Altura msnm	Area Km2	Altura Promedio msnm	Temp °C	Precipitación mm	Evapotransp mm	Escorrentía	
						mm	m3/s
3800-4000	12.5	3900	2.7	90	91.9	0.0	0.000
4000-4200	116.7	4100	1.3	110	109.5	0.5	0.002
4200-4400	76.5	4300	-0.1	130	124.5	5.5	0.013
4400-4600	55.3	4500	-1.5	150	135.4	14.6	0.026
4600-4800	47.6	4700	-2.9	170	140.5	29.5	0.045
4800-5000	26.9	4900	-4.3	190	137.3	52.7	0.045
5000-5200	20.7	5100	-5.7	210	123.2	86.8	0.057
5200-5400	15.0	5300	-7.1	230	96.0	134.0	0.064
<b>TOTAL</b>	<b>371</b>						<b>0.251</b>

##### 4.1.1.2.2 Descarga

Las descargas naturales se producen a través de un humedal situado en las cercanías de la desembocadura de la Q. de Cienaga Redonda, al cual denominaremos H3. Este humedal tiene una extensión de aproximadamente 0.6 km<sup>2</sup> y produce una pérdida por evapotranspiración de 28 l/s.

##### 4.1.1.2.3 Balance

Despejando desde la ecuación de balance, la escorrentía total de salida de la zona Z2 esta definida por:

$$Ets = +274 + 251 - 28 = 497 \text{ l/s}$$

De los cuales, 25 l/s corresponden al caudal medio superficial de la estación de control fluviométrico Valle Ancho en Barrera, y 472 l/s como flujo pasante subterráneo.

El siguiente cuadro resume el balance efectuado por zonas dentro de la subcuenca de Cienaga Redonda, y en la figura N° 7, se ilustra un perfil

topográfico sobre la línea de drenaje principal de la subcuenca, con la condición hidrogeológica de los flujos de agua que han sido establecidos:

ZONA	Entradas (l/s)				Salidas (l/s)			
	Superf	Subt	Recarga	TOTAL	Evaptr	Superf	Subt	TOTAL
Z1	0	0	427	427	153	130	144	427
Z2	130	144	251	525	28	25	472	525

#### 4.1.2 Cuenca del Salar de Maricunga

##### 4.1.2.1 Zona Z3

##### 4.1.2.1.1 Recarga

Las recargas corresponden a la escorrentía total saliente de la zona Z2 (497 l/s), más la escorrentía generada dentro de Z3 determinada según la siguiente tabla:

Z3							
Banda de Altura msnm	Area Km2	Altura Promedio msnm	Temp °C	Precipitación mm	Evapotransp mm	Escorrentía	
						mm	m3/s
3600-3800	133.5	3700	4.1	70	72.6	0.0	0.000
3800-4000	384.0	3900	2.7	90	91.9	0.0	0.000
4000-4200	239.1	4100	1.3	110	109.5	0.5	0.004
4200-4400	258.8	4300	-0.1	130	124.5	5.5	0.045
4400-4600	234.9	4500	-1.5	150	135.4	14.6	0.109
4600-4800	111.4	4700	-2.9	170	140.5	29.5	0.104
4800-5000	80.6	4900	-4.3	190	137.3	52.7	0.135
5000-5200	39.6	5100	-5.7	210	123.2	86.8	0.109
5200-5400	25.3	5300	-7.1	230	96.0	134.0	0.107
5400-5600	13.4	5500	-8.5	250	55.5	194.5	0.082
5600-5800	9.6	5700	-9.9	270	4.0	266.0	0.081
5800-6000	7.1	5900	-11.3	290	53.8	236.2	0.053
6000-6200	5.8	6100	-12.7	310	112.6	197.4	0.036
6200-6400	5.6	6300	-14.1	330	168.5	161.5	0.029
<b>TOTAL</b>	<b>1548</b>						<b>0.894</b>

De esta manera la recarga total hacia la zona Z3 alcanza los 1391 l/s.

##### 4.1.2.1.2 Descarga

No existen descargas naturales significativas en esta zona y la escorrentía de salida se asume igual a la de entrada.

##### 4.1.2.1.3 Balance

Et ent = Et sal = 1391 l/s

#### 4.1.2.2 Zona Z4

Esta zona corresponde al área de salar con 145 km<sup>2</sup>, incluido 6 km<sup>2</sup> de lagunas. No existen antecedentes que indiquen la existencia de otra salida alternativa a la evaporación, toda la esorrentía afluente proveniente de la zona Z3 se evapora.

Cabe señalar que dentro de los antecedentes presentados en el estudio e.-), se indica que la evaporación desde el salar alcanzaría los 1518 l/s, superior en 10% a los 1391 l/s de esorrentía final estimada para el presente informe.

No obstante la similitud indicada anteriormente, en adelante se realiza un análisis complementario tendiente a corroborar si los cálculos anteriores son consistentes con algunos antecedentes reconocidos sobre evaporación desde salares.

- Evaporación desde las áreas de lagunas.

De acuerdo con el balance hídrico salino efectuado en el estudio SIT N° 51 de 1999, la evaporación del sistema lagunar es de aproximadamente 190 l/s (figura N°2).

- Evaporación desde el salar.

En general, se puede señalar que para determinar apropiadamente la evaporación desde el suelo en un salar se requiere la realización de estudios "in situ", debido a que la naturaleza de éste fenómeno depende de muchos factores que son difíciles de aislar, dentro de los cuales se destacan por su importancia: la profundidad de la napa, la salinidad del agua, las características de los sedimentos (granulometría, tipos de sales precipitadas, etc) y la evaporación potencial, que a su vez, depende de las variables meteorológicas. En este sentido, algunos estudios experimentales en salares específicos han logrado establecer aproximaciones mediante relaciones empíricas entre la evaporación desde el suelo y la profundidad de la napa, atendida la homogeneidad de los sedimentos. Uno de estos estudios corresponde al efectuado por Mardones en el Salar de Ascotan<sup>2</sup>, para el cual se obtuvo la siguiente relación lineal:

$$Z \text{ (m)} = -0,2262 * E_s \text{ (mm/día)} + 0,7226$$

En donde:

Z = profundidad de la napa

E<sub>s</sub> = Evaporación desde el suelo

---

<sup>2</sup> L. Mardones, 1997. Flux et Evolution des Solutions Salines dans les Systèmes Hydrologiques des Salars D'Ascotan et D'Atacama

Si bien esta relación es válida sólo para el Salar de Ascotan, es posible extrapolar su aplicación sobre otros salares en la medida que existan características similares significativas. En el siguiente cuadro resumen se comparan algunas de las principales características presentes en las cuencas del Salar de Ascotán y de Maricunga, y que se relacionan directamente con el balance Hídrico.

		Maricunga	Ascotan
altura de salar:	msnm	3716	3760
superficie de la cuenca:	km <sup>2</sup>	1757	2600
superficie del salar:	km <sup>2</sup>	243	145
superficie de las lagunas	km <sup>2</sup>	18	6
precipitaciones:	mm/año	100-150	120
evaporación potencial:	mm/año	1630	1200
temperatura media:	°C	5.8	4
Salmuera	Tipo	Na+Ca/Cl	Na+Ca/Cl

Como se puede observar, la evaporación potencial no es del todo coincidente y obliga el ajuste del modelo de evaporación ya que es una de las variables directamente relacionada con la evaporación desde el suelo, sin embargo, otras características relacionadas con la conformación de los sedimentos poseen una excelente coincidencia, como su composición mineralógica debida a la similar calidad química de las aguas de aporte y salmueras, y la similitud geología y morfología de ambas cuencas de aporte, todo lo cual permite la realización de un análisis cuantitativo, de carácter referencial, respecto de la evaporación.

El factor de ajuste para la evapotranspiración potencial queda determinado por:

$K = E_{vtp} \text{ Maricunga} / E_{vtp} \text{ Ascotan} = 0.74$ , luego la tasa de evaporación desde el suelo del Salar de Maricunga se obtendría a partir de,

$$E_s = ((0.7226 - Z)/0.2262) 0.74 = (0.7226 - Z)/0.30726$$

O bien,

$$Z \text{ (m)} = -0.30726 E_s \text{ (mm/día)} + 0.7226,$$

en donde Z es la profundidad de la napa.

A partir de esto, considerando que el área del salar de Maricunga es de 139 km<sup>2</sup> (descontado el sistema lagunar), y que la evaporación por este concepto es de 1201 l/s, diferencia entre la escorrentía afluente y la evaporación desde las lagunas, la profundidad media de la napa para la cual el sistema se encuentre en equilibrio estará dada por :

$$Z(m) = -0.30726 (1201/139000000) 86400 + 0.7226$$

$$Z(m) = 0.49 \text{ m}$$

Por otro lado, si la profundidad de la napa se encontrara a sólo 0.20 m, se requeriría un área de 61 km<sup>2</sup> para evaporar 1201 l/s, calculada según lo siguiente:

$$0.2 = -0.30726 (1201/As) 86400 + 0.7226$$

$$As = 61 \text{ km}^2$$

Esto permite concluir que 1201 l/s de evaporación desde el suelo del salar es una cifra razonable, sobre todo si al menos un tercio del salar mantiene una condición de orilla activa, definida por niveles muy cercanos a la superficie, es decir, dentro del orden de 20 cm.

Consecuentemente con lo anterior y tal como se indicó en su oportunidad, la condición de orilla activa, se deduce de la continuidad de afloramientos existentes entre el borde este y el canal recolector situado en el extremo oeste del salar.

Con el objeto de ilustrar lo indicado, en las figuras N° 8 y 9 se indica el detalle e interpretación de un perfil transversal dentro del salar, utilizando topografía del USGS, STRM(90m), escala 1:100.000 y la imagen satelital del Google Earth.

## 4.2 Balance considerando Usos

Conforme al listado de los derechos superficiales y subterráneos de Tablas N°s 1, 2, 3 y 4 del Anexo, en el siguiente cuadro se indica el caudal comprometido por cada una de las zonas definidas en el presente estudio. Para el caso de los derechos superficiales el caudal comprometido corresponde al 100% del valor nominal entregado en derecho, y para el caso de los derechos de aguas subterráneas se ha considerado un uso previsible del 75% del valor nominal.

Valores en l/s		DERECHOS CONSTITUIDOS			USOS PREVISIBLES		
ZONA	TIPO USO	SUPERFICIALES	SUBTERRÁNEOS	TOTAL	SUPERFICIALES	SUBTERRÁNEOS	TOTAL
1	MIN	80	258	338	80	194	274
2	MIN	45	200	245	45	150	195
3	MIN	315	523	838	315	392	707
4	MIN	0	0	0	0	0	0
TOTAL		440	981	1421	440	736	1176

A partir de estos valores es posible efectuar el balance por zonas en una condición de uso intensivo y en régimen permanente, sin embargo, para ello se requiere de

mayor rigurosidad que aplicar una metodología basada en la simple suma y resta de entradas y salidas, por cuanto, como se ha indicado anteriormente, el acuífero de Ciénaga Redonda posee particularidades hidrogeológicas que producen modificaciones en los componentes del balance en un escenario de explotación intensiva, tales como:

- i. Modificación de la recarga a la Z1. La condición de equilibrio, en régimen permanente, de la delimitación hidrogeológica en cabecera puede ser modificada por una variación piezométrica inducida desde las extracciones intensivas situadas en su cercanía, aumentando la recarga hacia la zona 1.
- ii. La existencia de singularidades de origen estructural y litológicas que:
  - a. Restringen el flujo pasante y producen afloramientos permanentes de agua, que a su vez, alimentan coberturas significativas de humedales.
  - b. Sectores con altas tasa de infiltración de agua, generalmente situados aguas abajo de los humedales, que producen una rápida desaparición de los cursos superficiales excedentes.

Las condiciones a) y b), le dan al acuífero un comportamiento sectorizado y pseudo independiente entre tramos situados aguas arriba y aguas abajo de un humedal. Es decir, una extracción aguas arriba captará e impactará en primera instancia la escorrentía que alimenta el humedal, disminuyendo su cobertura debido a una menor surgencia. Si el caudal extraído alcanza un orden de magnitud similar o superior a la evapotranspiración total del humedal, entonces el gradiente hidráulico del acuífero es afectado, y el flujo subterráneo de salida disminuye.

A estas dos particularidades hidrogeológicas del acuífero, hay que agregar un tercer aspecto que tiene relación con el área de captura de un pozo. En este caso, antecedentes como el gradiente hidráulico del acuífero, gradiente de terreno, y las características y ubicación de una captación, pueden ser suficientes para estimar razonablemente el área de captura, y con ello, la subcuenca de aporte. En primera instancia, se puede decir que la profundidad de habilitación constituye la cota mínima y el límite físico para que se pueda producir una inversión de flujo hacia aguas arriba. Para el caso específico de la batería de pozos ubicada en la cabecera de Ciénaga Redonda, la cota mínima de habilitación es de aproximadamente 4180 m, que llevada a la topografía de terreno coincide con el inicio de la surgencia que alimenta el humedal H1 en condiciones de régimen natural, sin embargo, bajo condiciones de explotación, la captura del flujo pasante de 80 l/s produce el decaimiento de la napa hacia aguas abajo de las captaciones, hasta lograr el equilibrio con la disminución de evapotranspiración en el humedal. Con ello, la cota real de inversión de flujo se ubicaría hacia aguas arriba y cercana a las captaciones. Si el caudal extraído por esta batería de pozos supera el caudal pasante de 80 l/s, el excedente necesariamente debe provenir de la cuenca del Negro Francisco, conforme con el mecanismo indicado en el punto 1.) anterior, ver figura N°10.

Estos antecedentes permiten definir el balance general de la cuenca en los siguientes términos:

ZONA	Entradas (l/s)				Salidas (l/s)				
	Superf	Subt	Recarga	TOTAL	Evaptr	Usos	Superf	Subt	TOTAL
Z1	0	114	427	541	73	274	50	144	541
Z2	50	144	251	445	0	195	0	250	445
Z3	0	250	894	1144	0	707	0	437	1144
Z4	0	437	0	437	247	190(*)	0	0	437

(\*) Uso in situ correspondiente a la evaporación desde las lagunas

En la figura N° 11, se ilustra un perfil topográfico, sobre la línea de drenaje principal de la subcuenca de Cienaga Redonda, con la condición hidrogeológica de los flujos establecidos en condición de uso intensivo.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con estos resultados existiría una disponibilidad de 194 l/s de escorrentía renovable, que podrían ser convertidos en derechos de agua sobre las solicitudes ND-0302-455; ND-0302-456; ND-0302-555; ND-0302-556. Estos 194 l/s corresponden a 144 l/s de escorrentía subterránea y 50 l/s de escorrentía superficial que sobrepasa las estaciones de control Barros Negros y Valle Ancho. Los 50 l/s de escorrentía superficial indicados, se hacen parte de la disponibilidad subterránea por cuanto se infiltran poco antes de llegar al sector de los pozos.

En el caso de comprometer la totalidad de los recursos indicados, se dan las condiciones para la declaración de agotamiento del recurso superficial en esta fuente en atención a la particularidad del sistema hidrogeológico.

Del mismo modo la constitución de los derechos anteriormente señalados, coparía la disponibilidad para nuevos derechos en la Q. de Cienaga Redonda, por cuanto la escorrentía excedente ascendería a sólo 56 l/s (250 l/s – 194 l/s), y tendrían por finalidad entregar un marco de seguridad al sostenimiento del sistema lagunar en la zona terminal de la cuenca. Este hecho también genera las condiciones que hacen recomendable la declaración de área de restricción para esta subcuenca.

Sin perjuicio de lo anterior se estima que la evaluación de derechos adicionales a los indicados requerirá la necesaria modelación del sistema hidrogeológico en condición transiente, en donde el almacenamiento del acuífero jugará un rol fundamental.

## **ANEXO**

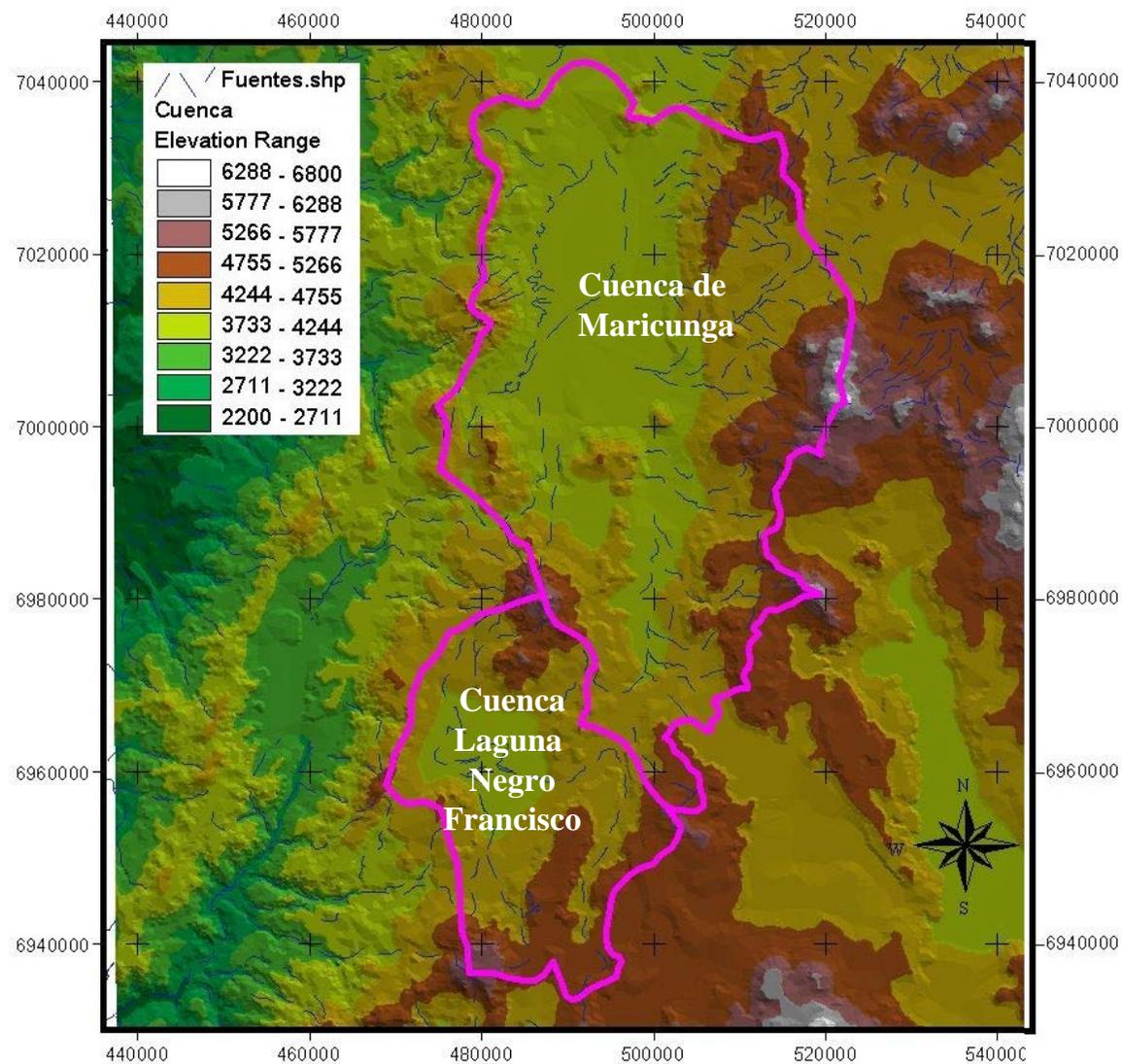


Figura N°1 Delimitación Hidrológica Cuenca del Salar de Maricunga y Cuenca Laguna del Negro Francisco.

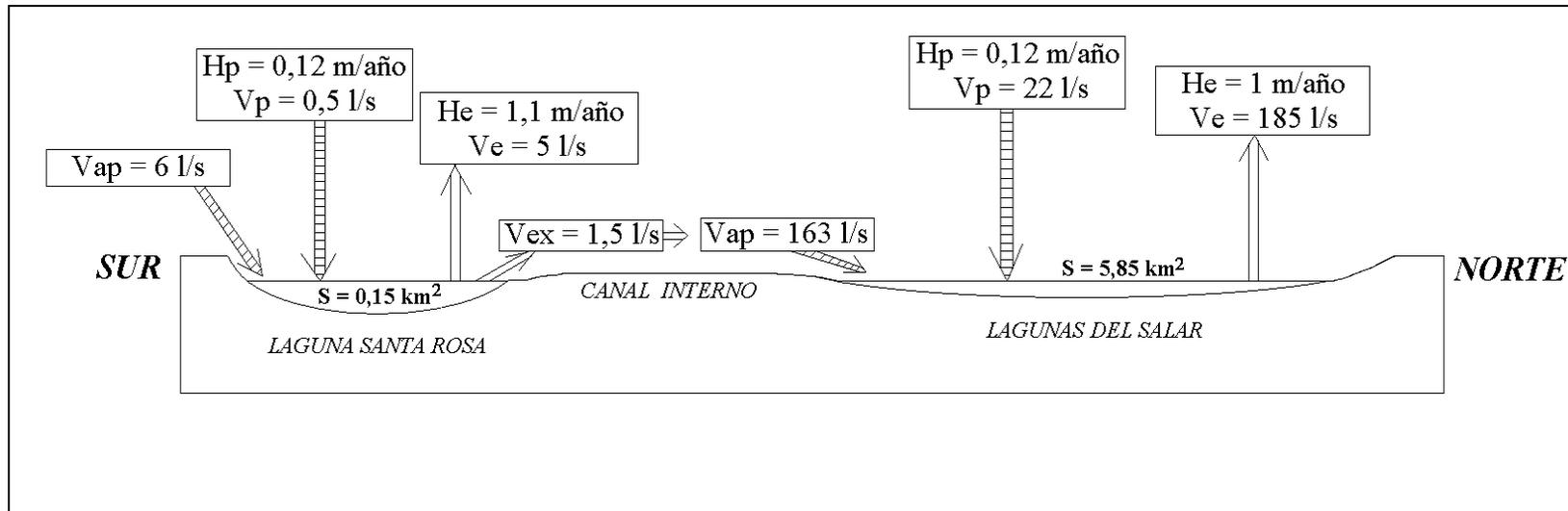


Figura N°2 Balance hídrico de las lagunas del salar de Maricunga.

En donde:

- $S$  : superficie de la laguna (en  $\text{m}^2$ )
- $H_e$  : altura de evaporación potencial (en  $\text{m/año}$ )
- $H_p$  : altura de las precipitaciones (en  $\text{m/año}$ )
- $V_e = SH_e$  : volumen de agua evaporada desde la superficie (en  $\text{m}^3/\text{año}$ )
- $V_p = SH_p$  : volumen de precipitaciones sobre la superficie (en  $\text{m}^3/\text{año}$ )
- $V_{ap}$  : volumen de los aportes por la cuenca de drenaje (en  $\text{m}^3/\text{año}$ )



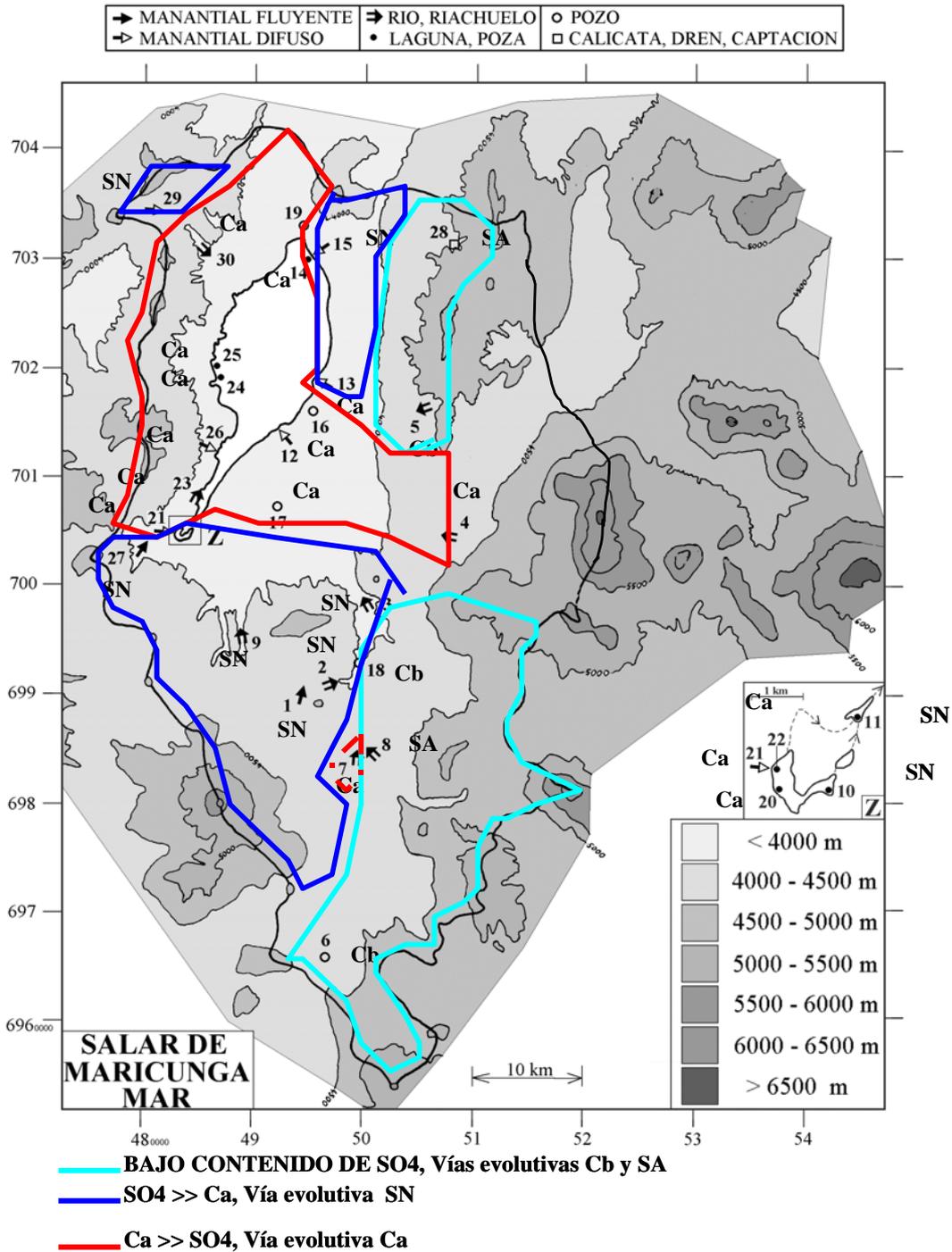


Figura N° 3 Vías Evolutivas de las aguas de la cuenca del Salar de Maricunga. Modificado de Risacher , SIT N°51.

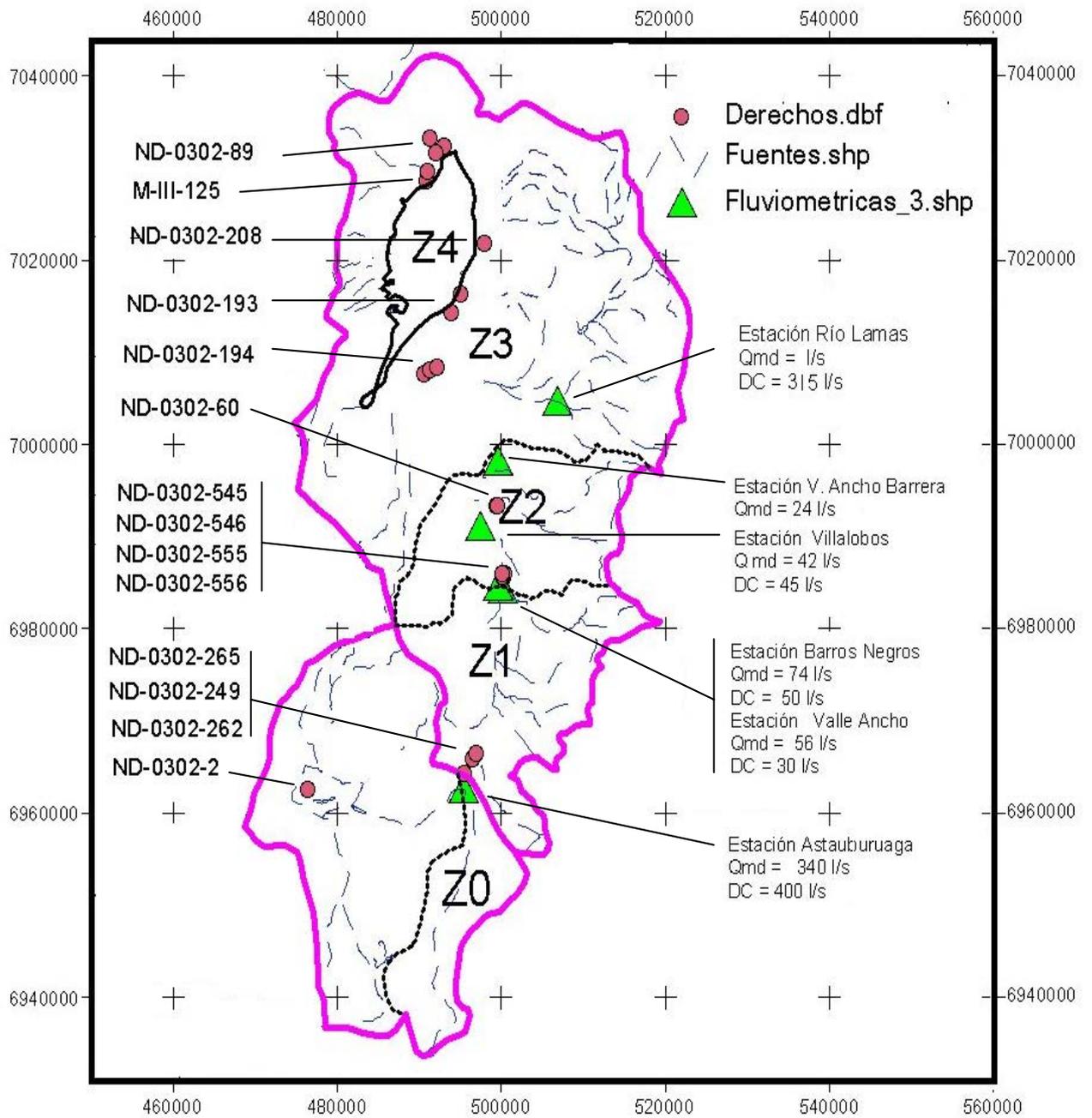


Figura N°4 Zonificación propuesta para el Balance de la Cuenca de Maricunga y ubicación Derechos de Agua Constituidos y en trámite

DELIMITACION HIDROLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA EN CIENAGA REDONDA  
CUENCAS DE LA LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO Y MARICUNGA

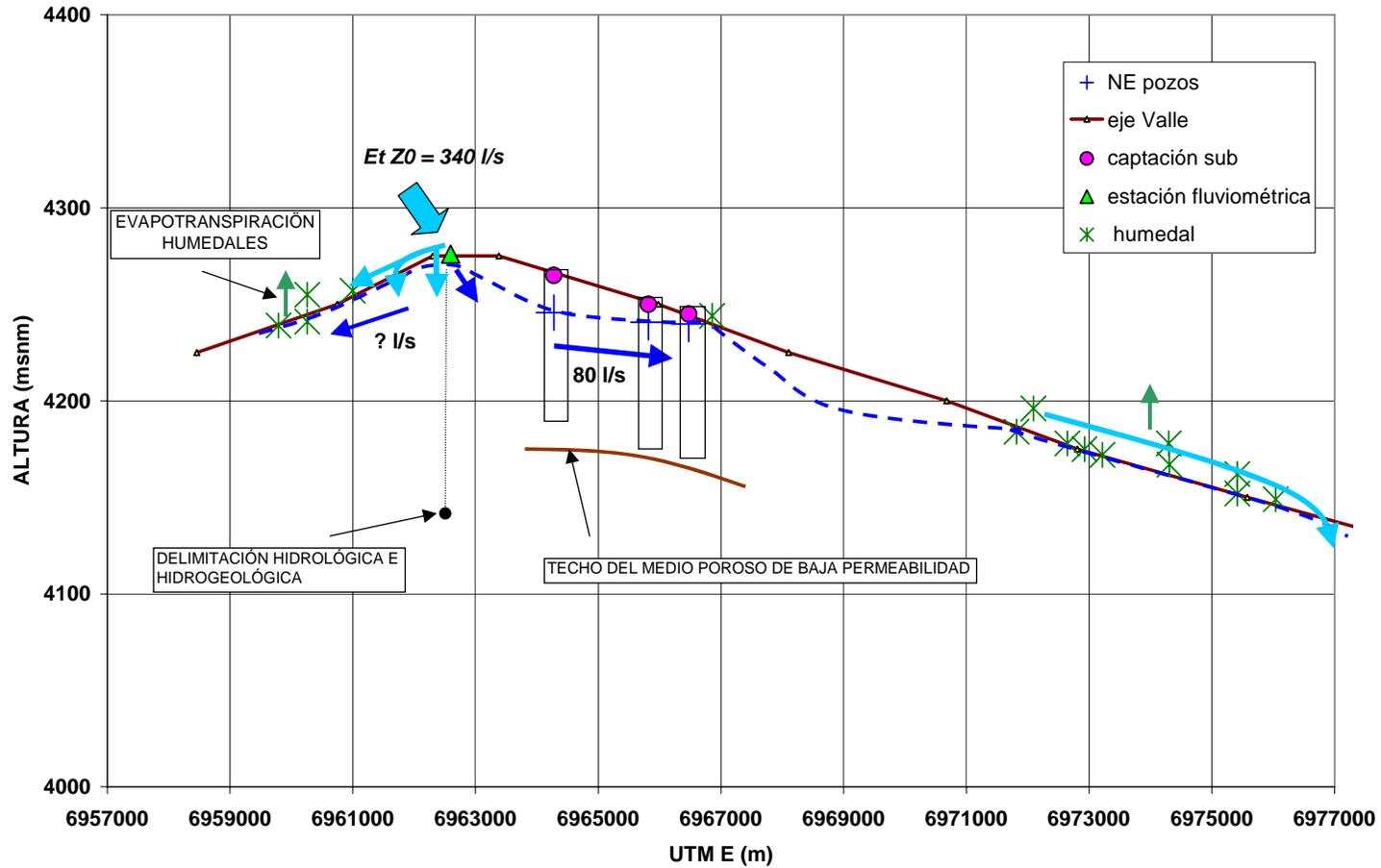


Figura N°5 Situación Hidrogeológica de Cabecera en Cienaga Redonda. Régimen natural

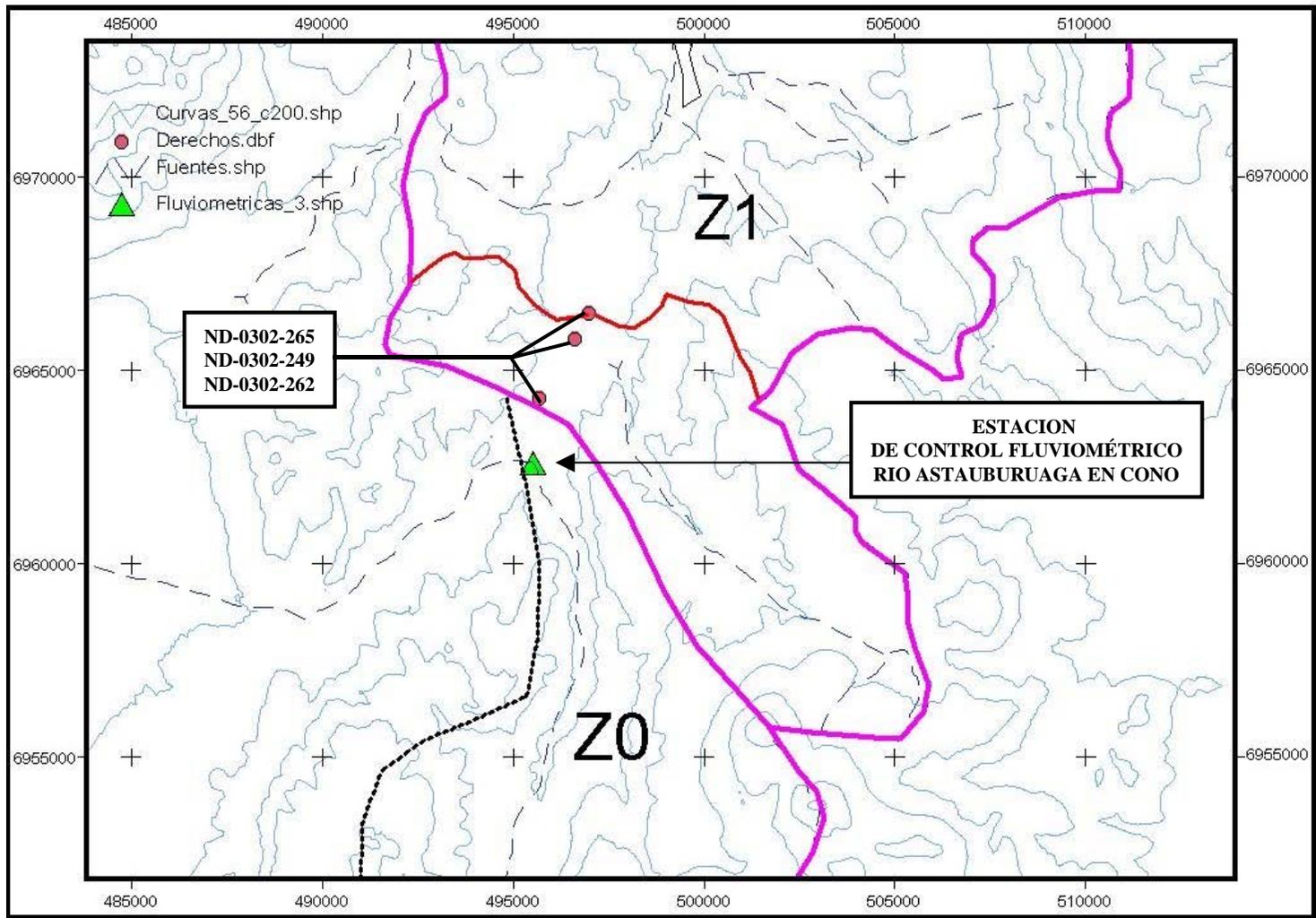


Figura N° 6 Área de recarga sector de pozos en cabecera de Q. Ciénaga Redonda

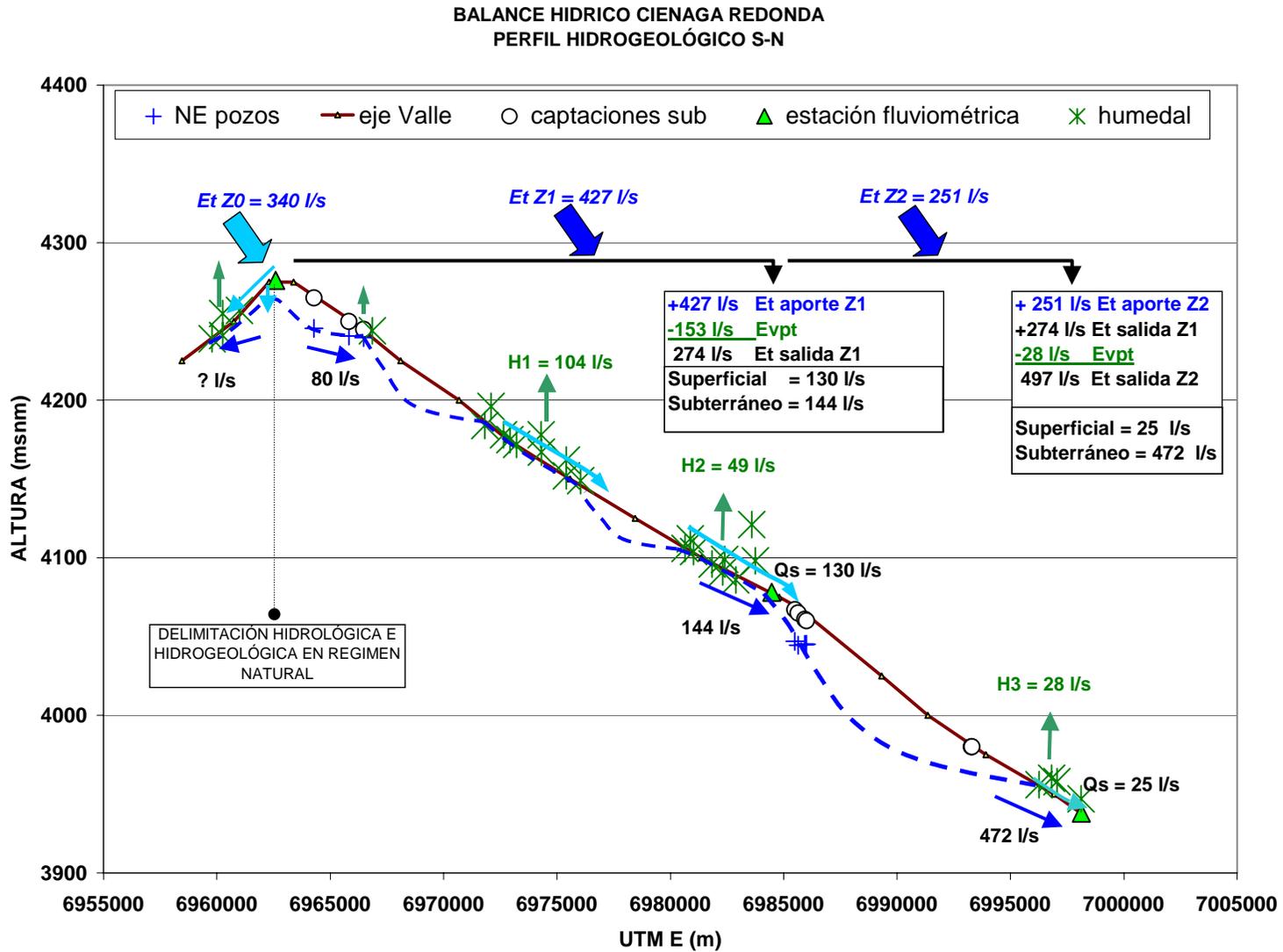


Figura N° 7 Perfil Topográfico ilustrativo de flujos en Ciénaga Redonda. Régimen natural

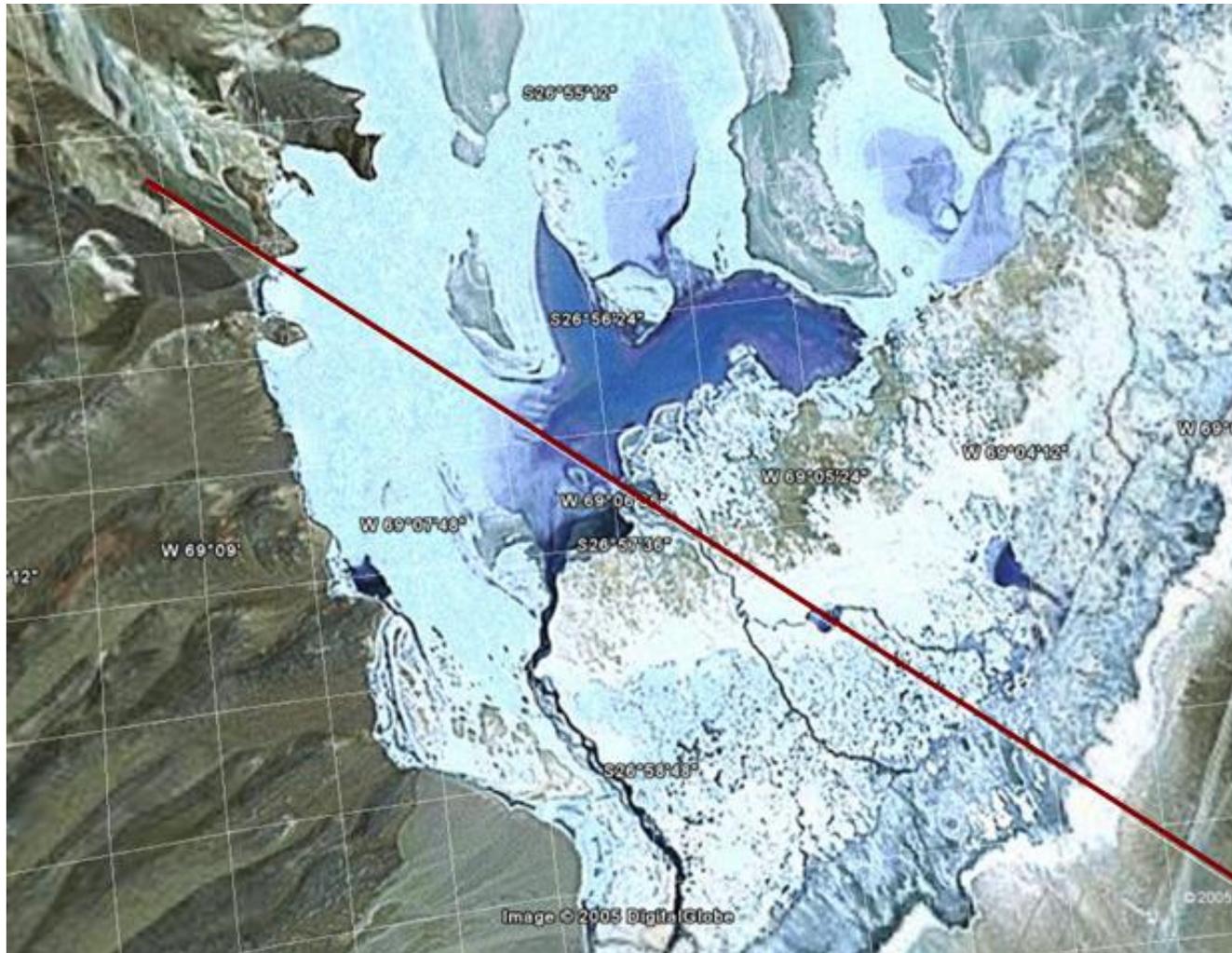


Figura N°8 Trazado perfil transversal NW-SE en el Salar de Maricunga

### EJE TRANSVERSAL SALAR NW-SE

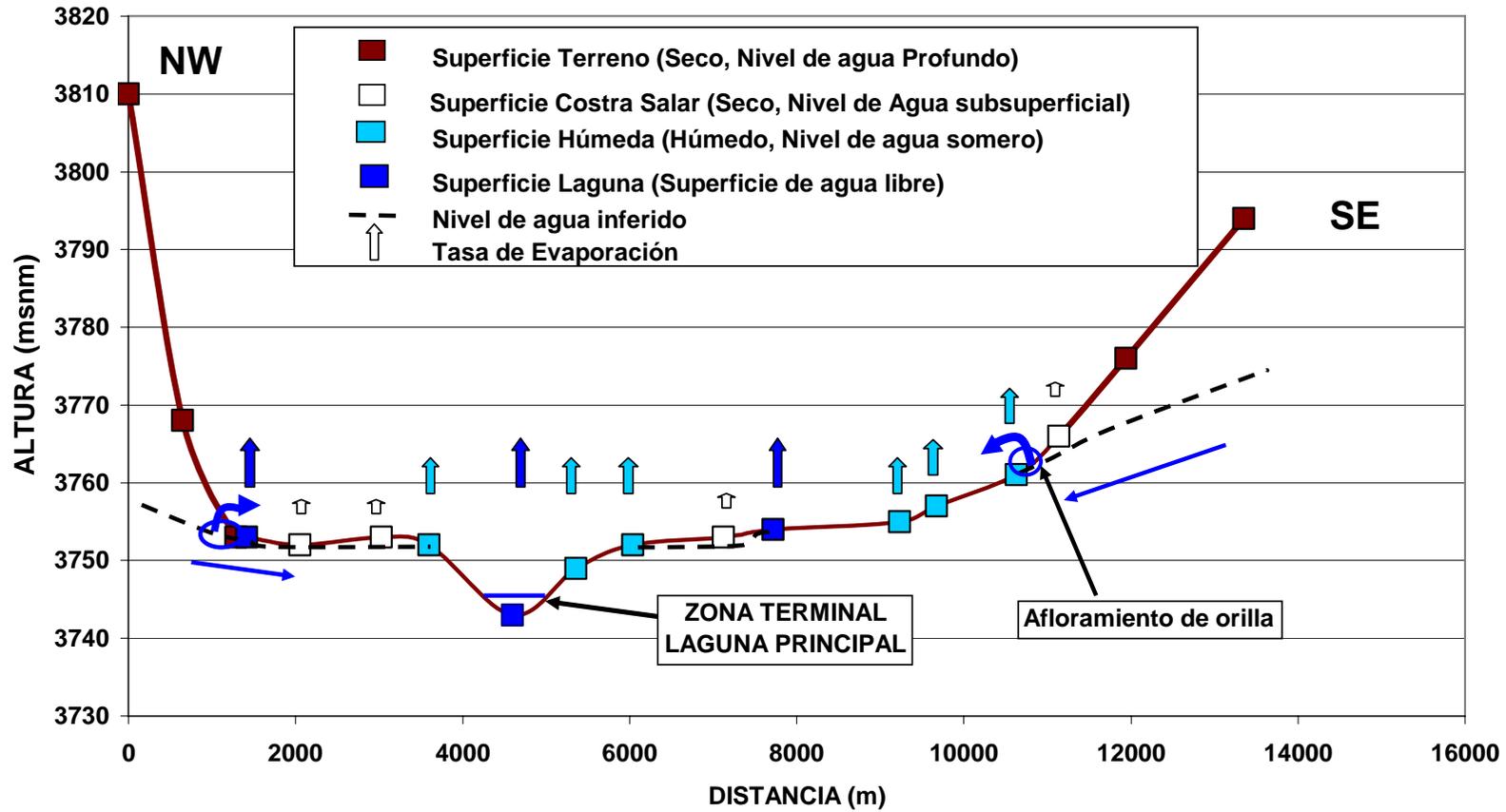


Figura N° 9 Perfil de la situación hidrogeológica en un perfil transversal del salar de Maricunga.

**SITUACION HIDROGEOLÓGICA EN LA CABECERA DE CIENAGA REDONDA  
BAJO REGIMEN DE EXPLOTACIÓN**

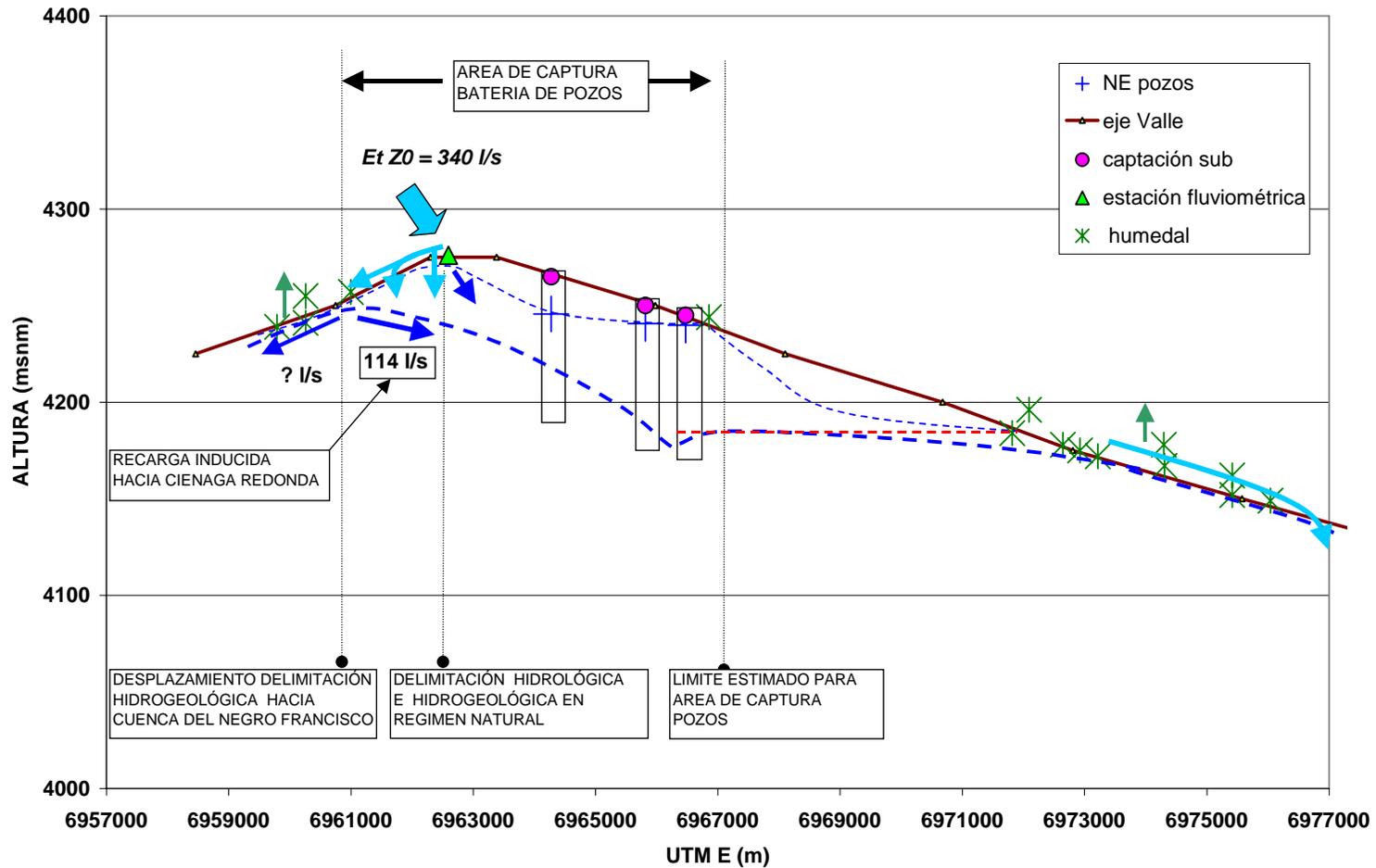


Figura N° 10 Situación Hidrogeológica en Cabecera de Ciénaga Redonda. Uso intensivo

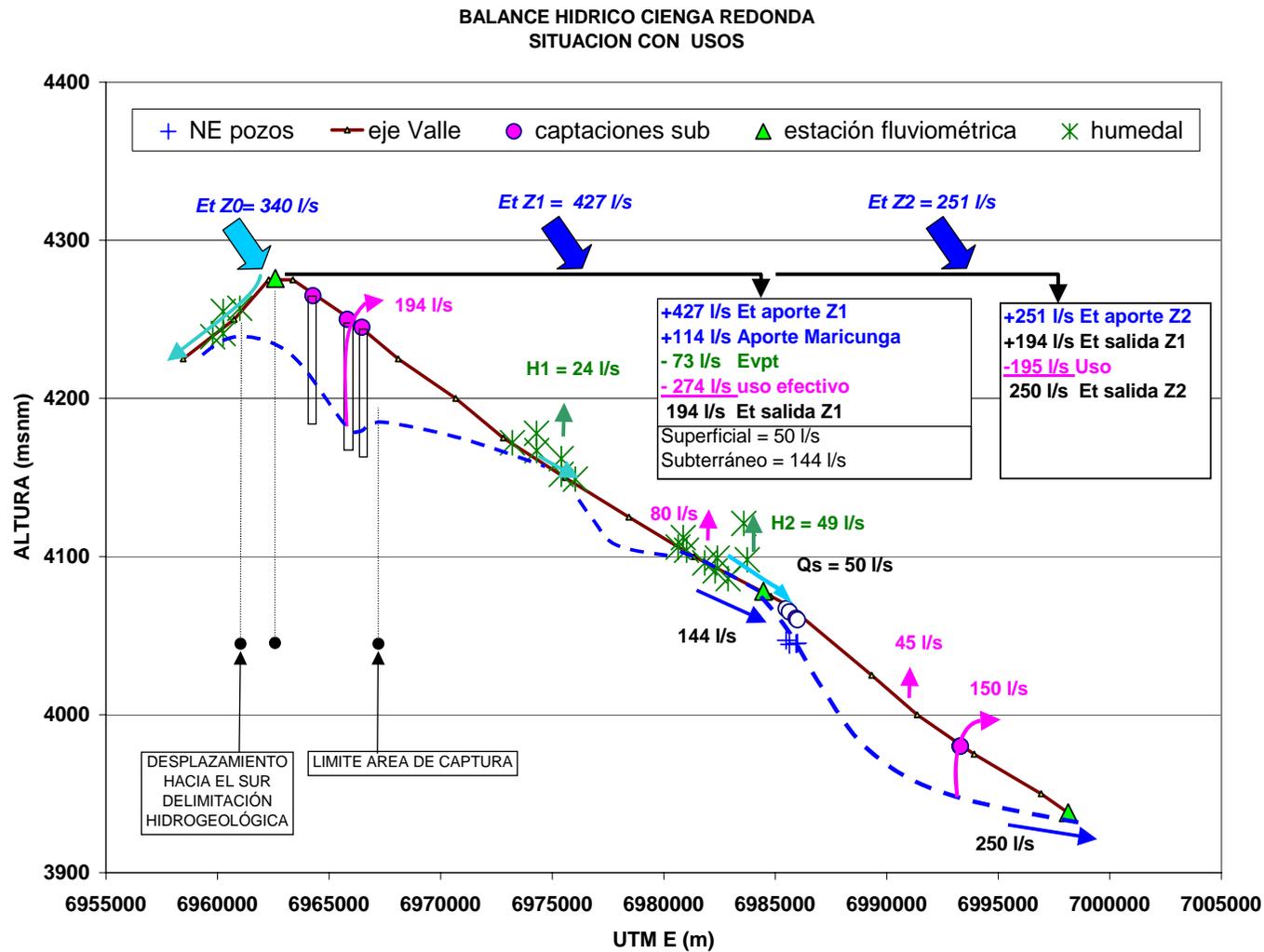


Figura N° 11 Perfil Topográfico ilustrativo de flujos en Ciénaga Redonda. Uso intensivo.

### Tabla N°1

CUENCA DEL SALAR DE MARICUNGA DERECHOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS CONSTITUIDOS Y EN TRAMITE							
EXPED.	PETICIONARIO	UTM (E)	UTM (N)	CAUDAL (l/s)	Res	FECHA	ESTADO
M-III-125	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	491000	7028650	20	176	06.03.90	A
ND-0302-60	CIA. MINERA ANGLO COMINCO LTDA.	499559	6993300	100	163	27.04.89	A
ND-0302-60	CIA. MINERA ANGLO COMINCO LTDA.	499658	6993274	100	163	27.04.89	A
ND-0302-89	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	493204	7032428	25	542	21.08.90	A
ND-0302-89	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	492144	7031614	30	542	21.08.90	A
ND-0302-89	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	491489	7033304	1	542	21.08.90	A
ND-0302-89	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	491131	7029661	30	542	21.08.90	A
ND-0302-193	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	494000	7014252	50	658	23.11.90	A
ND-0302-193	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	495151	7016398	50	658	23.11.90	A
ND-0302-194	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	490652	7007701	100	659	23.11.90	A
ND-0302-194	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	491451	7008050	100	659	23.11.90	A
ND-0302-194	CIA. MINERA MANTOS DE ORO	492295	7008332	55	659	23.11.90	A
ND-0302-208	CHEVRON MINERA CORPORATION OF CHILE	498052	7021792	62	244	04.07.91	A
ND-0302-249	MINERA BERNA GOLD LTDA.	496661	6965817	108	284	24.07.92	A
ND-0302-262	MINERA BERNA GOLD LTDA.	495703	6964275	105	283	24.07.92	A
ND-0302-265	MINERA BERNA GOLD LTDA.	497025	6966473	45	282	24.07.92	A
ND-0302-545	INVERSIONES EL SAUCE LTDA	500395	6985490	120			P-DARH
ND-0302-546	INVERSIONES EL SAUCE LTDA	500500	6986000	30			P-DARH
ND-0302-555	INVERSIONES EL SAUCE LTDA	500315	6985930	40			P-DARH
ND-0302-556	INVERSIONES EL SAUCE LTDA	500320	6985635	170			P-DARH
ND-0302-556	INVERSIONES EL SAUCE LTDA	500315	6985930	170			P-DARH
TOTAL				1511			

### Tabla N°2

CUENCA LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO DERECHOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS CONSTITUIDOS Y EN TRAMITE							
EXPED.	PETICIONARIO	UTM (E)	UTM (N)	CAUDAL (l/s)	Res	FECHA	ESTADO

**Tabla N°3**

CUENCA DEL SALAR DE MARICUNGA DERECHOS DE AGUA SUPERFICIALES CONSTITUIDOS								
EXPED.	PETICIONARIO	FUENTE	UTM (E)	UTM (N)	CAUDAL (l/s)	Res	FECHA	ESTADO
M-3-259	CIA. MINERA ANGLO COMINCO LTDA.	RIO LAMAS	SI	SI	300	225	13.07.83	A
M-3-259	CIA. MINERA ANGLO COMINCO LTDA.	Q. BARROS NEGROS	SI	SI	50	225	13.07.83	A
M-3-259	CIA. MINERA ANGLO COMINCO LTDA.	Q. VILLALOBOS	SI	SI	45	225	13.07.83	A
M-3-259	CIA. MINERA ANGLO COMINCO LTDA.	Q. COLORADO	SI	SI	15	225	13.07.83	A
M-3-259	CIA. MINERA ANGLO COMINCO LTDA.	Q. C. REDONDA SUR	SI	SI	30	225	13.07.83	A
					TOTAL	440		

**Tabla N°4**

CUENCA LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO DERECHOS DE AGUA SUPERFICIALES CONSTITUIDOS								
EXPED.	PETICIONARIO	FUENTE	UTM (E)	UTM (N)	CAUDAL (l/s)	Res	FECHA	ESTADO
M-III-12 (M-3-258)	CIA. MINERA ANACONDA LTDA.	RIO ASTABURUAGA	SI	SI	200	278	04.08.83	A
M-3-259	CIA. MINERA ANGLO COMINCO LTDA.	RIO ASTABURUAGA	SI	SI	200	225	13.07.83	A
					TOTAL	400		