

**INFORME TÉCNICO DARH N° 198**

**EVALUACIÓN DE LA OFERTA DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN EL SECTOR ACUÍFERO PICA**

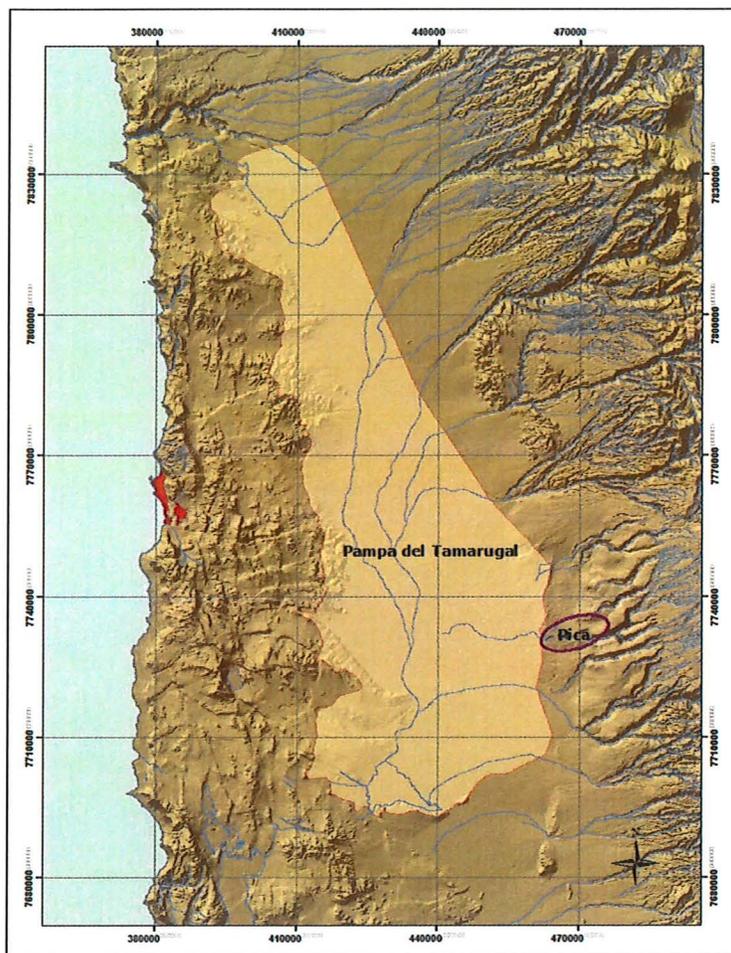
Santiago, 29 de agosto de 2018

**1.- OBJETIVO.**

El presente informe tiene por objetivo definir y evaluar la oferta del recurso hídrico subterráneo en el sector de la localidad de Pica, para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

**2.- ANÁLISIS.**

El área de estudio comprende las localidades de Pica y Matilla, al Este del sector acuífero Pampa del Tamarugal, donde se concentran solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, ver Figura 1.



**Figura 1.** Ubicación sector Pica respecto del sector Pampa del Tamarugal.



## 2.1 Antecedentes.

En el Informe "Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal I Región", SIT N° 48 de 1998, la Dirección General de Aguas establece que:

- Las aguas del acuífero de PICA corresponden mayoritariamente a un mismo cuerpo de agua, que evoluciona a partir de una condición inicial de alta temperatura, baja conductividad y bajo contenido de <sup>18</sup>O.
- Su zona de recarga se encuentra situada en la zona alta de la Formación Altos de Pica.
- La existencia de vertientes que descargan desde los Altos de Pica hacia el Salar del Huasco, definen la existencia de una delimitación hidrológica entre ambas cuencas.
- La edad relativa del acuífero subterráneo del Salar del Huasco es similar al que presentan las zonas terminales de los sistemas endorreicos, indicando la existencia de una condición de impermeabilidad para la cubeta contenedora del acuífero. Luego, es posible sostener que no existe comunicación con características de recarga hacia el sector acuífero PICA.
- Se define para el acuífero de PICA, un límite inferior de la recarga de -12 SMOW para el contenido de <sup>18</sup>O, lo que determina una altura mínima de recarga de 3.479 metros para el acuífero de PICA.
- Bajo estas condiciones y la utilización de la relación precipitación-escorrentía del estudio JICA-DGA, se establece que la recarga para el sector PICA es del orden de los 250 l/s.

Posteriormente, en el Informe "Levantamiento de información hidrogeológica para la modelación del acuífero de Pica, cuenca de la Pampa del Tamarugal, Región de Tarapacá", SIT N°294 de 2012, realizado por GHD para la Dirección General de Aguas, se recopila la información existente, se define y caracteriza las unidades de acuíferos principales, se realiza una caracterización hidrológica e hidrogeológica, se ejecutan prospecciones geofísicas, TEM y gravimetría, se realiza catastro de pozos, de nivel y calidad de aguas subterráneas, y se desarrolla un modelo conceptual del sector.

Este último Informe conforma la base de información que permite a este Servicio definir en este Informe el sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pica, Figura 12, y la disponibilidad de recurso hídrico para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

## 2.2 Caracterización hidrológica e hidrogeológica del sector.

A continuación se presenta un resumen de la caracterización hidrológica e hidrogeológica del sector en análisis realizada en el Informe de 2012, que permiten comprender el comportamiento de la recarga del acuífero de Pica.

### Clima

Desde los 1.000 y hasta los 2.500 m.s.n.m. se desarrolla un clima desértico normal caracterizado por una masa de aire estable y seca que provoca una gran aridez, una humedad atmosférica baja que favorece una alta tasa de evaporación, y una alta oscilación térmica diaria.

Al Este de esta zona y hasta los 3.500 m.s.n.m. se presenta un clima desértico marginal de altura, que se caracteriza por presentar una masa de aire inestable que por efectos de la altura produce nubosidad que da origen a precipitaciones durante casi todos los veranos. La temperatura promedio en los meses más cálidos es de 14°C y en los más fríos de 9°C, con una alta oscilación térmica diaria.

Por sobre los 3.500 m.s.n.m. se desarrolla un clima de estepa de altura que se caracteriza por presentar bajas temperaturas, las cuales no sobrepasan los 5°C de promedio anual, con una gran amplitud térmica entre el día y la noche. Las bajas temperaturas, especialmente en los meses fríos, producen congelamiento de los cuerpos de agua existentes en la zona. En este tipo de clima el aire es muy seco, y a pesar de las bajas temperaturas, se produce una evaporación intensa tanto de aguas superficiales como de hielo y nieve.

## Precipitación

La Tabla 2 muestra la información de precipitación obtenida a partir de los datos de las estaciones meteorológicas vigentes de la Dirección General de Aguas, más próximas al área de estudio, ver Tabla 1, pero que se encuentran situadas fuera de la cuenca Pica-Matilla.

N°	Estación	Código BNA	UTM		Altitud (msnm)
			Norte	Este	
1	Iquique	01820001-5	7.764.260	381.308	50
2	Huara en Fuerte Baquedano	01700010-1	7.773.836	421.635	1.100
3	Guatacondo DGA	02113005-2	7.685.876	495.262	2.460
4	Cerro Colorado	01740002-9	7.781.275	471.737	2.510
5	Parca	01740001-0	7.787.125	478.731	2.650
6	Mamiña	01750003-1	7.780.115	477.548	2.730
7	Coposa	01700009-8	7.710.041	531.847	3.760
8	Huaytani	01042002-4	7.788.402	544.924	3.950
9	Coyacagua	01050007-9	7.782.608	520.130	4.013
10	Lagunillas	01730018-0	7.795.860	517.064	4.020
11	Ujina	01080001-3	7.680.944	538.722	4.300

**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas seleccionadas.

Estación	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
Iquique	50	0,3	0,1	0,0	0,0	0,4	0,0	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	1,3
Huara En Fuerte Baquedano	1.100	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
Guatacondo	2.460	11,1	3,5	2,7	0,0	0,1	0,8	1,0	0,8	0,1	0,1	0,0	0,5	19,8
Cerro Colorado	2.510	8,2	5,1	3,0	0,3	0,0	0,4	0,5	2,6	0,1	0,0	0,2	0,4	19,6
Parca	2.650	9,2	11,7	4,8	0,2	0,0	0,3	0,9	0,8	0,3	0,2	0,0	1,2	27,8
Mamiña	2.730	10,0	10,0	5,1	0,4	0,0	0,0	0,5	2,3	0,7	0,1	0,0	1,2	28,9
Coposa	3.760	38,0	38,1	13,1	1,4	0,7	2,9	3,5	0,6	0,4	0,3	0,7	4,0	100,1
Huaytani	3.950	46,7	47,9	26,7	3,9	0,3	0,9	1,1	0,7	1,2	0,6	3,6	11,1	135,7
Coyacagua	4.013	48,9	47,8	22,1	1,9	0,6	1,1	0,8	1,6	1,4	1,2	2,4	11,0	134,1
Lagunillas	4.020	51,3	43,8	21,3	1,9	0,3	0,7	1,2	1,6	1,0	1,0	2,3	11,8	129,7
Ujina	4.300	60,0	54,6	19,6	1,4	1,4	3,6	1,3	6,7	2,6	1,9	2,2	14,9	156,1

**Tabla 2.** Precipitación media mensual y anual.

Se observa que las estaciones ubicadas sobre los 3.500 m.s.n.m. registran una precipitación media anual cercana a los 130 mm anuales, mientras que las ubicadas bajo esta cota presentan valores significativamente menores que bordean los 25 mm anuales.

## Evaporación

La información que se dispone de las estaciones cercanas al área de estudio, corresponde a datos de evaporación diaria para las estaciones Coyacagua, Ujina, Huara en Fuerte Baquedano, Lagunillas y Cerro Colorado.

Los datos de evaporación anual indican un déficit entre lluvia y precipitación del orden de 1.700 – 2.100 mm en la zona altiplánica (Coyacagua, Ujina, Lagunillas), y >2.500 mm en las áreas bajas del valle central (Huara, Cerro Colorado).

Los datos mensuales para las estaciones Coyacagua y Cerro Colorado indican que las tasas de evaporación en la región son más altas en verano, del orden de 250 mm/mes y más bajas en invierno, del orden de 150 mm/mes.

## Temperatura

Sólo tres de las estaciones meteorológicas analizadas (Tabla 1) presentan información de temperatura; éstas son las estaciones Coyacagua, Lagunillas y Cerro Colorado.

Las estaciones ubicadas a mayor altitud, sobre los 3.500 m.s.n.m., Coyacagua y Lagunillas, registran una mayor oscilación térmica entre los meses más cálidos, con temperaturas medias que bordean los 8°C y los más fríos, que alcanzan los 0°C.

La estación Cerro Colorado, a su vez, presenta una temperatura media mensual cercana a los 15°C, con una baja oscilación térmica estacional.

Respecto a la oscilación térmica diaria, ésta es importante, presentando temperaturas máximas que bordean los 20°C en el día y las temperaturas cercanas a 0°C en la noche.

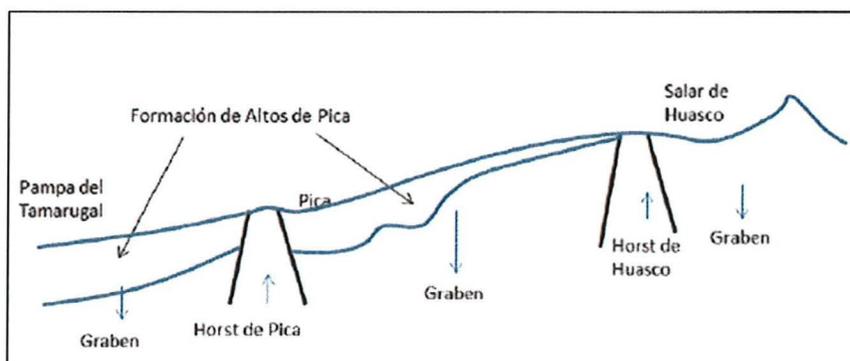
## Hidrología

La cuenca de Pica-Matilla, conformada por la Quebrada de Quisma, presenta escurrimientos de agua subterránea y cursos superficiales esporádicos que nacen en la Cordillera de los Andes y fluyen hacia el Oeste. En su mayoría éstos desaparecen antes de llegar a la Pampa del Tamarugal debido a las altas tasas de evaporación e infiltración, lo que no sucede en el caso de aquellas quebradas que drenan sectores altos de la Pampa del Tamarugal, como el sector de Altos de Pica, donde las quebradas poseen una red de flujo bien definida.

Las estaciones fluviométricas vigentes de la Dirección General de Aguas, próximas al área de estudio, y que corresponden a las estaciones Vertiente El Ermitaño, Vertiente Huasco Norte y Río Guatacondo en Copaquire, están ubicadas en la cabecera de la Pampa fuera de la cuenca Pica-Matilla.

## Geología

En general, la geología de la zona en estudio se compone de roca basal (formación Longacho) que han sido levantadas y deformadas por la actividad tectónica. Esto ha dado lugar a una serie de estructuras Horst y Graben, orientadas de Norte a Sur. En el área de estudio, los depósitos sedimentario y volcánico sedimentario de la formación de Altos de Pica han llenado una cuenca que es el resultado de un confinamiento delimitado por el Horst de Pica en el Oeste y el Horst de Huasco por el Este, ver Figura 3.



**Figura 3:** Diagrama conceptual de la geología estructural del área en estudio.

Las rocas de la Formación Altos de Pica afloran a través de la mayor parte del área de estudio. En la zona inferior Oeste del área en estudio (M1c y M3t en la Figura 4). En la zona inferior Oeste del área de estudio, estas rocas están cubiertas por depósitos relativamente jóvenes (cuaternario): depósitos fluviales y eólicos.

Descripción de estas unidades geológicas principales, de la más joven a la más antigua:

**Cuaternario:** Las acumulaciones de sedimentos cuaternarios se originaron durante períodos definidos de depósito y erosión. Una gran parte del área de estudio corresponde a depósitos cuaternarios (Qe) de origen eólico, dunas de arenas finas y medias.

Los depósitos cuaternario-recientes son acumulaciones de materiales aluviales y eólicos gruesos e irregulares, que ocupan, sobre todo, los sectores occidentales de la región.

En el área de Pica, los depósitos cuaternarios generalmente tienen un espesor menor de 30 m (DGA 1998). En el área de estudio estos depósitos no son significativos con respecto del almacenamiento de agua subterránea.

**Altos de Pica:** La formación Altos de Pica es la más ampliamente distribuida en la región y la de más interés hidrogeológico.

Se estima que la unidad es de edad terciaria superior a pleistocena y ha sido dividida en tres miembros continentales sedimentarios distinguidos con los números 1, 3 y 5, y dos miembros integrados principalmente por tobas soldadas, el 2 y el 4 (ver Tabla 3).

Las rocas sedimentarias constituyen la acumulación de materiales clásticos gruesos formados por la erosión de las montañas al Este. Las rocas piroclásticas riolíticas (tobas soldadas) de los miembros 2 y 4 son fases de unidades ignimbríticas formadas por flujos piroclásticos y ceniza (Galli 1962).

<b>Miembro</b>	<b>Litología</b>		<b>Unido (Galli 1962)</b>	<b>Unido (SERNAGE-OMIN 2004)</b>
Miembro 5	Galli 1962	Areniscas, conglomerados, bolones redondeados (espesor estimado 200 m)	TQa5	M1c
	SERNAGE-OMIN 2004	Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas		
Miembro 4	Galli 1962	Tobas riolíticas, ignimbríticas. Con fenoclastos de pumicita y cristalinos visibles a ojo desnudo (espesor estimado 23 m)	TQa4	M3t
	SERNAGE-OMIN 2004	Secuencias piroclásticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso		
Miembro 3	Galli 1962	Areniscas amarillentas media a gruesa, conglomerados (espesor estimado 173 m)	TQa3	MP1c
	SERNAGE-OMIN 2004	Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas.		
Miembro 2	Galli 1962 SERNAGE-OMIN 2004	Tobas riolíticas, ignimbríticas andesíticas (espesor estimado 17 m) Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso	TQa2	OM3t
Miembro 1	Galli 1962	Areniscas, conglomerados (espesor estimado 322 m)	TQa1	OM1c
	SERNAGE-OMIN 2004	Secuencias sedimentarias continentales parálicas o aluviales; conglomerados, areniscas, lutitas, calizas y montes de carbón.		

**Tabla 3:** Litología de la Formación Altos de Pica.



El afloramiento de esta formación se muestra en el mapa geológico como unidades M3t (secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderos de colapso) y M1c (secuencias sedimentarias de abanicos aluviales o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas).

Sumados los espesores parciales de los cinco miembros medidos en lugares distintos, el total es de aproximadamente 735 m (Galli 1962). Esta teoría se ha fundamentado en la observación de perforaciones en regiones cercanas y no representa la potencia real y máxima de la Formación. Las prospecciones geofísicas (SIT 294 de 2012) indican que la formación Altos de Pica tiene un espesor máximo de aproximadamente 500 m en el área del estudio.

Formación Longacho: Las rocas de la formación Longacho, de edad jurásica inferior, es de origen marino, forman el basamento debajo de Altos de Pica en el área en estudio. Otras rocas que forman basamento en la región incluyen la formación Chacarilla, de edad jurásica superior, de origen marino y continental, que aflora en el área al sudoriental del área del estudio (JK1c, Figura 4); y la formación Cerro Empexa, de edad cretácica, que cubre a la formación Chacarilla, en discordancia angular.

La unidad está muy poco expuesta en la región, está formada por lutitas fisibles, fangolitas, areniscas finas y calizas, generalmente grises, que se depositaron en ambiente marino. Existe un afloramiento de esta roca en el cerro Longacho ubicado al norte de Pica (Ji1m, Figura 4).

### **Estructuras**

Las estructuras regionales tienen, en general, orientación Norte-Sur. Las grandes fallas supuestas y la extendida flexura al Este de Pica limitan la Cordillera de los Andes, la depresión de Pica-Puquio Núñez, la serranía del Longacho, las serranías al norte de Pampa Esmeralda y la Pampa del Tamarugal, que son las mayores unidades estructurales de la región. Galli 1962.

La línea de falla N-S ubicada al Oeste de Pica se muestra en la Figura 4. La geología en el borde oriental de la serranía del Longacho constituiría el elemento estructural más importante de la región. La falla se extendería en la región estudiada desde los afloramientos más septentrionales de esa serranía hasta las proximidades del cerrito de Puquio Núñez (Galli 1962). Esto se evidencia por el afloramiento de Ji1m en el Cerro de Longacho situado el Norte de Pica y al Oeste de la línea de falla (Figura 4). Esta estructura elevada también ha dado lugar al afloramiento de rocas más antiguas piroclásticas (OM3t) al oeste de la línea de falla.

### **Datos de Estratigrafía**

Se revisaron datos de estratigrafía de 29 sondajes/pozos en el área de estudio (Expedientes de solicitudes de derechos de agua), de los cuales hay solo tres sondajes en el sector Pica con datos de estratigrafía y más de 100 m de profundidad (Expedientes ND-0103-1240, ND-0103-1238 y ND-0103-1775). En la Tabla 4 se presenta un resumen de los datos de estratigrafía.

En general, la información estratigráfica indica que los primeros 100 m del Miembro 5 de la Formación Altos de Pica en la zona de Pica y Matilla comprenden capas variables de arenas, gravas, conglomerados de gravas y arcillas. La capa freática se encuentra generalmente a profundidades de aproximadamente 30 m.

Esta estratigrafía es generalmente consistente con los resultados de los análisis por TEM realizados en el Informe SIT 294 de 2012.

En general, no fue posible identificar claramente los diferentes miembros de la formación Altos de Pica a partir de los datos estratigráficos disponibles, en particular teniendo en cuenta que estos miembros contienen muchos de los mismos materiales, tales como arenas, gravas y capas de ceniza y piedra pómez.

Expediente	Profundidad (m)	Descripción
ND-0103-1240	184	<p>Ubicado al Oeste de Matilla</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0-42 m arena y conglomerados</li> <li>- 42-71 m liparita</li> <li>- 72-76 m ceniza</li> <li>- 76-112 m arenisca</li> <li>- 112-158 m arcilla</li> <li>- 158 - 166 m ceniza</li> <li>- 166 - 184 m arenisca y arcilla</li> </ul> <p>Este sondeaje está ubicado cerca de la Serranía de Longacho donde el Miembro 2 (TQa2, OM3t) está más cerca de la superficie. Por lo tanto, la liparita y ceniza entre 42 y 76 m posiblemente representan Miembro 2 con sedimentos de Miembro 5 (TQa5, M1c) y Miembro 3 (TQa3, MP1c) arriba y Miembro 1 (TQa1, OM1c) abajo. Esto es consistente con la sección geológica de Galli 1962</p>
ND-0103-1238	115	<p>Ubicado entre Pica y Matilla</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0-32 m arena</li> <li>- 32-115 m arcillas con algunas capas de arena y un capa de grava 65-66m</li> <li>- Entrega de agua a las 31-32 m (mismo el napa), 65-66 (por gravas) y al base de sondeaje.</li> </ul>
ND-0103-1775	111	<p>Ubicado entre Pica y Matilla (1 km este de ND-0103-1238)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0-40 m arena</li> <li>- 40-111 m arcillas con algunas capas de arena</li> <li>- Entrega de agua a las 32.7 m (mismo el napa), aprox. 70 m (no es clara en log) y al base de sondeaje.</li> </ul>
ND-0103-346	12 sondajes 38,4 - 100	<p>Área Esmeralda</p> <p>Datos de estratigrafía disponibles para 8 sondajes (D11, D12, D27, D30, D31, D32, D33, D34) indican capas de arena y arcilla con algunas gravas desde de la superficie hasta aproximadamente 80 a 100 m y bajo esa profundidad liparitas (pumitas).</p>
ND-0103-1309	80	<p>Noreste de Pica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0-32 m arenas</li> <li>- 30 - 80 m gravas y arenas</li> </ul>
ND-0103-1759	80	<p>noreste de Pica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0-32 m Arenas</li> <li>- 30 - 80 m gravas y arenas</li> </ul>
ND-0103-611	71	<p>Ubicado en el área de Miraflores</p> <p>0-40 m arenas</p> <p>40 - 70 m roca desgranada roja</p> <p>71 m arcillas</p>
ND-0103-991	53.3	<p>Noreste de Pica</p> <p>0-23 m arena</p> <p>24-50 m conglomerado de grava</p> <p>50-53 m roca endurecida e ingreso de agua</p>
ND-0103-1046	44	<p>Entre Pica y Matilla</p> <p>0-44 m capas de arena y arcilla</p> <p>Napa 32 m</p>
ND-0103-1779	44	<p>Noreste de Pica</p> <p>0-18 m arena</p> <p>18 - 40 m Conglomerado de grava</p> <p>40 - 44 m roca endurecida ingreso de agua</p>

**Tabla 4.** Resumen de datos de estratigrafía.

## Unidades Hidrogeológicas

### Cuaternario

En ciertas localidades es posible encontrar aguas subterráneas en los depósitos cuaternarios, por ejemplo, el agua subterránea que escurre a través de los materiales aluviales cuaternarios de la quebrada Chacarilla. Sin embargo, esta agua no es significativa en la escala regional y representa sistemas muy localizados y pequeños. (Galli 1962, DGA 1998).

### Formación Altos de Pica

Esta Formación es la única en que existe agua subterránea en cantidades que tienen alguna importancia económica. La descarga natural o extracciones de aguas subterránea en el área del estudio proviene de los miembros de esta formación, Galli 1962.

Se cree que las areniscas y conglomerados del Miembro 5 (aproximadamente 200 m de espesor), así como las tobas subyacentes e ignimbritas del Miembro 4 (aproximadamente 23 m de espesor) representan las unidades acuíferas más productivas (M1c y M3t, respectivamente, Figura 4). La mayoría de los pozos en la zona de Pica/Matilla corresponden a areniscas y conglomerados de la Unidad M1c.

La existencia de sondajes surgentes (pozos artesianos) en el área de Pica, de los cuales el más notable es el sondaje de Chintaguay, indica que las unidades más profundas del acuífero están confinadas por sedimentos suprayacentes y bajo la presión suficiente para causar condiciones artesianas. Esto también sugiere la existencia de capas confinadas (ej.: acuitardos arcillosos). De acuerdo con el análisis TEM, es posible la existencia de una capa de arcilla a partir de una profundidad de alrededor de 100 a 200 m por debajo de la superficie, aunque esto no pudo ser confirmado por los datos estratigráficos disponibles.

### Formación Longacho

Las rocas de esta unidad son sedimentos muy cementados y tienen muy baja permeabilidad. Es improbable que las rocas constituyan una fuente de agua subterránea significativa porque tienen una permeabilidad muy baja debido a la litificación de las rocas. Es probable que la fracturación haya producido una porosidad secundaria pero "aparentemente" las fracturas no están abiertas hasta gran profundidad, Galli 1962. Entonces, en términos de la hidrogeología de la región, la formación Longacho representa el basamento impermeable con un muy bajo potencial de almacenamiento de volúmenes de aguas subterráneas significativos.

### Propiedades de los acuíferos

A partir de datos de pruebas de bombeo de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas se obtuvieron valores de transmisividad del acuífero Pica/Matilla que van desde 1 hasta 185 m<sup>2</sup>/día (ver Tabla 5). Los ensayos de bombeo no incluyen pozos de observación por lo cual no se pueden calcular las propiedades de almacenamiento a partir de estos datos.

Expediente	Profundidad (m)	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)
ND-0103-1092	87,5	1,5
ND-0103-1238	115	2
ND-0103-1775	111	1,5
ND-0103-1938	98	1,2
ND-0103-1940	78	185
ND-0103-2038	85,6	6

**Tabla 5.** Resultados del análisis de pruebas de bombeo.

Generalmente los sondeos tienen bajo caudal y gran descenso de nivel, indicando muy baja permeabilidad. La mayoría de los pozos arrojaron valores bajos de transmisividad ( $< 2 \text{ m}^2/\text{día}$ ) y solo un pozo (ND-0103-1940), un valor mucho más alto de  $185 \text{ m}^2/\text{día}$ . Estos datos son consistentes con las conclusiones de Galli 1962, en que existe una pequeña probabilidad de intercepción de las zonas de permeabilidad alta, debido a la posición esencialmente vertical de las fracturas. Esto también es consistente con los hallazgos de Jica 1995, que concluyó que el rendimiento potencial de las perforaciones en la zona de Pica/Matilla era considerablemente más bajo que el observado en la Pampa del Tamarugal.

Se puede concluir que el acuífero de Pica/Matilla es generalmente de bajo rendimiento con una baja permeabilidad, con zonas de fracturas específicas de alta permeabilidad.

Tanto el pozo en Chintaguay, el pozo del expediente ND-0103-1940, de transmisividad elevada y alto rendimiento, así como las vertientes de Pica, se localizan a lo largo de la misma orientación norte-sur. Esta línea coincide con la ubicación del basamento de poca profundidad ubicado en el sector que indica la existencia de una zona de más alto rendimiento de orientación norte-sur en la zona de fractura a lo largo de esta línea.

### Dirección y gradiente de flujo de las aguas subterráneas

Se generó un mapa de curvas del nivel de aguas subterráneas usando niveles estáticos de agua muestreados en terreno, los que se presentan en la Figura 5. Estos datos indican una dirección de flujo Oeste con un gradiente hidráulico promedio de aproximadamente 0,04.

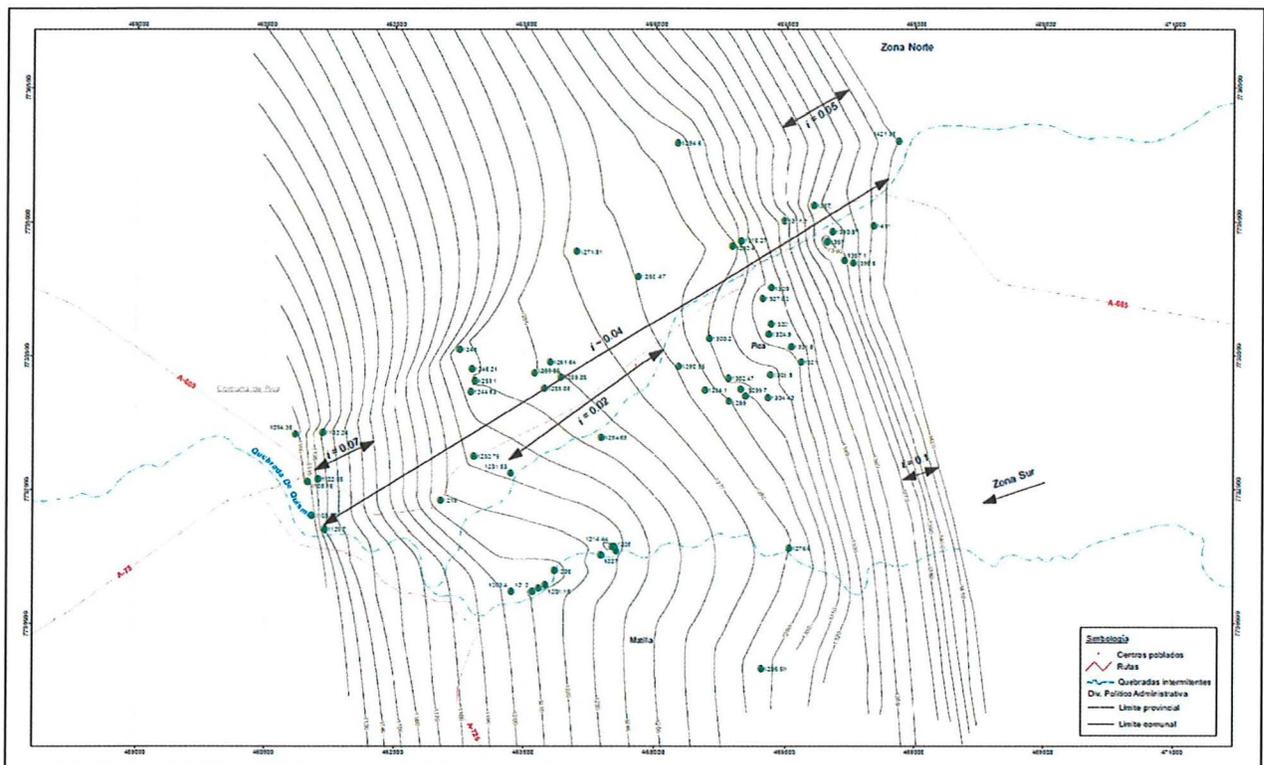


Figura 5. Equipotenciales de agua subterránea.

## Prospecciones Geofísicas

En el Informe SIT N°294 de 2012 se detalla las campañas de gravimetría y TEM (100 estaciones TEM y 100 estaciones Gravimétricas) realizadas en septiembre de 2012 a fin de apoyar el modelo conceptual, ver Figura 6.

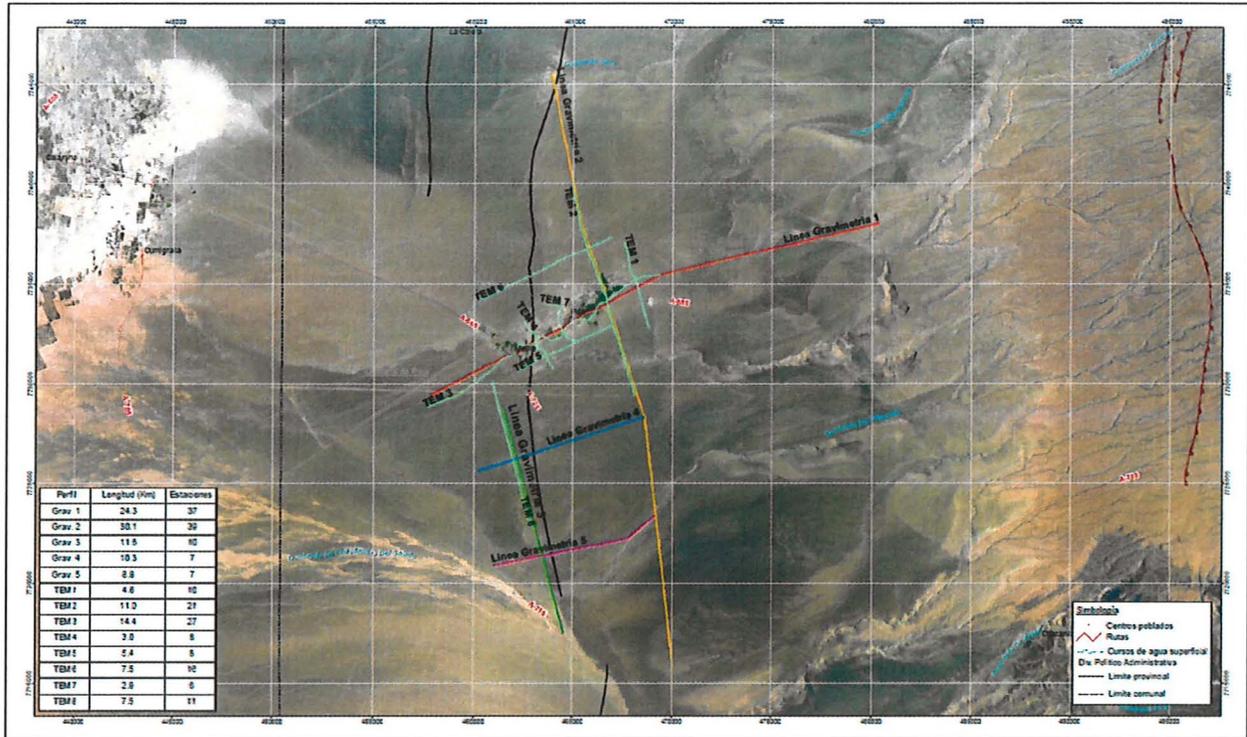
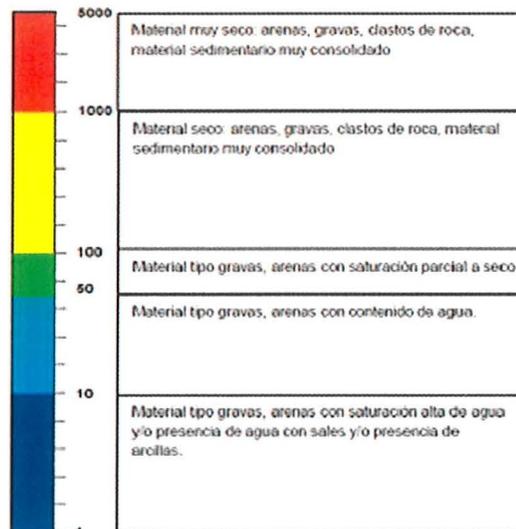


Figura 6. Perfiles Geofísicos realizados.

## Perfiles TEM

Se interpretó que los resultados de las mediciones TEM representaban la siguiente secuencia estratigráfica, en base a rangos de valores de resistividad (ohm-m).



La capa representada con color celeste (resistividad entre 10 y 50) se interpreta como el acuífero poco profundo dentro del Miembro 5 de la formación Altos de Pica. La parte superior de esta capa se interpreta como el nivel freático. El espesor de este acuífero es variable con un promedio de aproximadamente 100 a 150 m. El espesor del acuífero interpretado como superficial es mayor en el área entre Pica y Matilla indicando la presencia de una cuenca.

En general, hay concordancia entre el nivel freático en los perfiles TEM y las mediciones de profundidad de las aguas subterráneas de pozos y sondajes. Hay concordancia entre el gradiente hidráulico indicado por el nivel freático e interpretado con las curvas equipotenciales (Figura 7 y5).

El pronunciado gradiente del nivel freático entre los puntos 16 y 17 de la línea TEM 3 (Figura 7) es consecuente con las curvas equipotenciales que indican un aumento del gradiente hidráulico en el área de Matilla.

La profundidad del agua subterránea aumenta (>100 m) hacia el Oeste de Matilla y al Este de Pica (Figura 7).

El espesor del acuífero superficial hacia el Oeste de Matilla, a través del cual el agua subterránea fluye en la Pampa del Tamarugal está en el orden de 50 m aproximadamente (Figura 7).

Los datos TEM indican que existe potencialmente un horizonte de baja resistividad (<10 ohm-m) desde aproximadamente 100 a 200 m del piso. Esto se interpreta como la presencia de aguas con sales y/o presencia de arcillas. Esta última se considera más probable dado que la calidad del agua subterránea más profunda representada por sondajes surgentes y vertientes corresponde generalmente a agua fresca. Este horizonte de arcilla podría representar la capa suprayacente que confina el acuífero artesiano más profundo. La existencia y espesor de esta capa de arcilla no pudo ser confirmada debido a los pocos datos estratigráficos disponibles a partir de los sondajes.

Esta zona de baja resistividad está mucho más cerca de la superficie en los perfiles TEM 4 y 7 indicando que en el área de las localidades de Matilla y Pica el acuífero superficial puede tener un mayor contenido de arcilla. Esta baja resistividad también puede deberse en parte a la saturación de los sedimentos superficiales resultantes del riego.

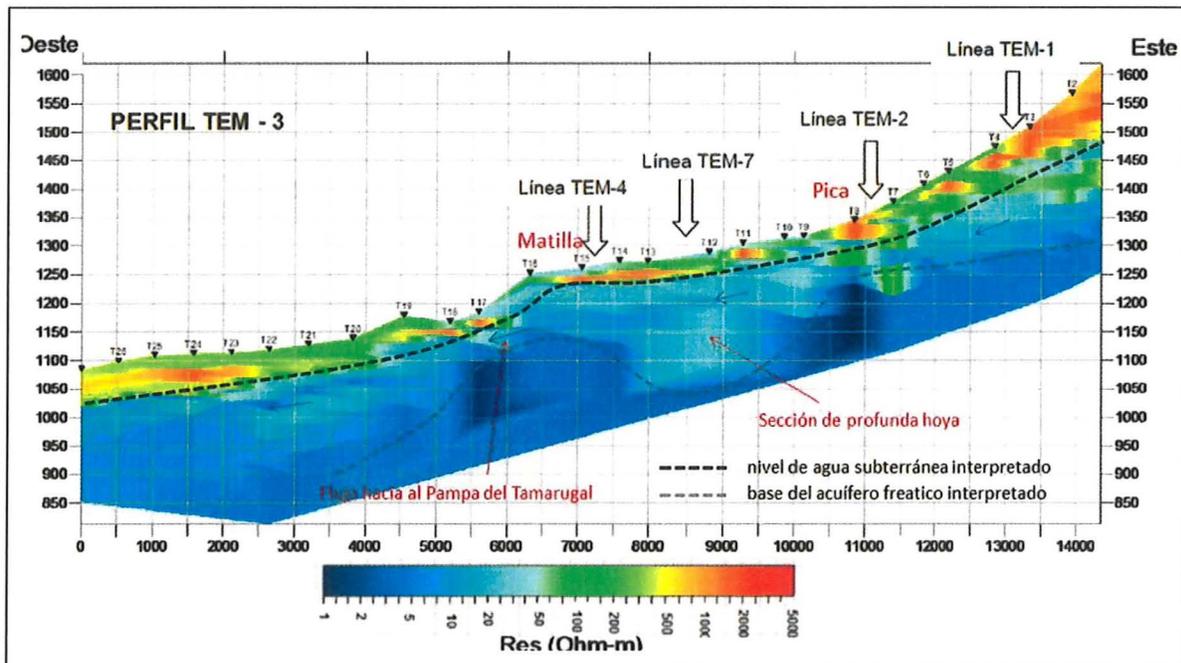


Figura 7. Perfil TEM 3.

## Perfiles Gravimétricos

El análisis del perfil gravimétrico 1 indica que a unos 500 m de profundidad bajo Pica y Matilla existe una cuenca sedimentaria significativa (ver Figura 8). Esto concuerda con la interpretación de un área de mayor espesor del acuífero somero indicada por el perfil TEM 3 (ver Figura 7).

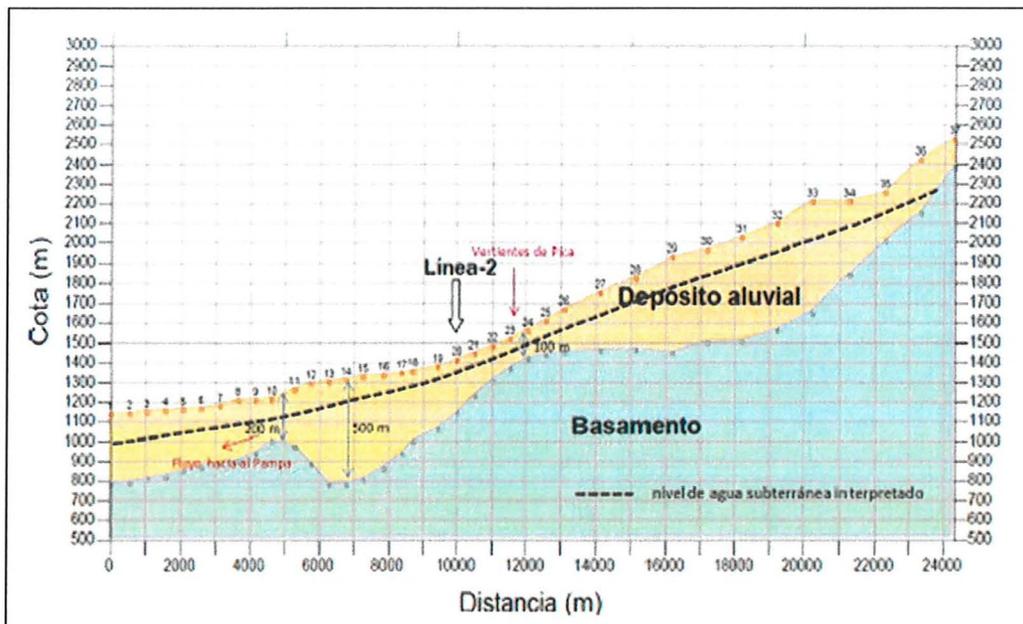


Figura 8. Perfil gravimétrico 1.

La profundidad del basamento al Oeste de Matilla es de aproximadamente 200 m. La profundidad del agua subterránea en esta área (en base a datos TEM) se encuentra en el orden de 30-50 m, indicando un espesor saturado de aproximadamente 150 m. Esto indica que la barrera hidráulica provocada por el impulso ascendente del basamento no impide el paso del flujo de aguas subterráneas desde Pica / Matilla hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal (ver Figura 8).

En el Perfil de Gravimetría 1, entre los puntos 20 a 26, se indica un basamento alto. Esto indica una considerable disminución en el espesor del acuífero en esta área de 300 m a menos de 100 m. La ubicación del basamento alto corresponde a la ubicación de las vertientes de Pica. Esto sugiere que la disminución del espesor de la secuencia sedimentaria en esta área tiene como resultado mayor presión del agua ya que el volumen de agua subterránea escurre a través de la sección más delgada de la ruta de flujo. Este aumento en la presión podría explicar el flujo surgente a través de las fracturas en esta área (ver Figura 8).

Los resultados del estudio de gravimetría indican que el basamento alto, representado por el afloramiento en Longacho, cae abruptamente hacia el Sur, con una profundidad del basamento de aproximadamente 200 m indicada al Oeste de Pica (punto 10, Perfil gravimétrico 1, Figura 8).

En base a los resultados del Perfil de Gravimetría 2, la cuenca sedimentaria parece tener un espesor relativamente constante de aproximadamente 200 - 300 m en dirección Norte-Sur (ver Figura 9). El alcance de la hoya pareciera estar bien definido por el Perfil gravimétrico 2.

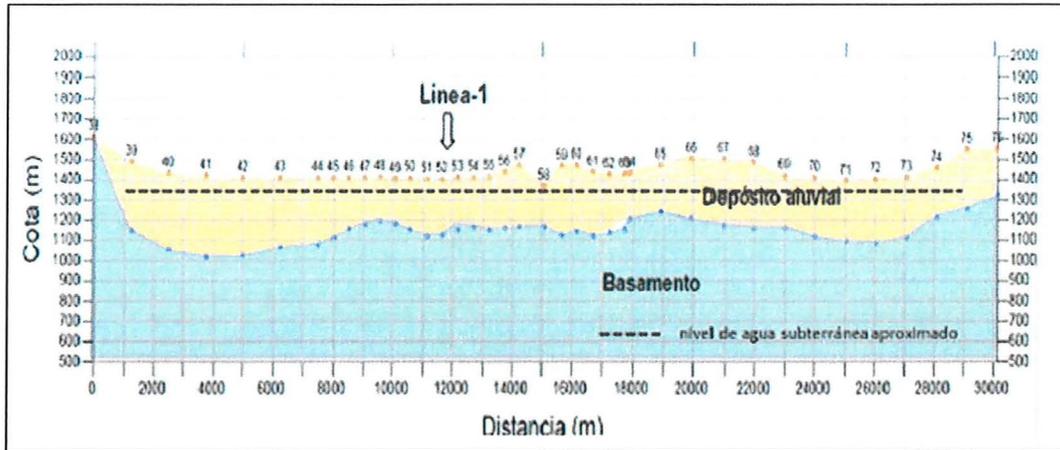


Figura 9. Perfil gravimétrico 2.

Por otra parte, las curvas de nivel de las aguas subterráneas son consistentes con el mapa gravimétrico de la profundidad del basamento. Hay fuertes pendientes en el borde oriental de Pica y en el borde occidental de Matilla asociadas al basamento alto en estos sectores (baja transmisividad). La pendiente plana entre las localidades de Pica y Matilla es consistente con la cuenca identificada en esta área (mayor transmisividad), ver Figura 10.

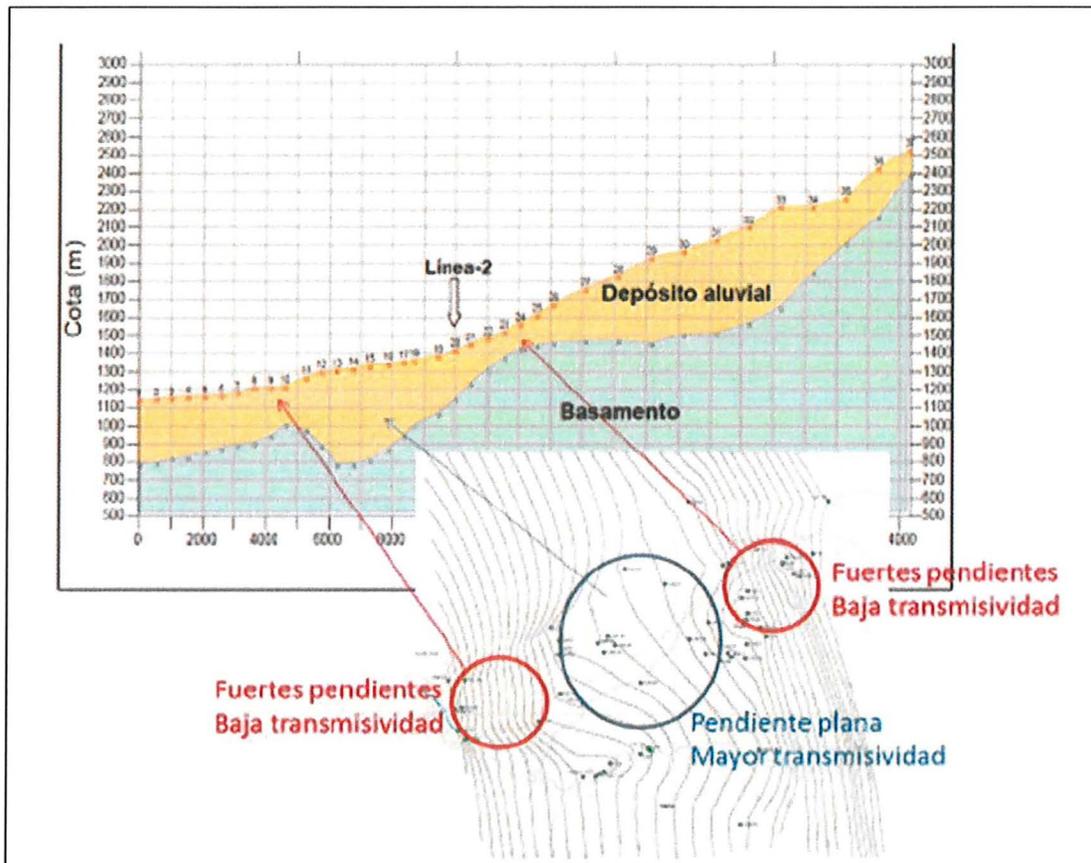


Figura 10. Pendientes hidráulicas de Pica

Los mapas que indican la elevación del basamento y su profundidad se presentan en las Figuras 11 y 12. Estas figuras muestran la gran cuenca sedimentaria entre Pica y Matilla y el basamento alto en el área de vertientes de Pica.

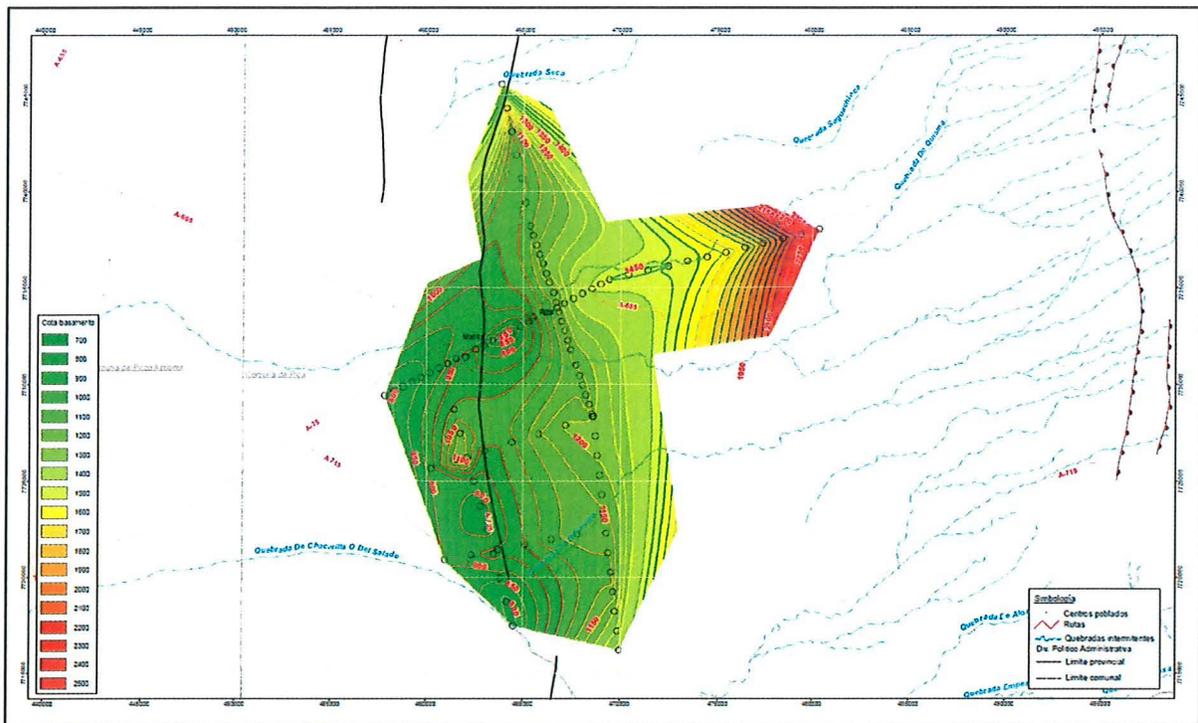


Figura 11. Interpolación cota del basamento.

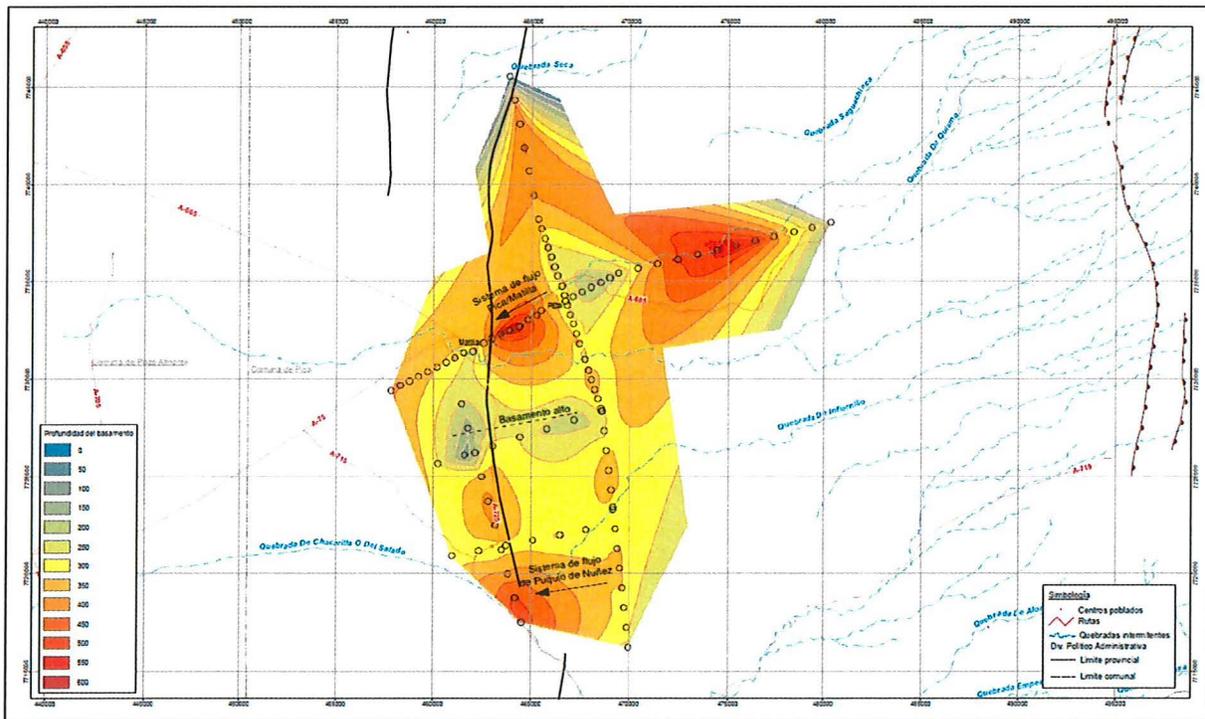


Figura 12. Interpolación profundidad del basamento.

## **Rendimiento pozos**

Entre los años 1916 y 1942 el Gobierno de Chile perforó aproximadamente 20 sondajes en las áreas de Pica y Matilla y en la quebrada Chintaguay. Las profundidades de los pozos varían entre 35 y 320 m. Un sondaje ubicado en la quebrada Chintaguay tuvo un flujo surgente de 40 a 50 l/s y el agua fue utilizada para suministrar agua potable a la ciudad de Iquique. Hoy, esta agua es utilizada para a suministrar agua potable a Pica. Todos los otros sondajes produjeron menos de 5 l/s, y la mayor parte de ellos menos de 1 l/s, (Galli 1962).

Aproximadamente en 1952, la Dirección de Riego inició un programa de perforaciones de exploración en Esmeralda ubicado al Oeste de Pica. Los resultados de este programa de perforaciones han sido económicamente desfavorables y los rendimientos de los 13 pozos varían desde prácticamente 0 hasta 15 l/s (solamente en uno de ellos), (Galli 1962).

Se concluyó que la perforación de pozos profundos en el área de Pica, Matilla y Esmeralda tiene pocas posibilidades de buen éxito debido a la pequeña probabilidad de la intercepción de las zonas de permeabilidad alta. Se considera que los conductos de alta permeabilidad en las rocas fracturadas, se encuentran en posición esencialmente vertical y por este motivo atravesar en una perforación uno o varios de ellos, es una circunstancia casual (Galli 1962).

En muchos de los sondajes de exploración se encontró agua subterránea con presión artesiana (surgente). Estos sondajes surgentes tenían profundidades que varían de 35 m (Chintaguay) a 320 m, lo que indica que el agua subterránea con presión artesiana existe a diferentes profundidades del perfil sedimentario y la magnitud del flujo está afectada por la red de fracturas existente. Esto indica que posiblemente existen múltiples capas de acuíferos confinados dentro de la secuencia sedimentaria en condiciones artesianas.

## **Profundidad del agua subterránea**

La profundidad estática del agua subterránea en la región de Pica es difícil de determinar debido a la influencia del bombeo de pozos. En base a los resultados del trabajo de terreno, la profundidad del agua subterránea en pozos no operativos (nivel estático del agua) generalmente oscila entre 15 y 30 m bajo el nivel de suelo.

## **Velocidad de flujo de las aguas subterráneas**

Se calculó la velocidad lineal del flujo de agua subterránea usando la ley de Darcy utilizando valores de  $K = 0,2$  a  $0,6$  m/día,  $i = 0,04$  (promedio), obteniendo valores de  $0,008$  a  $0,025$  m/día (aproximadamente 3 a 10 m/año). Luego, el agua, para recorrer 25 km desde Altos de Pica hasta Pica, demoraría aproximadamente 2.500 a 8.500 años. Esto es consistente con la información entregada en el Informe DGA 1998, lo que indica que las aguas subterráneas en la zona de Pica tienen una edad de entre 1.000 y 10.000 años.

En el Informe DGA de 2004 se indica que también existe entre la zona de recarga y Pica una trayectoria de flujo menor de 50 años. Sin embargo esto requeriría una conductividad hidráulica del orden de 35 m/día que es de varios órdenes de magnitud más alta que la observada en los ensayos de bombeo. Luego, se considera que la existencia de aguas subterráneas de menor edad en algunas áreas de Pica se debe a la influencia del riego.

## **Movimiento de las aguas subterráneas**

Como se explica en las secciones anteriores, el agua de los acuíferos de la Formación Altos de Pica fluye al Oeste de acuerdo con la topografía. El movimiento del agua en los acuíferos es muy lento y la velocidad es tal vez de unos pocos metros por año. El escurrimiento del agua subterránea desde Altos de Pica hasta la Pampa del Tamarugal tiene probablemente una duración

de siglos o milenios. Este largo camino de flujo desde el área de recarga a Pica es consistente con el flujo estable observado en las vertientes.

Debido al lento movimiento del agua, los periodos de sequía de poca duración tienen escasa influencia sobre la recarga media de la formación y, por lo tanto, sobre las vertientes artesianas de Pica (Galli 1962). Esto es consistente con la velocidad de flujo calculada anteriormente.

Basándose en los resultados de la gravimetría realizada, se concluye la existencia de un basamento alto situado en la parte Este de Pica, que corresponde a la ubicación de las vertientes de Pica. Esto sugiere que la reducción del espesor de la capa sedimentaria en esta área no es compatible con el volumen del flujo, lo que ocasiona una presión del agua en el terreno. Este aumento de presión puede explicar el flujo surgente a través de las fracturas en esta zona.

El sondaje surgente de Chintaguay se ubica al Sur y en la misma orientación norte-sur con las vertientes de Pica, y es probable que la quebrada de Chintaguay intercepte la misma red de fracturas de Pica. Esto se reafirma debido a que la calidad del agua es similar en ambos lugares. El sondaje de Chintaguay se encuentra dentro de una incisión profunda (quebrada) y está a 35 m de profundidad.

### **Temperatura de las aguas subterráneas**

El agua de riego que se infiltra en el suelo para recargar el acuífero freático, adquiere la temperatura de los sedimentos que atraviesa en su descenso. A pocos metros de profundidad la temperatura del agua puede variar entre, 14 y 17° C, valores que son aproximadamente los de la temperatura media anual del aire en el oasis de Pica. A mayor profundidad aumenta la temperatura de las rocas, con un incremento que se conoce como gradiente geotérmico (Galli 1962).

Las aguas subterráneas del acuífero freático en el área de Pica y Matilla tienen temperaturas que varían entre 14° y 31° C, lo que se puede explicar considerando que el acuífero freático no sólo es recargado por la infiltración de aguas de riego de temperaturas relativamente bajas, sino que también por agua artesianas calientes que escurre a lo largo de fracturas desde gran profundidad.

El agua artesianas asciende verticalmente desde por lo menos 200 o 300 m de profundidad, donde las rocas deben tener temperaturas aproximadas de 35° a 40° C. Probablemente, el escurrimiento vertical es muy rápido en ciertas vertientes como Resbaladero, no permitiendo que el agua adquiera la temperatura de las rocas que atraviesa y esa sería la razón por la cual se observan temperaturas tan altas.

Es muy probable que una parte del agua artesianas que asciende por las fracturas pueda escurrir lateralmente a través de las rocas sedimentarias más altas en la Formación (Miembros 3 y 5). La lentitud de la percolación y el contacto prolongado con la roca reducirían la temperatura del agua subterránea. Entonces, es probable que la recarga de las aguas subterráneas de Pica sea una combinación de agua fría de riego y agua caliente que asciende verticalmente. Esto es posiblemente porque la temperatura del agua de galerías y pozos de Pica varía entre 14° y 31° C.

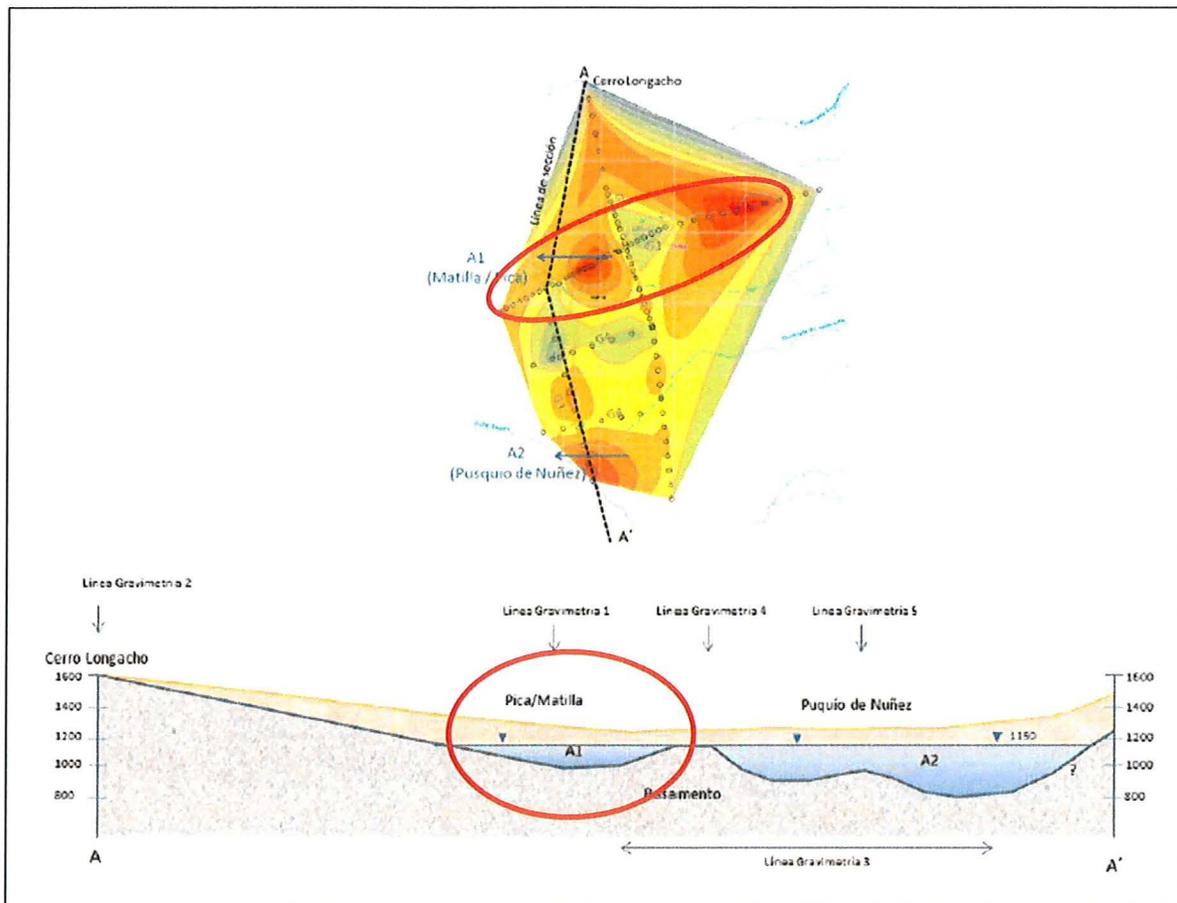
No es posible actualmente determinar qué proporción de la recarga total corresponde a agua fría, proveniente del agua de riego infiltrada, y qué proporción a agua artesianas calientes. Sin embargo, el aumento rápido de la temperatura del agua con la profundidad, indicaría que la parte de la recarga que proviene de agua artesianas calientes es volumétricamente más importante (Galli 1962).

### **Flujo hacia el acuífero Pampa del Tamarugal**

La información existente del sector indica que la línea de falla de Longacho representa una barrera hidráulica al flujo de agua subterránea desde el acuífero de Pica al acuífero de la Pampa del Tamarugal. Galli en 1962 concluye que hay un gran volumen de agua subterránea en la

Formación Altos de Pica que fluye hacia los acuíferos de la Pampa del Tamarugal, que es apoyada por los análisis hidroquímicos de DGA-UCN-IRD 1999, que indican un flujo desde Altos de Pica hacia el mismo sector.

Los resultados de esta prospección geofísica son consistentes con la conclusión de Galli 1962, pues los datos de gravimetría indican que la altura del basamento a lo largo de la línea de falla no puede impedir el flujo de las aguas subterráneas entre Pica y la Pampa del Tamarugal. El estudio TEM indicó un gradiente hidráulico desde Este a Oeste de la napa desde Matilla hacia la Pampa del Tamarugal, indicando el movimiento de las aguas subterráneas (ver Figura 13).

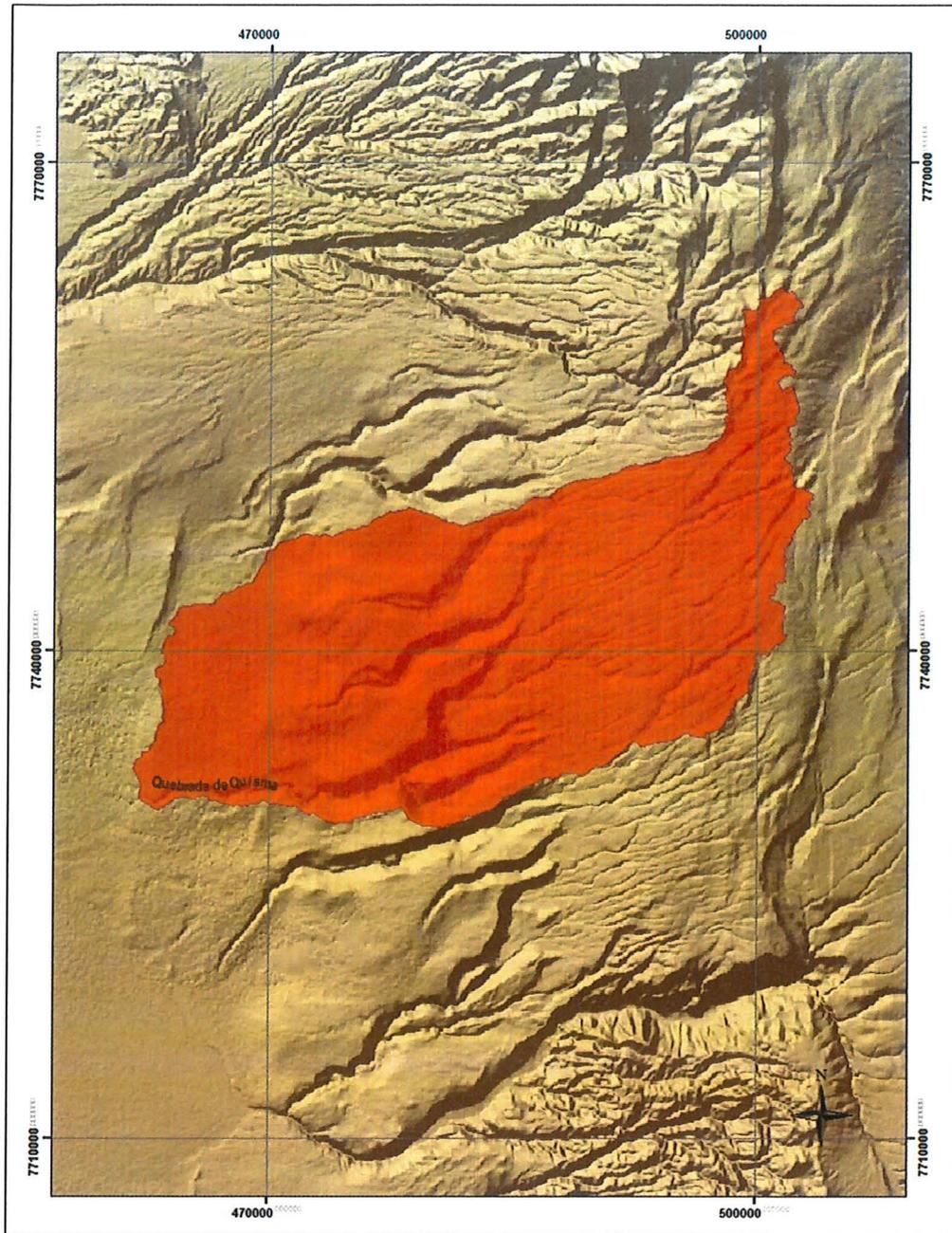


**Figura 13.** Flujo de agua subterránea hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal.

### 3. Delimitación y Oferta de recursos hídricos subterráneos del sector acuífero Pica.

#### 3.1 Delimitación Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común Pica.

A partir de los antecedentes expuestos anteriormente, este Servicio ha convenido definir el sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pica mediante la cuenca hidrológica que aporta al sector de interés. La Figura 14 muestra la delimitación realizada mediante la utilización de un modelo de elevación digital (ASTER GDEM).



**Figura 14.** Sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado Pica.

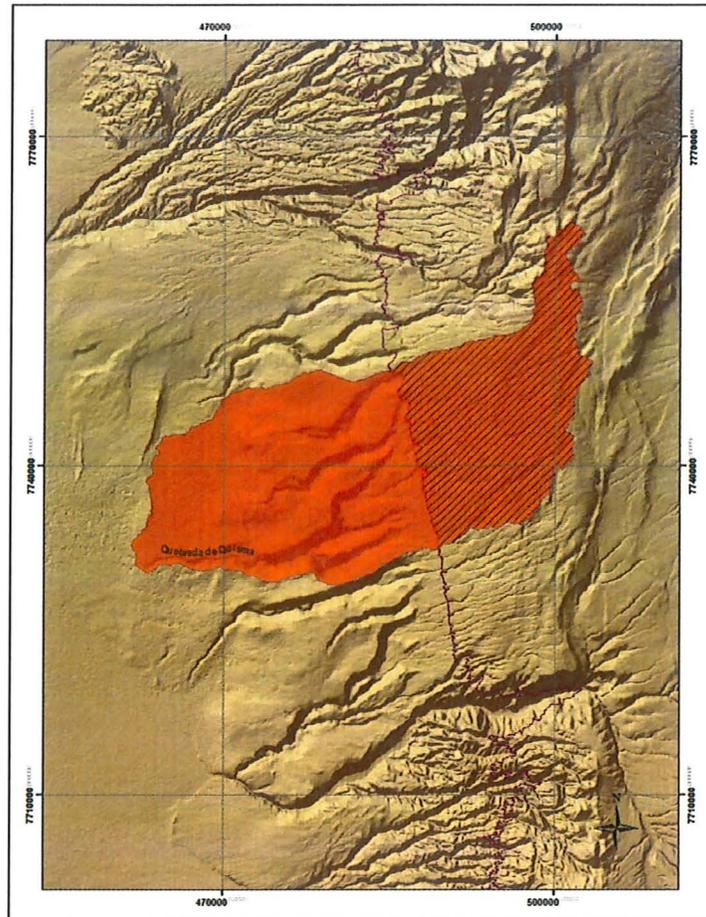
### 3.2 Recarga.

Se asume que el principal mecanismo de recarga para el sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado Pica se produce a elevadas altitudes dentro de la red de fracturas de la formación Altos de Pica.

Para el cálculo de su recarga, Informes anteriores consideraron las precipitaciones que se reciben en las áreas altas a más de 3.000 m.s.n.m. (Galli 1962), o el área ubicada entre los 3.500 m.s.n.m. y el límite oriental de la cuenca (DGA SIT N°48 de 1998).

En el Informe SIT 294 de 2012 se indica que existe evidencia para apoyar un límite de recarga de 3.000 m dado que ésta es aproximadamente la altitud de la línea de vegetación y hay plena evidencia de agua con líneas de drenaje profundas causadas por las lluvias torrenciales que se presentan durante el invierno altiplánico.

Utilizando la herramienta ARCGIS se definió el área ubicada entre la altura 3.000 m y el límite oriente del sector acuífero Pica, ver área achurada en Figura 15. Luego, mediante un raster generado a partir de las isoyetas del Balance Hídrico Nacional, se obtiene la precipitación media del área.



**Figura 15.** Área del Sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado Pica sobre los 3000 m.

No se han efectuado estudios para determinar la eficiencia con que la precipitación se convierte en recarga de los acuíferos de los Altos de Pica. Un factor importante que controla la recarga es el espaciamiento y las aberturas del sistema vertical de diaclasas del Miembro 4 observado en las áreas de afloramiento. La permeabilidad vertical de Miembro 4 probablemente es suficiente para permitir el paso del agua de recarga rápida hacia las rocas subyacentes (Galli 1962).

El Informe SIT 294 de 2012 indica que es probable que la recarga de las aguas subterráneas ocurra en áreas específicas durante cortos períodos de alta precipitación en enero y febrero. Estudios recientes de estimación de la recarga de los acuíferos de las cuencas de Coposa y Salar Michincha (Chadwick et al, 2012) demostraron que las lluvias de alta intensidad, por lo general de corta duración, producen más recarga de acuíferos que la misma cantidad de precipitaciones distribuidas de manera uniforme en un período más largo de tiempo. El estudio de Chadwick (et al) 2012 utilizó un modelo de distribución hidrológico para el cálculo de las pérdidas por

evaporación, escorrentía e infiltración, utilizando datos diarios de precipitación, temperatura y evaporación. La estimación de la recarga resultante corresponde al 16% de la precipitación sobre la cuenca.

Esto es consecuente con el valor de 20% que se ha utilizado en informes anteriores. Un rango de 15 a 25 % se adoptó en el Informe SIT 294 de 2014.

Para el presente cálculo de recarga se considerará un valor de 20%.

Luego, la recarga R al acuífero será:

$$R = A * Pp_{media} * 0,2 = 269,2 \text{ km}^2 * 137,4 \text{ mm} * 0,2 = 235 \text{ l/s}$$

### 3.3 Flujo de aguas subterráneas hacia el acuífero Pampa del Tamarugal.

El flujo hacia el sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado Pampa del Tamarugal fue calculado usando el método de Darcy. Para ello se obtuvo una permeabilidad k promedio a partir de los datos de pozos señalados en la Tabla 5, sin considerar el dato del pozo de la solicitud ND-0103-1940 de acuerdo a lo señalado en el punto 2.3.

Expediente	Profundidad (m)	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)	Permeabilidad (m/día)
ND-0103-1092	87,5	1,5	0,017
ND-0103-1238	115	2	0,017
ND-0103-1775	111	1,5	0,014
ND-0103-1938	98	1,2	0,012
ND-0103-2038	85,6	6	0,070

**Tabla 6.** Datos de transmisividad y permeabilidad.

La pendiente i se extrapola de las curvas equipotenciales (Figura 5), y el área A se muestra en la Figura 13 enmarcada en color rojo (A1 en Informe SIT 294 de 2012).

Los parámetros utilizados son entonces los siguientes:

$$k = 0,026, \quad i = 0,07, \quad A = 800.000 \text{ m}^2$$

$$\text{Luego,} \quad Q = k * i * A = 1.460,3 \text{ m}^3/\text{día} = 17 \text{ l/s}$$

El flujo subterráneo hacia el acuífero Pampa del Tamarugal se encuentra comprometido en dicho sector, el cual además se encuentra declarado área de restricción para nuevas explotaciones de aguas subterráneas.

### 3.4 Oferta recurso hídrico subterráneo.

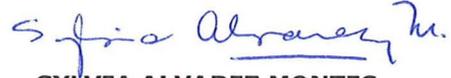
Considerando lo anteriormente descrito, la oferta de recursos hídricos subterráneos en el sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado Pica será la recarga del sector acuífero debiéndose descontar el flujo subterráneo hacia la Pampa del Tamarugal que se encuentra comprometido.

Sector acuífero	Recarga	Flujo de aguas subterráneas hacia la Pampa del Tamarugal	Oferta recursos hídricos subterráneos	
			l/s	m <sup>3</sup> /año
Pica	235	17	218	6.874.848

**Tabla 7.** Oferta de recursos hídricos subterráneos acuífero Pica.

#### 4.- CONCLUSIÓN.

Revisada la información técnica disponible en el sector en análisis, se define el sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado Pica, el cual se encuentra representado geográficamente en el Mapa 1, y se establece la oferta de recursos hídricos subterráneos para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas de 6.874.848 m<sup>3</sup> anuales.



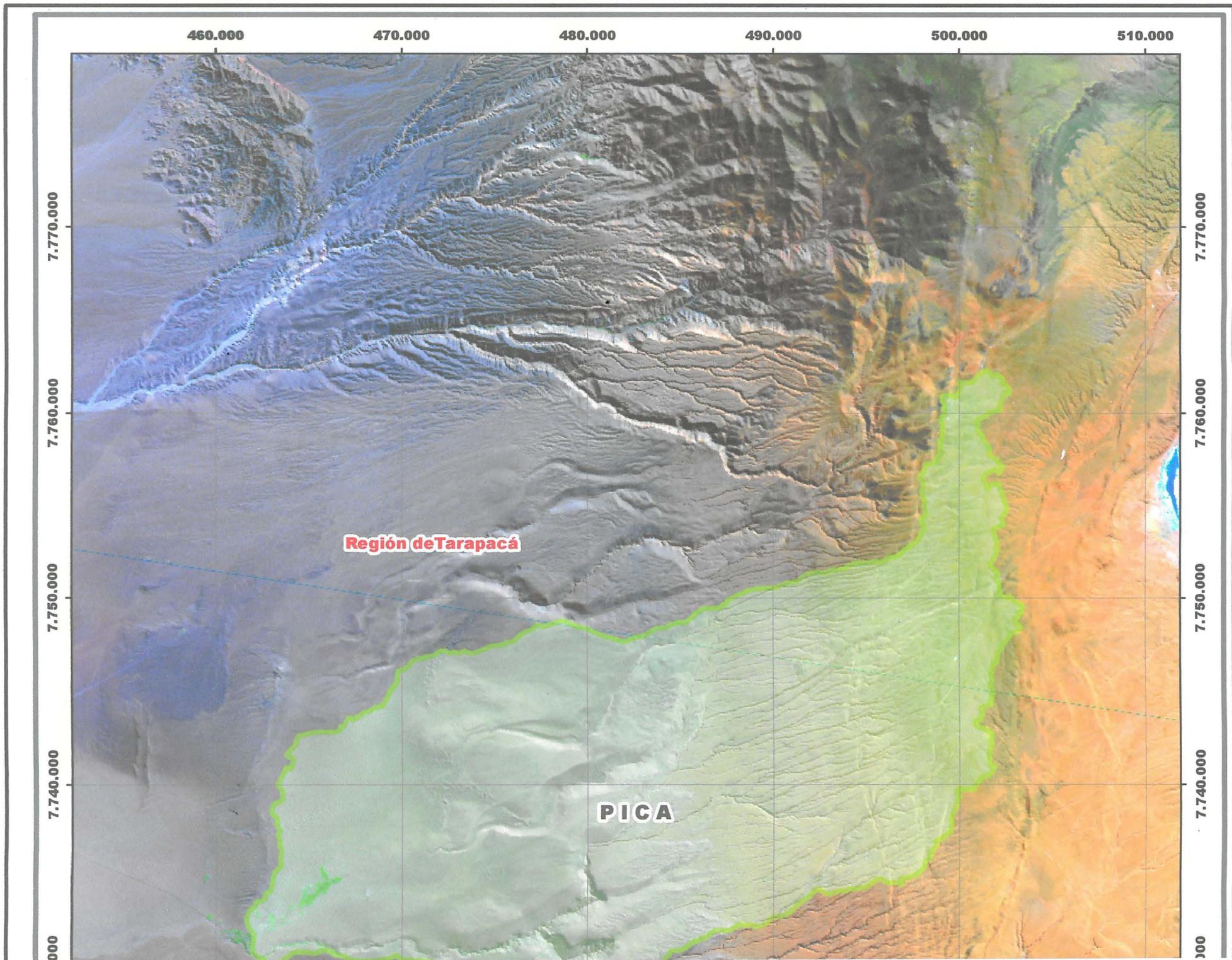
**SYLVIA ALVAREZ MONTES**

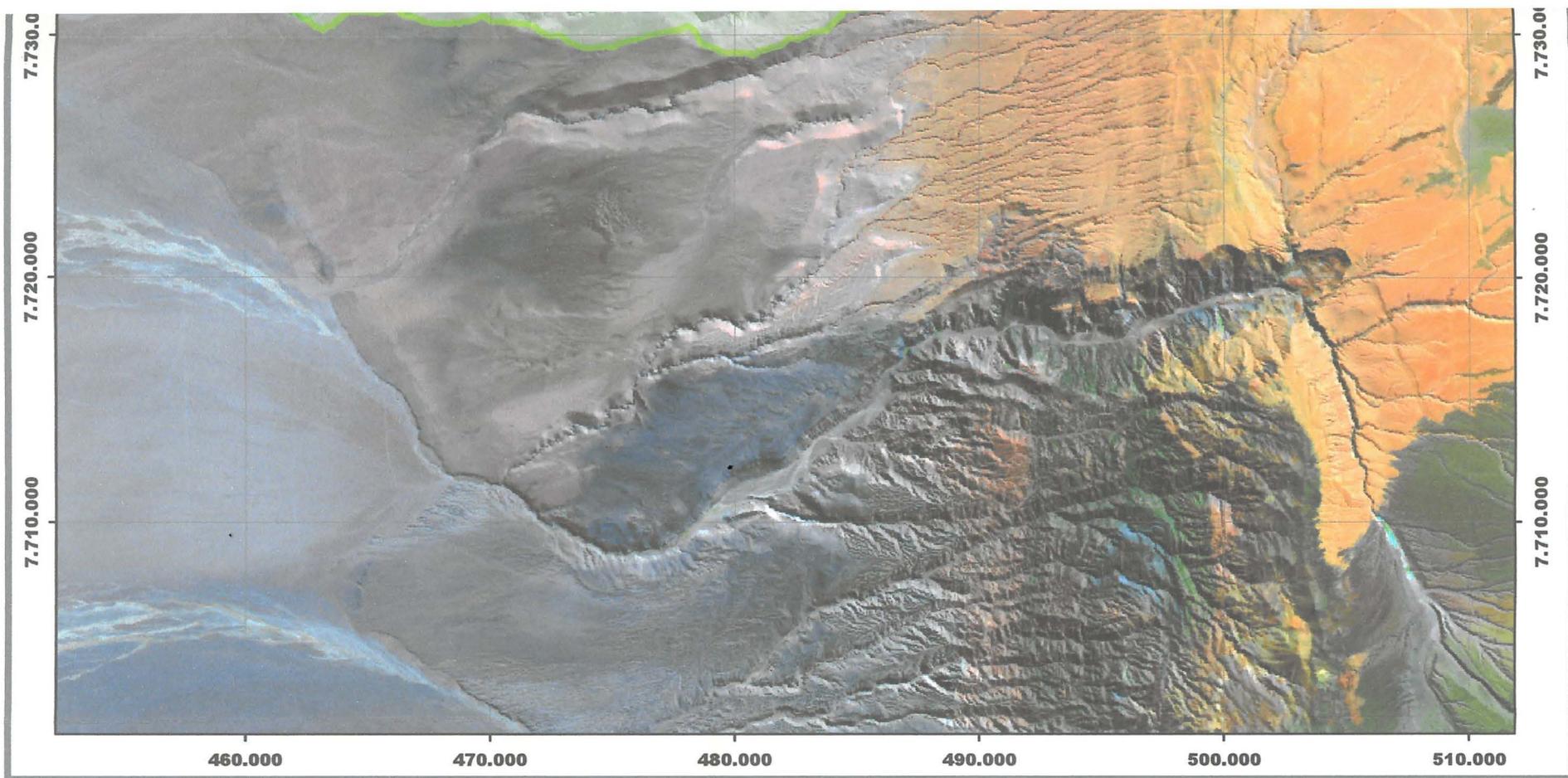
Depto. Adm. de Rec. Hídricos  
Dirección General de Aguas.



SSD N°: 12286745 /







**Simbología**

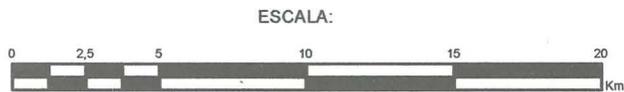


Sector Hidrogeológico Pica



**DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**  
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

**SECTOR HIDROGEOLÓGICO DE APROVECHAMIENTO COMÚN PICA**



1:250.000

FUENTE: Base Cartográfica, MOP 2011  
Elaboración Propia

PROYECCIÓN: Universal Transversal de Mercator (UTM)  
DATUM: Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)  
HUSO: 19 Sur.

**Mapa N°1**

JEFE DEPTO. ADMINISTRACIÓN RECURSOS HÍDRICOS

FECHA Agosto 2018

Nury Salazar M : Geógrafo