

## MAPA DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA

### Introducción

Gran parte del área de la hoja San Miguel de Tucumán, está ocupada por cadenas montañosas en donde se encuentran las nacientes de los ríos que alimentan tres grandes cuencas hidrográficas: la cuenca del Río Salí ubicada en el sector central de la hoja, la cuenca del Río Santa María que se encuentra en el borde occidental y la cuenca del Río Salado que abarca el sector oriental. La línea divisoria de aguas entre las dos primeras cuencas coincide con el área cumbral de las Cumbres Calchaquíes hacia el norte y las Sierras del Aconquija hacia el sur, mientras que las nacientes de los ríos pertenecientes a las cuencas de los ríos Salí y Salado están separadas por las máximas alturas de las sierras del Cajón y de La Ramada.

La cuenca del Río Salí abarca la mayor superficie de la hoja. El colector principal es el Río Salí, que nace en el extremo norte de la Provincia de Tucumán. Al llegar a la Provincia de Santiago del Estero y hasta su desembocadura en la laguna de Mar Chiquita, su nombre cambia al de Río Dulce. A lo largo de su trayecto por la provincia de Tucumán, el Río Salí recibe numerosos afluentes que descienden desde las Cumbres Calchaquíes y las sierras del Campo en el sector norte y de las Sierras del Aconquija hacia el sur (ver mapa hidrológico en esta carta y en la de líneas de base Concepción).

En este sector es donde nacen los numerosos ríos que conforman la cuenca y que en el sector pedemontano se infiltran recargando los acuíferos que se encuentran en el subsuelo de la llanura del este y del sur o de los valles intermontanos del norte, cuyas aguas son intensamente explotadas por medio de perforaciones de hasta 400 metros de profundidad. Por este motivo, los ríos que nacen en la zona montañosa pueden ser considerados como una de las principales reservas de agua de buena calidad de las provincias de Tucumán y Santiago del Estero.

Debido a las características fisiográficas del terreno, el desarrollo urbano e industrial en este sector ha sido escaso, lo cual ha favorecido la preservación de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo existen limitaciones para su aprovechamiento por la presencia de contaminantes de origen natural en concentraciones que exceden los valores recomendados por los organismos de salud nacionales e internacionales. Es el caso de las aguas subterráneas poco profundas de la llanura del este que contienen elevadas concentraciones de arsénico, vanadio, molibdeno, etc.

### RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES

En la hoja San Miguel de Tucumán, se pueden distinguir tres grandes cuencas hidrográficas, cuyos límites exceden los de la hoja.

**a) Cuenca del Río Salí.** El sector norte de la cuenca del Río Salí abarca una superficie de 4700 Km<sup>2</sup> hasta la estación de aforos de El Cadillal. Este río surca la región de Norte a Sur, siendo el colector principal de los numerosos ríos que descienden desde las cumbres Calchaquíes y las sierras del Aconquija por el oeste y las sierras del Campo y de La Ramada por el este. En las nacientes, estos cursos son de régimen temporario, pero en el área pedemontana forman cursos de agua permanente con máximos caudales durante los meses de verano. El río Salí nace en el límite entre las provincias de Salta y Tucumán con el nombre de Río El Tala y en su curso superior hasta el dique Celestino Gelsi, se encuentra encajonado en una falla que corre en sentido N-S. En este tramo, el Río Salí tiene una longitud de 113,5 Km.

**b) Cuenca del Río Santa María.** El río Santa María se encuentra en el extremo noroccidental de la provincia de Tucumán, ocupando un valle tectónico de orientación norte-sur que se extiende desde la provincia de Salta al norte, hasta la provincia de Catamarca al sur. Se trata de un valle con un ancho variable entre 20 y 25 kilómetros, limitado al este por las Sierras del Aconquija – Cumbres Calchaquíes, y al oeste por las Serranías de Quilmes o El Cajón. El colector principal es el río Santa María o Yocavil que nace al oeste de la Sierra de Quilmes o del Cajón a casi 4.500 m. de altitud, en la provincia de Catamarca, con el nombre de río Colorado y con un recorrido norte-sur. En el codo de Punta de Balasto, se denomina río Saladillo desde donde inicia una amplia curva con la que orienta su curso hacia una dirección totalmente contraria sur-norte. Ya en el valle toma la denominación de río Santa María. Al norte, en la provincia de Salta, se une al río Calchaquí y forma el río de Las Conchas - Guachipas, dando origen después al río Juramento o Salado que desagua en el río Paraná. El río Santa María es de régimen permanente, con máximos caudales durante los meses de verano. Al norte del puente de Quilmes, se infiltra casi totalmente (Blasco, 1988), alimentando los reservorios subterráneos. Colecta las aguas que fluyen desde ambas márgenes del valle (secretaría de minería de la Nación, <http://www.mineria.gov.ar/ambiente/estudios/inicio.asp>).

**c) Cuenca del Río Salado.** En este sector, únicamente los ríos Urueña y Tajamar así como sus correspondientes tributarios están representados. El Río Urueña nace en la zona limítrofe entre Tucumán y Salta, entra al territorio de la Provincia de Santiago del Estero desde Tucumán donde recorre unos 50 Km en dirección SE. Su cauce pocas veces tiene el caudal suficiente como para conectarse con el Río Salado, por lo que generalmente se pierde en esteros y bañados. El Río Tajamar nace en la zona cumbral de las sierras del Campo y una vez que alcanza la zona pedemontana forma un abanico aluvial de aproximadamente 470 km<sup>2</sup>. Debido a la elevada permeabilidad de los sedimentos y al riego intensivo,

este río suele perderse en la llanura durante gran parte del año (Galindo et al., 2001).

Algunas características morfométricas de las cuencas y subcuencas en el área de estudio se detallan en la Tabla 5.

En su mayoría, las subcuencas son elongadas en sentido oeste-este. Todos los ríos presentan sus cabeceras en la ladera oriental de las cumbres Calchaquíes y de la Sierra del Aconquija y en la ladera occidental de las sierras del Cajón y de La Ramada.

Los caudales están fuertemente influenciados por el régimen de lluvias, siendo máximos durante la época húmeda (Octubre a Marzo) y mínimos en el período seco (Junio a Septiembre).

**Tabla 5.** Principales características morfológicas de las cuencas y subcuencas de la Hoja San Miguel de Tucumán.

Subcuenca	Longitud del colector principal (Km)	Superficie de la Cuenca (Km <sup>2</sup> )	Nº de orden máximo de ríos	Datos de caudal
Colorado-Famaillá	16,06	513,41	3	No
Lules	38,45	1018,59	5	Si
Tapia	18,67	242,02	4	No
Vipos	30,44	656,26	4	No
Choromoro	33,86	444,93	4	No
Acequiones	28,82	595,29	4	
Tala	45,68	862,48	5	No
La Calera	20,80	411,12	4	No
Candelaria	35,56	441,80	3	No
Cajón - Tajamar	68,37	438,34	3	No
Aguas Blancas	27,31	384,60	4	
Urueña	32,85	690,15	4	
Copo Quille	30,17	265,57	3	
Tafí – La Angostura	10,28	494,80	3	
Santa María	63,11	3029,26		No*
<b>Salí</b>	<b>113,5</b>	<b>5680,7</b>	<b>5</b>	<b>Si</b>

\*Existen datos de caudal en estaciones ubicadas fuera del área de la hoja.

## 2.1 Caudales

La determinación mensual de los caudales en los ríos de la cuenca ha sido muy irregular durante la segunda mitad del siglo pasado y es prácticamente inexistente en la actualidad. Sólo en una estación de aforos, ubicada en la localidad de Potreros de las Tablas, sobre el río Lules se continúan realizando medidas de aforo. Otras 16 estaciones de aforos distribuidas a lo largo del área de esta hoja dejaron de operar entre los años 1950 y 1978. En la Tabla 6 se indica la ubicación de las estaciones de aforo, el período en el que funcionaron y el valor de los caudales medio, máximo y mínimo de ese período

según los datos publicados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2004).

El caudal máximo promedio de los ríos de orden 4 y 5 que alimentan al río Salí desde su margen occidental es de aproximadamente 8 m<sup>3</sup>/s y el mínimo 2 m<sup>3</sup>/s. Estos valores son estimativos ya que han sido calculados sobre la base del promedio interanual de caudales máximos y mínimos, que no siempre han sido determinados en un mismo período. Por lo general, los máximos caudales interanuales se registraron entre los meses de Enero y Marzo, mientras que los mínimos, entre Agosto y Noviembre.

**Tabla 6:** Ubicación, cota y años de registro en las estaciones de aforo del área de estudio.

Estación	Río	Latitud S	Longitud O	cota (msnm)	año de inicio	año de cierre	años de registro
El Brete	Tala	26°03'58''	65°20'24''	845	1941	1961	21
Chulca	Chulca	26°11'00''	65°31'00''	1100	1952	1962	11
El Seminario	Tacanas	26°14'00''	65°30'00''	1150	1943	1962	20
La Higuera	Choromoro	26°23'00''	65°25'00''	950	1948	1950	3
San Vicente	Salí	26°29'56''	65°12'34''	580	1960	1978	19
Obras Sanitarias	Vipos	26°28'00''	65°22'00''	800	1937	1967	21
La Junta	Rearte	26°25'00''	65°33'00''	1100	1952	1965	14
Lambedero Blanco	Potrero	26°26'00''	65°33'00''	1150	1952	1963	12
El Corte – Va Lola	Medina	26°21'00''	65°50'00''	642	1947	1950	4
El Sunchal	Calera	26°37'00''	65°04'00''	600	1947	1962	15
El Cadillal	Salí	26°37'00''	65°11'00''	545	1913	1961	49
Tafí del Valle	La Quebradita	26°52'00''	65°42'00''	2285	1943	1949	7
Potrero de las Tablas*	Lules	26°51'11''	65°25'51''	950	1914	2002	76
Ruta 307 Km52	La Angostura	26°55'00''	65°41'00''	1820	1943	1976	34
Cafayate	Chuscha	26°06'00''	66°00'00''	1750	1941	1950	10
La Punilla	Calchaquí	26°06'42''	65°49'24''	1790	1948	1967	20
7 de Abril	Urueña	26°13'00''	64°32'00''	438	1948	1956	9

\* Estaciones que permanecen en funcionamiento.

**Tabla 6 (continuación):** caudales medios, máximos y mínimos registrados en las estaciones de aforos del área de estudio.

Estación	Río	caudal medio anual (Hm <sup>3</sup> /s)	caudal máximo anual (Hm <sup>3</sup> /s)	caudal mínimo anual (Hm <sup>3</sup> /s)
El Brete	Tala	5,92	9,83	3,47
Chulca	Chulca	1,57	2,95	0,83
El Seminario	Tacanas	1,31	2,73	0,44
La Higuera	Choromoro	1,79	1,79	1,79
San Vicente	Salí	11,46	22,40	5,14
Obras Sanitarias	Vipos	3,39	6,57	0,87
La Junta	Rearte	1,66	5,61	0,34
Lambedero Blanco	Potrero	0,96	1,96	0,42
El Corte – Va Lola	Medina	7,42	7,68	7,16
El Sunchal	Calera	0,68	1,99	0,32
El Cadillal	Salí	14,66	36,72	5,62
Tafí del Valle	La Quebradita	0,04	0,05	0,03
Potrero de las Tablas*	Lules	6,35	12,93	2,17
Ruta 307 Km52	La Angostura	1,30	2,38	0,57
Cafayate	Chuscha	0,50	0,71	0,35
La Punilla	Calchaquí	6,48	23,35	0,44
7 de Abril	Urueña	0,23	0,34	0,15

## 2.2. Calidad y composición química del agua

Las aguas superficiales de la región son utilizadas para consumo humano y animal, riego y abastecimiento a las industrias que generalmente se desarrollan sobre las márgenes del Río Salí. Es por esto que en la franja que se extiende en sentido N-S a lo largo del curso del río Salí, la calidad del agua está más afectada por los efluentes derivados de todas esas actividades. Por el contrario, las cabeceras de

los principales ríos tienen aguas de buena calidad. El grado de alteración de la calidad del agua no es constante a lo largo del año debido a la distribución estacional de las precipitaciones y al carácter también estacional de la actividad industrial.

La Dirección General de Saneamiento Ambiental de la Provincia de Tucumán es la encargada de realizar el monitoreo de la calidad del agua de los ríos de la Provincia de Tucumán. Además, existen datos recopilados por institutos y centros de

investigación pertenecientes a la Universidad Nacional de Tucumán, tal como el CIQ (Centro de Investigaciones y Transferencia en Química Aplicada), el ILINOA (Instituto de Limnología del NOA) y el INSUE (Instituto Superior de Entomología) de la Universidad Nacional de Tucumán. Los estudios comprenden además, aspectos ecológicos de distintas comunidades acuáticas (bacterias, plancton, aves, peces, entre otras) en relación con parámetros fisicoquímicos.

El estudio de la composición química promedio de los ríos de la provincia de Tucumán, revela que en su gran mayoría las aguas se clasifican como bicarbonatadas cálcicas, excepto los ríos Calera y Colorado en su cauce superior, que se clasifican como sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas. La composición iónica mayoritaria de los ríos no presenta fluctuaciones estacionales de relevancia en los tramos que no están perturbados por actividades humanas (Hidalgo et al., 2006).

Las aguas del río Salí, a lo largo de su recorrido, pasan de ser bicarbonatadas sódicas, a la altura del balneario El Boyero (Trancas), a sulfatadas cálcicas, a la altura de la localidad de Los Gómez, aproximadamente 40 km antes de su desembocadura en el embalse de Río Hondo (fuera del área de esta hoja). La calidad de sus aguas está afectada por contaminación de origen fundamentalmente orgánico en su curso medio e inferior, con una recuperación en la calidad de las aguas antes de su desembocadura en el embalse de Río Hondo, que es más marcada en época de lluvias (Galindo et al., 2001). En general, los estudios de calidad llevados a cabo en el Río Salí coinciden en que el mayor impacto se produce en el tramo en el que el río atraviesa el complejo urbano de San Miguel de Tucumán (Grimaldi 1973; MCT y MA 1995; SEMA 1996; Hidalgo et al. 1994, 2001, 2006; Perera et al. 1996; Seeligmann 1998; Chaile et al. 2000; Fernández Turiel et al. 2001).

La evaluación de la calidad de las aguas realizada sobre la base de parámetros fisicoquímicos y biológicos demostró que ciertas zonas se encuentran fuertemente contaminadas. Domínguez y Fernández, 1998 elaboraron un mapa de la calidad de las aguas de los principales ríos de la cuenca del Río Salí (Figura 7). En el mapa se puede apreciar la calidad del agua de los ríos, según distintos colores preestablecidos. Como resultado de estos estudios, se puede ver que la contaminación está restringida al eje norte-sur que determina la ruta 9 hacia el norte, y la 38 hacia el sur de la Capital. Si bien las fuentes de contaminación consideradas son de origen industrial

y urbano, existen otras asociadas con los fertilizantes y biocidas usados en la agricultura que son de carácter difuso. Esta situación se magnifica en época de invierno - primavera primavera debido al bajo caudal de los ríos y a la coincidencia con el período de zafra de la industria azucarera.

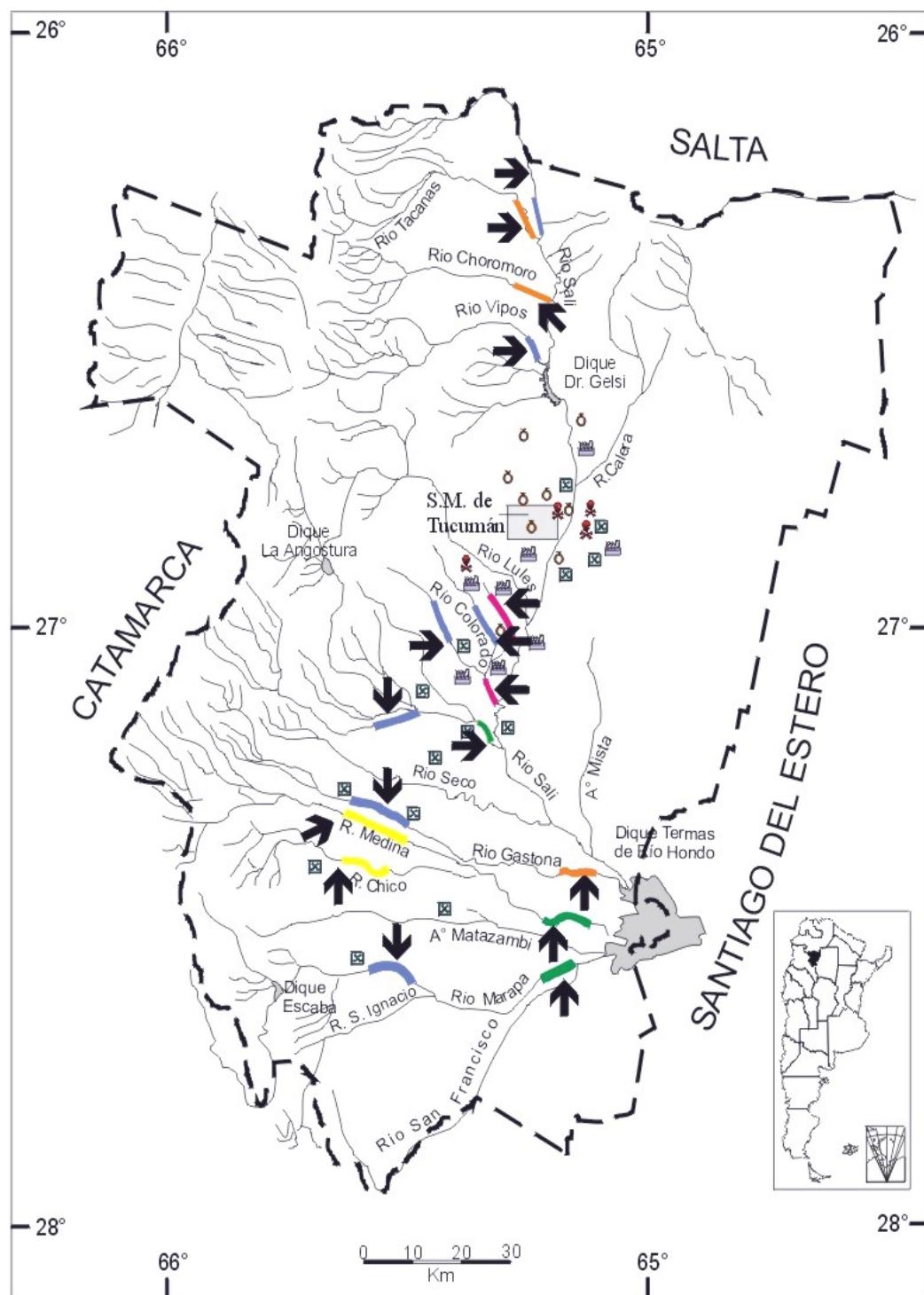
La determinación de metales pesados en los principales cursos de las cuencas del Río Salí y Santa María fue llevada a cabo por la Secretaría de minería de la Nación, quienes informan que en general los contenidos de metales pesados tales como arsénico, cadmio, zinc y molibdeno no superan los límites máximos permitidos para aguas de consumo establecidos por el Código Alimentario Argentino (CAA, 1994). Sin embargo tanto en el Río Santa María como en el río Salí, los contenidos de Fe y Mn pueden superar esos límites sobre todo en épocas de caudales mínimos.

En el caso particular del Río Santa María, el vertido de los efluentes derivados de la planta de tratamiento de minerales de Minera Alumbrera puede producir disminución en los valores de pH y oxígeno disuelto, así como elevadas concentraciones de Fe, Mn y As en algunos sectores del río.

### 2.3. Infraestructura hídrica

En el sector abarcado por esta carta existen dos diques que embalsan las aguas de los ríos Salí y La Angostura respectivamente. El dique El Cadillal se encuentra al norte de la ciudad de San Miguel de Tucumán y se utiliza principalmente para el abastecimiento de agua para consumo, riego, generación hidroeléctrica y recreación. El segundo, emplazando en el valle de Tafí, entre las localidades de Tafí del Valle y El Mollar, sólo tiene fines recreativos en la actualidad. En la Tabla 7 se indican algunas características de estos embalses.

De acuerdo con un trabajo realizado por Adler (2006), los embalses disponibles actualmente y los de posible ejecución en la provincia de Tucumán, no conforman un volumen suficiente para un aprovechamiento total del agua disponible. Los que hoy operan tienen una vida entre 27 y 56 años y algunos están sometidos a fuertes procesos de colmatación por sedimentos con disminución importante de su capacidad regulatoria y, en el caso del embalse El Cadillal, afectación de la calidad de las aguas (Adler, 2004). En la totalidad de los embalses, a pesar del tiempo transcurrido desde su implantación, no se llegaron a desarrollar totalmente los sistemas de uso del agua previstos (redes de riego, agua potable, etc.).



**Figura 7:** Mapa que muestra la calidad de las aguas superficiales en distintos puntos de los principales ríos de la cuenca del Salí en la Provincia de Tucumán (Modificado de Domínguez y Fernández 1998). Se incluye además la ubicación y descripción de las principales actividades de la zona.

**Tabla 7:** Características generales de los diques construidos en el área de estudio

Río	Localidad	Fecha de construcción	Capacidad (Hm <sup>3</sup> )	Uso actual
Salí	El Cadillal	1966	192 <sup>1</sup>	Riego - Agua Potable - Industrias – recreación Hidroelectricidad
La Angostura	La Angostura	1979	79 <sup>2</sup>	recreativo

Fuente: ORSEP (Organismo Regulador de Seguridad de Presas-Regional Norte). <sup>1</sup> Capacidad actual

<sup>2</sup> Capacidad inicial

## RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS

En base a las características geológicas, geomorfológicos e hidrogeológicas, Tineo et al. (1998) han diferenciado en la Provincia de Tucumán tres ambientes hidrogeológicos. 1) La Provincia Hidrogeológica de los valles intermontanos de las Sierras Pampeanas comprende las cuencas hidrogeológicas del valle del Río Santa María y del Valle de Tafí. 2) La Provincia Hidrogeológica de los valles intermontanos de las Sierras Subandinas comprende a la cuenca hidrogeológica Tapia-Trancas y 3) la Provincia hidrogeológica Tucumano-Santiagueña cubre las cuencas ubicadas en llanura oriental.

Estas tres provincias se encuentran presentes dentro del área de esta carta.

### 3.1. Provincia Hidrogeológica de los valles intermontanos de las Sierras Pampeanas

Ubicada en el extremo occidental de esta carta, la provincia comprende dos cuencas hidrogeológicas: la cuenca del valle de Santa María y la cuenca de Tafí. Las características principales de estas cuencas han sido descritas en detalle por Tineo et al (1998) y se resumen más abajo.

#### 3.1.1. Cuenca del Valle del Río Santa María

El desarrollo de los acuíferos productivos en esta cuenca está limitado a los sedimentos cuaternarios depositados en niveles de glacis, conos modernos y terrazas fluviales fundamentalmente de la margen occidental del río Santa María que abarcan una superficie de alrededor de 100 Km<sup>2</sup>. Se han encontrado niveles saturados hasta una profundidad máxima de 210 metros bajo boca de pozo (mbbp) en la localidad de Puesto de Incallala.

La profundidad de la freática oscila entre los 10 y 16 mbbp y por debajo de los 20 m comienza a desarrollarse el acuífero confinado; los niveles

estáticos alcanzan profundidades que varían entre los 15 y 30 mbbp. En general las aguas extraídas son aptas para consumo humano y animal y para riego.

La recarga de estos acuíferos proviene de la infiltración de las escasas precipitaciones en los conos aluviales y glacis que descienden desde la Sierra de Quilmes, del agua que escurre en los estratos precuartarios de escasa permeabilidad y del agua que se infiltra directamente desde el río principal y de algunos de sus afluentes de régimen permanente como el río Amaicha. Se ha estimado que la recarga natural es de aproximadamente 8,8 Hm<sup>3</sup>/año, a lo que hay que sumar la recarga artificial producida por riego. Luego de infiltrarse, se estima que el agua sigue un movimiento similar al de las aguas superficiales hasta la zona de descarga ubicada en el área más baja del valle y en un sector comprendido entre Quilmes y Colalao del Valle donde el afloramiento del agua subterránea forma una serie de bañados.

#### 3.1.2. Cuenca del Valle del Río Tafí

Como en el caso anterior, los acuíferos encontrados en esta cuenca corresponden a depósitos cuaternarios de glacis, abanicos aluviales y materiales acarreados por los ríos. Estos depósitos quedan restringidos a una superficie de 400 Km<sup>2</sup> ocupada por una depresión tectónica elongada en sentido NNO-SSE. Las perforaciones en la zona son escasas, y las existentes han alcanzado una profundidad máxima de 160 m. El acuífero freático se desarrolla entre los 2 y 14 mbbp, mientras que los acuíferos confinados se encuentran por debajo de los 18 mbbp. Los niveles estáticos oscilan entre los 5 y 7 mbbp y las aguas son aptas para consumo en todos los casos.

La recarga proviene de la infiltración de las escasas precipitaciones en los niveles permeables de los conos aluviales y de los cursos superficiales provenientes del deshielo y las precipitaciones. Luego de infiltrarse se mueve siguiendo la pendiente regional. La zona de descarga coincide con el emplazamiento del dique La Angostura.

### **3.2. Provincia Hidrogeológica de los valles intermontanos de las Sierras Subandinas**

#### **3.2.1. Cuenca Tapia - Trancas**

Esta cuenca se encuentra en el sector central y septentrional de la hoja San Miguel de Tucumán. Hacia el este limita con la sierra de Medina y hacia el oeste con las Cumbres Calchaquíes. Hacia el sur la cuenca se cierra en el morro de El Cadillal y los bordos del Saladillo.

La red de drenaje en la zona evidencia el marcado control estructural, con un diseño dendítico a subparalelo de rumbo O-E que está regulado por la litología superficial, en su mayor parte constituida por sedimentitas friables de granulometría variable (Páez, 2000).

Los sedimentos portadores de agua de buena calidad corresponden a depósitos aluviales ubicados al pie de las escarpas de falla y a depósitos fluviales que rellenan los valles de los ríos intermontanos cuya extensión no supera los 1000 Km<sup>2</sup> de superficie.

La recarga se localiza en el faldeo oriental de las Cumbres Calchaquíes donde las precipitaciones se infiltran a través de depósitos de glacis y conos aluviales. Además se estima que existen una recarga proveniente de la infiltración desde los cursos de agua superficiales favorecida por la presencia de sedimentos gruesos y altamente permeables acumulados en los valles de estos ríos. El movimiento del agua sigue la dirección de la pendiente regional siendo en sentido predominante E-O hacia la margen oeste del Río Salí y en sentido N-S en las proximidades de los ríos Tala-Salí en coincidencia con la dirección de escurrimiento de las aguas superficiales.

La mayor parte de las perforaciones en esta cuenca no supera los 100 metros de profundidad. En las proximidades del Río Acequiones, el acuífero freático se desarrolla entre los 4 y 15 m de profundidad, mientras que el acuífero confinado se desarrolla por debajo de los 30 m de profundidad (Páez, 2000) Este acuífero consiste en una sucesión de niveles arenosos saturados intercalados con niveles limo-arcillosos impermeables.

### **3.3. Provincia Hidrogeológica Tucumano-Santiagueña**

Esta es la cuenca hidrogeológica más extensa de la provincia de Tucumán y una de las más importantes del país. En la Provincia de Tucumán, la cuenca se denomina de la Llanura Oriental (Tineo et al., 1998) y está dividida en dos sectores, separados ambos por la dorsal de Tacanas, una estructura

positiva enterrada que actúa como divisoria de aguas subterráneas. Hacia el norte de esta dorsal se desarrolla la cuenca hidrogeológica de Burruyacu, mientras que hacia el Sur y el Oeste se extiende la cuenca hidrogeológica del Río Salí.

#### **3.3.1. Cuenca de Burruyacu**

Se extiende desde el faldeo oriental de las Sierras de La Ramada, El Campo y La Candelaria hacia los extremos NE y E de esta hoja.

En el sector ocupado por las sierras antes mencionadas, afloran rocas del basamento, de escasa permeabilidad secundaria que favorecen en escurrimiento del agua de las precipitaciones hacia la llanura ubicada al este. En este sector de la cuenca, las precipitaciones oscilan entre los 800 y 1000 mm anuales y se distribuyen en forma irregular a lo largo del año, concentrándose en los meses de verano (EEAOC, 1997)

En el sector pedemontano se encuentran sedimentos terciarios de baja permeabilidad que constituyen el núcleo de una serie de lomadas que se intercalan con antiguos depósitos cuaternarios de glacis, de buen espesor, y con algunos niveles conglomerádicos (Tineo et al., 1998). Estos depósitos son altamente permeables y favorecen la infiltración del agua de lluvia que desciende desde las sierras. Hacia el este, la llanura está cubierta por una capa de loess que puede alcanzar los 40 m de espesor, por debajo de la cual se desarrollan depósitos aluviales cuaternarios.

##### **3.3.1.1. El acuífero libre**

La profundidad del acuífero freático puede variar entre los 1.5 y 40 m. En la zona pedemontana se encuentra a 30 metros de profundidad; cerca del Río Muerto el nivel está próximo a los 5 m por debajo de la superficie, en las cercanías del Río Tajamar a 11 m y hacia el extremo NE el nivel del agua se encuentra por debajo de los 27 m de profundidad (Galindo et al., 2001). El movimiento del agua en el acuífero freático esta relacionado con la topografía y en general tiene dirección NO-SE.

##### **3.3.1.2. Acuífero confinado**

Es un acuífero múltiple formado por niveles saturados de gravas y arenas que se intercalan con niveles impermeables de arcillas y limos que se hacen más abundantes hacia el este. Este acuífero puede desarrollarse entre los 50 y 450 m de profundidad. Por lo general estos pozos extraen agua desde dos a

diez niveles saturados, con caudales específicos que varían entre 1 y 5,6 m<sup>3</sup>/h/m y caudales de surgencia de entre 2 y 130 m<sup>3</sup>/h (Galindo et al., 2001).

El perfil litológico de la Figura 8 corresponde a un esquema de una sección NE-SO del sector sur de la cuenca de Burruyacu (ver ubicación en el mapa hidrogeológico). En este perfil se observa la alternancia en profundidad de niveles gravosos y arenosos de escaso espesor, intercalados con niveles limoarcillosos de mayor potencia. La profundidad promedio de los pozos en esta cuenca es de aproximadamente 250 m; los pozos más profundos se encuentran hacia el borde este, donde pueden sobrepasar los 450 m de profundidad.

Los depósitos de loess que cubren toda la cuenca desde su borde oriental se comportan como una barrera semipermeable que limita la infiltración del agua de lluvia hacia los acuíferos más profundos. Sin embargo, las características químicas del agua sugieren que puede producirse una percolación limitada del agua de la freática hacia las aguas más profundas (Warren et al., 2005).

La mayor recarga del acuífero confinado proviene de la infiltración del agua de lluvia en los niveles más permeables de la zona pedemontana y del abanico aluvial que forma el Río Tajamar al alcanzar la llanura. Un vez que alcanza los niveles saturados, el agua se mueve en sentido SE siguiendo la pendiente regional. En la zona de la llanura deprimida, ubicada en el extremo SE del área de esta hoja, los pozos presentan elevada presión artesiana.

Las curvas isopiezas representadas en el mapa hidrogeológico fueron obtenidas a partir de datos de profundidad sobre el nivel del mar de los niveles estáticos registrados en más de 250 pozos ubicados en las cuencas de Burruyacu, del Río Salí y Tapiá-Trancas. Las curvas fueron generadas con el programa Surfer 8.04 (Golden Software Inc 2002)

usando el método de interpolación kriging point. La distribución de las curvas isopiezas indica que el movimiento del agua es en dirección E-SE, aunque se observan zonas de drenaje centrípeto en algunos sectores ubicados en el límite entre la llanura y la zona pedemontana. El área de surgencia se encuentra en el extremo SE de la cuenca, coincidiendo en gran parte con la zona de la llanura deprimida.

La mayor parte de las perforaciones realizadas en este sector están destinadas a proporcionar agua para el abastecimiento de la población. Todas las comunas presentan un pozo a partir del cual se distribuye el agua a las viviendas. En los mejores casos, la distribución se hace por medio de una red que se conecta al pozo, aunque en general el pozo se hace en un sector de fácil acceso a fin que los pobladores lleven el agua a sus casas cuando la necesitan. En muchos casos el pozo pertenece a la escuela o el hospital de la comuna.

Por tratarse de un área principalmente agrícola, se han realizado numerosas captaciones a fin de obtener agua para riego.

El uso del agua depende de su aptitud química. Debido a su elevada conductividad, no todas las aguas son aptas para riego. La zona central y norte del área surgente tiene una peligrosidad salina media (Martínez, 1998), por lo cual estas aguas son aptas para el riego de vid, olivo, tomate, coliflor, lechuga, maíz, cebolla, zanahoria, alfalfa, trigo, centeno, avena y girasol. El resto de la zona surgente tiene peligrosidad salina elevada (Martínez, 1998) y por lo tanto sus aguas se utilizan para el riego de cultivos de palmera datilera, remolacha, espárrago, espinaca, cebada y algodón (Richards, 1954). El mapa de variación de la conductividad en las aguas subterráneas profundas de la cuenca muestra estas variaciones e indica también que la conductividad aumenta hacia el sector NE (Figura 9 a)

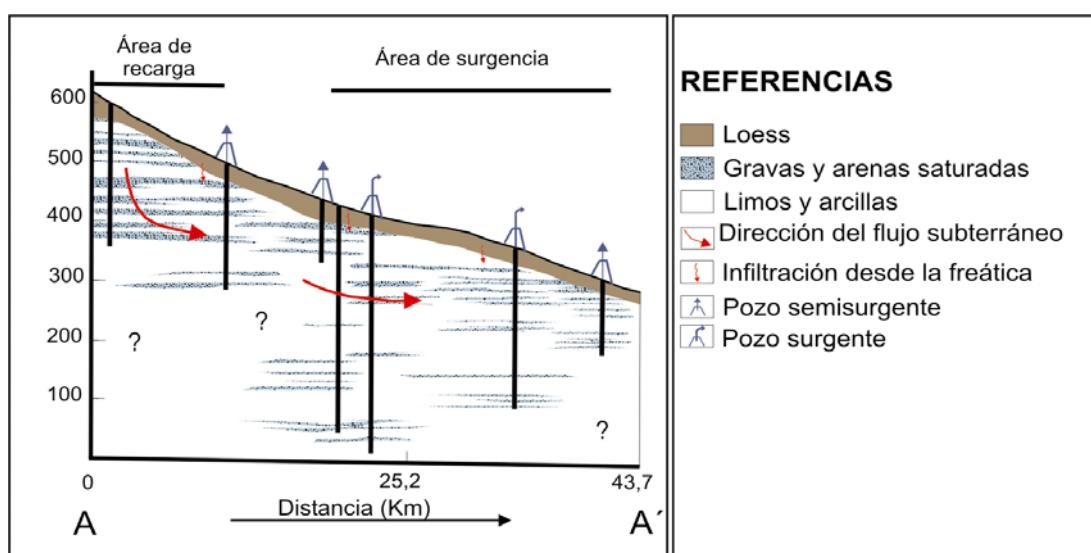
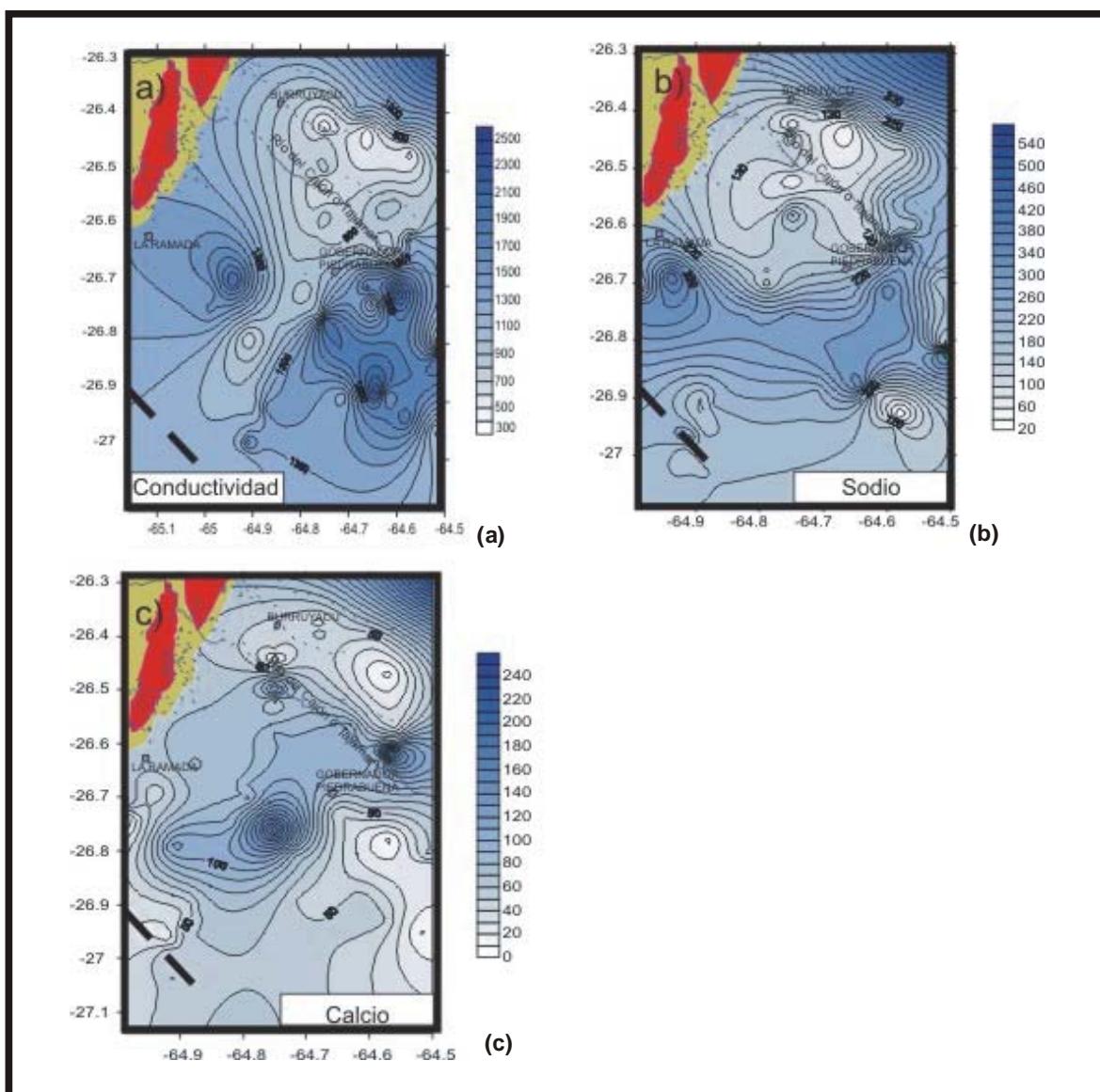


Figura 8: Corte esquemático de la sección A - A' (NO - SE) indicada en el mapa hidrogeológico.



**Figura 9:** Variación espacial de la conductividad y la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  en las aguas profundas de la cuenca de Buruyacu. Los valores están expresados en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (a) y  $\text{mg L}^{-1}$  (b y c).

De acuerdo con su composición iónica mayoritaria, las aguas confinadas son en su mayoría de tipo sulfatadas sódicas, aunque en algunos pozos las aguas son sulfatadas cálcicas sódicas y cloruradas y/o sulfatadas sódicas (Martínez, 1998).

La distribución espacial de los elementos mayoritarios en las aguas subterráneas profundas presenta una tendencia definida que se representa en los mapas de líneas de isoconcentración de las Figuras 9 y 10.

En la zona de recarga de los acuíferos profundos, los valores de conductividad son más bajos que en el resto del área de estudio. En general el valor de la conductividad aumenta hacia el sureste y el noreste.

El pH varía de ligeramente ácido a alcalino, con un valor promedio de 7,5. Los valores de pH más bajos se concentran en un sector restringido ubicado al sur de la localidad de Gobernador

Piedrabuena (Figura 10 a). No se observa una tendencia muy clara de variación en el sentido del flujo, aunque si puede observarse una ligera disminución hacia el borde sur de la cuenca donde se encuentra la dorsal de Tacanas.

La concentración de bicarbonato aumenta hacia el borde SO de la hoja (Figura 10 b) mientras que la concentración del cloruro aumenta claramente en el sentido del escurrimiento del agua (Figura 10 c). Las máximas concentraciones de sulfato (Figura 10 d) y de calcio (Figura 9 c) se encuentran en el límite entre la llanura y la llanura deprimida.

### 3.3.2. Cuenca del Río Salí

La mayor parte de la superficie de esta cuenca está incluida dentro de la hoja 2766-IV «Concepción», pero su extremo norte se encuentra en el sector sur de esta hoja. Los límites de la Cuenca hidrogeológica

del Río Salí en la hoja San Miguel de Tucumán corresponden al faldeo oriental de la sierra de San Javier hacia el oeste, el extremo sur de la sierra de La Ramada hacia el norte y el espolón de Tacanas que constituye el límite NE de la cuenca.

La cuenca del Río Salí es parte de una depresión estructural rellena con unos 3000 m de sedimentos terciarios y cuaternarios (Mon y Vergara 1987). Los primeros 30 metros han sido denominados como Formación Tucumán (Bonaparte y Bobovniqov 1974) y consisten en sedimentos loessicos re-trabajados que contienen abundante vidrio volcánico y plagioclasas y cantidades menores de cuarzo y carbonato. Estos sedimentos alternan con frecuentemente con lentes arenosos y gravosos. En las proximidades del Río Salí, estos depósitos alternan con los sedimentos gravosos y arenosos depositados por el río.

Por debajo de la cubierta loessica se encuentran sedimentos cuaternarios representados por una potente sucesión de depósitos aluviales depositados por antiguos abanicos. Al pie de la sierra de San Javier predominan materiales gruesos con intercalaciones arcillosas y limoarcillosas muy delgadas que hacia el este gradan hacia materiales predominantemente más finos (Figura 11).

Los sedimentos terciarios que constituyen el núcleo de una serie de lomadas que se disponen paralelas al flanco oriental de la sierra de San Javier, son considerados el basamento hidrogeológico de la región debido a que tienen permeabilidad de moderada a baja y son portadores de gran cantidad de sales solubles por lo que los acuíferos encontrados en ellas son pobres y contienen agua de mala calidad (Tineo y García, 1996).

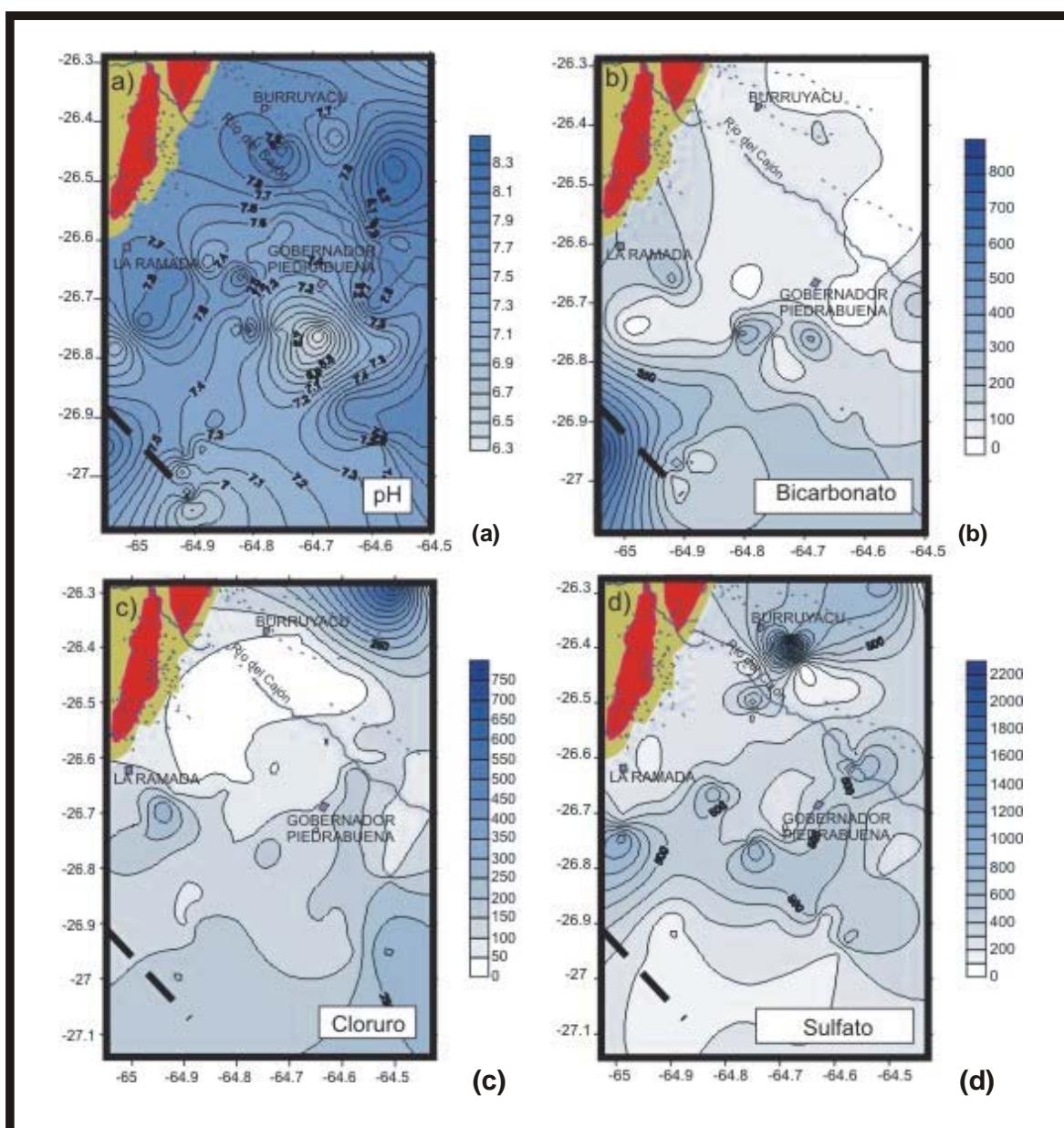


Figura 10. Variación espacial del pH, bicarbonato, cloruro y sulfato en aguas subterráneas profundas de la cuenca de Burruyacu.

En base a perfiles de perforaciones se han podido definir tres tipos de acuíferos en este sector de la cuenca hidrogeológica del Río Salí (García et al., en prensa):

### 3.3.2.1. El acuífero libre

Se encuentra alojado en los sedimentos loessicos que cubren gran parte de la llanura del este. En las proximidades de las Sierras de San Javier, la profundidad del acuífero freático oscila entre los 20 y 30 metros (Tineo y García 1996), mientras que hacia el este, la profundidad disminuye hasta alcanzar valores cercanos a los 3 m en las proximidades del Río Salí.

En el extremo SE de la hoja, la freática tiene una profundidad que puede variar entre los 3 y 36 metros (Warren et al., 2005), y su nivel está intensamente relacionado con la distribución de las precipitaciones, lo cual coincide con el comportamiento del nivel de la freática en toda la llanura oriental (Figueroa et al., 1996).

En el sector nororiental de la cuenca, el acuífero freático es ampliamente explotado en perforaciones domésticas que suplen la falta de una red de distribución de agua potable. Estos pozos funcionan con pequeñas bombas manuales y tienen diámetros de aproximadamente 50 cm. Los pozos freáticos del sureste, funcionan por lo general con baldes o pequeñas bombas eléctricas, tienen un diámetro de 1 metro aproximadamente y por lo general se encuentran abiertos o protegidos con tapas precarias.

La calidad del agua del acuífero freático está fuertemente afectada por su composición química y bacteriológica. El problema más grave corresponde a la presencia de elevadas concentraciones de arsénico que han sido documentadas principalmente en las proximidades de las localidades de Los Pereyra, Estación Aráoz y Ranchillos (Nicoll et al., 2000; Warren et al., 2005; García et al., en prensa). Los niveles de As en los pozos someros (de hasta 40 metros) en esta región superan ampliamente el límite establecido por el Código Alimentario Argentino (CAA, 1994) para aguas de consumo de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ , llegando a superar en algunos casos los  $1000 \mu\text{g L}^{-1}$ . Además de arsénico, estas aguas contienen concentraciones de flúor, boro, vanadio y nitrato que superan los límites recomendados por el CAA para aguas de consumo. Recientemente, García et al. (en prensa) determinaron que la concentración de As en la freática varía temporalmente, dependiendo de la variación del nivel de la freática. Estos autores observaron que un aumento en el nivel del agua dentro del pozo produce un aumento en la concentración de este elemento. Si bien el origen del arsénico en la

freática aun no ha sido determinado con precisión, está ampliamente aceptado que existe una fuente primaria de As asociada al vidrio volcánico y minerales oscuros como biotita (Sracek, 2006) dispersos en el loess. Una vez que el elemento es liberado en solución por la meteorización de estos minerales, el As (que se encuentra principalmente formando las especies  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ) se adsorbe sobre la superficie de óxidos de hierro que se encuentran formando pátinas o llenando fracturas en otros minerales del loess. Debido a que el pH del agua es alcalino (pH promedio de 8,05), la afinidad de los óxidos de hierro por las especies del As es muy pequeña, lo cual explica las elevadas concentraciones observadas.

El flúor también se encuentra en concentraciones que superan el límite máximo recomendado para aguas de consumo ( $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ ; CAA, 1994). En la zona de Los Pereyra, las concentraciones de flúor varían entre  $<0,05$  y  $8,3 \text{ mg L}^{-1}$ , con un valor promedio de  $1,6 \text{ mg L}^{-1}$  (Warren et al., 2005). El origen del flúor no ha sido identificado aún, pero en base a asociaciones geoquímicas se ha podido distinguir que probablemente haya dos fuentes, una en donde el flúor está asociado con el arsénico y otra que sólo libera flúor en solución.

### 3.3.2.2. Acuífero confinado y semiconfinado

El acuífero semiconfinado corresponde a gravas y arenas fluviales depositadas por el Río Salí y que en el área de estudio alcanzan un espesor de hasta 150 m. La recarga de este acuífero se da por la infiltración de la lluvia y por la infiltración directa de las aguas del Río Salí. Hacia el este, estos depósitos se interdigitan con el material loessico que cubre la llanura en los primeros 30 metros y con los acuíferos cuaternarios más profundos (Figura 11). No se conoce cuál es la extensión lateral de esta interconexión.

El acuífero confinado corresponde a un sistema múltiple desarrollado entre los 30 y los 400 metros de profundidad donde los niveles arenosos y permeables se intercalan con niveles arcillosos y limoarcillosos impermeables. La recarga de estos acuíferos se produce principalmente por la percolación del agua de lluvia a lo largo del área pedemontana de las Sierras de San Javier y en menor proporción en la zona pedemontana de las Sierras de Medina.

De acuerdo con la distribución de las curvas isopiezas (ver mapa hidrogeológico), la dirección principal del movimiento del agua subterráneas profunda es hacia el SE. Se distingue además una zona de surgencia que penetra como una cuña desde el SE hacia sectores ocupados por las porciones

distales de los abanicos aluviales que coincide con el cauce del Arroyo El Manantial y que hacia el norte continua en una depresión que atraviesa el sector occidental de la ciudad de San Miguel de Tucumán y que se ha denominado la «cuenca artesiana de Yerba Buena» (Tineo y García, 1996). Los pozos perforados en este sector son surgentes y altamente productivos.

El perfil B-B' corresponde a un corte de dirección NE-SE del área de estudio.

Las perforaciones profundas en la zona se utilizan para el abastecimiento de agua potable, para el riego y la actividad industrial. Muchas de las perforaciones que se encuentran próximas a la ciudad de San Miguel de Tucumán se conectan directamente a la red de distribución domiciliaria. La mayoría de las mismas son gestionadas por la empresa concesionaria de la distribución.

En general, las aguas extraídas de pozos de más de 100 metros de profundidad son aptas para consumo humano.

De acuerdo con su composición química mayoritaria, las aguas evolucionan de bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas en la zona de recarga a sulfatadas y/o cloruradas sódicas en el límite SE de la hoja geológica. En las proximidades del Río Salí, las aguas son principalmente bicarbonatadas sódicas (García et al., 1998; García et al., 2001).

Las concentraciones de sodio y calcio varían en forma casi opuesta en el sentido del flujo. Mientras el calcio disminuye hacia el SE, la concentración de sodio aumenta en esa misma dirección (Figura 12 a y b).

El pH varía de ligeramente ácido a alcalino, con un valor promedio de 7,1. Los valores de pH más bajos se concentran a lo largo del área pedemontana de la Sierra de San Javier y aumentan hacia el eje central de la cuenca (Figura 12 c).

La concentración de bicarbonato disminuye hacia el borde sur y SE de la hoja (Figura 13 a) mientras que la concentración del cloruro aumenta hacia el SE en el sentido del escurrimiento del agua (Figura 13 b). Las máximas concentraciones de sulfato (Figura 13 c) por el contrario se encuentran en el límite entre las cuencas del Río Salí y

Burruyacu, sobre el espolón de Tacanas.

Los datos sobre el contenido de metales pesados en pozos profundos de este sector de la cuenca del Río Salí son limitados. Los pozos más estudiados son los ubicados en la región cercana a Los Pereyra y aquellos que se encuentran en el Gran San Miguel de Tucumán y que son destinados al abastecimiento de agua potable. Estos datos son recopilados en su mayor parte por la empresa concesionaria de la distribución del agua, y por lo general no son de libre acceso. La información disponible corresponde fundamentalmente a niveles de arsénico y ocasionalmente de flúor. En general, las aguas subterráneas profundas ubicadas en sectores pedemontanos, al oeste del Río Salí, presentan concentraciones de As por debajo de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ . Hacia el este, se han detectado concentraciones mayores de As en pozos de más de 100 metros de profundidad en localidades como Agua Dulce, Orán y Los Pereyra. En este lugar, se ha medido una concentración máxima de  $70 \mu\text{g L}^{-1}$  en un pozo de 80 metros de profundidad (Warren et al., 2005). Las concentraciones de flúor, por el contrario no exceden el máximo permitido en ningún caso.

### 3.4. Termalismo

Las aguas surgentes de la cuenca de Burruyacu que se extraen de pozos de más de 160 m de profundidad presentan valores anómalos de temperatura. El valor más elevado de temperatura se midió en un pozo de La Fortuna (provincia de Santiago del Estero) de 280 m de profundidad, donde alcanzó los  $48^\circ\text{C}$  en superficie. En la provincia de Tucumán, se midieron temperaturas superiores a los  $40^\circ\text{C}$  en las localidades de Paso de la Patria ( $44,7^\circ\text{C}$  y 474 m de profundidad), La Tuna ( $44^\circ\text{C}$ , 400 m de profundidad) y Santa Lucía ( $41,6^\circ\text{C}$ , 380 m de profundidad) entre otros.

Los geotermómetros químicos indican temperatura de foco de  $70^\circ\text{C}$  para El Azul,  $78^\circ\text{C}$  en Paja Colorada,  $86^\circ\text{C}$  en Paso de la Patria,  $89^\circ\text{C}$  en El Triunfo,  $97^\circ\text{C}$  en Las Cejas,  $98^\circ\text{C}$  en Gobernador Garmendia y Estación La Argentina y  $117^\circ\text{C}$  en El Zapallar (Martínez, 1998)

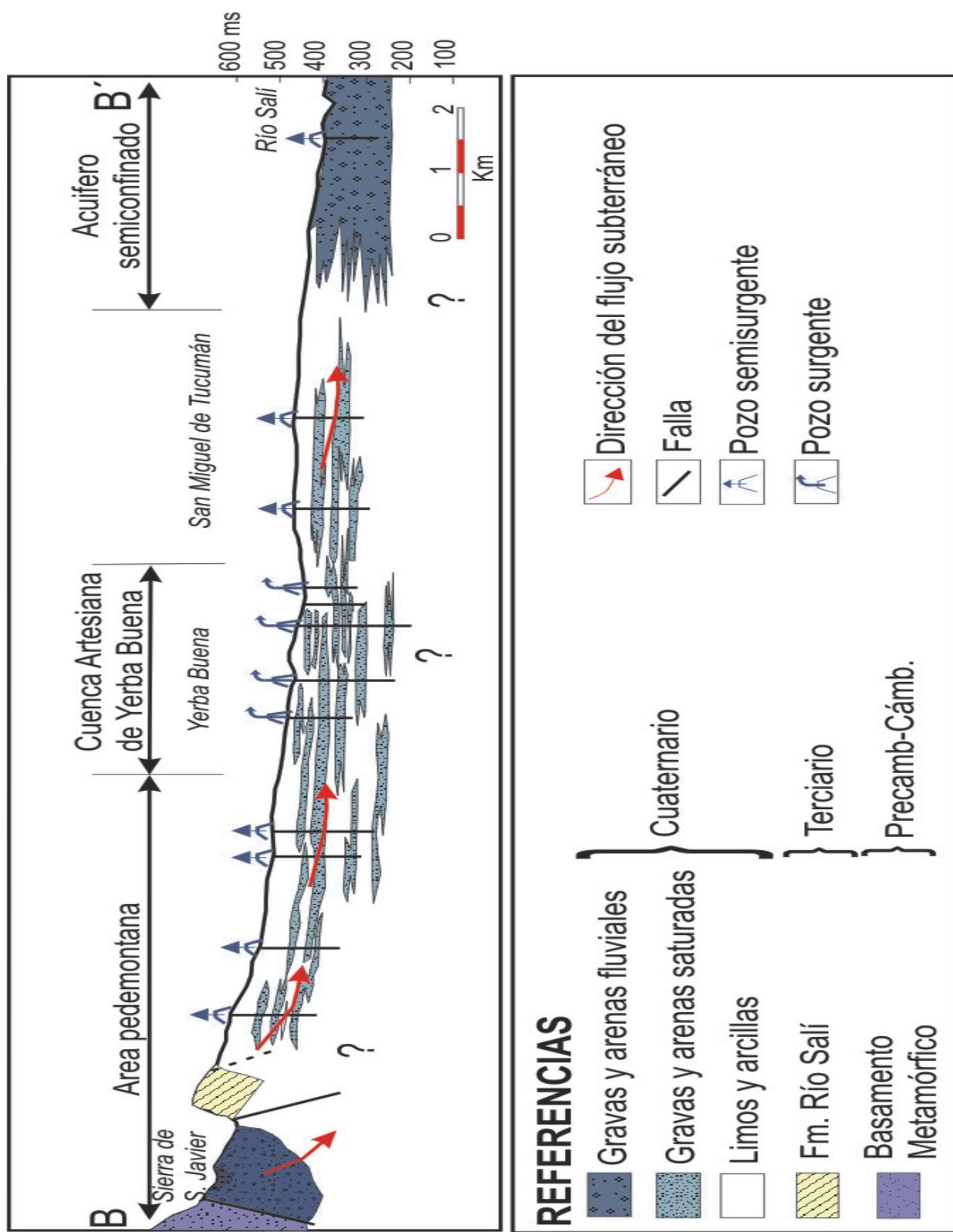


Figura 11: Corte esquemático de la sección A – A' (NO –SE) indicada en el mapa hidrogeológico (modificado de Tineo y García, 1998).

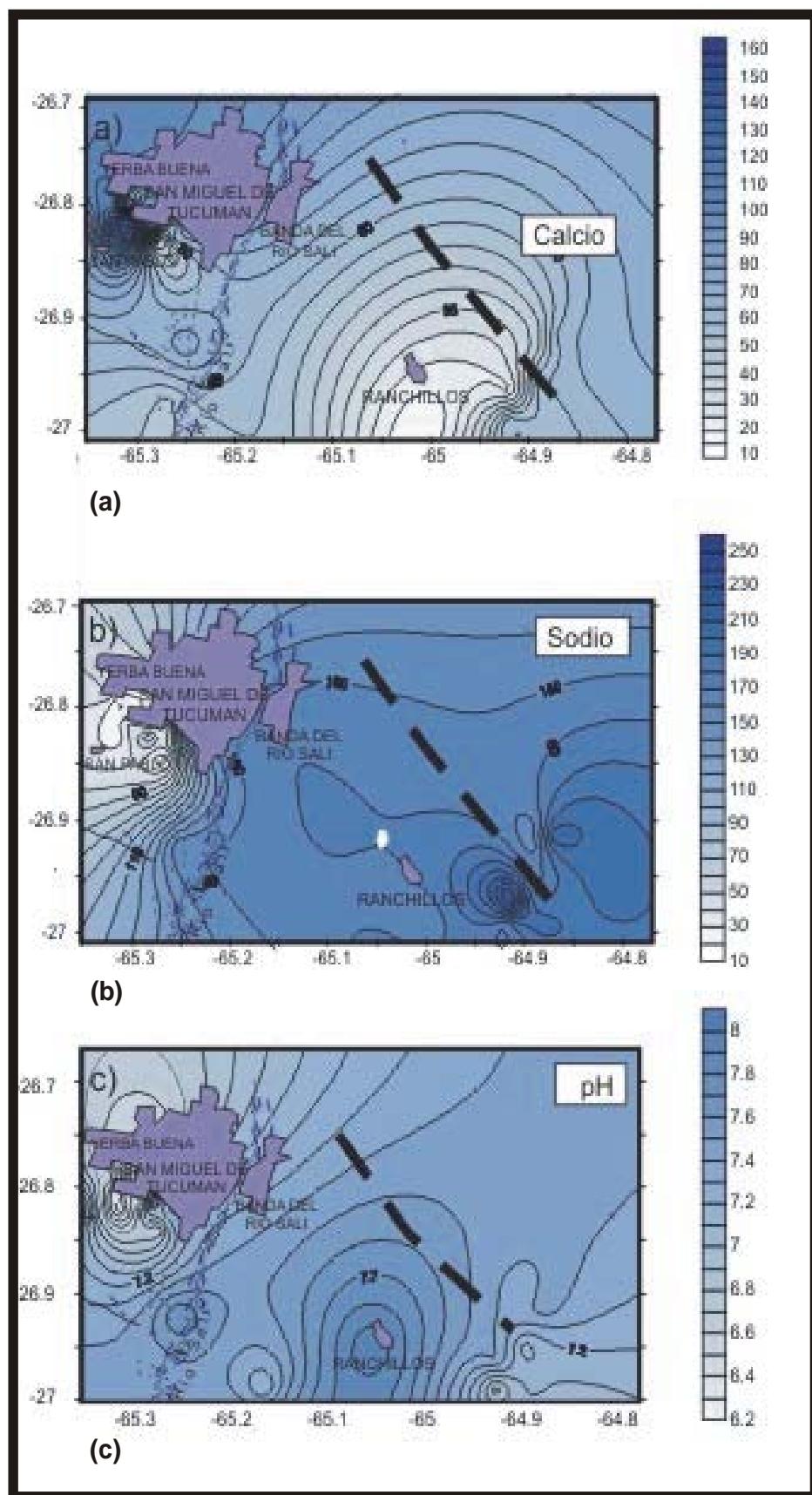


Figura 12: Variación espacial de las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  (a),  $\text{Na}^+$  (b) y del pH (c) en las aguas profundas de la cuenca del Río Salí. Los valores están expresados en  $\text{mg L}^{-1}$  (a y b).

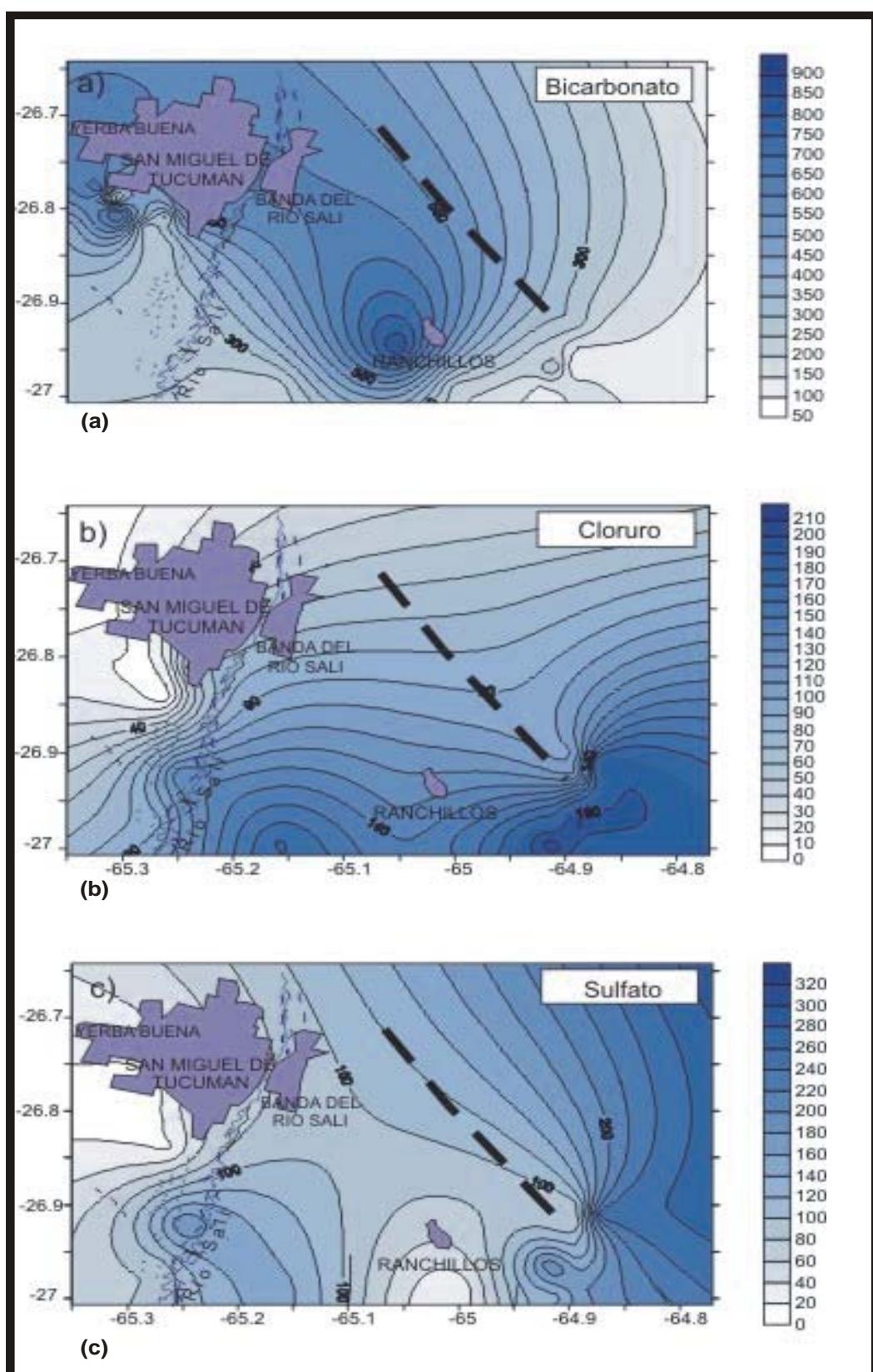


Figura 13: Variación espacial de las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  (a),  $\text{Cl}^-$  (b) y  $\text{SO}_4^{2-}$  (c) en las aguas profundas de la cuenca del Río Salí . Los valores están expresados en  $\text{mg L}^{-1}$  (a y b).