UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

MAESTRÍA EN CIENCIAS HÍDRICAS

TESIS DE MAGISTER

EVALUACION DE LAS APTITUDES DE USO DEL RECURSO HIDRICO DEL ACUIFERO DEL VALLE DE LA CRUZ PROVINCIA DE CORDOBA

Autor

Geólogo Juan José Tardivo

Mayo del 2011

ÍNDICE

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN 6

1.1. Motivación del estudio 7

1.2. Objetivo general 8

1.3. Objetivos específicos 8

1.4. Características generales del Área de Estudio 9

1.5. Metodología 10

CAPITULO II

CLIMA 13

2.1 Generalidades 14

2.2. Datos pluviométricos 15

2.2.1. Análisis de consistencia de los datos (Técnica del Análisis de doble masa) 15

2.2.2 Distribución de las precipitaciones 18

2.3. Temperatura 25

2.4. Vientos y humedad del aire 26

2.5. Evapotranspiración 27

2.5.1. Estimación de la evapotranspiración potencial 28

2.5.2. Estimación de la evapotranspiración real 32

2. 6. Clasificación climática 38

2.6.1. Clasificación de Thornthwaite 38

2.6.2. Índice de Dantín Cereceda y Revenga 40

CAPITULO III

GEOLOGÍA 42

3.1. Marco Geológico 43

3.2. Unidades litológicas 44

3.2.1. Rocas Paleozoicas 46

3.2.1.1. Cámbrico inferior. Granitos de anatéxis y rocas asociadas 46

3.2.1.2. Gneises y esquistos del borde oriental 46

3.2.2. Rocas Mesozoicas 46

3.2.3. Sedimentos Cenozoicos **48**
3.3. Geomorfología **49**
3.3.1. Lomadas del borde oeste **49**
3.3.2. Mesetas **50**
3.3.3. Serranías del borde este **51**
3.3.4. Planicies **51**
3.4. Suelos **51**

CAPITULO IV
PROSPECCIÓN GEOFÍSICA **54**
4.1. Generalidades **55**
4.2. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) **55**
4.3. Descripción de los Perfiles de Resistividad **58**
4.4. Criterios Para la Interpretación de los SEV **61**
4.5. Modelo Geoeléctrico **63**
4.4. Interpretación de los S E V **65**
4.6. Resultados **67**

CAPITULO V
HIDRODINÁMICA – HIDROQUÍMICA **72**
5.1. Generalidades **73**
5.2. Mapa de isopiezas **73**
5.3. Estimación de la recarga **77**
5.3.1. Estimación de la recarga con el método Balshort **77**
5.3.2. Balance de masa del ión cloruro **81**
5.4.3. Relación recarga - pluviometría método de Goldschmidt **84**
5.5. Resultados ***85***
5.6. Hidroquímica **86**
5.6.1. Procedimiento de trabajo **86**
5.6.2. Análisis Estadístico **87**
5.6.2.1 Agrupamiento (Cluster) **87**
5.6.2.2. Estadísticos descriptivos de los grupos **88**

5.6.2.3. Prueba T 89
5.6.2.4. Resultados 91
5.6.3. Caracterización química del agua de los grupos 92
5.6.4. Distribución espacial de componentes químicos del agua 95
5.6.4.1. Conductividad eléctrica 95
5.6.4.2. Distribución espacial de las concentraciones de cloruros 96
5.6.4.3. Distribución espacial de las concentraciones de sulfatos 97
5.6.4.4. Distribución espacial de las concentraciones de bicarbonatos 99
5.6.4.5. Distribución espacial de las concentraciones de arsénico 100
5.6.4.6. Distribución espacial de la Relación Mg/Ca 102
5.7. Aptitudes de uso del recurso hídrico 103
5.7.1. Uso doméstico 104
5.7.2. Bebida animal 108
5.7.3. Riego suplementario a la lluvia 109

CAPITULO VI
MODELO HIDROGEOLÓGICO 113
6.1. Unidades Hidroestratigráficas 114
6.1.1. Unidad I. Rocas paleozoicas (basamento cristalino) 114
6.1.2. Unidad II. Areniscas y conglomerados del complejo volcánico – sedimentario Sierra de Los Cóndores 114
6.1.3. Unidad III. Sedimentos fluviales – aluviales 115
6.1.4. Unidad IV. Loes y Limos Pampeano 116
6.2. Acuíferos 116
6.3. Modelo conceptual de funcionamiento del sistema hidrológico 118
6.4. Estimación de las reservas 121
6.4.1. Cálculo de las Reservas Naturales 121
6.4.2. Cálculo de las Reservas Regulatrices 122

RESUMEN Y CONCLUSIONES 124
RECOMENDACIONES 125
BIBLIOGRFÍA 126
ANEXO I - Análisis Físico Químicos de Agua 130

ANEXO II - Graficas de Campo de Sondeos Eléctricos Verticales 143

CAPITULO I
INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del estudio

La región que le da marco al área de estudio cuenta con aproximadamente dieciocho mil habitantes establecidos en la zona rural y las áreas urbanas de La Cruz y Berrotarán, en la provincia de Córdoba. Es socioeconómicamente dependiente de la práctica agrícola ganadera de pequeña escala, la que a través del tiempo se perfiló como actividad principal. Si bien se desarrollan algunas actividades relacionadas con la industria metalmecánica, éstas son de escasa envergadura y siempre vinculadas con el agro.

Algunos planes tendientes a incrementar la actividad productiva, esbozados por la Comunidad Regional de Municipios (organismo del Estado Provincial creado con el fin de diseñar políticas de desarrollo regional) estuvieron focalizadas a promover actividades de procesamiento y asignación de valor agregado a los productos agropecuarios (granos y carnes). Estas se fundamentaron en estrategias de desarrollo integral de las actividades, entendiendo como tal, a la promoción de cada una de las etapas del ciclo de producción agrícola ganadera desde la generación primaria hasta la industrialización.

Esas acciones, más allá de las vicisitudes políticas, pusieron de manifiesto la escasez de conocimientos básicos sobre las características y disponibilidad de recursos naturales fundamentales como el agua y de los recursos energéticos.

Aunque la región cuenta con un cuerpo de agua superficial muy importante como el lago de Embalse y otro menos significativo como el río La Cruz, el aprovechamiento de éstos como recursos para riego o abastecimiento de la población de Berrotarán, en principio, presentan fuertes impedimentos técnicos y económicos.

Inicialmente se requiere de la construcción de obras de infraestructura cuya relación costos-beneficios no resultaría favorable. Entre otras razones conocidas, está el modo de distribución de la tierra productiva, que debiera ser de un número mayor de parcelas para ampliar la cantidad de familias beneficiarias.

Utilizar el agua del embalse del río Tercero que, por el volumen almacenado, sería la fuente que posibilitaría un uso continuo durante largos períodos, requeriría elevar el agua en una diferencia de cotas más de una centena de metros y conducirla varias decenas de kilómetros. Mientras que, en el río La Cruz, en época de estiaje o en períodos secos, el caudal es escaso y no tiene azudes que permitan el almacenamiento de agua, por lo que es muy poco factible su aprovechamiento.

A partir de esa situación descrita se dirige la atención hacia los recursos hídricos subterráneos y surge el proyecto de realizar un estudio hidrogeológico básico para conocer el funcionamiento del sistema hidrológico de la región.

1.2. Objetivo general

Toda acción que se proyecte con vistas a aprovechar el recurso hídrico subterráneo, requiere de un detallado conocimiento del medio físico natural en el cual está inserto el sistema acuífero. Dicho conocimiento permitirá reducir incertidumbres, proveerá elementos de juicio para estimar recursos y reservas, caracterizar químicamente el agua a los fines de los distintos usos actuales y potenciales y establecer criterios básicos de gestión. Este conocimiento podría servir de base a futuras investigaciones con un nivel de detalle mayor.

Por ese motivo, se propone como objetivo general elaborar el modelo conceptual del sistema acuífero, a los fines de brindar un conocimiento global del mismo que constituya una herramienta para la planificación hidrológica de la zona, dentro del marco de un uso sostenible de los recursos naturales.

1.3. Objetivos específicos

Derivados del objetivo principal se pretende:

- Elaborar el modelo geológico de la región que contiene al sistema acuífero
- Definir las características hidráulicas del acuífero freático
- Cuantificar la recarga al acuífero y el recurso hídrico subterráneo
- Estimar las reservas hídricas subterráneas

- Conocer las características químicas del agua subterránea y su aptitud para cada uso
- Establecer zonas de explotación en función de calidad y uso

1.4. Características generales del Área de Estudio

La región que enmarca al Valle de La Cruz, geográficamente situado en el departamento Calamuchita, Provincia de Córdoba, se caracteriza por una fisiografía predominante de valles intermontanos y piedemonte flanqueados al oeste por el cordón de la Sierra Grande y al este por la Sierra Chica, Sierra de Los Cóndores y Sierra de Las Peñas, todas pertenecientes al sistema de Sierras Pampeanas.

Esta morfología de valles alargados en la dirección norte - sur, que es característica del oeste de la provincia de Córdoba, alberga a la cuenca imbrífera del río Talamochita (río Tercero para la toponimia de los conquistadores españoles) segundo sistema hídrico en magnitud en la provincia, luego del sistema Mar de Ansenuza (Laguna Mar Chiquita). La cuenca del río Talamochita recoge las aguas de un sector del flanco oriental de la Sierra Grande y occidental de la Sierra Chica, además del agua de los valles de La Cruz y de Calamuchita.

Ambos valles tienen la orientación meridiana de las cadenas montañosas que los limitan. Hacia el sur, la depresión estructural que conforma el valle de La Cruz se ensancha suavizando su relieve y paulatinamente se confunde con la llanura Pampeana; el suelo es generalmente plano y fértil, regado por algunos cursos de agua que descienden de la Sierra Grande. La parte más deprimida de la región está ocupada por el lago del Embalse del Río Tercero, al que confluyen todos los ríos del valle, convirtiéndose este departamento en el principal productor de energía eléctrica de la provincia y uno de los más importantes de Argentina, con cinco centrales hidroeléctricas y una central nuclear.

El área de estudio, de aproximadamente 520 Km^2, incluye casi la totalidad del valle de La Cruz y sus principales localidades son la ciudad homónima y Berrotarán. Dista a 120 Km de la ciudad de Córdoba, a la que se encuentra vinculada por las rutas nacional N°36 y provincial N°5 y a 100 Km de la ciudad de Río Cuarto, comunicada por la ruta nacional N°36. Cuenta con otras vías de acceso y comunicación secundarias que,

además de conectarla con las poblaciones vecinas, la une a la localidad de Merlo en la provincia de San Luís, distante a 70 Km a través de la Sierra Grande.

El área de estudio (Figura 1.4.a.) está ubicada a una altura media sobre el nivel del mar de 580 m, limitada al norte por la ribera sur del lago Embalse del Río Tercero (aproximadamente 32° 13’ 53” LS); mientras que el límite sur lo hace la divisoria de aguas que la separa de la cuenca del arroyo El Barreal, 32° 29’ 45.40” LS aproximadamente. Por el este, el límite está constituido por la divisoria de aguas de la Sierra de Las Peñas y la Sierra de Los Cóndores, situada en los 64° 17’ 16.77” W aproximadamente. Finalmente, por el oeste, el área de estudio está limitada por el río La Cruz a largo de los 64° 31’ 13.35” W.

1.5. Metodología

La metodología de trabajo incluyó tareas de gabinete y de campo. En gabinete se llevaron a cabo:

- **Recopilación bibliográfica**. Incluyó la búsqueda, selección y análisis de la documentación existente relacionada con la climatología, geomorfología, geología, hidrogeología y el agua subterránea del área de trabajo.

- **Análisis fotogeológico.** Comprendió el análisis de las características estructurales, litológicas, geomorfológicas, entre otras, del área de estudio, a través del análisis e interpretación de fotografías aéreas en escala 1:20.000, que sirve como base para el diseño de los trabajos campo. La información obtenida a partir de este análisis, luego de un proceso de verificación en el terreno, se utilizó también para la elaboración de un mapa geológico del área.

- **Climatología.** Consistió en el análisis y procesamiento de los datos meteorológicos, a partir de los cuales, se caracterizó climáticamente al área de estudio, se determinó la evapotranspiración, la distribución temporal y espacial de las precipitaciones, etc. que se utilizaron luego para estimar la recarga al sistema acuífero.

- **Análisis de laboratorio.** En gabinete se interpretaron los resultados de los análisis físico - químico de las muestras de agua y de suelos obtenidas en el área de estudio y el procesamiento e interpretación de los resultados.

- **Procesamiento e interpretación de la información.** Esta etapa consistió en la síntesis de toda la información obtenida a lo largo del proceso de estudio, que permitió alcanzar los objetivos propuestos y extraer las conclusiones pertinentes.

Los trabajos de campo fueron los siguientes:

- **Relevamiento geológico de campo.** Comprendió la comprobación en el terreno de la información obtenida mediante el análisis fotogeológico y el relevamiento in situ de litologías, estructuras, suelos y análisis de geoformas, entre otros. Este conocimiento, sumado a los datos geofísicos, permitió elaborar un modelo geológico de la región. Para el relevamiento de suelos se individualizaron previamente las unidades cartográficas a través del Mapa de Suelos de la provincia de Córdoba E 1:500.000, elaborado y publicado por la Agencia Córdoba Ambiente y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi (2003). Posteriormente se determinaron puntos de muestreo y estudio en el terreno.

- **Prospección geofísica.** Se realizaron Sondeos Eléctricos Verticales a los fines de obtener información sobre características geométricas, geológicas e hidrogeológicas del subsuelo, que luego fue integrada en la elaboración de secciones geoeléctricas.

- **Censo hidrogeológico de campo.** Comprendió el relevamiento de puntos de agua con toma de muestras, medición de niveles piezométricos y geoposicionamiento.

CAPITULO II
CLIMA

2.1 Generalidades

El modelo hidrológico de un sistema acuífero necesariamente debe estar respaldado por un ajustado conocimiento de la dinámica del clima de la región que contiene a dicho sistema. Los aportes naturales de agua hacia el suelo y los volúmenes que este devuelve a la atmósfera están directamente condicionados, entre otros factores, por el clima, por lo que este cumple un rol fundamental en la investigación y gestión de los recursos hídricos.

Si bien los datos meteorológicos son imprescindibles como base para la caracterización climática, actualmente la obtención de esta información es labor de instituciones específicas y, por su carácter de especializadas, no son muy frecuentes en el país. Tal situación hace que la disponibilidad de información sobre zonas alejadas de los grandes centros urbanos sea bastante limitada.

Para la realización de este trabajo se procesaron datos meteorológicos con los siguientes orígenes:

- Datos obtenidos dentro de la zona de estudio por los habitantes. Previo a su utilización fueron analizados con métodos estadísticos de comparación con otras series para validarlos.
- Datos de la Central Hidroeléctrica Ing. Casafousth de Embalse de la Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC) obtenidos por los operarios de planta.
- Estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en Embalse y Río Cuarto.
- El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en estaciones de Manfredi y Río Cuarto.

Por causa de la heterogénea procedencia de los registros, principalmente de precipitaciones, como se expresó más arriba, se fijó un criterio de validación fundado en comparaciones estadísticas entre las series. El propósito fue comprobar la validez de aquellos que no fueron obtenidos por el SMN o el INTA, tomando a estos como referencia.

A tal efecto se estableció como premisa que, si bien algunas series pertenecen a localidades que están fuera del área, están relativamente cercanas (80 km.) e incluidas en

un mismo dominio climático según Capitanelli (1979) que abarca la mayor parte de la llanura oriental de la provincia y del piedemonte.

En la figura 2.1.a se muestra la ubicación de las distintas fuentes de datos meteorológicos.

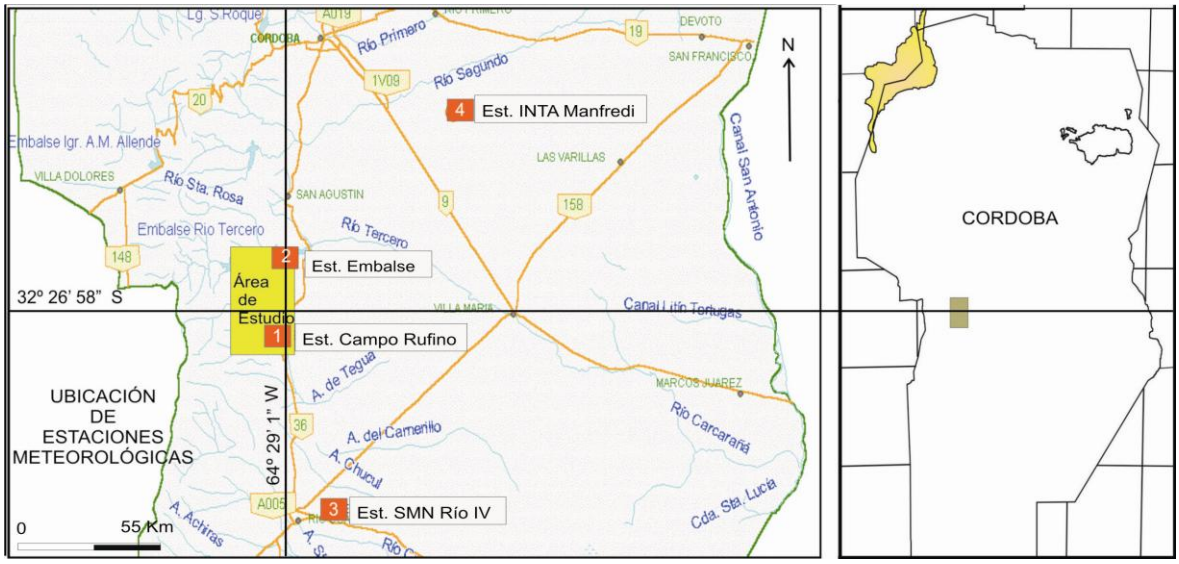


Figura 2.1.a. Ubicación de las fuentes de datos meteorológicos

2.2. Datos pluviométricos

Aunque el procedimiento de registro de datos pluviométricos es simple, pueden suscitarse errores debido a cambios en las condiciones del espacio físico en que está situado el pluviómetro, cambio del observador que registra los datos o cambio del lugar de emplazamiento del instrumento. Por tal motivo, para evitar posibles variaciones que condujeran a evaluaciones erróneas, se realizó la verificación aplicando la técnica del Análisis de Doble Masa.

2.2.1. Análisis de consistencia de los datos (Técnica del Análisis de Doble Masa)

Esta técnica considera que en una región meteorológicamente homogénea los valores de las precipitaciones que ocurren dentro de ella, en diferentes puntos y en un período determinado, poseen una relación de proporcionalidad que puede expresarse

gráficamente en un sistema de coordenadas. Si los valores no tienen variación, como resultado de esa relación los puntos se alinean a lo largo de una recta con una única pendiente. Si por el contrario, la recta tuviese un quiebre de pendiente, significa que la secuencia posee datos erróneos a partir del año representado en el quiebre y deberán ser corregidos.

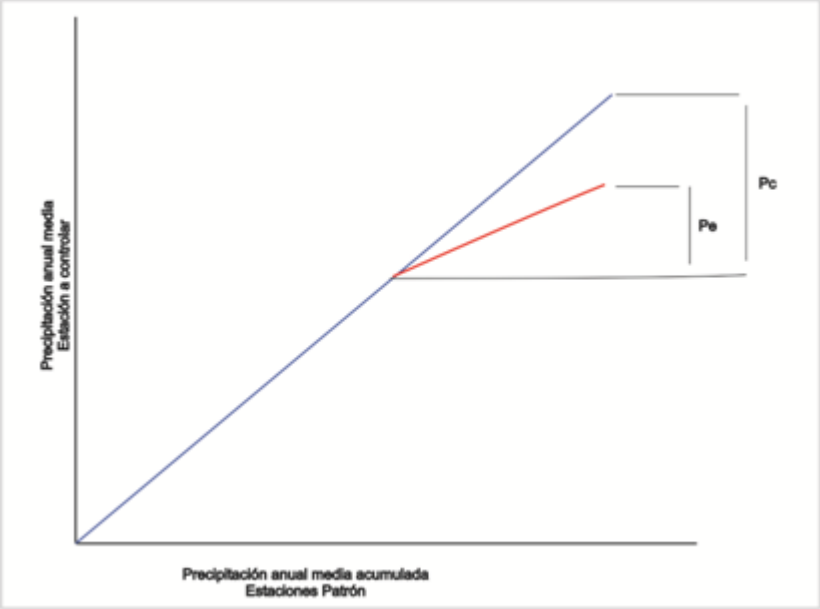


Figura 2.2.1.a Gráfico del Análisis de Doble Masa.

En tal caso, se obtiene un factor de corrección que es proporcional a la variación de la pendiente de la recta y que surge de la relación Pc/Pe (Figura 2.2.1.a). Este factor deberá afectar a los valores promedio, sin acumular, de cada año a partir del quiebre de pendiente.

El procedimiento consiste en tomar la serie de datos pluviométricos de por lo menos dos estaciones consideradas confiables, las que serán utilizadas como estaciones patrón, obtener el promedio de cada año de ambas estaciones y expresarlos acumulados a partir del primero. Luego se obtienen los promedios anuales acumulados para los datos de la serie de la estación a controlar y, finalmente, se grafican en un sistema cartesiano donde en abscisas se consignan los datos de las estaciones patrón y en ordenadas los de la estación a controlar. La tabla 2.2.1 muestra parcialmente y a modo ilustrativo la confección de la tabla de valores que posteriormente deberán ser graficados.

	Estaciones patrón				Estación a controlar		
Año	Embalse	Manfredi	Promedio	Promedio Acumulado	Promedio	Acumulado	Corregido
1991	918	1070	994	994	1134	1134	…
1992	1000	976	988	1982	1149	2283	…

Tabla 2.2.1. Valores procesados para el análisis de doble masa

A los efectos del control de las series, se verificaron los valores diarios obtenidos desde 1991 a 2007 en el campo propiedad del Sr. Mario Rufino ubicado en el sector central de la zona de estudio, comparándolos con una serie de datos del mismo período obtenidos en la estación Manfredi del INTA y en la estación de la central hidroeléctrica Casafousth de Embalse, utilizadas como estaciones patrón. La figura 2.2.1.b muestra gráficamente la relación obtenida entre ellas, con un valor de correlación de 0.9998.

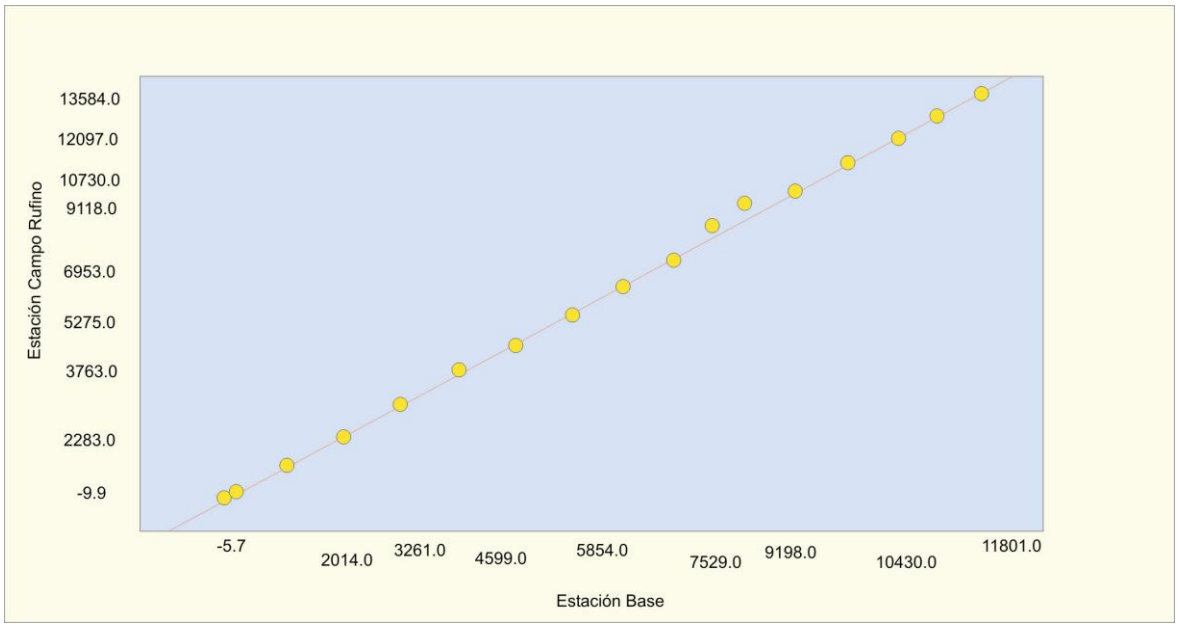


Figura 2.2.1.b. Gráfico del análisis de doble masa estación campo Rufino.

Para complementar la verificación, se analizó la serie de datos de la central hidroeléctrica Casafousth tomando como base las estaciones INTA Manfredi y OMN Río Cuarto. En la Figura 2.2.1.c se muestra el gráficamente el grado de correlación existente.

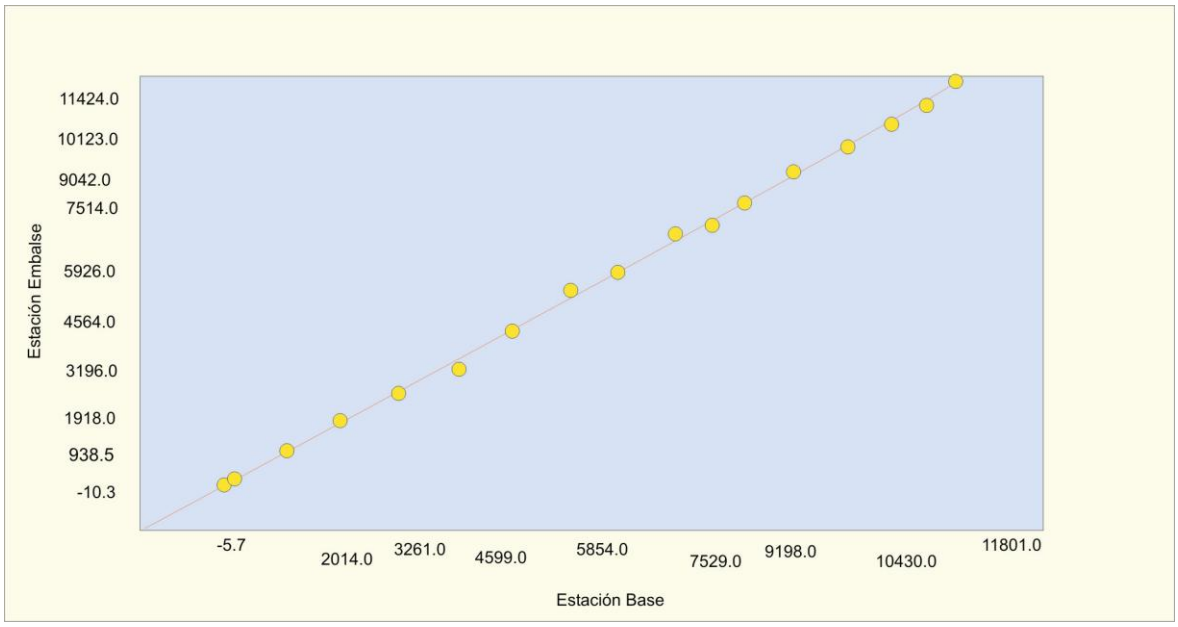


Figura 2.2.1.c Gráfico del análisis de doble masa estación Embalse.

Si bien en ambos conjuntos de datos se obtuvo un coeficiente de correlación muy elevado (0.9998) en el primer caso hay una variación de 0.82 en la pendiente de la curva en el punto que representa el año 2000. Lo propio ocurre en el segundo grupo de datos para el punto del año 2002 donde la variación es de 1.1. A pesar de ellas, como se ve en los gráficos, los valores luego se ajustan nuevamente a las pendientes de las rectas.

En síntesis, del análisis puede interpretarse que en las series de datos de las estaciones verificadas no se han encontrado variaciones significativas que puedan conducir a resultados erróneos debido a su uso.

2.2.2 Distribución de las precipitaciones

En la tabla siguiente se muestra las precipitaciones medias anuales del período 1991 a 2007 de las estaciones ubicadas dentro del área de estudio (estaciones campo Ruffino y Embalse) y la media anual respectiva y la figura 2.2.2.a. muestra la distribución espacial de las precipitaciones anuales en la región.

Estación campo Rufino	Estación Embalse	Precipitación media
836 mm/año	759 mm/año	797.5 mm/año

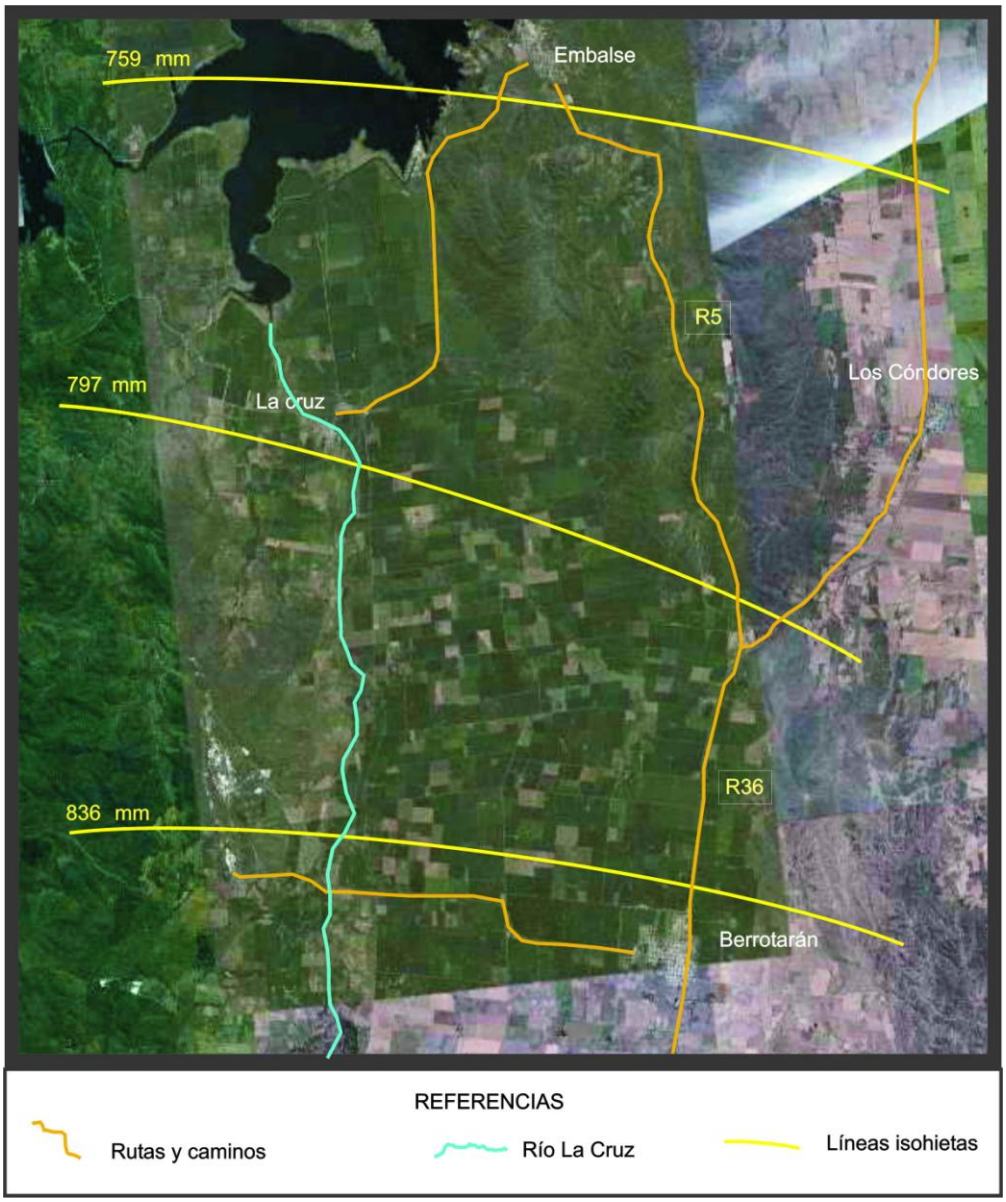


Figura 2.2.2.a. Distribución espacial de las precipitaciones en el valle de La cruz - Calamuchita

El conocimiento de la distribución temporal de las lluvias es necesario en todas las planificaciones que puedan hacerse respecto del manejo de las aguas de escurrimiento superficial, de períodos de riegos, manejo de cosechas y la gestión de los recursos hídricos en general.

Los gráficos correspondientes (figuras 2.2.2.b, 2.2.2.c, 2.2.2.d y 2.2.2.e) muestran que la distribución de las precipitaciones en la zona de estudio y en la amplia región que la circunda responde a una misma modalidad aunque con algunas variaciones en la lámina

media. Por ejemplo, la lluvia media caída en el mes de diciembre en campo Rufino supera los 140 mm, mientras que para el mismo mes en Embalse es de 120 mm, aunque ambas estaciones están ubicadas a escasos kilómetros una de otra y dentro del mismo valle. Lo propio ocurre con el volumen anual, que en Embalse es 14 % menor que en campo Rufino.

Esa circunstancia podría ser explicada por un fenómeno de desviación, por la sierra de los Cóndores y la sierra Chica, de las masas de aire húmedo provenientes del oeste, las que tienen relación con la ocurrencia de las lluvias en la región. En tal sentido, las sierras actúan como una pantalla que desvía las masas alejándolas de la zona de Embalse, mientras que Berrotarán, situada en la zona distal del piedemonte, resulta más expuesta a la acción de dichas masas. Esta merma de humedad puede ser apreciada en la vegetación que, hacia el norte de esta última localidad, va perdiendo las características de pradera.

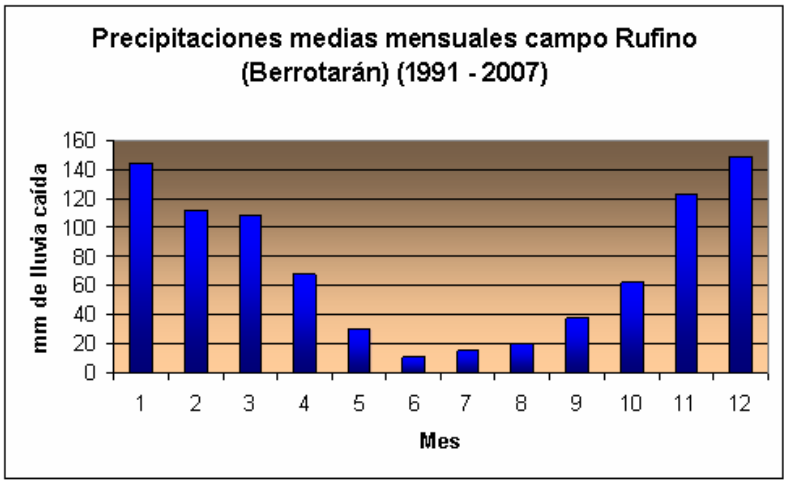


Figura 2.2.2.b Histograma de precipitaciones en campo Rufino

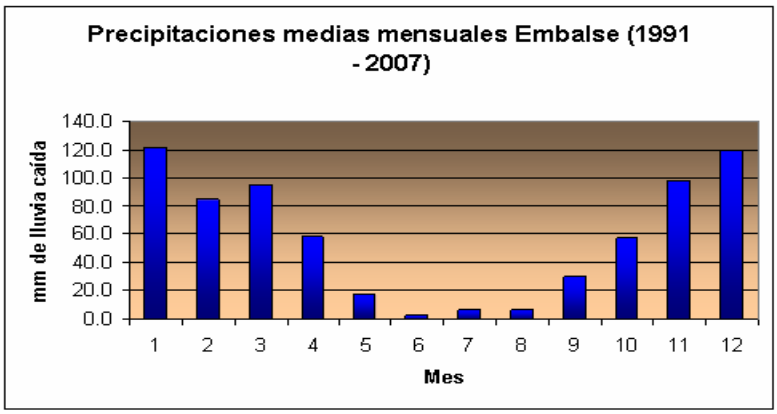


Figura 2.2.2.c Histograma de precipitaciones en Embalse

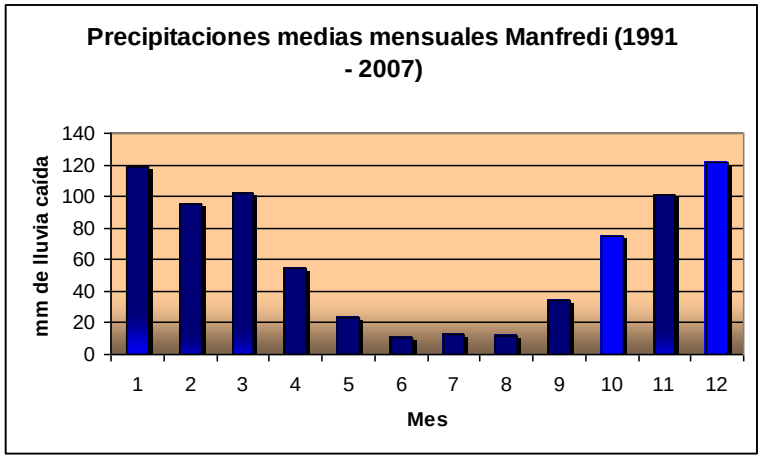


Figura 2.2.2.d Histograma de precipitaciones en Manfredi

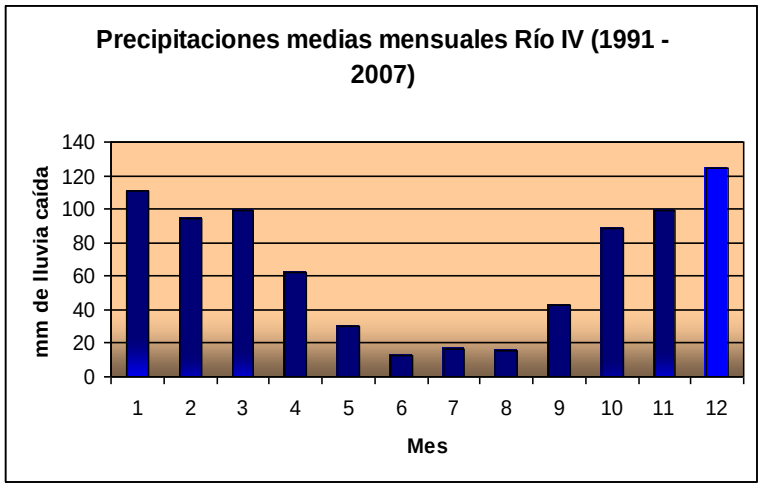
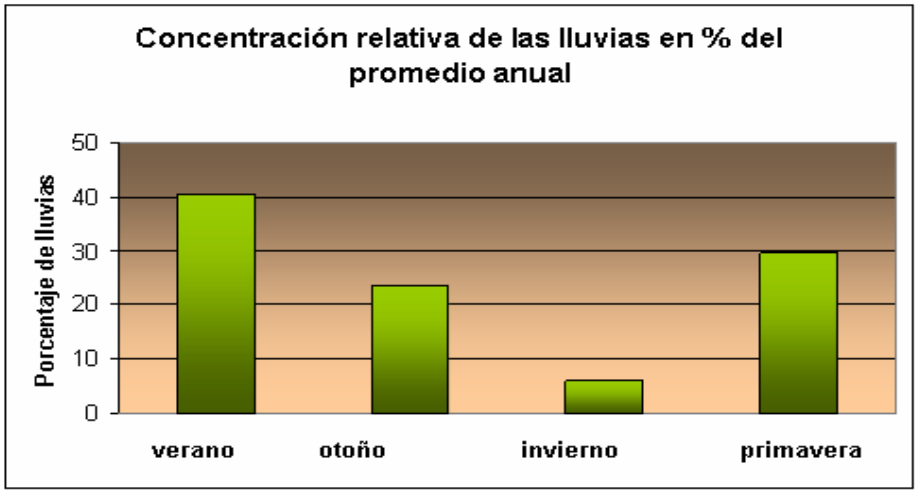


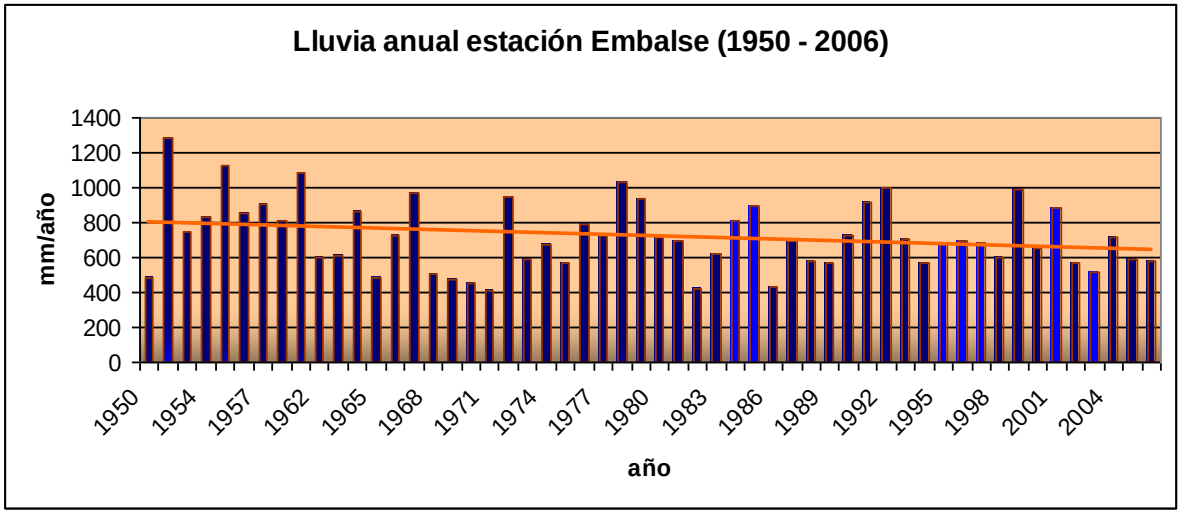
Figura 2.2.2.e Histograma de precipitaciones en Río IV

El cálculo de la concentración de las precipitaciones, expresado en porcentajes relativos al promedio anual de lluvia caída, muestra que estas se distribuyen en el final de la primavera (29.5%) y principalmente en el verano (40.6%), comienzan a disminuir en el otoño (23.5%) y son muy escasas en el invierno (6%) como queda expresado en el cuadro de la figura 2.2.2.f

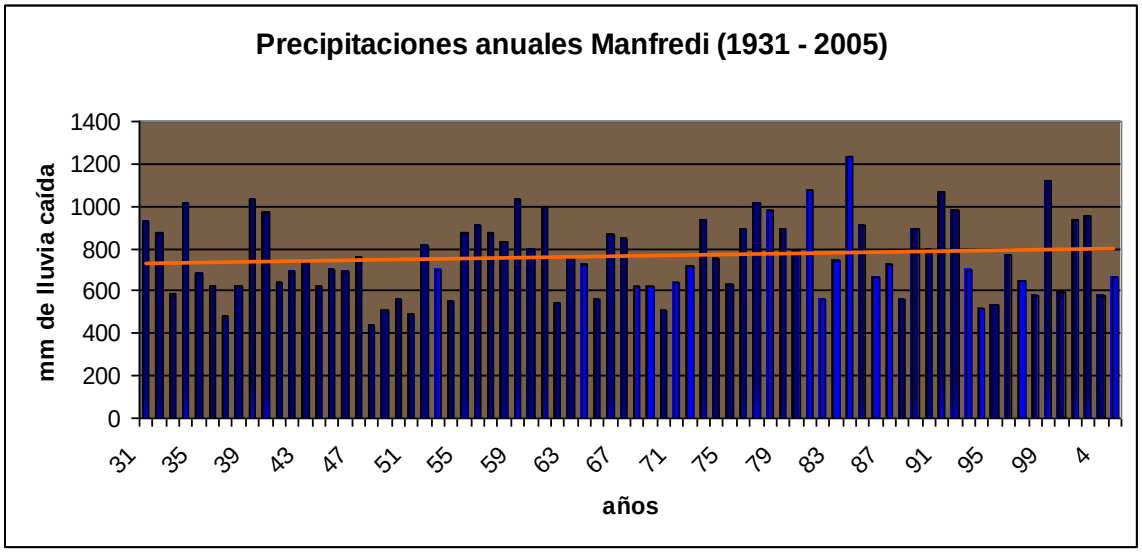


2.2.2.f Gráfico de distribución de las precipitaciones

En las figuras 2.2.2.g y 2.2.2.h están graficadas una serie de registros anuales de 56 años de la estación Embalse y una serie de 74 años de la estación INTA Manfredi. Aunque desde el punto de vista de los fenómenos climáticos las series son relativamente breves como para hacer inferencias a partir de ellas, las líneas de tendencia muestran que desde la década de los años 50 hasta el presente, la evolución de las lluvias es hacia un período menos húmedo en la zona peri serrana (serie Embalse), mientras que en la zona de llanura (serie Manfredi) la evolución es hacia un período más húmedo.



2.2.2.g Histogramas de precipitaciones anuales período 1950 – 2006 de estación Embalse del S.M.N.



2.2.2.h Histogramas de precipitaciones anuales período 1931 – 2005 de estación Manfredi del INTA.

Los gráficos de las figuras 2.2.2.i y 2.2.2.j representan la variación de las precipitaciones anuales respecto de la media, cuyos valores se han obtenido de la diferencia entre la precipitación de cada año y el valor de la precipitación media de las series. Luego se han volcado, indicados con círculos, los episodios de los fenómenos climáticos Oscilación Sur El Niño y Oscilación Sur La Niña, según registros de la National Oceanic and Atmospheric Administration de Estados Unidos (NOAA).

En la serie Embalse, el 82% de episodios La Niña se corresponden con años secos, con precipitaciones de hasta 307 mm inferiores a la media. No ocurre lo propio con los períodos El Niño; si bien muchos de los episodios concuerdan con años húmedos, el 30% coinciden con años secos. Por otra parte, han ocurrido años con lluvias muy por encima de la media que no guardan relación con el mencionado fenómeno climático.

En la serie Manfredi, el comportamiento es similar al anteriormente descrito. El 80% de los sucesos La Niña registrados coincide con años de lluvias inferiores a la media y, se destaca aquí, que el 52% de los sucesos El Niño también coinciden con años secos.

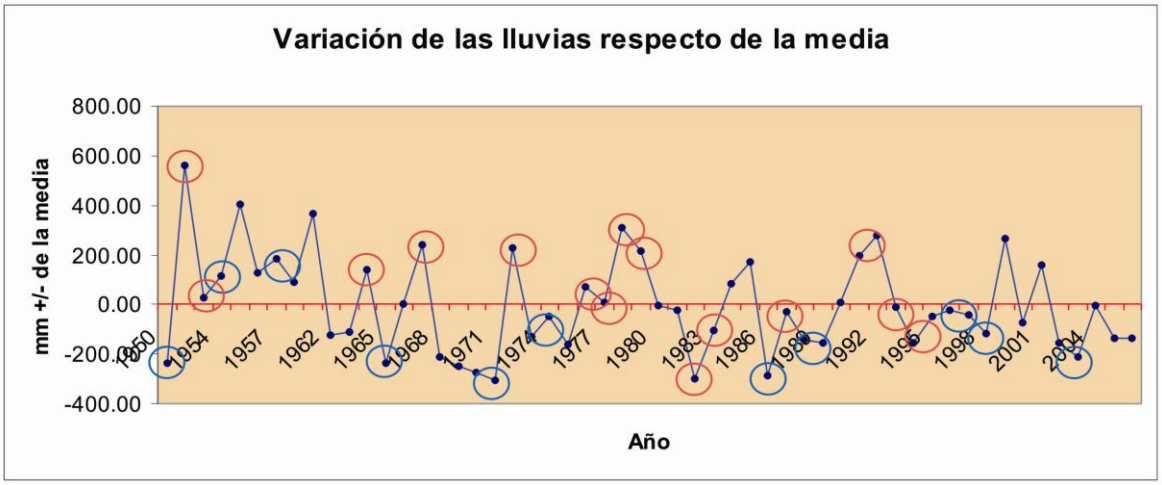


Figura 2.2.2.i. Variación anual de las precipitaciones respecto de la media en Embalse.

Figura 2.2.2.j. Variación anual de las precipitaciones respecto de la media en Manfredi.

Lo observado en las series muestra que ambos fenómenos climáticos se manifiestan con distribución temporal errática o aleatoria y sugiere que la influencia del fenómeno La Niña sobre la cantidad de precipitaciones en la región es más determinante que la del fenómeno El Niño.

Se puede interpretar además que el impacto del fenómeno El Niño sobre las precipitaciones anuales es más marcado en la zona peri serrana que hacia la llanura. Esa diferencia podría estar relacionada con la situación geográfica de la provincia, ubicada en el ámbito de confluencia e influencia de los dominios climáticos pacífico y atlántico. De manera tal que él clima de la zona peri serrana estaría más influenciado por el dominio

pacífico, mientras que hacia el este, hacia la llanura, la influencia dominante sería la del dominio atlántico.

2.3. Temperatura

La temperatura, en términos físicos, indica el nivel de la actividad molecular en un cuerpo. Desde el enfoque de la hidrología podría ser definida como una medida de los efectos que produce en el ambiente el balance entre la radiación solar recibida y la emitida. En tal sentido, además de las variaciones estacionales, la temperatura ambiente mantiene una relación directa con la latitud y, en menor medida, con la altitud.

Para los diferentes cálculos y caracterizaciones en este trabajo se utilizaron datos de temperatura obtenidos por el SMN en la estación de Río IV (S 33º 5´34.45” W 64º 16´36.5”) y por el INTA en la estación de Manfredi (S 31° 49' 12" W 63° 46' 00").

El área de estudio está ubicada entre estas ciudades, equidistante a 80 km. Las temperaturas medias mensuales que la representa se obtuvieron promediando los valores mensuales de las series Río IV y Manfredi y la resultante, con una media de 16.9 ºC, se utilizó como temperaturas de referencia. (Ver tabla 2.3.1.)

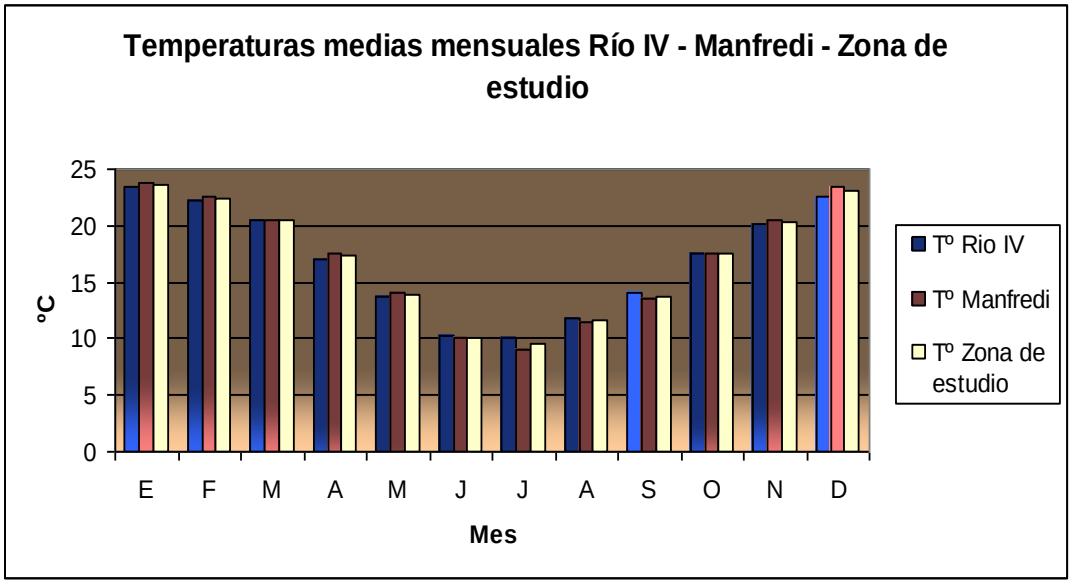


Figura 2.3.a. Histogramas de temperaturas medias en zona de estudio, Río IV y Manfredi.

TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES

Mes	Río IV	Manfredi	Obtenida zona de estudio
E	23.5 ºC	23.7 ºC	23.6 ºC
F	22.3 ºC	22.5 ºC	22.4 ºC
M	20.5 ºC	20.5 ºC	20.5 ºC
A	17.1 ºC	17.5 ºC	17.3 ºC
M	13.8 ºC	14 ºC	13.9 ºC
J	10.3 ºC	10 ºC	10.2 ºC
J	10 ºC	9 ºC	9.5 ºC
A	11.8 ºC	11.5 ºC	11.7 ºC
S	14.1 ºC	13.5 ºC	13.8 ºC
O	17.6 ºC	17.6 ºC	17.6 ºC
N	20.2 ºC	20.4 ºC	20.3 ºC
D	22.6 ºC	23.1 ºC	22.8 ºC
T media anual	**16.9 ºC**	**16.9 ºC**	**16.7 ºC**

Tabla 2.3.1. Temperaturas medias mensuales.

2.4. Vientos y humedad del aire

Por su ubicación geográfica, el sector norte del área de estudio se encuentra inserto en el Valle de Calamuchita - Valle de La Cruz, en el ámbito de las sierras y el sector sur ocupa el relieve de la llanura. Se considera entonces que los registros de la estación Embalse del SMN situada en el valle de Calamuchita, serían representativos de las condiciones en el sector norte (Tabla 2.4.1.) mientras que los datos de la estación Río IV del SMN, ubicada en la llanura, serían más representativos del sector sur (Tabla 2.4.2.)

EMBALSE (SMN)				
Velocidad media 10 Km/h – días de calma: 149/365				
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Vel. media Km/h	10.3	8.7	8.7	11.3
Dirección predom.	E (W)	E (N)	E (S)	E (S)
Humedad del aire	63%	71%	66%	62%

Tabla 2.4.1. Datos de vientos de estación meteorológica Embalse.

Río IV (S.M.N.)				
Velocidad media 14 Km/h – días de calma: 54/365				
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Vel. Media Km/h	15	13	13	17
Dirección predom.	NE	NE	NE	NE
Humedad del aire	58%	72%	68%	59%

Tabla 2.4.2. Datos de vientos de estación meteorológica Río Cuarto.

2.5. Evapotranspiración

Si bien se requiere de una cuantificación precisa de la evapotranspiración (Et) para contextos diferentes tales como la producción agrícola, la gestión y planificación de recursos hídricos o estudios ambientales, también es ampliamente reconocida la complejidad del proceso y las incertidumbres asociadas a su cuantificación.

Esencialmente se puede concebir a la Et como un proceso físico que depende de la energía disponible en el medio para evaporar agua, de la capacidad del aire para tomar y transportar el vapor y de la accesibilidad del agua a la superficie evaporante. La energía puede ser provista por la radiación solar o por calor sensible transmitido por el aire o por el suelo. La capacidad de transporte del aire está condicionada por la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie evaporante. Mientras que el suministro de agua a la superficie evaporante está controlado por factores del suelo y de la vegetación tales como la cantidad y fuerza con que el agua está retenida en el suelo o el flujo hídrico a través de la vegetación, entre otros.

A modo de síntesis, se puede resumir que las tasas de evaporación del agua almacenada sobre la cubierta vegetal o desde superficies de agua dependen únicamente de las condiciones meteorológicas, mientras que la evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas dependerá, además de las variables climáticas, de las

propiedades físicas del suelo y de las características del sistema que conforman suelo y planta.

2.5.1. Estimación de la evapotranspiración potencial

Debido al tipo de datos disponibles, el monto de la evapotranspiración (Etp) se calculó por los métodos empíricos más simples es decir aquellos que requieren datos meteorológicos de obtención relativamente sencilla. Se utilizaron las ecuaciones de Thornthwaite; Blaney – Criddle; Blaney - Criddle modificado para FAO y Penman – Monteith (Sánchez Toribio, 1992).

a) Thornthwaite (Etp). Thornthwaite encontró empíricamente que la relación entre la temperatura media mensual y la evapotranspiración potencial ajustada para un mes tipo de 30 días con 12 horas de sol posibles puede ser representada por la ecuación:

$$\mathbf{EPa = 16\ [10\ T\ med\ /I]^{a}}$$

Donde (I) es un índice de calor anual que se obtiene de la suma de los doce índices de calor mensual (i) consignados en una tabla y pueden ser calculados mediante la expresión:

$$\mathbf{I = (Tmed/5)^{1.514}}$$

El exponente (a) de la ecuación (EPa), se obtiene a partir de los valores del índice (I) de la siguiente forma:

$$\mathbf{a = 0.000000675\ I^{3} - 0.0000771\ I^{2} + 0.01792\ I + 0.49239}$$

La evapotranspiración potencial (Etp) para un determinado mes será entonces:

$$\mathbf{Etp\ (mm/mes) = EPa\ (N/12)\ (NDM/30)}$$

Donde (N) es el número máximo de horas de sol y (NDM) es el número de días del mes considerado.

b) Blaney – Criddle (UC). La ecuación es el resultado de estudios de correlación entre temperatura y el uso del agua en el oeste de USA. Está fundamentada en la temperatura y un coeficiente que depende del tipo de cultivo y de la región geográfica, para finalmente obtener el uso consuntivo del cultivo (UC).

Para la estimación de la Etp los únicos datos necesarios son la temperatura y la duración del día.

$$\mathbf{Etp = (0.46\ Tmed + 8.13)\ p}$$

(p) es la duración diaria media de las horas de luz durante el período considerado, respecto del total de horas de luz anuales. El uso consuntivo del cultivo surge de la siguiente relación:

$$\mathbf{UC = K\ (0.46\ Tmed + 8.13)\ p}$$

Donde (K) es un coeficiente variable en función del cultivo y de la región y viene consignado en tablas.

c) Blaney – Criddle FAO (Eto). Este procedimiento es una modificación del método Blaney – Criddle, hecha por Doorenbos y Pruit (1977), que incluye en el cálculo la influencia de la radiación, el viento y la humedad relativa. La ecuación calcula la Eto de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$\mathbf{Eto = a_b + b_b\ f}$$

$$\mathbf{f = p\ (0.46\ Tmed + 8.13)}$$

$$\mathbf{a_b = 0.0043\ HRmin – n/N – 1.41}$$

$$\mathbf{b_b = a_0 + a_1\ HRmin + a_2\ n/N + a_3\ Udía + a_4\ HRmin + a_5\ HRmin\ Udía}$$

(HRmin) es la mínima humedad relativa del aire expresada en %, mientras que (n/N) es la fracción de la insolación media mensual y (U/día) es la velocidad diurna del viento en m/s.

d) Penman – Monteith. Esta fue la primera expresión con base física para el cálculo de la evaporación potencial. La ecuación inicial estima las pérdidas por

evaporación de una superficie libre de agua combinando dos procesos: el balance de energía y el de transferencia turbulenta. Es una forma derivada de la ecuación de combinación que usa un factor empírico para relacionar la tasa de evaporación de una pradera de hierba baja, extensa y que cubre completamente el terreno, que ejerce despreciable resistencia al flujo de vapor y está adecuadamente abastecida de agua, con la evaporación de una superficie libre de agua.

$$\mathbf{Ep = (\Delta/(\Delta+\gamma))\ (R_n - G)\ 1/\lambda + (\gamma/\delta + \gamma)\ f(U_2)\ [e_a - e_d]}$$

$$\mathbf{E_{tp} = f\ E_o}$$

Donde Δ es la pendiente de la curva presión de vapor/temperatura; R_n radiación neta; γ constante psicrométrica; $f(U_2)$ función del viento; U_2 recorrido medido a 2 m. de altura; $[e_a - e_d]$ déficit de presión de vapor; f factor empírico dependiente de la época del año.

La tabla 2.5.1.1 presenta los valores de Etp estimados con los métodos enumerados, correspondientes a la estación Campo Rufino.

VALORES MENSUALES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL				
Mes	PENMAN – MONTEITH	THORNTHWAITE	BLANEY – C (FAO)	BLANEY – CRIDDLE
E	158.4 mm.	129 mm.	178.8 mm.	177 mm.
F	168 mm.	112 mm.	152.8 mm.	165 mm.
M	129 mm.	88.4 mm.	151.2 mm.	153 mm.
A	98.4 mm	60.6 mm.	109 mm.	135 mm.
M	79.5 mm.	38 mm.	97.8 mm.	102 mm.
J	60.9 mm	21 mm.	88 mm.	87 mm.
J	69.6 mm.	19 mm.	97.8 mm.	87 mm.
A	99 mm.	29.4 mm.	131 mm.	102 mm.
S	126.6 mm.	42.6 mm.	138.6 mm.	117 mm.
O	160.5 mm.	70.5 mm.	138 mm.	141 mm.
N	182.7 mm.	97.8 mm.	171.5 mm.	162 mm.
D	189.9 mm.	125.4 mm.	186.8 mm	180 mm.
Evapotranspiración Potencial (mm/año)	1522 mm.	834 mm.	1641 mm.	1608 mm.

Tabla 2.5.1.1. Valores mensuales de Etp.

En el gráfico de la figura 2.5.1.a. se muestran en forma comparativa los valores mensuales de evapotranspiración junto a los valores medios mensuales de precipitaciones.

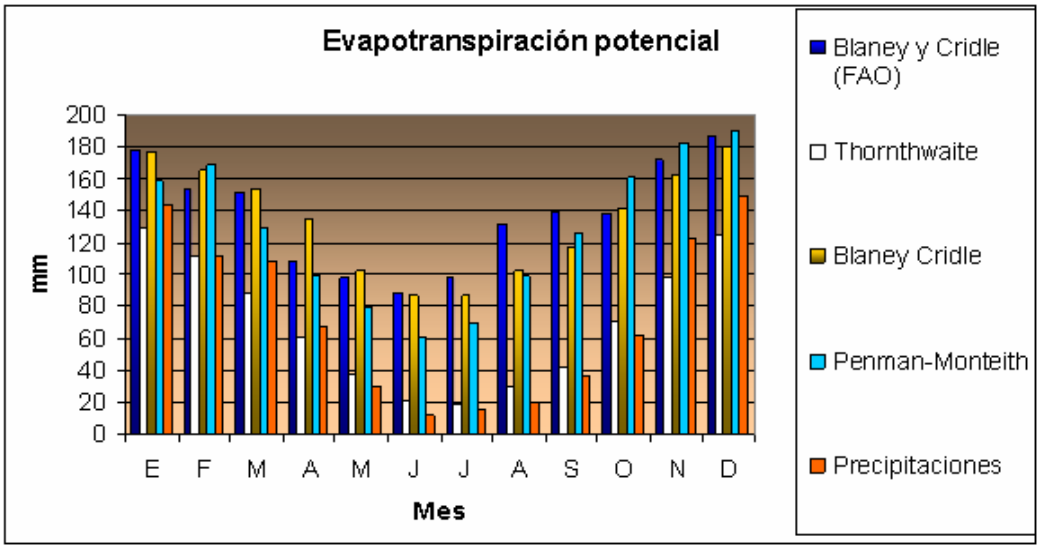


Figura 2.5.1.a. Histogramas de evapotranspiración potencial

Los resultados señalan que en la región de estudio el método de Thornthwaite subestimaría la intensidad de la evapotranspiración en los meses cálidos, de noviembre a marzo, cuando se verifican las máximas temperaturas. Los métodos de Blaney – Criddle sobreestimarían dichos valores a lo largo del año, particularmente de abril a julio, cuando la energía disponible es relativamente menor (Troha y Falasca; 1991).

Los valores anuales obtenidos por los métodos Blaney – Criddle y Blaney – Criddle (FAO) son 93 y 96 % superiores respecto al obtenido con el método de Thornthwaite mientras que el obtenido por el método de Penman – Monteith es un 82 % mayor. Los resultados obtenidos por el método de Blaney – Criddle se consideran un máximo posible de la magnitud del proceso de evapotranspiración, por lo que, para los cálculos que requieran de ETP se utilizará el valor de Penman – Monteith que se aproxima más al valor medio de todos los métodos utilizados.

2.5.2. Estimación de la evapotranspiración real (Etr)

La ETR se estimó con los métodos de Turc, de Coutagne (Custodio y Llamas, 1983) y el algoritmo Balshort (Carrica, 1993) utilizando los datos de temperatura y precipitaciones del período 1999 – 2007 de la estación Campo Rufino. Además, a los

efectos comparativos, se usó el método de Brook et al. (1983), que relaciona la presión parcial de CO_2 en el suelo y la ETR.

Los dos primeros métodos son de origen experimental basados en estudios estadísticos de más de dos centenares de cuencas alrededor del mundo. Relacionan evapotranspiración, precipitación y temperatura. El método Balshort, también de naturaleza empírica basado en criterios hidrológicos y edáficos, ha sido creado específicamente para la región pampeana de Argentina.

Brook *et al.* (1983) relacionó estadísticamente el crecimiento medio anual de la presión parcial de CO_2 en el suelo (PCO_2) y la media anual de las variables climáticas precipitación, temperatura y ETR, encontrando que esta última podía predecir la PCO_2. Si bien el trabajo del mencionado autor no estaba enfocado al estudio de la ETR, desde el punto de vista hidrológico resulta de gran utilidad dado que, sólo con el conocimiento de una variable, la PCO_2 obtenida a partir del análisis de una muestra de agua, se puede llegar a la estimación de la ETR.

a) Formula de Turc

$$\mathbf{ETR = \frac{P}{(0.9 + P^2/L^2)^{1/2}}}$$

P = precipitación en mm/año

$L = 300 + 25\ t + 0.05\ t^3$

t = temperatura media anual

Reemplazando los valores de temperatura (16,9 ºC) y Precipitación del período 1991-2007 (836 mm/año): ETR = 650 mm/año

b) Formula de Coutagne

$$\mathbf{ETR = P - X\ P^2}$$

P = precipitación anual en metros

$X = 1/ 0.8 + 0.14\ t$

t = temperatura media anual

La formula es válida solo si P está comprendida entre 1/8 X y 1/2 X

Reemplazando valores, la ETR = 615 mm/año

c) Balshort

El algoritmo Balshort (Carrica, 1993) es un programa computarizado de cálculo del balance de agua en el suelo que toma en cuenta las características texturales y comportamiento hidráulico de los suelos de la región para la que fue creado y considera también la frecuente escasez de datos meteorológicos asequibles. Dada su naturaleza empírica, asume ciertas simplificaciones del fenómeno real en base a criterios hidrológicos y edafológicos.

En la tabla 2.5.2.1. se presentan los valores anuales de ETR en el período 1991 – 2007 obtenidos con el algoritmo Balshort para la zona de estudio. Para el cálculo se consideró una capacidad de campo (CC) de 153 mm obtenida con la formula de Fuentes y Cruz (1990) y los valores de ETP obtenidos con el método de Penman – Monteith para la estación Campo Rufino. En la figura 2.5.a. se muestra la relación entre precipitación y ETR para el período considerado.

Año	ETR	Precipitación anual
1991	908,8	1139
1992	854.9	1169
1993	666.7	844
1994	679.9	610
1995	698.3	740
1996	802.4	870
1997	715.6	895
1998	789.0	773
1999	885.3	1137
2000	858.0	1011
2001	821.0	834
2002	740.5	787
2003	599.7	546
2004	697.6	728
2005	751.4	771
2006	630.5	734
2007	649.2	628
Promedio	**736.2**	**836**

Tabla 2.5.2.1. Evapotranspiración real y precipitaciones en la zona de estudio con Balshort.

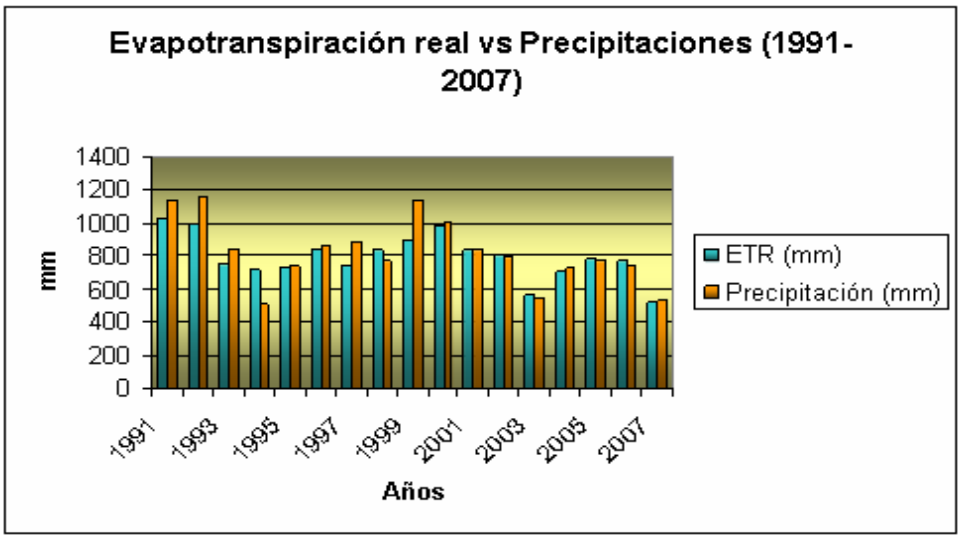


Figura 2.5.a. Histograma de precipitaciones y evapotranspiración real de la zona de estudio.

d) Método de Brook

Si bien el incremento de la temperatura en el suelo aumenta la producción de CO_2, esta no es la única variable que controla la productividad biológica. Según Brook *et al.* (1983), también las condiciones de disponibilidad de agua en el suelo cumplen un rol fundamental, de allí que ha propuesto el uso de la ETR como una medida de la producción biológica en un área y, a partir de ella, las presiones de CO_2 en el suelo.

El autor realizó su trabajo obteniendo datos del crecimiento estacional de la PCO_2 en el suelo en diecinueve regiones distintas del mundo, en nueve países. Análisis estadísticos bivariados y de regresión linear múltiples de los log PCO_2 en el suelo, como variables dependientes, y temperatura, precipitaciones, log ETR y log ETP, como las cuatro variables climáticas independientes, demostraron que la ETR predice la PCO_2 en el suelo.

En base a ello, desarrolló un modelo mejorado PCO_2 en el suelo vs. ETR asumiendo que:

- Cuando la ETR se próxima a 0, la PCO_2 en el suelo se aproxima a la atmosférica.
- Hay un límite superior para la PCO_2 en el suelo, a una muy elevada ETR.

Dicho modelo tiene la siguiente expresión, donde ETR es en mm:

$$\mathbf{Log\ PCO_2 = -3.47 + 2.09\ (1 - e^{-0.00172\ ETR})}$$

Esto explica el 67% de la variación inicial en los datos de PCO_2 y predice para el suelo un log PCO_2 de **- 3.47** a ETR = 0 y un límite superior de 3.5% (log (PCO_2) = - 1.45) para el crecimiento medio estacional de PCO_2 en el suelo a una ETR con valores de 2000 mm, o superiores.

En el presente estudio se obtuvieron los logaritmos de las presiones parciales de CO_2 a partir de los análisis químicos de dieciséis muestras de agua subterránea del área de trabajo, con el software FREEQC Versión 2.15.02. Se calculó el valor medio de esos datos,

– 2.1, y con él se ingresó al gráfico que muestra la figura 2.6.b obteniendo la ETR media anual para la región, equivalente a 669 mm. /año.

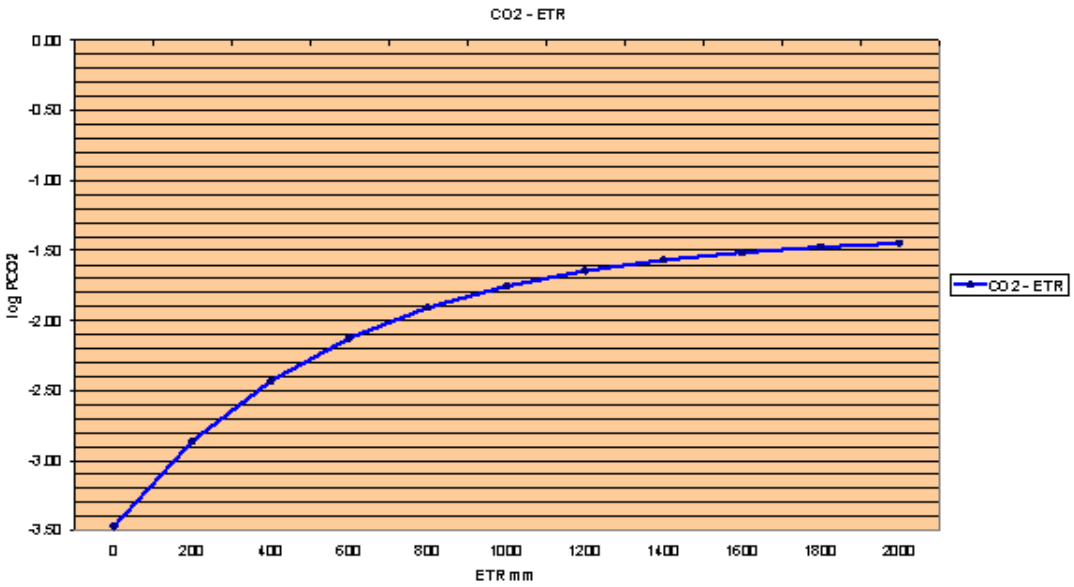


Figura 2.6.b. Gráfico Log PCO_2 - ETR

Comparando los valores resultantes de los distintos métodos aplicados, se ve que el resultado de éste está en el orden de magnitud de los demás, los cuales han sido suficientemente probados y universalmente aceptados. Por tal motivo, en el futuro, se aplicará a otras zonas a los fines de compararlo y verificarlo ya que se muestra como un método potencialmente muy práctico.

En la tabla 2.5.2.2. puede verse los valores promedios de ETR del período considerado, obtenidos con los diferentes métodos.

ETR TURC	ETR COUTAGNE	ETR BALSHORT	ETR BROOK
650 mm./año	615 mm/año	736 mm./año	669 mm./año
78 % ppción	74% ppción	88% ppción	81% ppción

Tabla 2.5.2.2. Valores promedio de ETR calculados con diferentes métodos

La ETR calculada por Balshort utilizando la ETP de Penman-Monteith arroja los mayores valores, esto significa que presenta el mínimo de agua de lluvia que es posible de

escurrir y recargar el acuífero, mientras que las mayores probabilidades de que ocurran estos fenómenos se presentan con la mínima ETR que estima Coutagné.

2. 6. Clasificación climática

2.6.1. Clasificación de Thornthwaite

La clasificación climática de Thornthwaite (1948) ha sido ampliamente utilizada en trabajos de hidrología, honrando los aportes del autor a esta ciencia desde una perspectiva geográfica. Supone un gran avance respecto de otras ya que se fundamenta en los efectos del clima sobre el suelo y las plantas, expresados a través de la evapotranspiración y del agua disponible en el suelo, en vez de relacionar los parámetros meteorológicos clásicos.

Toma en consideración la eficacia térmica, que surge de una relación entre la ETP y la humedad disponible, expresada como índices de humedad y de aridez a partir del balance hídrico. Esta clasificación define tipos climáticos en función de:

- La humedad, representados por letras mayúsculas y su variación estacional expresada en letras minúsculas.
- La eficacia térmica, representados por letras mayúsculas con comilla y su concentración estival expresada por letras minúsculas con comilla.

Para poder aplicar la formula a toda clase de suelos sin particularizar unas condiciones concretas, el método fue modificado en su versión original (Terrón, 1995) asumiendo las hipótesis siguientes:

- La reserva de agua del suelo varía entre 0 y 100 mm ($0 \leq R \geq 100$)
- La evapotranspiración real ETR corresponde, en los meses en que por falta de humedad no se alcancen las condiciones potenciales, a las precipitaciones del mes sumadas a la reserva del mes anterior.
- En los meses suficientemente húmedos la evapotranspiración real coincide con la potencial.

- Existe déficit de humedad en los meses en que la evapotranspiración real es inferior a la potencial.

Para obtener el índice de humedad se realiza un balance hídrico con el método directo y con reserva máxima climática de 100 mm El índice se definirá como el conjunto de los excesos de agua (E), en porcentaje, respecto de la ETP anual de la siguiente forma:

$$\mathbf{I_E = (E / ETP)\ 100}$$

Mientras que el índice de aridez de define como el porcentaje de la falta de agua (D) de los distintos meses respecto de la ETP del año:

$$\mathbf{I_D = (D / ETP)\ 100}$$

Y el índice de humedad global se define como el porcentaje de excesos menos el 60 % del porcentaje de falta de agua:

$$\mathbf{Ih = I_E - 0{,}6\ I_D}$$

En la tabla 2.6.1.1. se expone el balance hídrico del suelo propuesto por Thornthwaite, necesario para la clasificación climática del área de estudio calculado con las precipitaciones medias mensuales de la estación campo Rufino del período 1999 – 2007.

	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	
P	11.5	16.1	33.6	58.8	119.4	149.4	140.4	108.3	104.8	63.7	26.2	7.9	840.1
ETP	19	29	42	70.6	96.2	120.7	128	113	88.5	59.5	37.6	21.4	825.5
P - ETP	-7.5	- 12.9	-8.4	- 11.8	23.2	28.7	12.1	-4.7	16.3	4.2	- 11.4	- 13.5	
R	92.5	79.6	71.2	59.4	82.6	100	100	95.3	100	100	88.6	75.1	
ETA	11.5	16.1	33.6	58.8	96.2	120.7	128	108.3	88.5	59.5	26.2	7.9	
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	11.3	12.1	0	11.6	4.2	0	0	39.2

Tabla 2.6.1.1. Balance hídrico del suelo con el método de Thornthwaite.

Según esta metodología, el clima de la región se clasifica como:

- **(C_2)** Sub-húmedo
- **(r)** Falta de agua pequeña a nula
- **(B'_2)** Mesotérmico
- **(a´)** Baja concentración de la eficacia térmica en verano

Se evaluó también el grado de aridez del clima en el contexto regional, en base a los criterios termo - pluviométricos de Dantín Cereceda y Revenga y de Martonne (en Terrón, 1995). Estos se expresan en índices que surgen de relacionar temperatura y precipitaciones.

2.6.2. Índice de Dantín Cereceda y Revenga

$$I_{DR} = 100\ T/\ P$$

$I_{DR} = 2$
$I_{DR} \leq 2$ **clasificación: Zonas húmedas y sub húmedas**

2.6.3. Índice de Martonne

$$I_M = P\ /\ T + 10$$

$I_M = 32.5$
$30 \leq I_M \leq 40$ **clasificación: Regiones de olivos y cereales**

Finalmente, con el objetivo de verificar la existencia y duración de un eventual período seco, los registros de temperatura y precipitaciones medias se volcaron en un diagrama ombrotérmico de Gaussen.

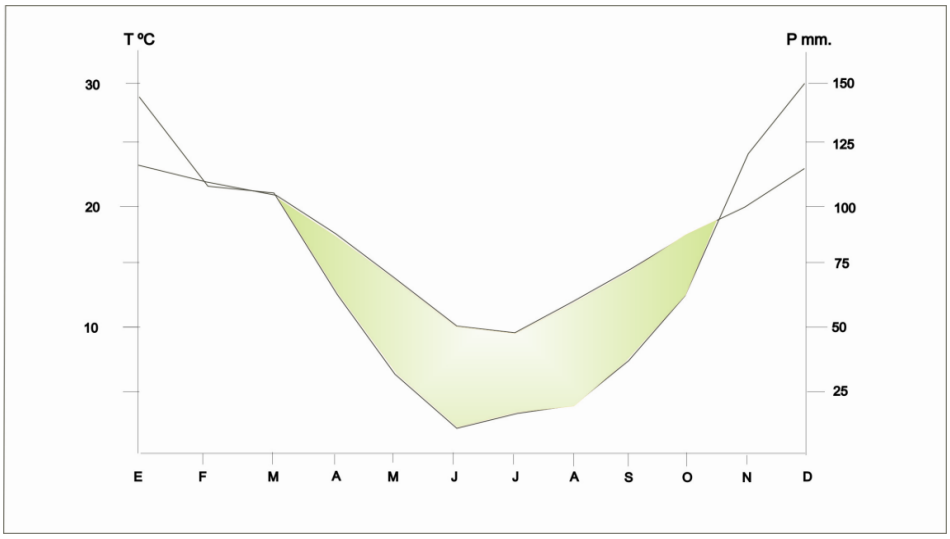


Figura 2.6.1.a. Diagrama Ombrotérmico de Gaussen.

Del diagrama de la figura 2.6.1.a. resulta un período seco que se extiende de abril a octubre definiendo a un clima monoxérico.

De los tres métodos empleados para definir el tipo de clima de la región han resultado valores que, si bien lo caracterizan como sub húmedo, están en el límite entre esta categoría y el semiárido. Esto es coincidente con la ubicación geográfica, ya que el área de estudio se encuentra prácticamente en el límite entre las regiones geográficas Pampa húmeda y Pampa semiárida.

CAPITULO III
GEOLOGÍA

3.1. Marco Geológico

Las características geológicas de la zona de estudio son de vital importancia para la comprensión del sistema hidrológico de la misma.

Existen diversas ideas sobre la evolución tectónica de las sierras de Córdoba. Bajo el riesgo de simplificar excesivamente un problema complejo, se puede definir brevemente como:"una estructura de bloques limitados por fallas principales longitudinales, generadas y reactivadas por los distintos movimientos orogénicos andinos".

"Dichas fallas tienen un carácter compresivo (fallas inversas) y buzan al este, en consecuencia los escarpes generan una pendiente montañosa abrupta al oeste, mientras que la pendiente este de las sierras es suavemente inclinada. El efecto resultante de las fallas inversas es que unidades litológicas más antiguas montan sobre otras más modernas". (Capitanelli 1979).

Prescindiendo de consideraciones sobre la génesis y evolución, el marco geológico del valle de La Cruz está dado por las principales unidades litológicas y estructurales que conforman las Sierras Pampeanas de Córdoba.

Por el oeste emerge el bloque de la Sierra Grande constituida por rocas de anatexis asociadas a extensas unidades gnéisicas que intercalan esquistos y, en menor proporción, plutones de gabros de poca extensión superficial, mármoles y anfibolitas representantes del metamorfismo de grado medio a alto. A todo el conjunto se le asigna edad Proterozoico superior a Paleozoico inferior. (Gordillo y Lencinas, 1967)

El complejo de rocas metamórficas aparece intruido por plutones de granitos y tonalitas de edad atribuida al Paleozoico inferior - medio, además de granitoides peraluminosos ubicados cronológicamente en el límite Devoniano – Carbónico y cuya máxima expresión es el batolito de Achala (Gordillo y Lencinas, 1979). En el flanco oriental de la Sierra existe un conjunto de superficies planas, de origen erosivo, que se destacan en la morfología montañosa y se conocen como "pampas elevadas", entre las que se destaca la pampa de Achala.

En el este, el contexto geológico está dado por los afloramientos del complejo metamórfico que da origen a la Sierra Chica de Córdoba, asociado a las rocas graníticas de anatexis de la Sierra de las Peñas de edad Cámbrico inferior y el complejo volcánico - sedimentario de la Sierra de los Cóndores de edad Cretácico (Gordillo y Lencinas, 1967).

El complejo cretácico está integrado por formaciones sedimentarias continentales del tipo estratos rojos, con predominio de conglomerados asociados a basaltos olivínicos alcalinos. Los estratos rojos se apoyan discordantemente sobre el basamento plutónico - metamórfico de la sierra y en algunas localidades yacen cubiertos, en discordancia erosiva, por los depósitos cenozoicos. (Gordillo y Lencinas 1967).

El mapa de la figura 3.1.a., elaborado en base interpretación geológica de fotografías aéreas y verificaciones en el terreno, muestra la distribución de las formaciones rocosas que conforman el área de estudio y los principales lineamientos estructurales relevados e inferidos.

3.2. Unidades litológicas

Desde el punto de vista hidrogeológico, las rocas y los sedimentos se clasifican por su capacidad de almacenar y transmitir agua, la que depende de propiedades físicas como la porosidad y permeabilidad en las rocas sedimentarias y el grado de desarrollo de fracturas y diaclasas en las rocas cristalinas. En tal sentido, se describen las formaciones litológicas que conforman los límites superficiales del sistema y las que constituyen el subsuelo. En el capítulo V, se las agrupa como Unidades Hidrogeológicas, de acuerdo a sus características hidrogeológicas.

Insertar mapa geológico

3.2.1. Rocas Paleozoicas

3.2.1.1. Cámbrico inferior. Granitos de anatéxis y rocas asociadas

a) Granitoide Sierra de Las Peñas.

Esta unidad litológica ocupa una amplia superficie en la región y se lo define como un granitoide singenético con alto contenido de magnetita. El cuerpo granítico se extiende en forma ininterrumpida y concordante con el grupo gnéisico y rocas asociadas del Complejo Metamórfico Sierra de Las Peñas. Está limitado en el este por una mega estructura que genera el contacto oriental, la falla de Las Peñas y, por el oeste, la falla de la Sierra Chica genera el contacto occidental.

3.2.1.2. Gneises y esquistos del borde oriental

b) Gneises Biotíticos Granatíferos

Son las rocas de mayor distribución areal y actúan a manera de encajante de las restantes unidades (Guereschi 2000). Es una de las unidades litológicas dominante en el Complejo Metamórfico Sierra Grande y se extiende en el borde oriental del complejo, más exactamente desde la mega fractura de Guacha Corral hacia el este, hasta sumergirse en la llanura.

3.2.2. Rocas Mesozoicas

Cretácico medio. Complejo volcánico - sedimentario Sierra de Los Cóndores

En la Sierra de Los Cóndores aflora una secuencia volcánica - sedimentaria cretácica de unos 200 m de espesor que se ubica en el extremo sur de las Sierras Chicas, en el área del embalse del Río Tercero. La conforma un ciclo sedimentario compuesto por dos secuencias continentales de estratos rojos y dos pulsos de vulcanismo sinsedimentario basáltico intercalados (Gordillo y Lencinas, 1967) conformando una típica asociación petrotectónica de rift (Kay y Ramos, 1996).

Componen el grupo, desde la base hacia el techo, la Fm. Embalse Río Tercero, Vulcanitas Cerro Colorado, Conglomerado Cerro Libertad y Vulcanitas Rumipalla.

c) **Formación Embalse Río Tercero**

Es la formación basal del grupo, comprende una secuencia sedimentaria de estratos rojos que se apoyan discordantemente sobre el basamento cristalino de la región y se compone de tres asociaciones de facies sedimentarias: una corresponde a las facies psefíticas, otra a las psamíticas y una asociación de facies psamíticas y pelíticas (Poiré *et al.*, 1989). Aflora desde el norte del embalse en la zona de Villa del Dique, se continúa hacia el sur por debajo del lago y compone el cuerpo principal de la sierra de Los Cóndores (Gordillo y Lencinas, 1967).

d) **Formación Vulcanitas Cerro Colorado**

Esta formación agrupa un serie de coladas basálticas depositadas en forma sinsedimentaria sobre los niveles superiores de la Fm. Embalse de Río Tercero. Está compuesta por más de siete mantos con espesores individuales de 3 a 15 m que, en los diferentes afloramientos donde aparecen, suman totales de 30 a 45 m (Gordillo y Lencinas, 1967).

Aflora desde la costa norte del lago de Embalse, en la zona de Villa del Dique y flanco oriental del Cº Rumipalla, continúa por debajo del lago y aparece nuevamente en la costa sur, en el área de la central nuclear y Cº Colorado, a partir de donde se extiende hacia el SSE conformando una línea de cerrillos (Cº Los Carpinteros, Cº Jarillas, etc.) que desaparece bajo la cubierta cuaternaria del valle de La Cruz.

e) **Formación Conglomerado Cerro Libertad**

Entre los dos ciclos de efusiones de basaltos (Vulcanitas Cerro Colorado y Vulcanitas Cerro Rumipalla) se encuentra una capa de conglomerados 60 a 80 m de espesor que, a pesar de su similitud con los niveles basales de la Fm. Embalse de Río Tercero, se considera como una unidad independiente por la abundante presencia de clastos provenientes de la destrucción de los basaltos de la Fm. Vulcanitas Cerro Colorado. (Gordillo y Lencinas, 1967)

Aflora en la zona del Cº Rumipalla y en la margen sur del lago en el área del Complejo Hotelero de Embalse y en el Cº Pistarini. Está compuesta por estratos de ortoconglomerados polimícticos rojos violáceos de 0,2 a 2 m de espesor, granodecrecientes desde ortoconglomerados masivos, en ocasiones imbricados, hasta areniscas sabulíticas guijosas o gruesas con clastos mayores dispersos.

f) **Formación Vulcanitas Rumipalla**

Comprende un segundo ciclo de vulcanismo basáltico que marca el techo de la secuencia cretácica del Grupo Los Cóndores. Los afloramientos comienzan en el Cº Rumipalla y se continúan al sur por toda la Sierra de Los Cóndores desde el Cº Libertad hasta desaparecer bajo la cubierta cuaternaria del valle de La Cruz. La localidad y perfil tipo se encuentra en el Cº Rumipalla y Cº Libertad respectivamente.

Está compuesta por cinco o más coladas de basaltos de 5 a 15 metros de espesores individuales, intercaladas con capas conglomerádicas de la Fm. Cº Libertad, que en conjunto tienen espesores comprendidos entre 35 y 50 m. (Gordillo y Lencinas, 1967)

3.2.3. Sedimentos Cenozoicos

Están constituidos, en su mayor parte, por los sedimentos pampeanos (limos y loess) que incluye arenas de origen fluvial y aluvial y que cubre casi la totalidad del valle al este del río La Cruz, desde el lago de Embalse hasta el límite sur del área de estudio. Constituyen las formaciones sedimentarias de mayor permeabilidad en la región y el acuífero libre del área de estudio.

Los limos – loess, como formación, tiene las características de un sedimento friable, gris pardo, de estructura maciza, con textura de limos gruesos; en algunas cárcavas aparecen en la base estructuras de cauces efímeros. Tanto Santa Cruz (1972) como Cantú (1992) coinciden en que la mineralogía de estos sedimentos muestra dos orígenes:

a) Una asociación plutónico - metamórfica correspondiente al basamento cristalino compuesta de cuarzo, oligoclasa, microclino y ortoclasa).

b) Otra volcánico - piroclástica compuesta de andesina y labradorita, hipersteno, lamprobolita, augita, litoclastos de rocas volcánicas y trazas de vidrios volcánicos ácidos.

3.3. Geomorfología

En el valle coexisten formaciones rocosas cuyas edades van desde los tiempos paleozoico hasta los actuales. Por esta dilatada historia, han estado sometidas a los efectos de los movimientos orogénicos más importantes en la evolución del planeta. Esos procesos han dejado su impronta a través de geoformas antiguas, como las llanuras elevadas labradas en las rocas graníticas de la sierra Grande, o los relictos de relieves volcánicos sedimentarios en el flanco oriental. La acción reciente y actual de los agentes morfogenéticos está representada por los depósitos de sedimentos fluviales, aluviales y eólicos que caracterizan al cuaternario de la región Pampeana.

Sin hacer consideraciones genéticas se definen tres unidades homogéneas: Lomadas de afloramientos de gneises y esquistos del borde oeste; Mesetas de afloramientos de rocas volcánicas y sedimentarias y Serranías de granitoides del borde este; y Planicies de sedimentos fluviales – aluviales y eólicos de relleno del valle.

3.3.1. Lomadas del borde oeste

Es un relieve de lomas bajas aplanadas, de pendientes suaves, generadas por un proceso erosivo evolucionado sobre afloramientos de gneises y esquistos del borde oeste. Estos macizos conforman el borde oriental de la Sierra Grande y ocupan un área del orden de las centenas de kilómetros cuadrados.

El desarrollo de fracturas es relativamente escaso, con la excepción de áreas afectadas por movimientos tectónicos importantes como la zona de Las Caleras de Calamuchita, donde las rocas metamórficas junto a un significativo manto de calizas aparecen altamente fracturadas. Ambas rocas en el sector, particularmente las calizas, llegan a constituir un acuífero en medio fracturado.

La superficie está cubierta por un manto de regolito con desarrollo de vegetación, cuyo espesor alcanza el orden de metros. El agua de las precipitaciones se infiltra en el regolito y fluye entre él y la superficie del macizo, luego siguiendo los gradientes topográficos, mana lentamente en las quebradas generando manantiales. En las cabeceras

de la red de drenaje los manantiales son estacionales, pero a medida que la red se jerarquiza, cuando llegan a ser cauces de tercer orden, llevan agua permanentemente que aportan al río La Cruz.

Una característica morfológica que se destaca de las quebradas excavadas por el proceso de drenaje, es su fondo plano. Estas se rellenan con sedimentos gruesos y regolito y contienen acuíferos de poca producción en rocas fracturadas que, en la zona, alcanzan a abastecer a familias y ganado.

3.3.2. Mesetas

Están formadas por afloramientos de rocas volcánicas y sedimentarias y granitoides del borde este. En general puede resumirse que las rocas de edad mesozoica ocupan un área importante que limita al sistema acuífero por el este - noreste. Las rocas volcánicas conforman relieves planos de mesadas, aisladas por la erosión, con desarrollo de fracturas que colectan y contienen agua. Si hay aporte suficiente para recarga pueden constituir medios acuíferos; como ejemplo se citan algunos casos de pozos de buena producción excavados en lavas que circundan al lago de Embalse.

Los conglomerados componentes del complejo, conforman un relieve de lomadas alargadas y cimas redondeadas características que se diferencian de las areniscas por el diseño del drenaje. En estas últimas la red es más densa, lo que presupone menor permeabilidad que los conglomerados y por lo tanto se comportan hidráulicamente como acuitardos. Estos conglomerados polimícticos están constituidos por sedimentos cuyas granulometrías varían desde arcillas a bloques dispuestos en forma caótica, de manera tal que los sedimentos más finos (arcillas y arenas finas) componen una matriz que rellena los espacios entre clastos de mayor tamaño, originando una formación compacta de baja permeabilidad.

Observaciones in situ, en pozos de agua cavados y en cortes de los caminos, permitió verificar el modo discontinuo de flujo del agua subterránea en los conglomerados, es decir niveles discontinuos colgados y de carácter temporario.

3.3.3. Serranías del borde este

El macizo de la Sierra de Las Peñas constituye un relieve rocoso apenas emergente, casi plano, donde el área de colección de agua es reducida, tanto que es insuficiente para abastecer manantiales de flujo permanente. Como en los macizos del sector oeste, existen algunas quebradas de fondo plano, a modo de cubetas rellenas de sedimentos, que contienen cuerpos acuíferos de reducida extensión en medio fracturado.

La superficie del macizo que drena hacia el valle es de unos pocos kilómetros cuadrados y aparece cubierta por una capa de regolito del orden del metro de espesor, que prácticamente no retiene partes importantes de las precipitaciones. El agua de lluvia escurre rápidamente y se infiltra en los sedimentos pampeanos situados aguas abajo, lo que denota el bajo grado de permeabilidad de estos granitoides.

3.3.4. Planicies

Están conformadas por sedimentos fluviales – aluviales y eólicos de relleno del valle. Estos cubren a modo de manto las formaciones más antiguas conformando una superficie plana con pendiente general hacia el norte y pendientes locales hacia el centro del valle. La pendiente media es del orden de 3‰ lo que favorece la infiltración del agua de precipitaciones y la recarga al acuífero freático subyacente.

3.4. Suelos

Dentro de los procesos hidrológicos, junto a la vegetación, el suelo cumple la función de interfase entre la atmósfera y el medio acuífero; a través de él ocurre el proceso reversible de transferencia de agua entre el subsuelo y la atmósfera y las principales modificaciones químicas del agua de recarga.

La capacidad de transmitir el agua está fundamentalmente relacionada con las propiedades referidas a la textura y estructura. Desde un enfoque geológico, cada tipo de suelo lleva en sí mismo la impronta del clima del pasado y del presente, ya que a través sus

características expresa la interacción entre los materiales parentales y el clima, los procesos geomorfológicos, etc. En este trabajo, el análisis de los suelos está enfocado a determinar su capacidad de transmitir el agua, es decir las propiedades hidráulicas.

Para la identificación, se tomó como base al mapa de suelos de la provincia de Córdoba a escala 1:500.000 de la Agencia Córdoba Ambiente y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi, (2003) dicho relevamiento está hecho a nivel taxonómico de Subgrupos del Sistema Americano Soil Taxonomy, que incluyen taxones menores.

Se hizo además un relevamiento de campo con obtención de muestras del horizonte superficial y a 0.8 m de profundidad, las que fueron sometidas a análisis de textura. Las muestras se obtuvieron en las partes más altas del relieve que constituye el fondo del valle y en la zona baja que ocupa la parte central con motivo de obtener datos específicos de las zonas fisiográficas discriminadas en los trabajos del INTA.

En las tablas siguientes se presentan los resultados de los análisis. La tabla 3.4.1 corresponde a las muestras obtenidas en la parte central del valle en Campo Bima A (S 32° 21’ 86” W 64° 25’ 809”) y la tabla 3.4.2 corresponde a las muestras obtenidas en un sector elevado del relieve próximo al campo Biondi (S 32° 20’ 558” W 64° 25’ 24”)

PARTÍCULA	MUESTRA 0.2 m profundidad	MUESTRA 0.8 m profundidad
	%	%
Arcilla (‹2μ) (%)	16 %	14.6%
Limo (2 – 50 μ) (%)	54.5 %	57.5 %
Arena muy fina (50 - 100 μ) (%)	27 %	20.8 %
Arena fina (100 - 250 μ) (%)	1.9 %	3.9 %
Arena media (250 - 500 μ) (%)	0.1 %	0.1 %
Arena gruesa (500 - 1000 μ) (%)	0.2 %	0.2 %
Arena muy gruesa (1000 – 2000 μ) (%)	0.1 %	0.1 %
Gravas (›2000 μ) (%)		

Tablas 3.4.1. Análisis textural de suelo de la zona baja del relieve

PARTÍCULA	MUESTRA 0.2 m profundidad	MUESTRA 0.8 m profundidad
	%	%
Arcilla (‹2μ) (%)	13.8 %	14.1%
Limo (2 – 50 μ) (%)	51.8 %	52.8 %
Arena muy fina (50 - 100 μ) (%)	31.3 %	28.3 %
Arena fina (100 - 250 μ) (%)	0.2 %	2 %
Arena media (250 - 500 μ) (%)	0.3 %	0.1 %
Arena gruesa (500 - 1000 μ) (%)	0.4 %	0.3 %
Arena muy gruesa (1000 – 2000 μ) (%)	0.3 %	0.1 %
Gravas (›2000 μ) (%)		

Tabla 3.4.2. Análisis textural de suelo de las zona elevada del relieve

Tal como se indicó precedentemente, en los trabajos del INTA quedan definidas dos unidades fisiográficas, la que ocupa las partes altas del relieve, denominada *del piedemonte de la Sierra de Las Peñas* y otra que ocupa los sectores planos de los relieves más bajos, denominada *de la Planicie Proximal Periserrana*. Los suelos de las dos unidades son definidos como Haplustoles típicos pertenecientes al orden Molisol.

Independientemente de las particularidades pedogenéticas, los análisis de la textura realizados en este trabajo concuerda con los resultados del mapa del INTA.

Se puede resumir que:

- En las partes altas del relieve, la capa superficial del suelo es de textura franca - arenosa pero, hacia la base del perfil a unos 0.55 m, aumenta la proporción de limos en detrimento de arenas y predomina la textura franco -limosa.
- En las partes bajas del relieve, en la capa superficial y hacia la base del perfil, a unos 0.70 m, la textura dominante es franco limosa.

En consecuencia, para todas las estimaciones que se hagan relacionadas con las características hidrológicas del suelo, se considerara esta última textura y se le asigna una capacidad de campo (CC) de 153 mm obtenida con la formula de Fuentes y Cruz (1990) y una porosidad eficaz (m) de 14 % (Sanders 1998).

CAPITULO IV
PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

4.1. Generalidades

La Prospección Geofísica puede definirse como un conjunto de técnicas con fundamentos en las leyes de la física que permiten efectuar un diagnóstico sobre el tipo, modo de ordenamiento y otras características de los materiales que conforman el subsuelo. La elaboración de tal diagnóstico es la etapa final de un proceso que comprende la toma de datos y su posterior interpretación geológica. En tal sentido, la geofísica es una herramienta muy útil para la hidrogeología, pero solamente con el alcance de comprobar o refutar modelos previamente establecidos en base al conocimiento geológico.

4.2. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

El SEV es una técnica de prospección por resistividad que pertenece al conjunto de métodos eléctricos y, básicamente, consiste en el estudio de la capacidad que tienen los materiales del subsuelo para conducir un flujo de corriente eléctrica. Esta propiedad de las rocas y sedimentos depende de características físicas y químicas tales como la porosidad, la textura, el contenido de humedad o saturación de agua, el contenido de sólidos disueltos en el agua presente en los poros, la cantidad de fracturas en las rocas masivas, etc. Como se ve, la capacidad de las rocas para conducir corrientes refleja la magnitud de un conjunto de propiedades con la que se puede caracterizar e individualizar a las formaciones litológicas, ubicarlas espacialmente en la columna estratigráfica y hacer inferencias sobre la posibilidad que contengan agua.

El agua, a causa de los sólidos que normalmente contiene en solución, favorece el flujo de la corriente eléctrica cuando ésta es aplicada a un medio saturado. Por lo tanto, en determinadas condiciones de geología, se puede asumir que los materiales del subsuelo que tienen resistividad eléctrica menor, en relación con los de su entorno, pueden contener agua en sus poros o fracturas.

Debido a que el subsuelo no es un conductor homogéneo, se utiliza el término resistividad eléctrica por el de resistencia eléctrica. Se puede asumir que el valor de la

resistividad representa aproximadamente el promedio de las resistencias de un determinado espesor de materiales litológicos.

El método se desarrolla utilizando un dispositivo generador de corriente continua junto a un dispositivo de registro de intensidad de corriente (I) y de potencial eléctrico (V) denominado multímetro, como muestra esquemáticamente la figura 4.2.a.

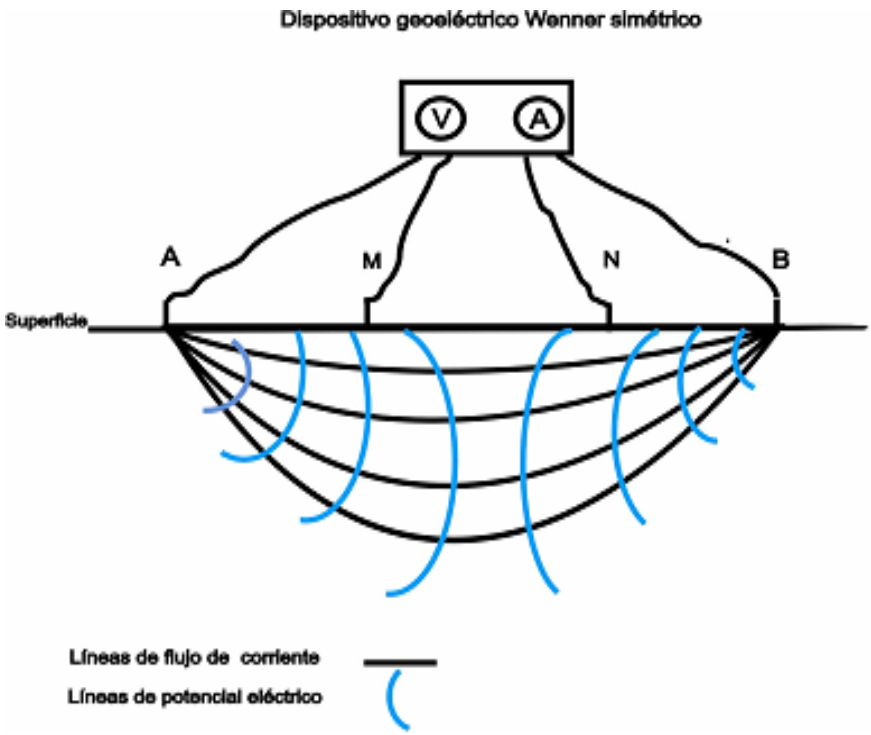


Figura 4.2.a. Esquema del dispositivo geoeléctrico Wenner simétrico.

Mediante 2 electrodos a los que se designa como A y B se introduce y se hace fluir por el subsuelo una corriente continua cuya intensidad (I) es leída en el instrumento de registro. Simultáneamente se mide la diferencia de potencial (V) que se genera entre 2 electrodos denominados M y N.

Cuando se utiliza el dispositivo de eléctrodos Wenner simétrico, como en este caso de estudio, la resistividad (ρ), se obtiene relacionando (V) e (I) y una constante geométrica k mediante la ecuación:

$$\rho = K \times V/I$$

K, la constante geométrica, vale 2 Π a; (a) es la profundidad de investigación y equivale a aproximadamente 1/3 de la distancia entre los electrodos A y B.

En cada punto de sondeo se repite el procedimiento de medida a distintas profundidades para obtener una secuencia de valores que constituyen el Sondeo Eléctrico Vertical. En las investigaciones hidrogeológicas, generalmente los datos de resistividad en un punto de sondeo se obtienen cada 10 metros de profundidad.

A los efectos de alcanzar el objetivo propuesto, se decidió realizar los sondeos a lo largo de tres perfiles transversales al valle que contiene al sistema acuífero. Dado que el alcance del estudio es de escala regional, se decidió por una distancia entre puntos de SEV de 1.5 km aproximadamente; mientras que la separación entre perfiles estuvo condicionada por la existencia de vías de acceso y circulación.

Tomando en cuenta el modo de ordenamiento de los bloques de la corteza se previó que los perfiles cortaran a las estructuras principales, es decir con dirección normal a ellas; por lo que se extienden desde las Sierras de Los Cóndores y Sierras Chicas en el este, hasta las proximidades del río La Cruz en el oeste. La figura 4.2.a. muestra la distribución de los perfiles de SEV en el área de estudio.

La distribución de corriente en el subsuelo se hizo mediante el dispositivo de electrodos Wenner simétrico con espaciamiento de electrodos de 10 m, hasta alcanzar los 140 m de profundidad aproximadamente. Las gráficas de campo de los respectivos SEV se incorporan en el Anexo II.

Figura 4.2.b. Esquema de ubicación de los sondeos eléctricos verticales.

4.3. Descripción de los Perfiles de Resistividad

a) Perfil 1

El perfil 1 está integrado por 8 SEV hasta 140 m de profundidad en una línea E - W a lo largo de 12 Km aproximadamente. Se extiende desde la pendiente occidental de la Sierra de Los Cóndores en el punto situado en S 32º 20’ 094 - W 64º 23’ 243, hacia el oeste, hasta las proximidades del río La Cruz en los S 32º 20’ 505 - W 64º 27’ 740.

La figura 4.3.a muestra la seudo sección de resistividad aparente y la sección de resistividades correspondientes al perfil.

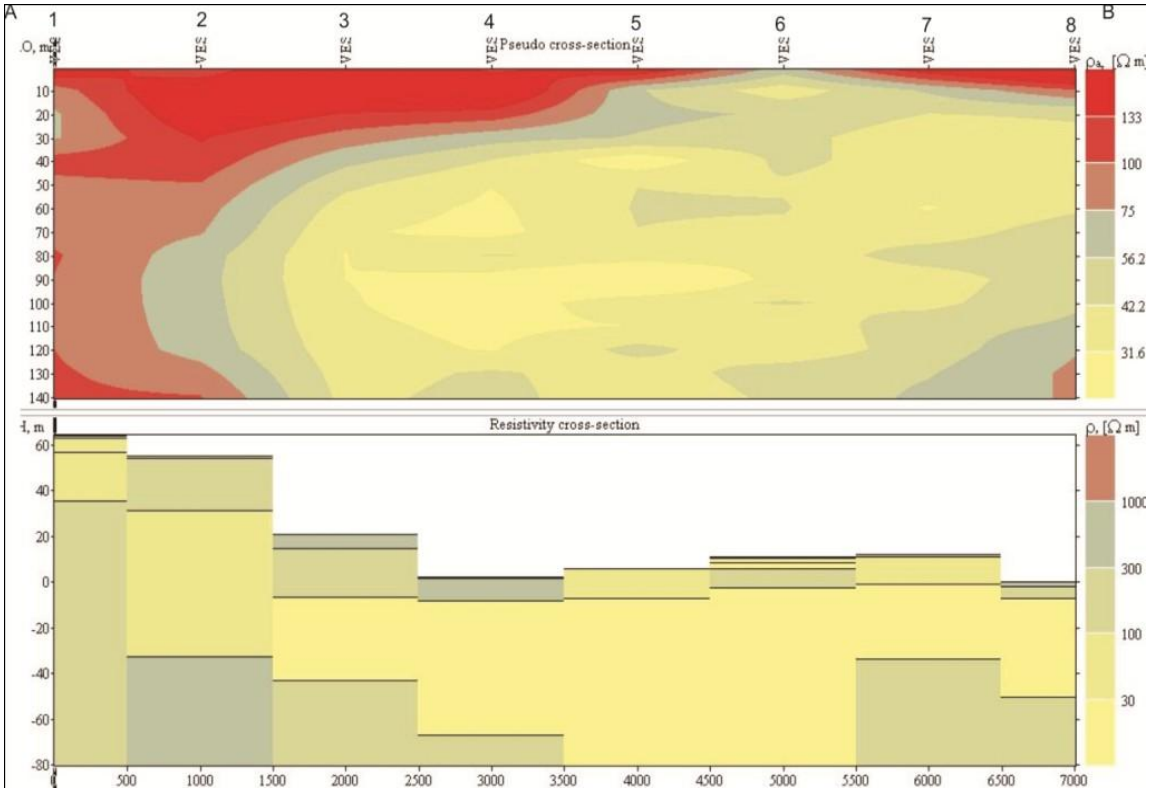


Figura 4.3.a. Seudo sección de resistividad aparente y sección de resistividades del Perfil 1.

b) Perfil 2

El perfil 2, está conformado por 6 SEV hasta 140 m de profundidad con toma de datos cada 10 m. Se extiende desde el borde occidental de la Sierra de Los Cóndores en un punto situado en S 32º 17’ 256 - W 64º 25’ 7, hacia el oeste hasta el sitio ubicado en S 32º 17’ 746 - W 64º 28’ 757 en las proximidades del río La Cruz, a lo largo de una línea de 9 Km aproximadamente.

La figura 4.3.b. muestra la seudosección de resistividad aparente y la sección de resistividad.

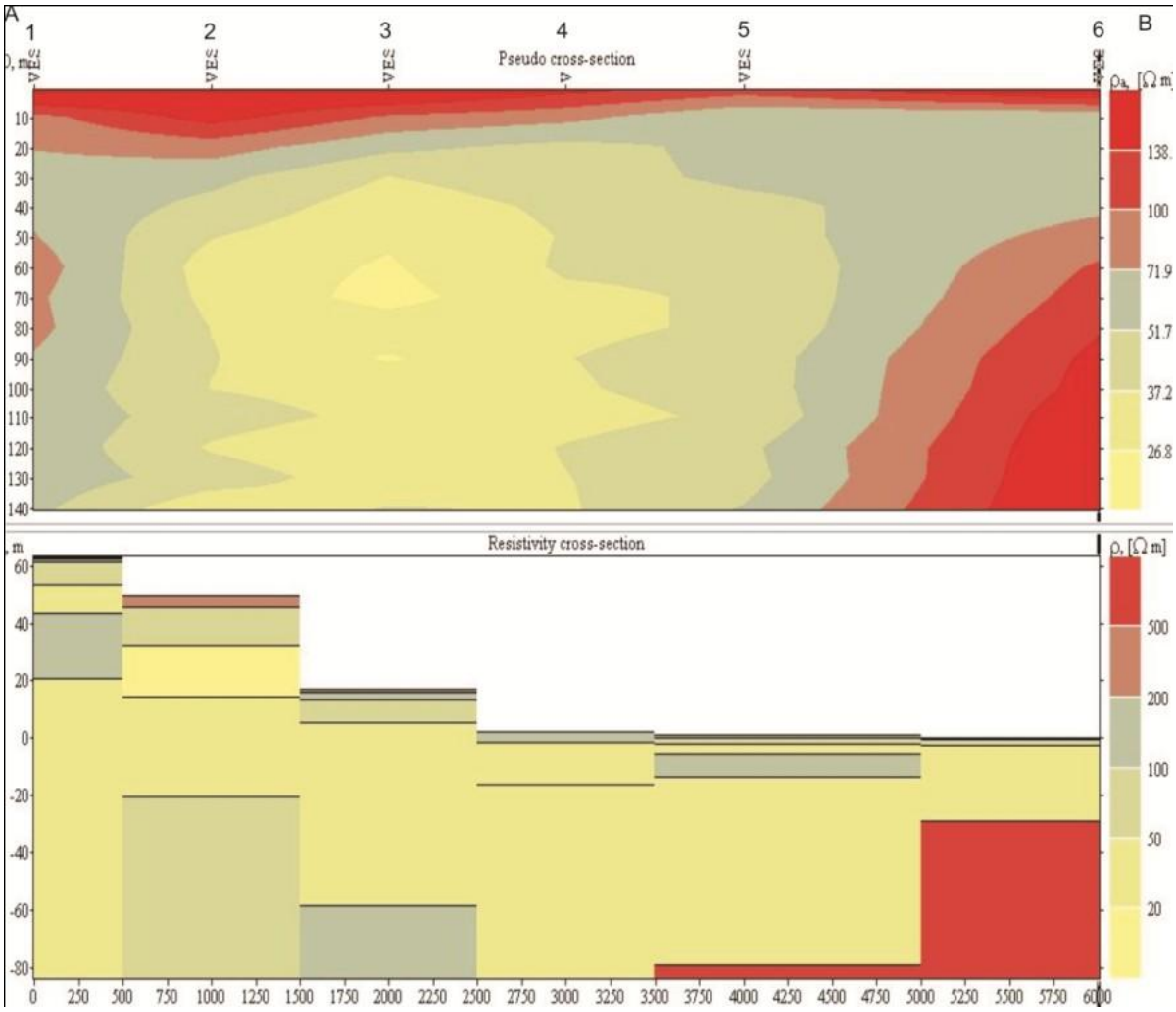


Figura 4.3.b. Seudo sección de resistividad aparente y sección de resistividades del Perfil 2.

c) Perfil 3

El perfil 3 (figura 4.3.c.) está conformado por 7 SEV hasta 140 m de profundidad, con toma de datos cada 10 m. Se extiende desde el borde occidental de la Sierra de Las Peñas, en el punto ubicado en S 32º 23’ 903 - W 64º 21’ 741, hacia el oeste hasta las proximidades del río La Cruz en el punto ubicado en S 32º 24’ 83 – W 64º 27’ 804, a lo largo de una línea de 13 km aproximadamente.

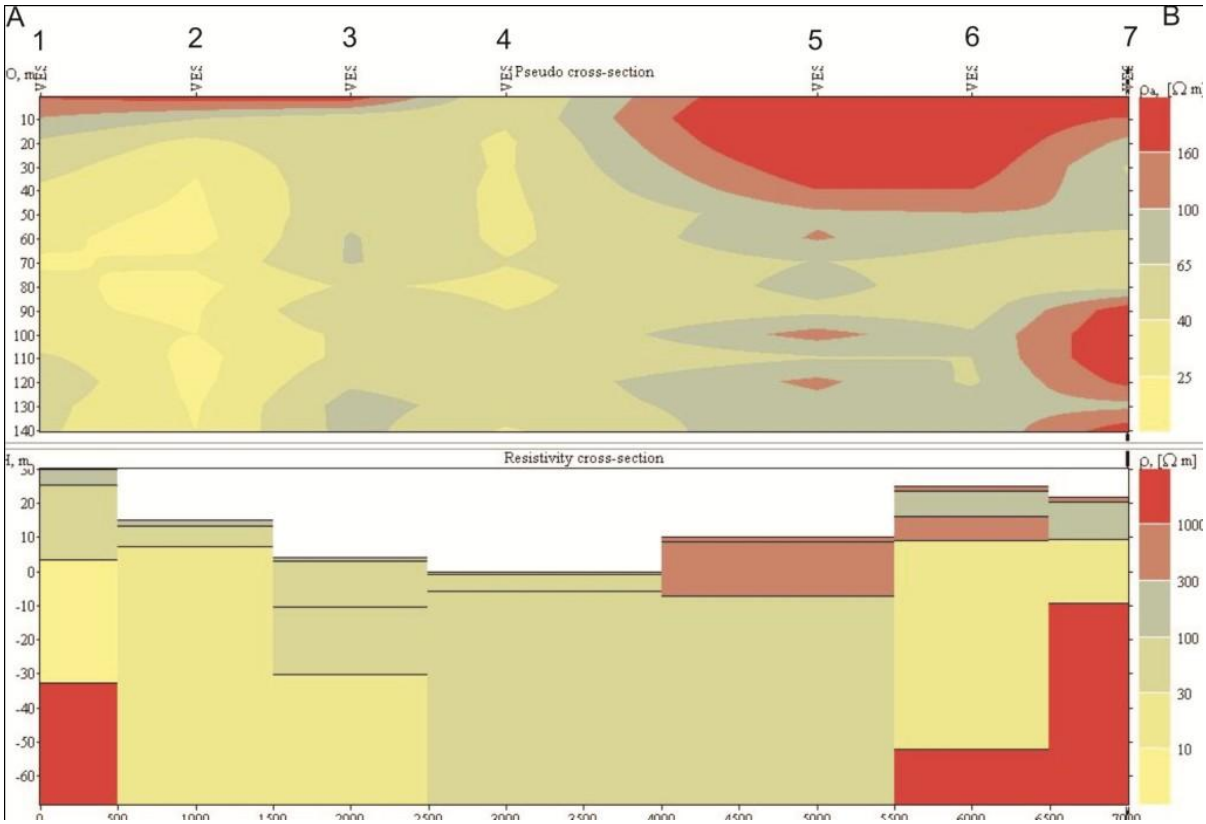


Figura 4.3.c. Seudo sección de resistividad aparente y sección de resistividades del Perfil 3.

4.4. Criterios Para la Interpretación de los SEV

Los datos de campo, luego de procesados, fueron objeto de una interpretación cuantitativa y cualitativa. La primera define las *capas eléctricas* que conforman el sondeo, les asigna espesores y valores medios de resistividad. La segunda, junto al discernimiento geológico, propone un determinado ordenamiento de las formaciones litológicas cuya existencia se infiere.

Se enfatiza que las capas eléctricas son de *comportamiento eléctrico*, cuyos límites pueden o no coincidir con los de capas litológicas. Es decir, representan espesores de subsuelo que, independientemente de las litologías o materiales que lo conforman, se comportan de un modo relativamente homogéneo ante el flujo de corriente. Dicha homogeneidad se traduce en el valor medio de resistividad eléctrica calculado para cada una. De allí que un cuerpo de igual litología puede incluir más de una capa eléctrica, como ocurre con frecuencia en rocas sedimentarias y macizos de rocas ígneas o metamórficas.

En el basamento metamórfico por ejemplo, en la parte superior del macizo, suelen obtenerse resistividades bajas en relación con la parte más profunda. Se debe a que la parte superior, sometida a la intemperización a lo largo del tiempo geológico, ha sufrido alteración físico química que se manifiesta con un comportamiento eléctrico diferente de los sectores más profundos, no alterados.

Similar comportamiento se puede encontrar en formaciones de calizas. Los sectores con un elevado número de fracturas y que permiten el flujo de agua, eléctricamente se comportan de manera disímil de los sectores de mejor calidad geotécnica en la misma formación.

Utilizando el dispositivo Wenner, el proceso de interpretación cuantitativa puede realizarse recurriendo a las Curvas Patrón de los ábacos de Orellana y Mooney. De ellas, por comparación, se obtiene el número de capas eléctricas que conforman un sondeo con sus respectivos espesores y resistividades. Éste es un procedimiento manual.

Otro procedimiento de interpretación, el cual ha sido aplicado en este trabajo, se lleva a cabo mediante el uso de software específico. En este caso se utilizó el IPI2win versión 3.0.1e 14.03.03 de origen ruso que procesa datos de SEV, IP y MTS.

El software genera modelos de capas eléctricas con sus respectivos espesores y resistividades, los que conforman la *sección de resistividades*. Genera también las imágenes de distribución de las resistividades en el subsuelo, denominadas *seudosección de resistividad aparente* (figuras 4.3.a.; 4.3.b.; 4.3.c.)

En la interpretación de los datos, auxiliarmente, se analiza el diseño de las curvas de campo. En tal sentido, con el dispositivo Wenner simétrico, se puede asumir que cada cambio en las propiedades físicas de los materiales del subsuelo se traduce en una inflexión en la curva. Análogamente como un haz de luz desvía su trayectoria al pasar de un medio a otro de distinta densidad.

4.5. Modelo Geoeléctrico

Las figuras 4.5.a; 4.5.b. y 4.5.c. muestran las capas eléctricas con sus respectivos espesores y resistividades, calculadas con el software para cada perfil.

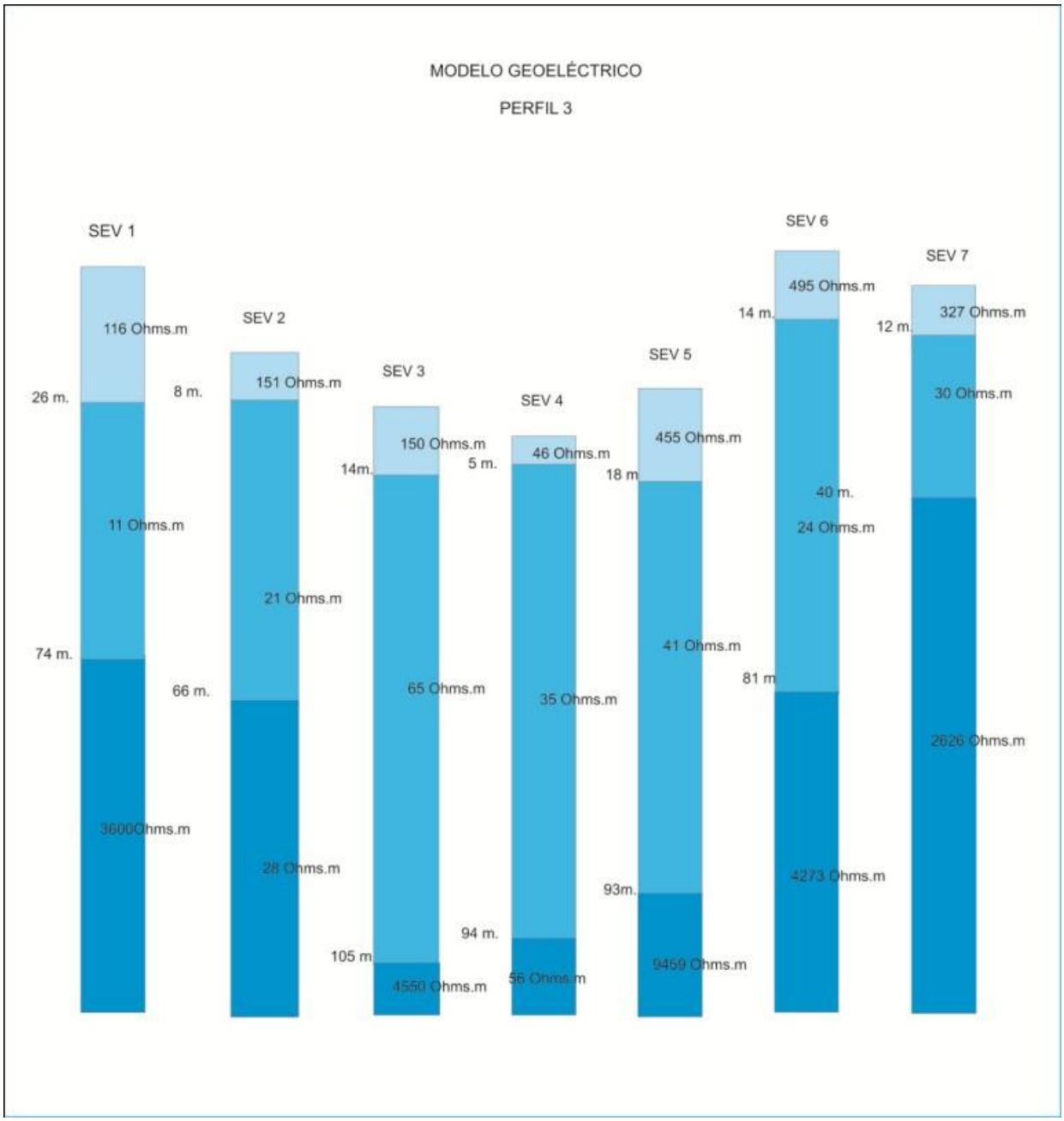


Figura4.5.a. Modelo geoeléctrico del Perfil 3

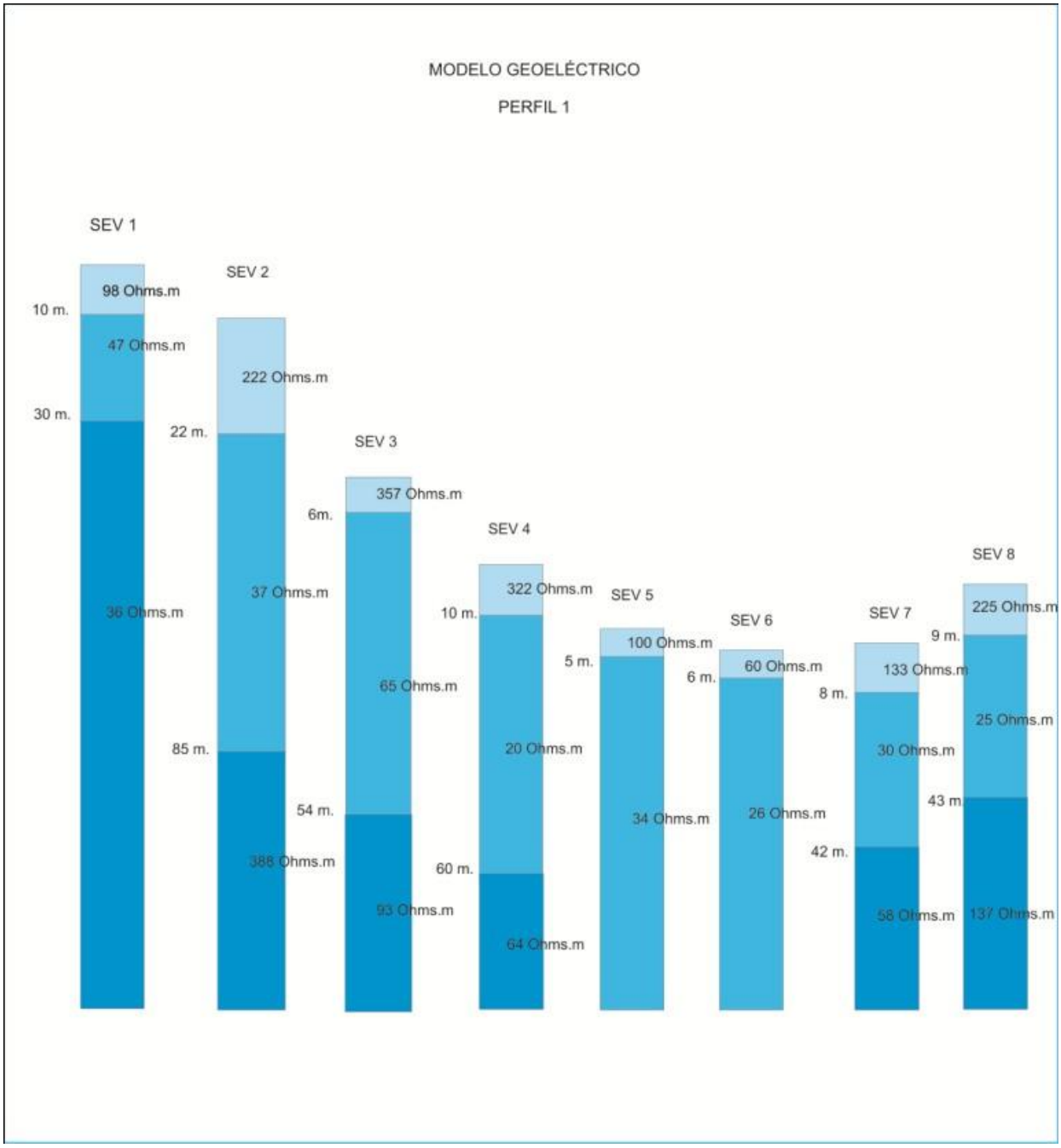


Figura 4.5.b. Modelo geoeléctrico del Perfil 1

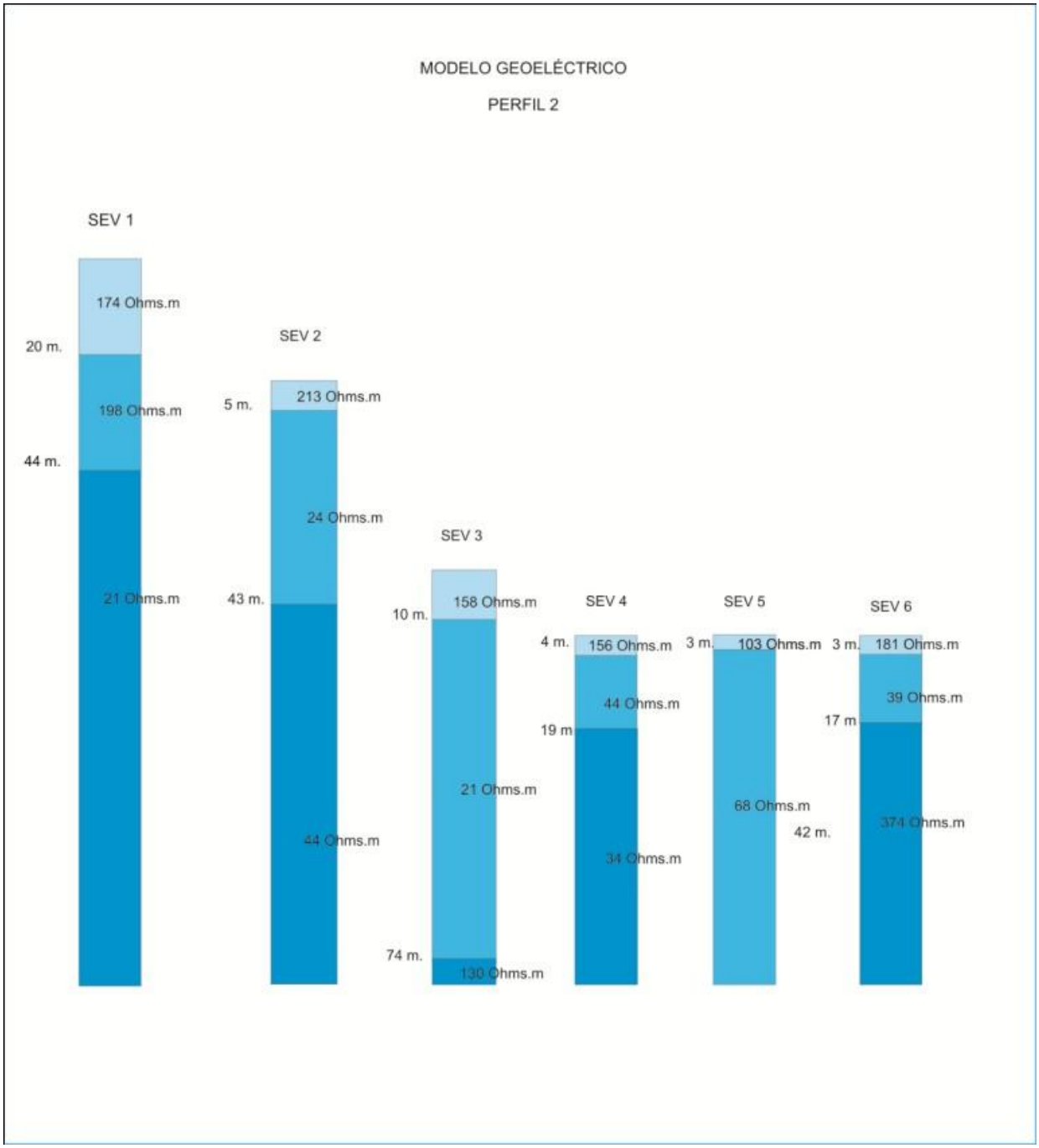


Figura 4.5.c. Modelo geoeléctrico del Perfil 2

4.4. Interpretación de los S E V

Del procesamiento de datos de los perfiles surge un modelo geoeléctrico de tres capas. La capa superior con un valor medio de resistividad calculado para toda el área de 194 ohm.m; la capa intermedia con un valor medio de 43 ohm.m y la capa inferior con un valor medio de 1269 ohm.m.

Capa superior – resistividad media 194 ohms.m.

La resistividad media de estos materiales sugiere que poseen una porosidad mayor que la capa subyacente y el contenido de materiales arcillosos es menor. Por lo tanto, en el modelo geológico que se infiere, dentro de esta capa estaría contenido el manto de loes y limos pampeanos que cubre el relieve del valle.

Capa intermedia – resistividad media 43 ohms.m.

En las seudosecciones de resistividad, particularmente en la del perfil 3, puede verse que los materiales que conforman el subsuelo del sector oeste (mitad derecha de la imagen) son de resistividad relativamente mayor que los del sector este.

Se propone que en el sector este, de resistividad menor, los materiales poseen un contenido de arcilla mayor respecto del sector oeste y corresponderían a los conglomerados de matriz arcillosa del complejo Sierra de Los Cóndores.

En el perfil 1, SEV 2, SEV 3 y SEV 4, en esta capa intermedia estaría contenida la roca alterada del basamento cristalino mientras que los conglomerados estarían ausentes. Se hace esta inferencia en base al diseño de las curvas de campo y al hecho que la roca aflora en las proximidades del sitio del SEV 2.

Desde aproximadamente la parte central de los perfiles hacia el oeste (extremo derecho) Se interpreta que en el subsuelo de este sector se manifiesta la influencia de los procesos aluviales que aportaron materiales psamíticos a los depósitos de limo-loess cuya antigüedad no iría más allá del pleistoceno.

Capa inferior – resistividad media 1269 ohms.m.

Los valores obtenidos en la parte inferior de los sondeos eléctricos, donde se verifica tendencia de las gráficas hacia resistividad infinita, indicarían la presencia del basamento cristalino.

Tal como muestran las secciones de resistividad en la parte media de los tres perfiles, puede inferirse la existencia de una importante estructura geológica que afecta al basamento produciendo en él un escalonamiento y controla la disposición de las formaciones que constituyen el subsuelo del valle.

4.6. Resultados

Como resultado del estudio de la prospección geofísica se propone un modelo del subsuelo con estructuras o fallas de carácter regional, cuya influencia en las particularidades geológicas del valle ha sido determinante.

En tal sentido, un sistema de fallas situado en el flanco oriental del valle, con dirección general noroeste-sureste, pone en contacto lateral al basamento cristalino paleozoico con rocas más modernas como las del complejo volcánico – sedimentario Sierra de Los Cóndores y los sedimentos del Pampeano de edad Pleistoceno – Holoceno. Este sistema de estructuras estaría relacionado con la génesis de las Sierra Chica, de Los Cóndores y Las Peñas.

Otro sistema de estructuras que se extiende también con dirección similar, ubicado a lo largo del sector central del valle, habría creado dos ámbitos geológicos distintos. Uno hacia el este, en el que se conservan parte de los materiales mesozoicos del complejo volcánico – sedimentario Sierra de Los Cóndores y sus aluvios. Otro ámbito hacia el oeste, donde coexisten los materiales sedimentarios característicos del Pampeano con los materiales aportados por la acción aluvial de descarga de sedimentos desde la Sierra Grande.

A los sedimentos del sector al oeste se le pueden asignar mejores condiciones como acuíferos que a los sedimentos del sector al este. En este último sector, el basamento cristalino se encuentra, en general, más cercano a la superficie reduciendo el volumen de materiales con capacidad de contener agua con respecto del otro sector.

En las figuras 4.5.a., 4.5.b. 4.5.c., se muestran los modelos geológicos del subsuelo inferidos a partir de los datos de resistividad eléctrica, también denominados perfiles de espesores o isópacas. Se destaca que, en las mencionadas figuras, las columnas representativas de los SEV 4 en el perfil 3, de los SEV 5 y 6 del perfil 1 y SEV 4 del perfil 2, que se han definido como materiales de la formación Sa. de Los Cóndores, podrían ser sedimentos erosionados de esta formación y luego depositados como relleno del valle, sumados a sedimentos aluviales provenientes de la Sierra Grande.

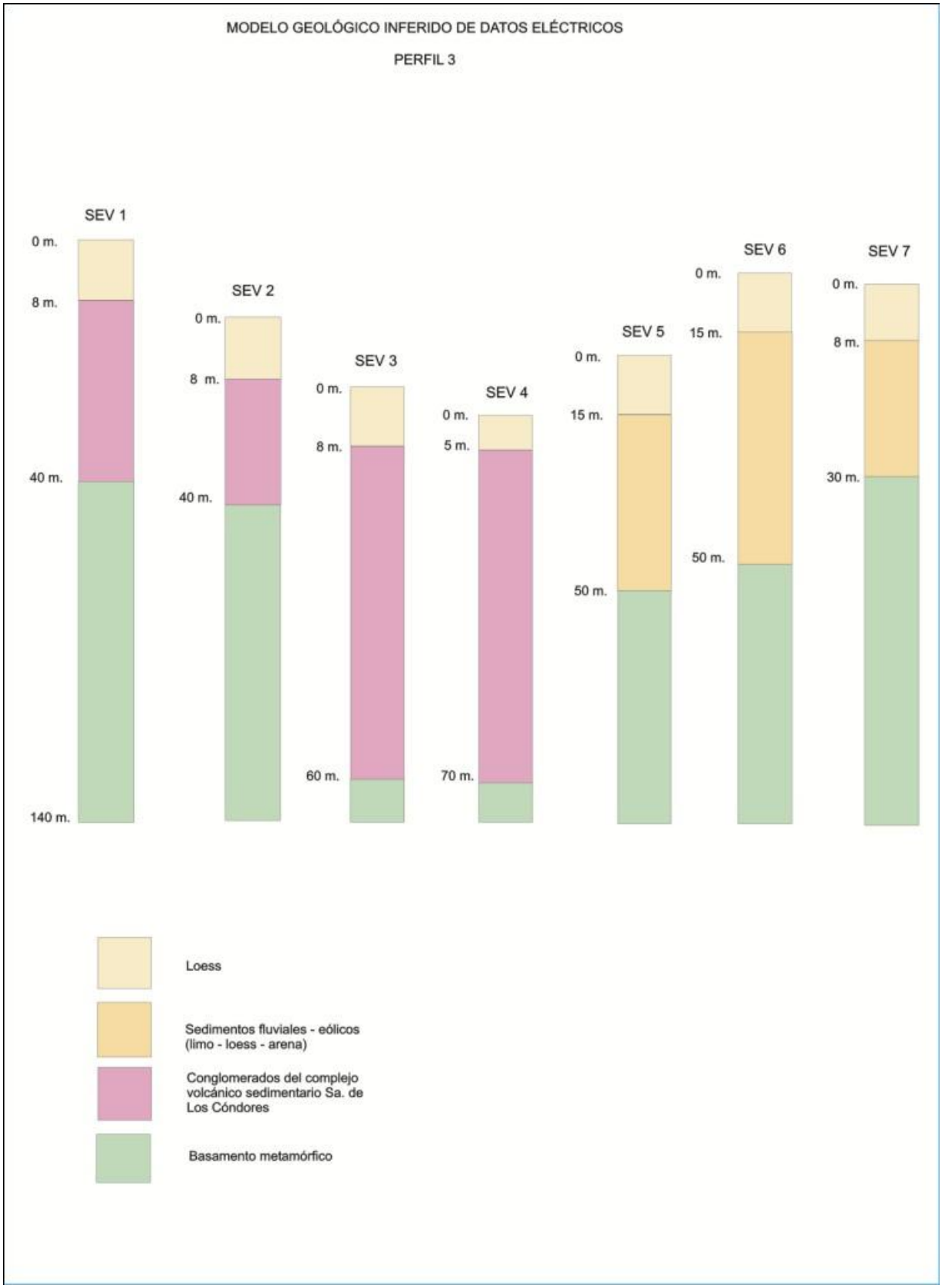


Figura 4.6.a. Modelo geológico a partir de resistividades eléctricas del Perfil 3

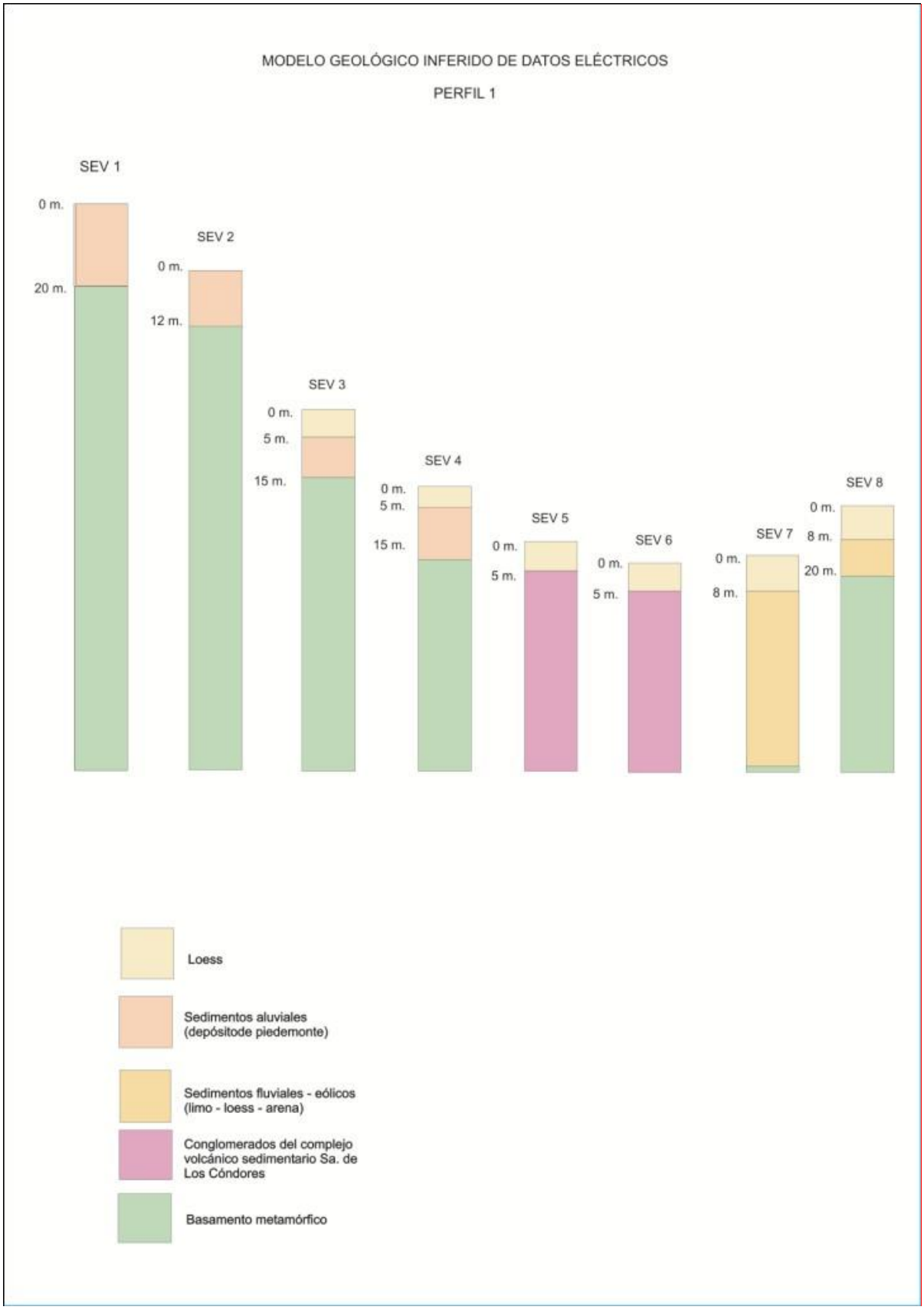


Figura 4.6.b. Modelo geológico a partir de resistividades eléctricas del Perfil 1

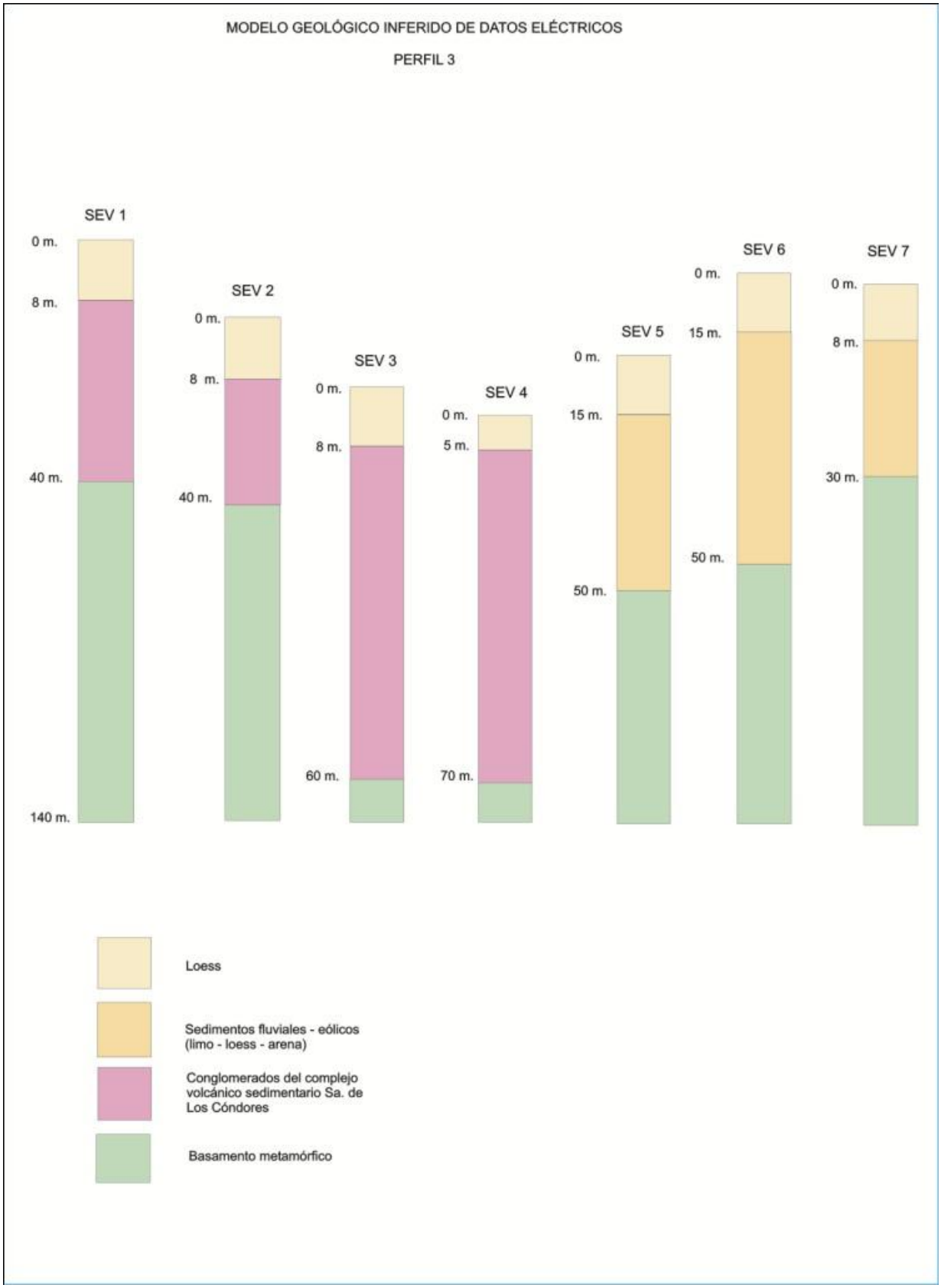


Figura 4.6.c. Modelo geológico a partir de resistividades eléctricas del Perfil 2

CAPITULO V
HIDRODINÁMICA - HIDROQUÍMICA

5.1. Generalidades

El estudio de los aspectos hidrodinámicos e hidroquímicos del sistema acuífero se hizo en base a datos obtenidos durante una campaña de relevamiento de veinte puntos de agua que incluyó la identificación del punto (nombre del propietario del campo), las coordenadas y cota del pozo, profundidad del nivel piezométrico y toma de muestra para análisis físico – químico. En algunos pozos cavados se verificó la sedimentología de la zona no saturada.

La elaboración e interpretación del mapa piezométrico permitió caracterizar el flujo de la capa freática y algunos de sus parámetros hidráulicos. Finalmente, por diversos métodos, se estimó un monto de recarga.

Utilizando técnicas estadísticas se analizaron las características químicas del agua y, como resultado, se establecieron zonas en el acuífero en función del grado de semejanza de composición química.

5.2. Mapa de isopiezas

La morfología de la superficie piezométrica está definida por el modo de escurrimiento del agua subterránea, el cual, en condiciones naturales, depende de factores tales como: la permeabilidad de los materiales, espesor del acuífero, las condiciones de recarga y descarga, velocidad de flujo, gradientes hidráulicos, etc. En función de ello, el mapa de isopiezas brinda información altamente significativa sobre las características hidrodinámicas del sistema acuífero.

Para elaborar el mapa, se midieron los niveles piezométricos en dieciocho pozos excavados (de gran diámetro). No fue posible relevar el nivel en un mayor número de pozos debido a que, en general, están construidos en diámetro 4” a partir del fondo de otros de gran diámetro. Esta particularidad hace prácticamente imposible introducir la sonda piezométrica en el espacio anular entre el tubo de 4” y el sistema de impulsión del equipo de bombeo.

Para determinar las cotas de los niveles de agua, las alturas topográficas de boca de pozo se obtuvieron con GPS modelo Garmin eTrex Vista, con altímetro barométrico, con una precisión de 2 m según datos proporcionados por el fabricante. Luego las cotas piezométricas calculadas se procesaron con el software SURFER 8.02 que genera modelos de elevación digital, obteniendo el mapa correspondiente que se muestra en la figura 5.2.a. La interpretación de la piezometría se hizo en base a la metodología propuesta por Castany (1971).

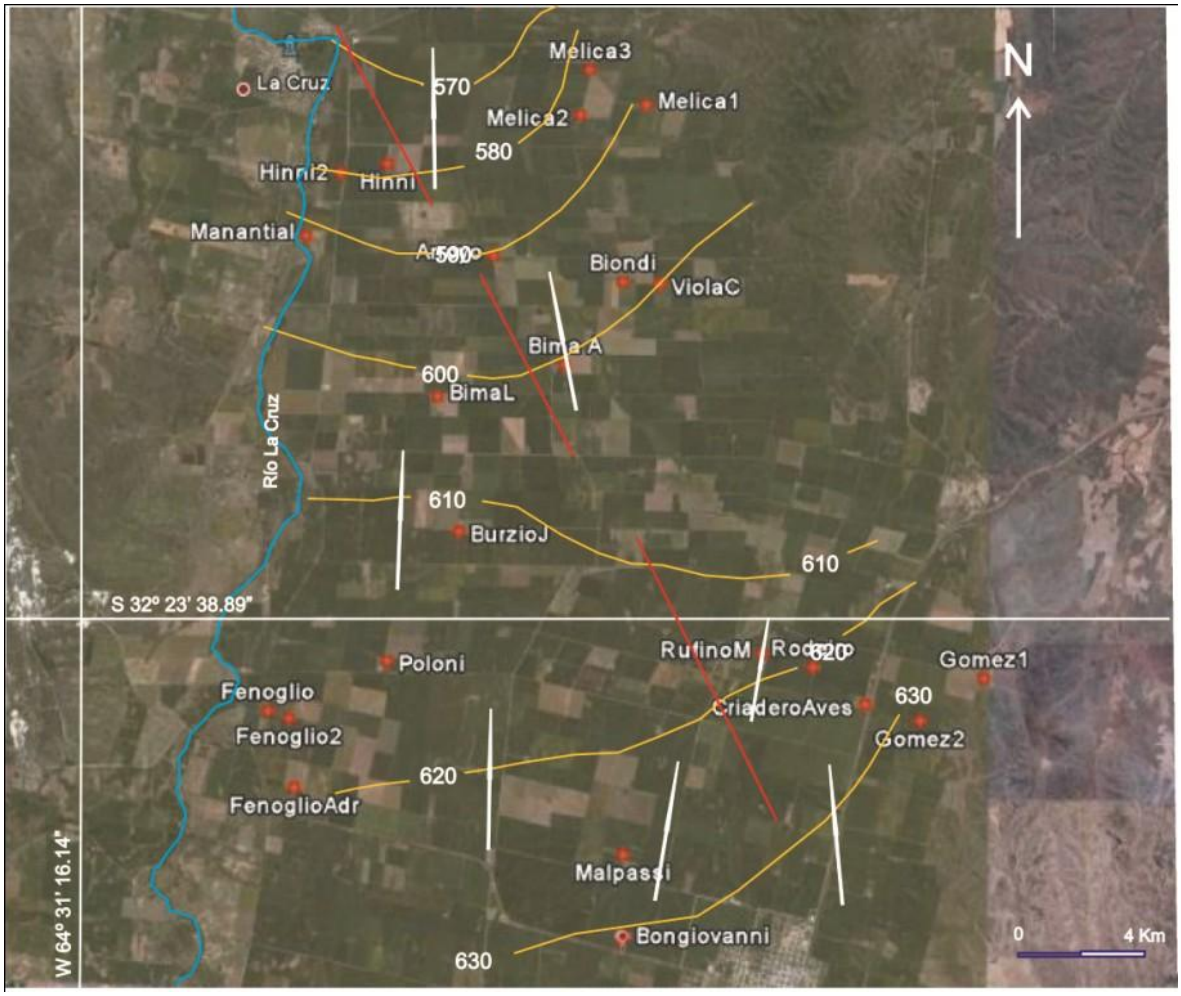


Figura 5.2.a. Mapa piezométrico del área de estudio. Equidistancia 10 m.

En función del espaciamiento de las isopiezas pueden establecerse dos zonas: un sector al oeste del área donde las líneas de 620 m. a 600 m. están espaciadas, mientras que en el sector este, el espaciamiento de las mismas líneas es reducido. Si se analiza toda el área en general, se ve que el espaciamiento se reduce desde el sur hacia el norte y se distorsionan desde el bajo La Dormida hacia el este.

Las isopiezas muestran una dirección general del escurrimiento subterráneo, que con la excepción de variaciones puntuales, se adapta a la morfología y topografía del área de estudio. En tal sentido, se interpreta un flujo general de sur a norte entallado en el valle, desde la divisoria de aguas hacia el nivel de base en el lago de Embalse.

El río La Cruz, en un tramo de su recorrido, en los meses de Agosto y Septiembre, estaba al mismo nivel topográfico que el nivel piezométrico (niveles medidos en pozos Fenoglio A. e Hinni, en período de estiaje). Según esta situación, podría tener una relación variable con las aguas subterráneas. Esta relación sería tal que, en la época de lluvias presentaría un comportamiento influente con respecto a la capa freática aumentando el almacenamiento en el acuífero, con el consiguiente ascenso el nivel piezométrico por ingreso del agua del río. En el período de estiaje se invertiría esa relación de gradientes y el acuífero podría entregar agua al río.

En el sector sudoeste, en el área del pozo Fenoglio y hacia el sur, el río corta a los sedimentos pampeanos y su lecho, en algunos tramos, está unos 30 m por debajo del nivel de la superficie de terreno comportándose como efluente.

La capa freática es de tipo radial, con líneas de flujo convergentes, y perfil de depresión parabólico, tal como muestra la figura 5.2.b.

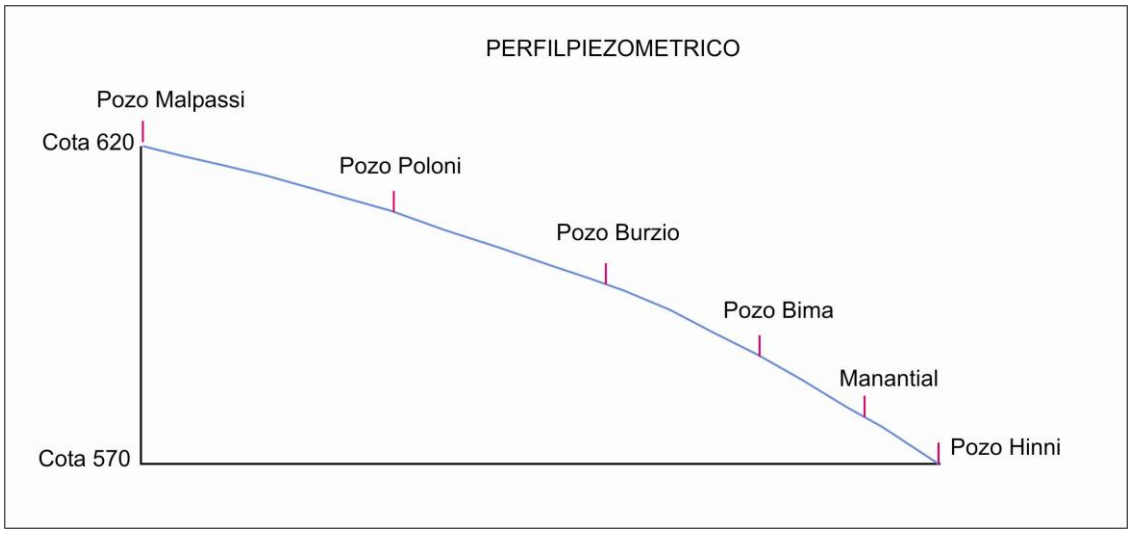


Figura 5.2 b. Perfil piezométrico de la capa freática

La velocidad real (Vr) del escurrimiento subterráneo, varía conforme la permeabilidad y porosidad efectiva de los materiales que constituyen el acuífero freático. A modo de referencia, se estimó una permeabilidad para sectores con predominio de sedimentos limos loésicos y otra para el sector oeste del área con sedimentos fluviales – aluviales del río La Cruz y el piedemonte de la Sierra Grande, donde influye la presencia de arenas.

Para el sector de sedimentos fluviales y aluviales se adopta el valor de permeabilidad de 3 m/d que surge de promediar los valores máximos y mínimos de K que caracterizan a éstos sedimentos, mientras que para los sedimentos pampeanos y sedimentos de la Fm Sierra de Los Cóndores se estima un valor de K de 0.5 m/d tomando como referencia trabajos de Matteoda, et al (2007) para sedimentos similares en un sector al sur del área de estudio.

La morfología de las curvas isopiezas puede determinar diferencias de transmisividad en el acuífero cuando los sedimentos son más o menos homogéneos. En tal sentido, pueden diferenciarse dos sectores que quedan delimitados aproximadamente desde el bajo La Dormida, hacia el este y el oeste.

La equidistancia de las líneas isopiezas, en el sector al este del mencionado bajo, es menor que en el oeste, lo que indicaría que la transmisividad del sistema acuífero en términos relativos, es menor. El estrechamiento de las líneas isopiezas, con el consecuente incremento del gradiente hidráulico, podría explicarse en un menor espesor del acuífero alojado en los sedimentos pampeanos. En las figuras 4.5.b. y 4.5.c. (Modelo geológico a partir de resistividades eléctricas) puede verse la reducción del espesor del depósito sedimentario y la escasa profundidad a la que se encuentra el basamento cristalino.

En el sector que se extiende desde el pozo Rufino hacia el oeste y que incluye las cotas piezométricas 620 a 600, el gradiente hidráulico es menos pronunciado. Ese hecho, sumado a un mayor espesor del acuífero según se desprende de los SEV y a sedimentos con menor proporción de materiales finos que en el sector este, permite inferir una transmisividad más elevada.

Otra característica que resalta al observar el mapa en general, es el estrechamiento del espacio entre líneas isopiezas hacia el norte del área de estudio, indicando nuevamente un incremento del gradiente hidráulico. Esto puede ser explicado por una reducción de la sección de flujo debido al estrechamiento de la sección del valle, según lo muestra el perfil geoeléctrico número 2 emplazado en el sector norte del área.

5.3. Estimación de la recarga

La estimación de la recarga es dificultosa debido a la multiplicidad de factores que intervienen en el proceso. Debido a ello, los métodos diseñados para tal fin, necesariamente asumen simplificaciones del medio natural, pero a pesar de ello, los resultados que se obtienen son considerados satisfactorios. En casos como el presente, donde las características geológicas del área han resultado muy heterogéneas, a los valores obtenidos se les debe asignar la condición de indicativos y continuar en el futuro con un proceso de seguimiento y ajustes de los datos.

Siguiendo esta línea de trabajo, se consideró apropiado abordar la estimación por los siguientes métodos:

a) Balance diario de agua en el suelo con método Balshort
b) Balance de masa del ión cloruro
c) Relación recarga - pluviometría método de Goldschmidt

5.3.1. Estimación de la recarga con el método Balshort

El programa Balshort (Carrica, 1993) es de naturaleza empírica y está basado en criterios hidrológicos y edáficos, siendo los datos de entrada la precipitación diaria (P) del período a evaluar, la evapotranspiración potencial (ETP) mensual, la capacidad de campo (CC), la textura del suelo, la intercepción vegetal y la reserva de agua inicial del suelo (RAU).

Calcula la Evapotranspiración Real (ETR) en función de la Evapotranspiración Potencial (ETP) conforme las características físicas del medio evaporante y del contenido de agua en el suelo.

El programa convierte los datos de ETP mensual en ETP diaria conforme al criterio de Burgos y Forte Lay (1978) mediante el cociente entre ETP mensual y los días de cada mes. Este valor es asignado al día 15 de cada mes (14 en febrero) para posteriormente establecer una ecuación lineal entre valores correlativos. La ETP de cada día se determina por extrapolación en cada una de las doce rectas generadas. En los días con precipitación el programa divide el valor diario de la ETP a la mitad, asumiendo una situación intermedia entre los días en que la lluvia tiene una duración casi total y consecuentemente la ETP es muy baja y días en que la precipitación está representada por una lluvia de corta duración.

Para el cálculo de la Evapotranspiración real (ETR) diaria, utiliza tres posibles funciones:

$$\textbf{(1)}\ \mathbf{ETR/ETP = \cos[\pi/2\ A]}$$

$$\textbf{(2)}\ \mathbf{ETR/ETP = 1/2\ \{\cos \pi A} + 1\mathbf{\}}$$

$$\textbf{(3)}\ \mathbf{ETR/ETP = 1 - \{\ 2/\pi\ \arccos[l - A]\}}$$

Donde A = (CC-Rda)/CC; CC es la capacidad de campo del suelo y Rda la reserva de agua en el suelo el día anterior.

Las tres ecuaciones representan de manera simplificada las curvas de retención de agua de suelos de distinta textura, entendiéndose por curva de retención a la que vincula la relación ETR/ETP como función del contenido de humedad del suelo e indica la fracción de agua que cede el suelo ante una determinada demanda potencial a medida que disminuye su reserva. La ecuación (1) representa la curva de retención para suelos de textura arenosa, la ecuación (2) corresponde a suelos de textura media y la ecuación (3) corresponde a suelos de textura arcillosa.

El método ha sido creado específicamente para la llanura pampeana, asumiendo que el escurrimiento superficial es despreciable. Su creador advierte sobre esta

simplificación de la realidad y, en consecuencia, indica que se debe utilizar complementariamente con otros métodos.

En el procedimiento de cálculo se utilizó la serie pluviométrica de la estación Campo Rufino ubicada en la zona central del área de estudio con datos de diecisiete años, desde 1991 a 2007. Incluye años con precipitaciones máximas y mínimas que tienen correspondencia con los máximos y mínimos de la series Embalse de 50 años y Manfredi de 75 años. Por tal motivo, se considera que representa las variaciones pluviométricas de la región y podrá mostrar el comportamiento del proceso de recarga en períodos secos y húmedos.

Se utilizaron los valores de ETP mensual obtenidos con el método de Penman – Monteith y se asume que el suelo es limo – loess. La capacidad de campo CC se obtuvo con la formula de Fuentes y Cruz (1990) que expresa:

$$\mathbf{CC = 0.48 \times Ac + 0.162 \times L + 0.023 \times Ar + 2.62}$$

Donde Ac, L y Ar, son el contenido de arcilla, limo y arena respectivamente, expresado en % de suelo seco.

En este caso se promedió el valor de la capacidad de campo de las cuatro muestras de suelo analizadas y considerando un espesor de suelo de 0.4 m, se obtuvo el valor de CC=153 mm.

El monto de recarga anual media obtenido con este método es de aproximadamente 99.4 mm anuales, equivalentes al 10,4% de la precipitación media anual de la serie considerada. Las figuras 5.3.1.a y 5.3.1.b. muestran los resultados del cálculo y, los mismos resultados, en forma comparativa con las precipitaciones anuales respectivamente.

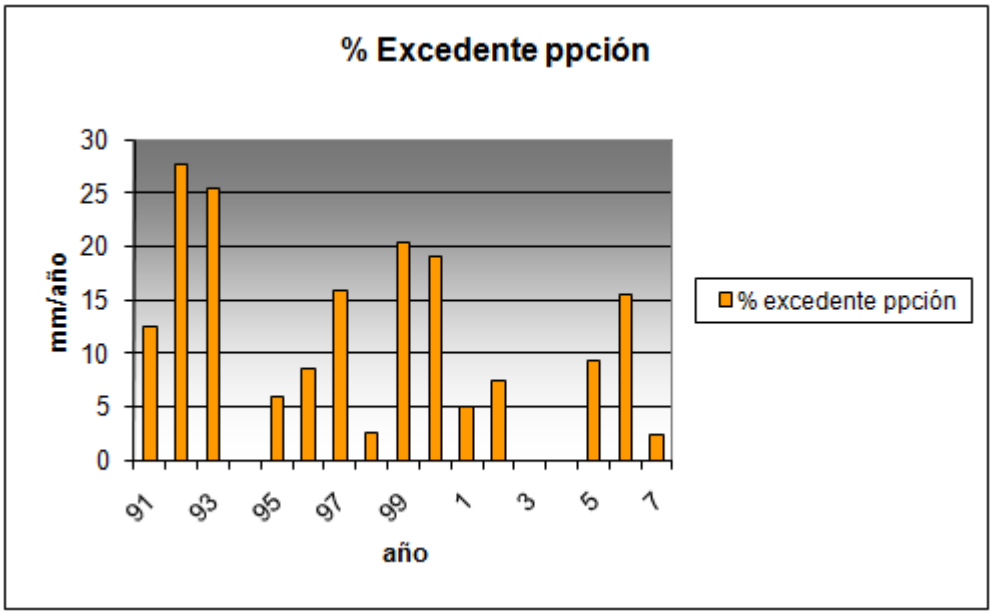


Figura 5.3.1.a. Excedente de las precipitaciones que pasa a formar parte de la recarga.

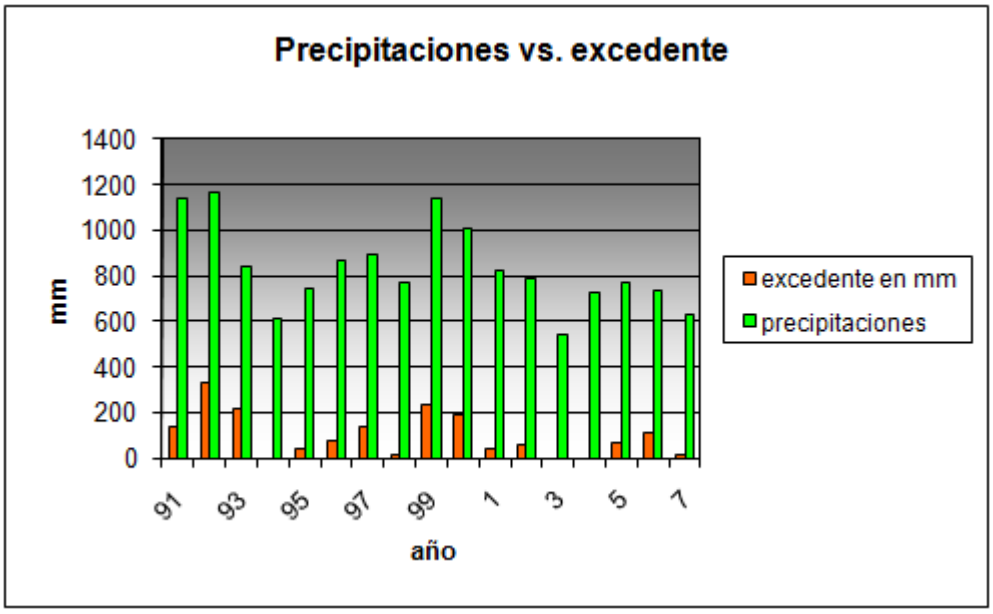


Figura 5.3.1.b. Precipitaciones anuales comparado con el excedente para recarga.

En la tabla 5.3.1.1. se muestran los montos anuales de lluvia excedente disponible para la recarga.

Año	Lluvia anual en mm.	% de lluvia excedente	mm. de lluvia excedente
1991	1139	12.4	141.3
1992	1169	27.6	332.5
1993	844	25.4	214.6
1994	610	0	0
1995	740	5.9	43.6
1996	870	8.5	74.3
1997	895	15.8	141.6
1998	773	2.5	19.5
1999	1137	20.3	230.5
2000	1011	19,1	193
2001	834	5	41.9
2002	787	7.5	59.3
2003	546	0	0
2004	728	0	0
2005	771	9.3	71.3
2006	734	15.5	113.5
2007	628	2.3	14.1
Promedio	**836.2 mm.**	**10.4 %**	**99.4 mm.**

Tabla 5.3.1.1. Porcentajes excedentes de lluvia disponible para la recarga.

5.3.2. Balance de masa del ión cloruro

Los métodos químicos ambientales permiten estimar la tasa de recarga mediante el balance en el terreno de un trazador natural conservativo (Lerner et al, 1990; Custodio, 1997) Por sus características, el ión cloruro es el trazador más empleado particularmente en zonas áridas y semiáridas de nuestro país (Carrica, 2009). Entre las ventajas se cuentan: ausencia de intercambio con el medio, estabilidad química, alta solubilidad, origen conocido y medida relativamente fácil y precisa.

En régimen estacionario y en ausencia de aportes de cloruros por el terreno o actividades antrópicas, se asume que el nivel freático o, eventualmente acuíferos colgados,

reciben un flujo másico de cloruros que coincide con el aportado por las precipitaciones luego de restado el flujo de salida por escorrentía directa.

El balance se establece para un período lo suficientemente prolongado de modo que se eviten las influencias de los períodos contiguos. Entre los tiempos t_0 y t la ecuación resulta:

$$\mathbf{PC_R = RC_p + E_S\, C_e}$$

Donde P, R y E son precipitación, recarga y escorrentía directa en mm respectivamente; C_r, C_p, C_e son las concentraciones del ión cloruro en las precipitaciones, el agua de recarga y en la escorrentía directa, expresadas en mg/L^{-1}. Los productos $P.C_R$, $R.C_p$ y $E_S.C_e$ son los flujos másicos en el período considerado o bien, flujos másicos medios.

Si se asumen características particulares del terreno por las cuales el escurrimiento superficial es ínfimo y puede considerarse despreciable, el término E_s de la ecuación resulta 0. En ese planteo la relación se simplifica a:

$$\mathbf{PC_R = RC_p}$$

En zonas áridas o semiáridas, carentes de escurrimiento superficial, se puede considerar que el flujo de masa de precipitación es igual al de recarga, siendo ésta una aproximación suficiente y dado que los otros términos del balance son de un orden de magnitud inferior (Custodio, 1997), se puede plantear como:

$$\mathbf{R = C_P / C_{AS} * P}$$

Donde C_P *y* C_{AS} representan la concentración de cloruros en la precipitación y en el agua subterránea respectivamente y su cociente representa el coeficiente de recarga medio.

Para la determinación de la concentración del ión cloruro en el agua de lluvia se instaló un colector de precipitaciones en el campo Mélica (pozo Mélica 1) en el sector noreste de la zona de interés, por un período de 17 meses, que abarcó desde noviembre de 2007 a abril de 2009.

Aunque el muestreo se realizó sólo en un punto del área de estudio, se considera que ésta es relativamente reducida y no existen variaciones en las características geográficas o climáticas que pudieran determinar diferencias significativas en la concentración del mencionado ión, dentro del área.

La determinación de cloruros en las muestras se realizó con el método de Mohr, en el Laboratorio de Aguas y Suelo de la Agencia Córdoba Ambiente. Las concentraciones halladas se muestran en la tabla 5.3.2.1.

Mes/año	Concentración de Cl (mg/l)
1/08	4.99 - 12
2/08	13.5 – 12.8 – 7.1
4/08	14.2
7/08	5.7
9/08	7.4 – 13.5 – 7.1
10/08	3.6 – 3.2 – 4.3
12/08	5.4
2/09	3.4 – 5.3 – 4.2
3/09	3 – 4 – 6.3 – 4.2
4/09	3.6 – 5 - 4
	Concentración promedio 6.6 mg/l

Tabla 5.3.2.1. Concentraciones del ión Cl^- en el agua de lluvia

Con el valor de precipitación media anual de 836 mm, la concentración de Cl^- en el agua de lluvia de 6.6 mg/l y de 55 mg/l en el acuífero (que es el valor medio de la concentración de cloruros en la zona que se ha identificado como de recarga del sistema) la recarga anual media estimada es:

R = 6.6 mg/l / 55 mg/l * 836 mm/año

R = 100.3 mm/año, equivalente al 12 % de la precipitación

5.4.3. Relación recarga - pluviometría método de Goldschmidt

El método de Goldschmidt (Custodio y Llamas, 1983) ha relacionado de manera empírica la recarga y las precipitaciones en regiones áridas y semiáridas. En consecuencia es un método al que no se le puede atribuir la condición de determinante en la cuenca en estudio (de clima semihúmedo) pero, por su simpleza y fácil implementación, tiene importancia como un elemento más de juicio en un proceso de estimación de recarga. Tal es el valor que se asigna en este trabajo.

Se obtiene un valor de la recarga mediante la ecuación:

$$\mathbf{R = \alpha\,(P - P_0)\ para\ P \geq P_0}$$

Donde R es la Recarga, $R = 0$ para $P \leq P_o$; $\boldsymbol{\alpha}$ es un coeficiente basado en las características fisiográficas de la cuenca y $\mathbf{P_0}$ un valor umbral de precipitaciones.

Según el método, el valor umbral P_0, es el monto mínimo de precipitaciones anuales a partir del cual se produce un excedente de agua para recarga. Con precipitaciones inferiores a este valor, no hay recarga.

En este trabajo se ve que el valor umbral puede estar determinado por las características pluviométricas de los años antecedentes. Así por ejemplo, en períodos relativamente prolongados con lluvias por debajo de la media anual en los cuales no se producen excedentes, al final de dichos períodos, el valor umbral resulta superior a otro correspondiente a una situación similar, pero menos prolongado. Esto podría atribuirse al hecho que, en los períodos secos prolongados, la reserva de agua del suelo disminuye tanto que las lluvias necesarias para restablecerlas deben ser abundantes y en consecuencia, el valor umbral es mayor.

Tomando en cuenta este comportamiento observado, se determina para el cálculo un valor umbral de 728 mm, que es el valor anual de mayor pluviometría sin excesos obtenido con Balshort.

Goldschmidt utilizó valores de coeficiente **α** de entre 0,78 y 0,87 (Custodio y Llamas, 1976) en regiones semiáridas; dado que en este caso se trata de una región semihúmeda, se utilizará a modo de estimación un valor más elevado, igual a 0.9.

$$R = 0.9\ (836\ mm - 728\ mm)$$

$$R = 97\ mm\ /año, \text{ equivalente a } 11.6\ \%\ \text{de la precipitación}$$

5.5. Resultados

La tabla 5.5.1. sintetiza los resultados de los valores de recarga obtenidos con los diferentes métodos aplicados.

Método	Recarga en mm	Recarga en % de la precipitación
Balshort	99.4	10.4
Balance del ión Cl^-	101.8	12
Goldschmidt	97	11.6
Monto Promedio	**99.4**	**11.3**

Tabla 5.5.1. Montos de recarga al acuífero

De la aplicación de tres métodos de estimación de la recarga se ve que los montos resultantes pueden ser juzgados semejantes y oscilan alrededor del 12% de las precipitaciones.

Respecto del método del balance del ión Cl^-, se encontró una gran variabilidad en las concentraciones de dicho ión en el agua de lluvia, con diferencias que alcanzan el orden del 300 % entre el valor mínimo y el máximo, en lapsos breves. Este amplio rango de variabilidad en las concentraciones del ión sería normal para el área estudiada y se debe, como ya se mencionó en el apartado de clima, a las variaciones temporales (estacionales) de las lluvias y a distintos tipos de tormentas (lluvias frontales, convectivas en verano y hasta orográficas en el piedemonte), además de la influencia estacional que pudiera tener el fenómeno de La Niña y El Niño. Por ello resulta aconsejable que los períodos de toma de datos sean lo suficientemente prolongados para obtener valores medios representativos.

5.6. Hidroquímica

El conocimiento de la naturaleza química del agua subterránea es de gran importancia ya que no sólo revela los procesos mediante los cuales interacciona con la atmósfera, la biosfera y la litosfera, sino que determina sus usos.

El análisis de las características químicas del agua subterránea, complementado con otras ramas del conocimiento, ha contribuido a la elaboración del modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero.

5.6.1. Procedimiento de trabajo

Los análisis químicos de la muestras de agua fueron realizados en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Agencia Córdoba Ambiente, organismo dependiente del Estado provincial. Los resultados, adjuntados al Anexo I, se analizaron desde dos enfoques. Uno hidroquímico con la finalidad de caracterizar al agua para los distintos usos y como ayuda para la interpretación de la hidrodinámica del sistema acuífero (identificar zonas de recarga, tránsito y descarga en el sistema) y otro hidrogeoquímico, con la finalidad de establecer algunas relaciones entre las características químicas del agua subterránea y la litología de las formaciones geológicas que atraviesa.

La particularidad que refleja el conjunto de muestras es una diferencia considerable entre los contenidos de algunos iones, principalmente sulfatos, y de la conductividad eléctrica. A los efectos de establecer grupos por composición química, se hicieron las siguientes pruebas estadísticas:

- Cluster o agrupamiento
- Análisis descriptivo de la población
- Prueba T
- Prueba de Kolmogorov – Smirnov para dos muestras

5.6.2. Análisis Estadístico

5.6.2.1 Agrupamiento (Cluster)

El primer paso del examen estadístico fue el análisis de agrupamiento o cluster. Se procesaron las muestras de diecisiete pozos comparando la concentración de Na, K, Mg, Ca, Cl, SO4, COH3, As, conductividad eléctrica, alcalinidad y pH.

En este caso, se empleó el software Statistic versión 7 con las opciones de cluster que consideran medidas de distancia (distancia Euclideana) y enlace completo. Se obtuvo la modalidad de agrupamiento que muestra el diagrama árbol de la figura 5.6.2.1.a

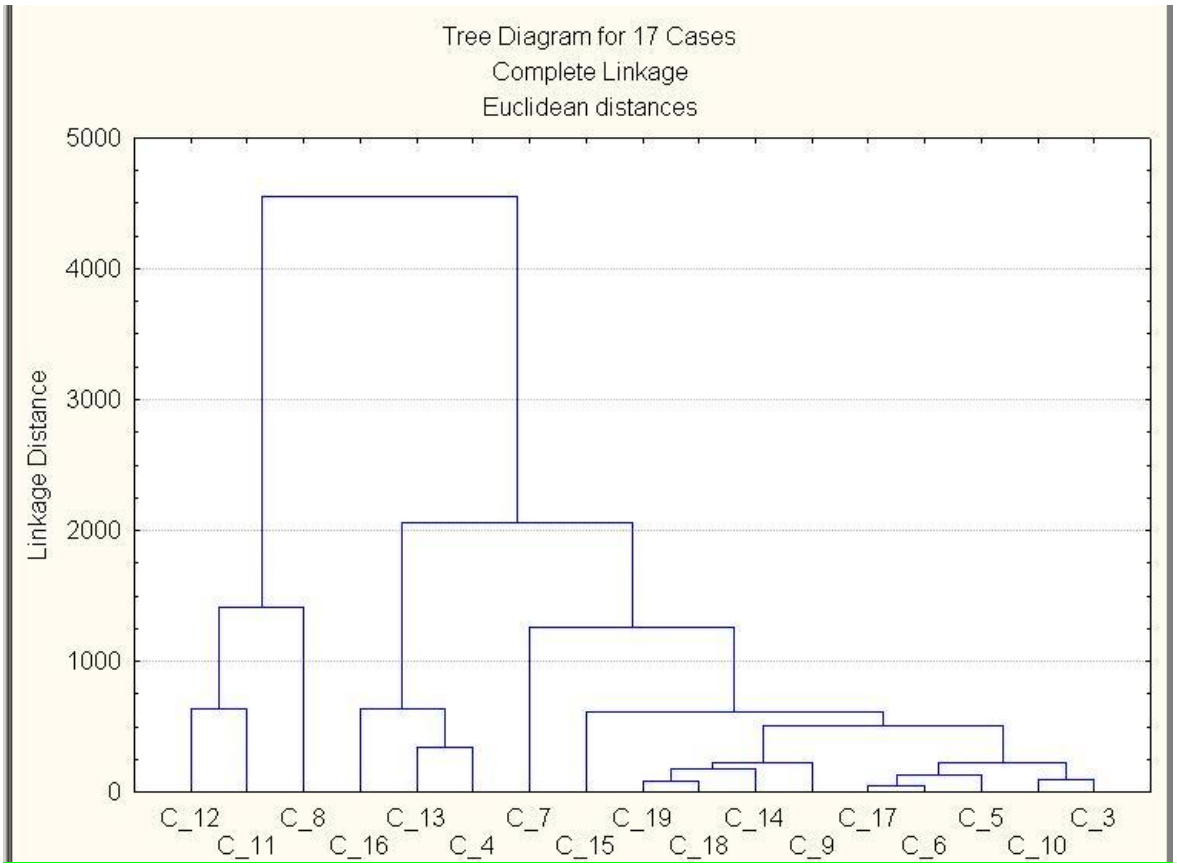


Figura 5.6.2.1.a. Diagrama árbol del agrupamiento

Puede verse que, en orden de diferencias decrecientes, las muestras de agua están reunidas en tres grupos principales que quedan integrados de la forma siguiente:

- Grupo 1: muestras C11, C12 y C8. (pozo Gómez 2, pozo Melica 3, pozo Melica 2)
- Grupo 2: muestras C16, C13 y C4. (pozo Fenoglio A, pozo Biondi, pozo Criadero de aves)
- Grupo 3: muestras C7, C15, C19, C18, C14, C9, C17, C6, C5, C10 y C3 (pozo Gómez 1, pozo Fenoglio, pozo Bongiovanni, pozo Malpassi, pozo Hinni, pozo Bima L, pozo Poloni, pozo Bima H, pozo Melica 1, pozo Bima A, arroyo).

5.6.2.2. Estadísticos descriptivos de los grupos

Los estadísticos descriptivos que caracterizan a los objetos de cada grupo se muestran en las tablas 5.6.2.2.1, 5.6.2.2.2 y 5.6.2.2.3.

	N Valido	Media	Mínimo	Máximo	Desvio Standard
Na	3	681.567	577.300	768.700	96.8434
K	3	29.633	24.200	34.700	5.2596
Ca	3	118.600	80.000	142.300	33.7169
Mg	3	76.467	50.100	96.500	23.8395
As	3	0.067	0.050	0.100	0.0289
Cl	3	201.700	180.000	228.100	24.3920
SO_4	3	1428.400	1201.700	1716.900	263.1011
CO_3H	3	339.700	262.100	487.500	128.0520
Conductividad	3	3793.333	3020.000	4310.000	682.2267
Alcalinidad	3	277.233	82.100	487.500	203.1232
pH	3	7.043	6.430	7.500	0.5519

Tabla 5.6.2.2.1. Estadísticos descriptivos del Grupo 1

	N Valido	Media	Mínimo	Máximo	Desv Standard
Na	3	331.467	276.000	396.500	60.8170
K	3	12.000	9.800	13.700	1.9975
Ca	3	58.667	37.000	78.700	20.8979
Mg	3	37.067	23.300	63.900	23.2410
As	3	0.233	0.100	0.300	0.1155
Cl	3	66.267	29.800	125.800	51.9909
SO_4	3	380.533	286.400	433.000	81.7005
CO_3H	3	550.333	429.800	668.800	119.5134
Conductividad	3	1782.333	1505.000	2070.000	282.6417
Alcalinidad	3	509.467	429.800	668.800	137.9867
pH	3	7.787	7.600	7.880	0.1617

Tabla 5.6.2.2.2. Estadísticos descriptivos del Grupo 2

	N Valido	Media	Mínimo	Máximo	Desv Standard
Na	11	159.564	5.1000	242.400	65.5903
K	11	15.400	8.2000	36.800	8.4802
Ca	11	56.009	14.5000	162.100	40.7469
Mg	11	15.936	3.7000	34.000	11.3098
As	11	0.114	0.0000	0.750	0.2146
Cl	11	53.418	11.3000	82.200	20.4242
SO_4	11	228.373	56.2000	608.200	143.717
CO_3H	11	308.273	82.1000	407.900	94.3193
Conductividad	11	1029.418	174.6000	1349.000	332.295
Alcalinidad	11	352.764	233.7000	552.400	88.3910
pH	11	7.644	7.2000	8.030	0.2181

Tabla 5.6.2.2.3. Estadísticos descriptivos del Grupo 3

5.6.2.3. Prueba T

En el gráfico 5.6.2.3.a. que muestra los valores medios de los componentes químicos de los grupos, los sulfatos y la conductividad eléctrica (los valores pico destacados en el gráfico), sugieren que las aguas pueden ser diferenciadas por su contenido químico. Se realizó un test estadístico de comparación de medias y varianzas de cada grupo para probar si la diferencia entre ellos es significativa.

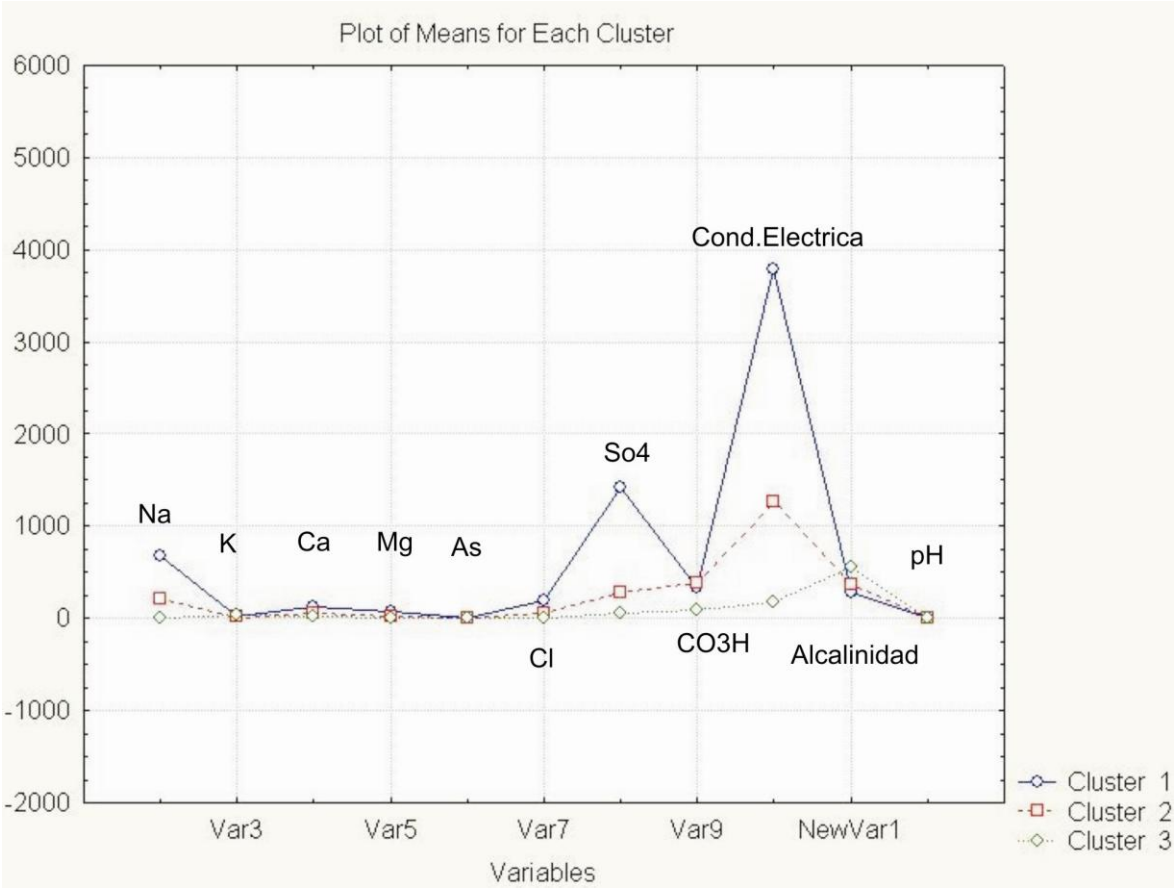


Figura 5.6.2.3.a. Valores medios de los componentes de los grupos

La media, surge del hecho que cada grupo generado resulta caracterizado por un valor medio de la concentración de los elementos químicos que componen los objetos, en este caso las muestras de agua de los pozos.

Las Tablas 5.6.2.3.a; 5.6.2.3.b. y 5.6.2.3.c. muestran los estadísticos de la Prueba T comparando la composición química media de los grupos.

De la comparación de medias surge que hay diferencias estadísticamente significativas, al nivel de confianza de 0.05, entre el Grupo 1 y el Grupo 2 y entre el Grupo 1 y el Grupo 3; mientras que no las hay entre el Grupo 2 y el Grupo 3. Al comparar las varianzas al mismo nivel de confianza surge que, únicamente hay diferencias estadísticamente significativas entre el Grupo 1 y el Grupo 3.

Las tablas 5.6.2.3.1; 5.6.2.3.2 y 5.6.2.3.3 muestran los estadísticos de prueba T comparando la composición química media de los grupos.

	Media	Media	Valor-t	df	p	N validos	N validos	Desv Standard	Desv Standard	Razón-F
G1 vs. G3	3793.33	1029.41	10.3043	12	0.000	3	11	682.2267	332.295	4.215116

Tabla 5.6.2.3.1. Prueba T Grupo 1 vs. Grupo 3 (comparación de medias y varianzas)

	Media	Media	Valor-t	df	p	N validos	N validos	Desv Standard	Desv Standard	Razón-F
G2 vs. G3	1782.33	1029.41	3.56172	12	0.0039	3	11	282.6417	332.2951	1.38221

Tabla 5.6.2.3.2. Prueba T Grupo 2 vs. Grupo 3 (comparación de medias y varianzas)

	Media	Media	Valor-t	df	p	N validos	N validos	Desv Standard	Desv Standard	Razón-F
G1 vs. G2	3793.33	1782.33	4.71679	4	0.0091	3	3	682.2267	282.6417	5.826195

Tabla 5.6.2.3.3. Prueba T Grupo 1 vs. Grupo 2 (comparación de medias y varianzas)

5.6.2.4. Resultados

Considerando las medias, el Grupo 1 puede ser calificado estadísticamente diferente de los demás. Si se toma en cuenta las comparaciones de varianzas, el Grupo 1 es estadísticamente diferente del Grupo 3, únicamente. Se interpreta entonces que el agua de los pozos del Grupo 1 puede ser diferenciada de los del resto muestreado, en base a su composición química.

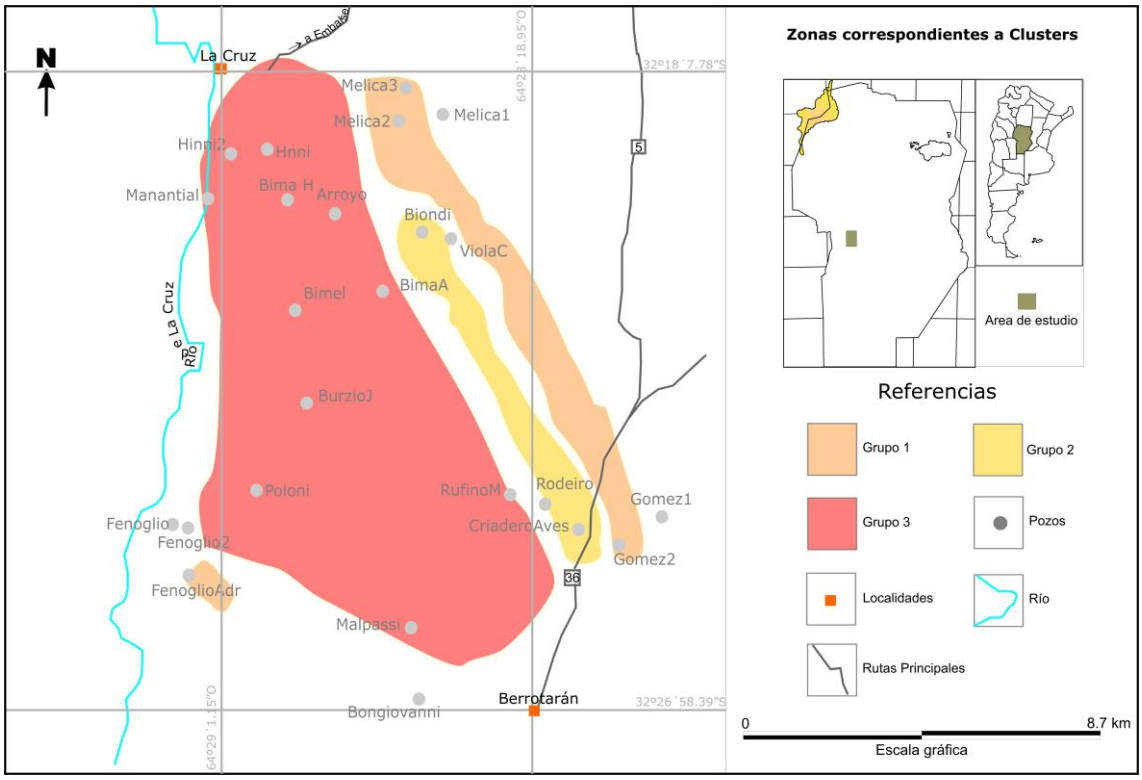


Figura 5.6.2.4.a. Distribución espacial de los pozos que integran cada grupo

Si se relaciona el resultado estadístico con la ubicación de los pozos respecto de la topografía y la morfología del área (Figura 5.6.2.4.a.) se encuentra que el Grupo 1 corresponde a los pozos situados en la parte superior de la ladera este del valle, donde se infiere en el subsuelo la existencia de las formaciones sedimentarias del cretácico. Estas, en la provincia y en otras regiones del país, se caracterizan por proveer aguas de elevada mineralización.

Los pozos del Grupo 3 están situados aproximadamente en la parte central y oeste del valle donde se infiere en el subsuelo la existencia predominante de sedimentos fluviales aluviales y que constituye la principal zona de recarga del acuífero. Los pozos del Grupo 2 quedan ubicados en una zona intermedia entre los grupos anteriores.

5.6.3. Caracterización química del agua de los grupos.

La etapa de infiltración a través del suelo es muy importante para la composición química del agua subterránea. Con frecuencia, gran parte de las características geoquímicas del agua la adquiere en los primeros metros a través de su paso por el suelo durante la

infiltración. Posteriormente puede circular varios kilómetros en el acuífero, pero sin grandes modificaciones.

Desde que el agua alcanza la superficie freática hasta que sale al exterior en un río, manantial, o captación, pueden transcurrir unos días o miles de años y el recorrido puede ser de unos metros o de varios kilómetros. Por tanto, la evolución química dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto que, a su vez, depende de la velocidad del flujo subterráneo.

Los diagramas de Stiff (Figuras 5.6.3.) que se presentan más abajo denotan que las aguas de los grupos 2 y 3, poseen baja salinidad, son del tipo bicarbonatadas sódicas, por lo que se infiere un corto tiempo de permanencia en el subsuelo y están espacialmente relacionadas con el área de recarga principal. Las sulfatadas sódicas del grupo 1, más salinas y cuyos pozos están ubicados en las partes más altas del relieve del área de estudio, indicarían un prolongado tiempo de permanencia en el subsuelo y, por lo tanto, podrían pertenecer a los sedimentos acuitardos cretácicos.

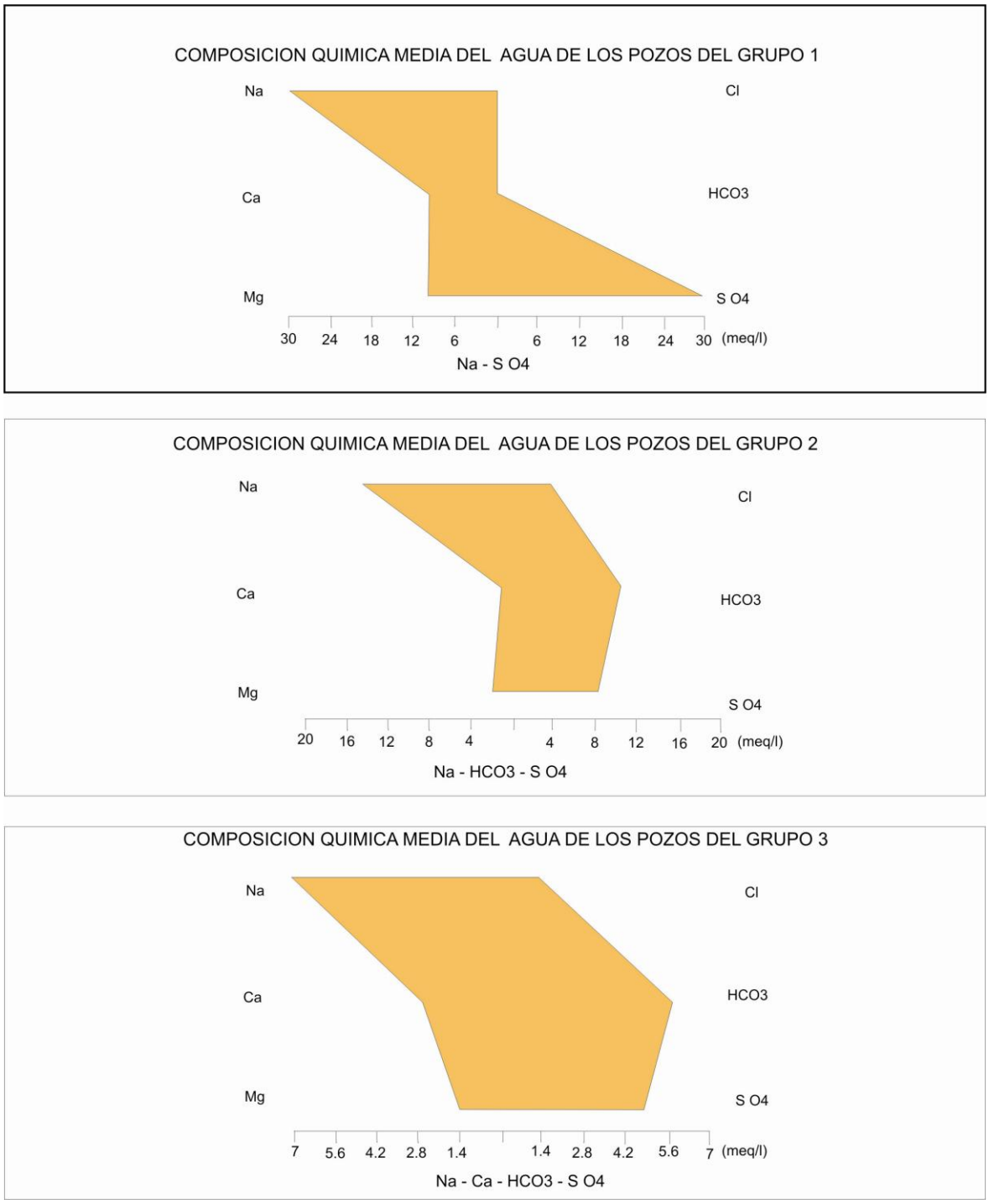


Figura 5.6.3. Composición química media del agua de los pozos relevados

5.6.4. Distribución espacial de componentes químicos del agua

5.6.4.1. Conductividad eléctrica

La distribución espacial de la conductividad eléctrica (Figura 5.6.4.1.a.) remarca el área de recarga principal de la zona a la vez que denota que el río La Cruz, en el tramo comprendido aproximadamente entre el campo Fenoglio y la población de La Cruz, sería influente en su margen derecha.

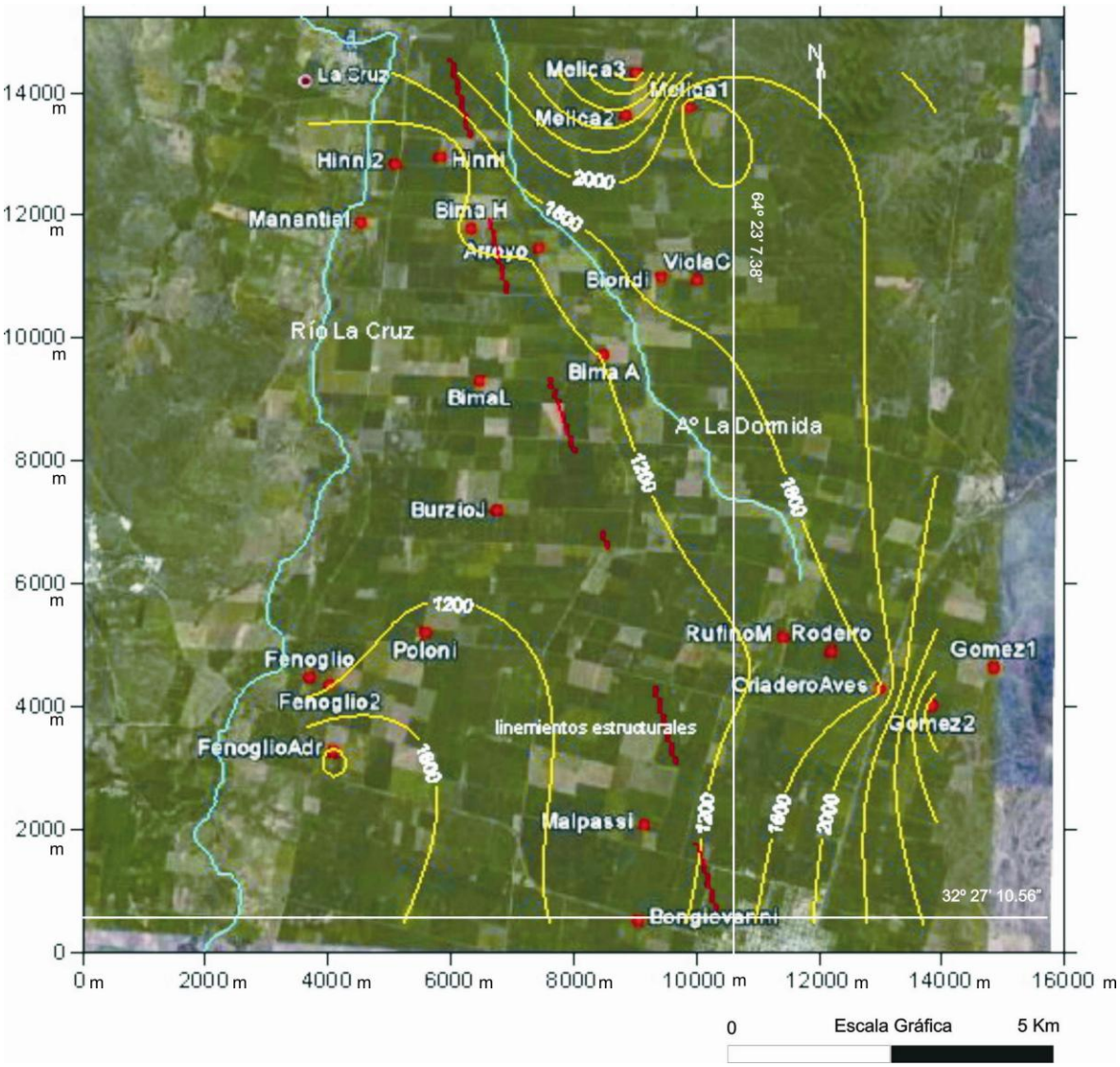


Figura 5.6.4.1.a. Mapa de distribución de conductividad eléctrica. Equidistancia de las isolíneas 400 µS/cm.

5.6.4.2. Distribución espacial de las concentraciones de cloruros

El mapa correspondiente (figura 5.6.4.2.a), muestra claramente que las concentraciones de cloruros en el agua aumentan desde el oeste, la parte baja del valle, hacia el norte más o menos gradualmente y, hacia los terrenos elevados del este, con un fuerte gradiente (zona de pozos Gómez 2 y Mélica 2). El gradiente pronunciado en las isolíneas está concentrado al este y al norte del trazo rojo que indica un lineamiento estructural, que parece delimitar condiciones del agua subterránea de la región.

Si bien los cloruros aumentan hacia el norte, en el sentido de flujo del agua siguiendo la pendiente del valle, el incremento más marcado es normal a esa dirección y desde el bajo hacia el alto. Esto se explicaría por la presencia en el subsuelo de las formaciones sedimentarias del complejo volcánico -sedimentario Sierra de Los Cóndores. La baja permeabilidad de la formación se traduce en un mayor tiempo de interacción agua – sedimentos.

También identifican al sector central como el de recarga principal en el área de estudio, fundamentalmente por precipitaciones, y por el río influente en algunos tramos y/o épocas del año. El área donde ocurre la recarga principal del acuífero freático, queda delimitada aproximadamente por la curva de isoconcentración de 55 mg/l.

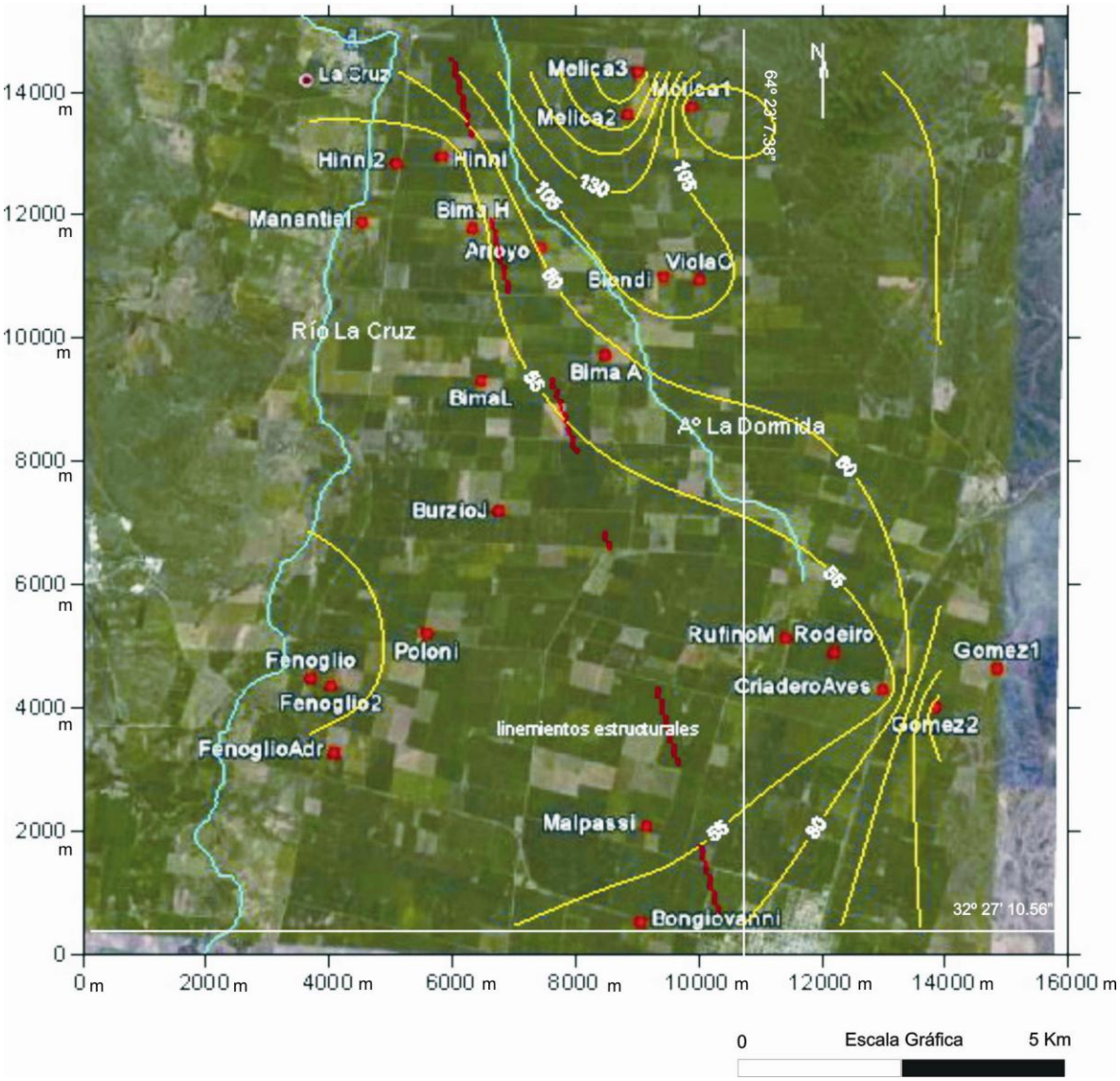


Figura 5.6.4.2.a. Mapa de distribución de cloruros. Equidistancia de las isolíneas 25 mg/l

5.6.4.3. Distribución espacial de las concentraciones de sulfatos

El mapa de la figura 5.6.4.3.a. muestra un comportamiento de la distribución de sulfatos similar a la de cloruros. Las concentraciones del elemento crecen desde el sector que ocupa la parte central del valle hacia las elevaciones del este y más gradualmente hacia el norte siguiendo el sentido de flujo del agua subterránea.

La alta concentración de SO_4 en las aguas del este, que en el pozo Mélica 2 alcanza los 1201 mg/l y en pozo Gómez 2 los 1366 mg/l, refuerzan la idea de que está contenida en

la unidad sedimentaria del complejo Sierra de Los Cóndores. Esta presunción se fundamenta en antecedentes de pozos en los mencionados sedimentos, que producen agua con altos contenidos en sulfatos. Por otra parte, en algunos sitios de la costa del lago de Embalse la misma formación muestra facies lagunares donde se han relevado algunas capas de yeso.

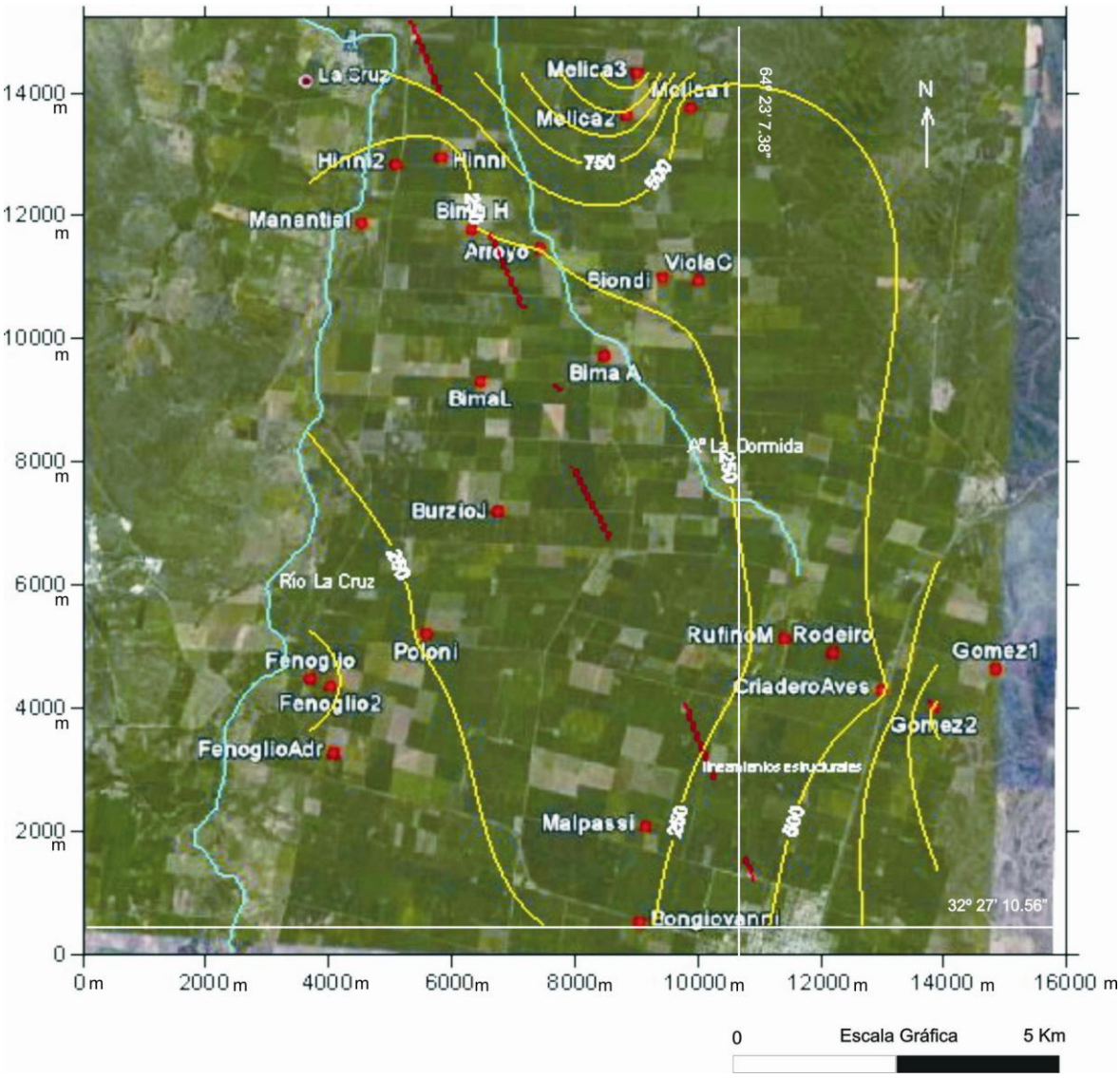
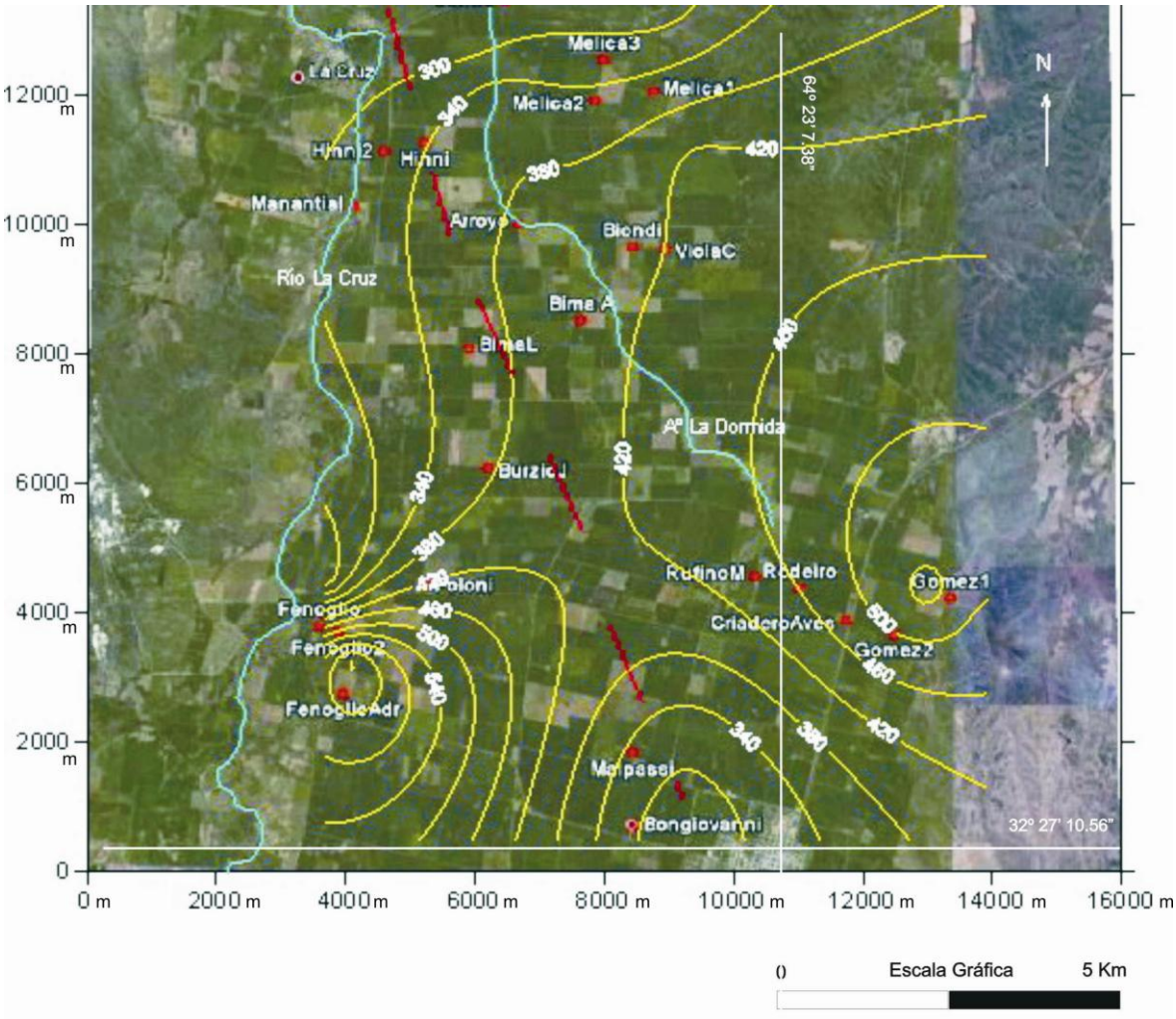


Figura 5.6.4.3.a. Mapa de distribución de sulfatos. Equidistancia de las isolíneas 250 mg/l.

5.6.4.4. Distribución espacial de las concentraciones de bicarbonatos

La concentración de bicarbonatos en general decrece desde la divisoria de aguas del sur hacia el norte, coincidiendo con la dirección de flujo subterráneo (Figura 5.6.4.4.a.) Se destacan las áreas de los pozos Fenoglio A. en el sector oeste y de los pozos Gómez 2 y Criadero de Aves en el sector este, por tener mayor concentración. Luego se verá que la distribución de As sigue una modalidad similar.

Posiblemente las áreas de mayores concentraciones se deban a la reacción del agua de lluvia con el CO_2 del suelo para originar ácido carbónico que ataca al CO_3 Ca del loess, que según Frenguelli (1956) "Se halla en partículas finísimamente distribuidas uniformemente en el espesor de la masa del loes, en cantidad generalmente variable del 2 al 7%". Hacia el norte y noroeste, si bien el loes está también presente, se destacan los procesos sedimentarios relacionados con transporte hídrico que modifica las características mineralógicas del loes eólico.



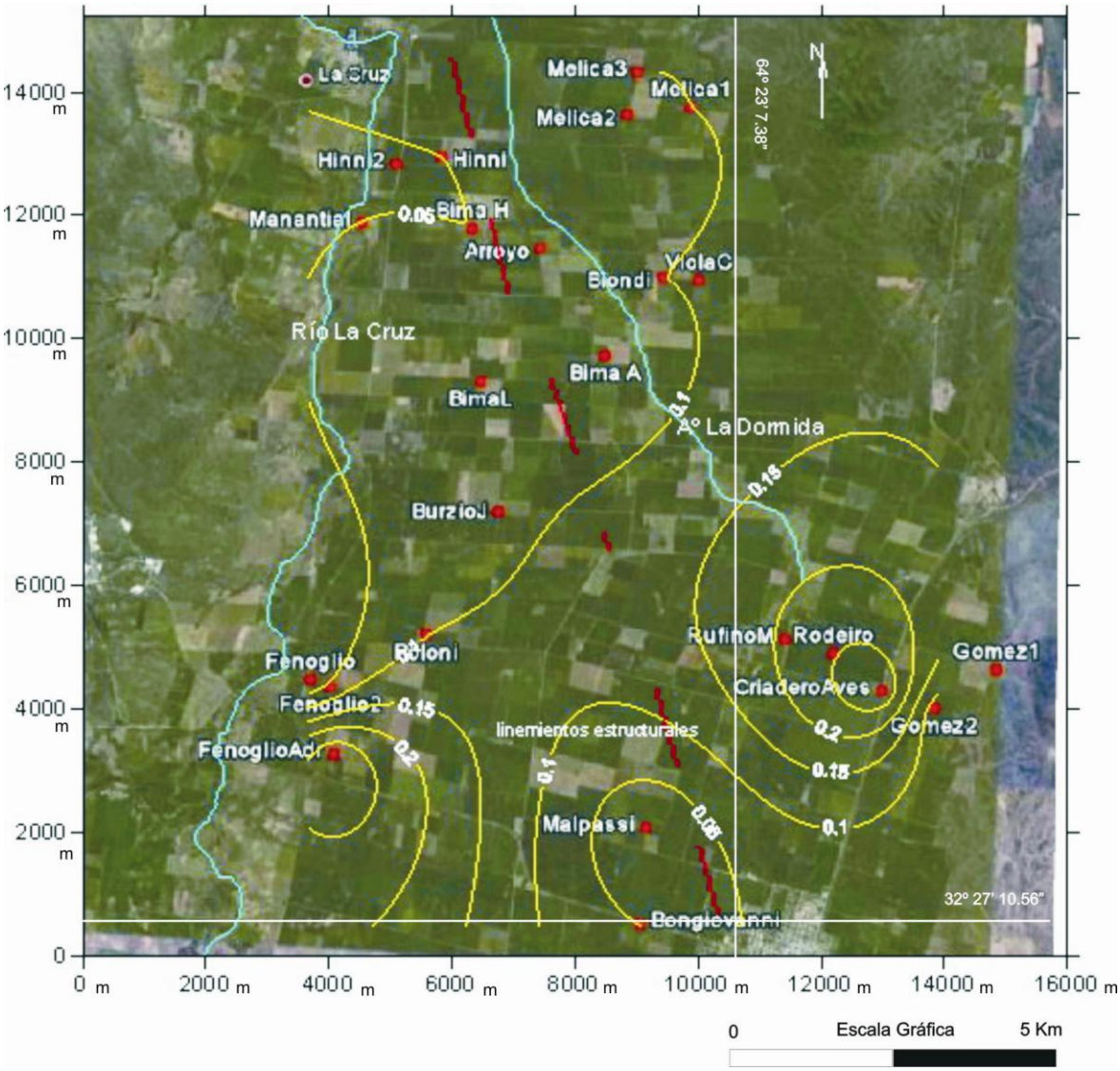
5.6.4.4.a. Mapa de distribución de bicarbonatos. Equidistancia de las isolíneas 40 mg/l.

5.6.4.5. Distribución espacial de las concentraciones de arsénico.

Más allá de considerar el modo de distribución de dicho elemento, del mapa se desprende que los contenidos de As en el agua de la capa freática superan los límites permitidos para el consumo humano, según lo regulado por Código Alimentario Argentino que acepta hasta un máximo de 0,05 mg/l.

Desde la zona central (pozo Burzio) hacia el sur, incluyendo los pozos que proveen a la localidad de Berrotarán, los contenidos de As superan ampliamente los 0.05 mg/l. La zona con menores contenidos ocupa una faja que se extiende a lo largo del río La Cruz y hacia el este (Figura 5.6.4.5.a.)

En acuíferos de materiales loéssicos, la presencia de As está vinculada a la existencia de vidrios volcánicos alterados, biotitas, etc., componentes de ese sedimento (Bonorino et al., 2001). Por otra parte, se encontró una muy alta correlación entre la concentración de As y el pH del agua, de manera tal que el contenido del primero crece con el aumento del segundo. Si se relaciona el incremento del pH con la alcalinidad del agua, se puede inferir que la distribución del arsénico en el agua del valle está relacionada con la de los depósitos de loess. En tal sentido, en el sector sur del área de estudio, esos depósitos predominan en la formación del relieve.



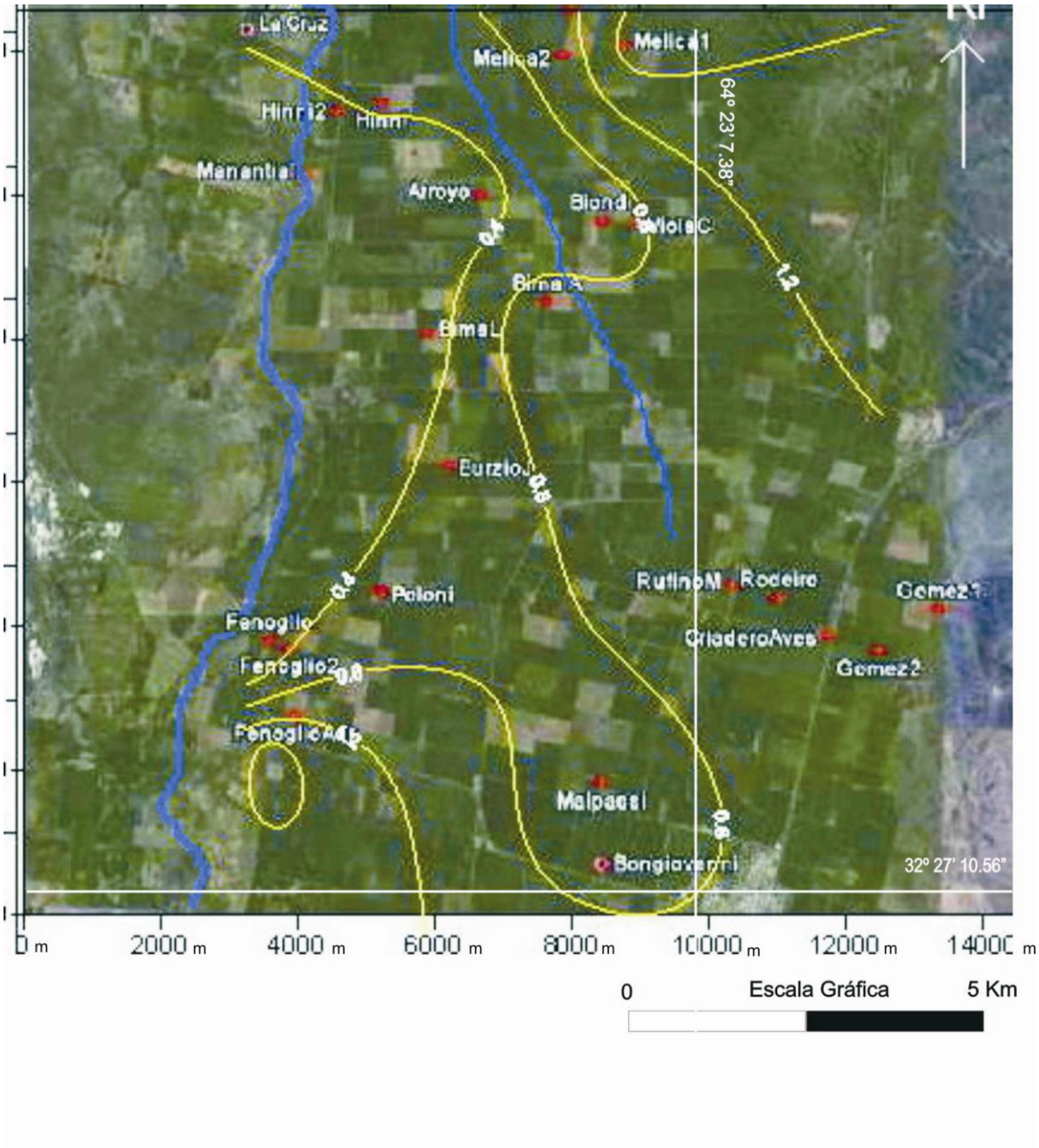
5.6.4.5.a. Mapa de distribución de arsénico. Equidistancia de las isolíneas 0.05 mg/l.

La distribución de las concentraciones del citado elemento en el agua de la capa freática, es similar en su modalidad (altamente variable) a la descripta por Matteoda, et. al. (2007) en la determinación del fondo natural de flúor y arsénico en aguas subterráneas en la cuenca del arroyo El Barreal. Si bien esta cuenca es afluente del sistema del Río IV, limita al sur con el área de estudio cuyos cursos de agua son tributarios del Río III.

Los valores medio, máximo y mínimo de concentración de As en el agua del área de estudio (0.07 mg/l, 0.3 mg/l y 0 mg/l, respectivamente) están dentro del rango del fondo natural establecido en el citado trabajo de 0.107 mg/l, con un valor máximo de 0.9 mg/l y un valor mínimo de 0 mg/l.

5.6.4.6. Distribución espacial de la Relación Mg/Ca

Se ha observado que esta relación adopta valores muy dispares (Figura 5.6.4.6.a.) probablemente como resultado de precipitación de calcita y /o intercambio iónico.
El máximo valor obtenido 1,78 en Mélica y el mínimo 0,09 en Fenoglio y algunos valores cercanos a 1 (uno), hacen inferir que el agua en algunos sectores estaría transitando por terrenos dolomíticos (Appelo y Postma, 2009), lo que deberá ser estudiado en mayor detalle



5.6.4.6.a. Mapa de distribución de la relación Mg/Ca. Isolíneas cada 0.4.

5.7. Aptitudes de uso del recurso hídrico

Cumpliendo con el objetivo predominantemente práctico que sigue este estudio se han establecido zonas según el grado de aptitud del recurso hídrico para los siguientes usos:

- Doméstico

- Bebida animal
- Riego suplementario a la lluvia

Los análisis químicos correspondientes fueron realizados en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Agencia Córdoba Ambiente. Previamente a ser utilizados se comprobó la validez de cada análisis con el software Phreeqc Versión 2.15.02 que determina el porcentaje de error en la relación cationes/aniones. Se tomó como límite máximo de error aceptable el 10%. En la tabla 5.7.1. se muestran los iones mayoritarios, NO_3 y fluor.

Muestra	HCO_3 mg/l	SO_4 mg/l	Cl mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	As mg/l	K mg/l	NO_3 mg/l	Residuo a 105° C	F mg/l
Bima A	407.9	194.2	72.9	154.6	34	47.3	0.05	16.4	19.1	898	0.52
Biondi	429.8	286.4	125.8	276	23.3	78.7	0.1	9.8	20.9	1282	-
C. aves	552.4	433	29.8	321.9	24.2	37	0.2	12.5	7.8	1108	0.93
Fenoglio	233.7	608.2	76.5	166.5	9.1	162.1	0	23.5	3.9	595	1.67
Gómez2	487.5	1366.6	180	698.7	82.8	142.3	0.05	24.2	1.5	3392	-
Bima H	374.8	245.2	46.1	229.9	3.7	38.7	0.05	9.4	18.4	821.4	
Hinni	271.9	130	39.2	112.7	15.5	56.2	0.05	10.1	5.9	748	0.31
Bima L	385.8	90.7	46.1	158.9	5.2	43.1	0.1	8.2	22.1	590	-
Melica 2	262.1	1201.7	197	577.3	50.1	80	0.05	30	4	2206	0.61
Melica 3	269.5	1716.9	228.1	768.7	96.5	133.5	0.1	34.7	0.24	3170	-
FenoglioA	668.8	222.2	43.2	396.5	63.9	60.3	0.3	13.7	11.71	1320	-
Malpassi	308.7	214.1	43.2	174.3	12.5	37.1	0.05	10.2	8.3	628	-
Poloni	385.8	222.2	46.8	242.4	12.3	35.1	0.1	10.2	14.6	830	-
Bongiovanni	268.3	230.4	67.3	127.9	29.9	55.2	0.05	11	7.4	630	-

Tabla 5.7.1. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua (iones mayoritarios)

5.7.1. Uso doméstico

Se han establecido zonas de aptitud para el uso doméstico tomando como referencia la normativa de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, basada en el Código Alimentario Argentino. Se consignan específicamente áreas en función de la concentración de As, SO_4 y TSD, debido a que estos elementos, de todos los analizados, son los que superan los máximos establecidos por la mencionada norma. En consecuencia,

los elementos químicos cuya distribución no ha sido considerada, no representan ningún tipo de limitante al consumo.

Se hace una mención particular respecto del flúor. Según los valores encontrados y la temperatura media ambiente del área de estudio, 17.9 °C, la concentración en el 50% de los sitios muestreados, es menor que la recomendada por el Código alimentario Argentino (entre 0,7 mg/l y 1.2 mg/l para ese rango de temperatura). El 50% restante está dentro de los valores de aptitud.

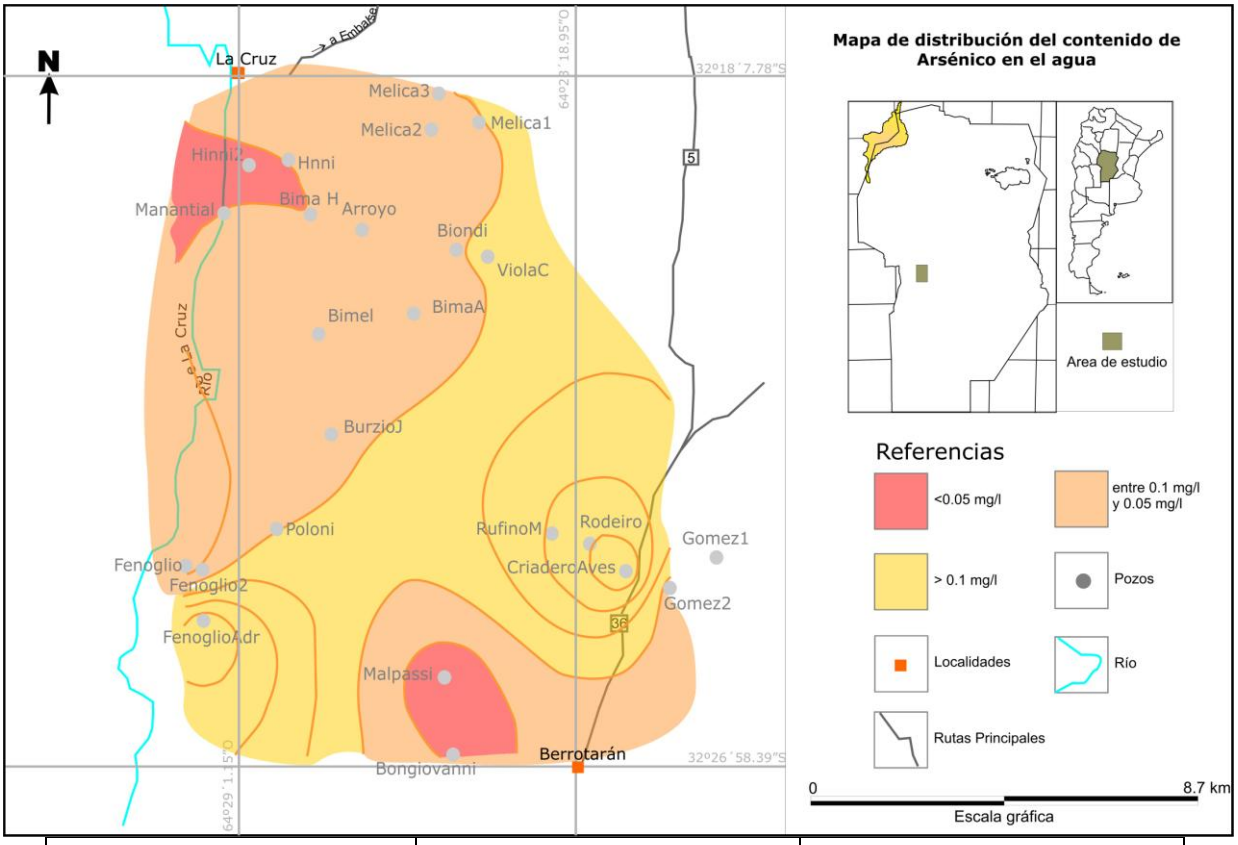
Dado que se muestrearon sólo ocho pozos, no resultarían suficientes para realizar una caracterización estadística del área, sin embargo, como expresa Cabrera, et. al. (2005) se percibe una marcada variabilidad de los valores y estos se encuentran dentro de los establecidos en el fondo natural de flúor para la región de Río Cuarto.

Relativo al déficit, se encuentran discusiones en distintos organismos relacionados con la salud humana, incluida la Organización Mundial de la Salud, sobre la conveniencia de adicionar flúor a las aguas deficitarias. Dicha organización propone que los administradores de la salud pública y dental, deberían considerar la exposición total de los individuos antes de ejecutar cualquier programa de adición de flúor para prevención de caries. Organización Mundial de la Salud (1994).

La recomendación está basada en estudios de organizaciones médicas de Europa y USA que han comprobado sobre ingesta y daños severos a la salud, en lugares con suministro adicional de flúor a los sistemas públicos de agua. Se considera como causa probable al hecho que, por medio de distintas acciones cotidianas, los individuos ingieren cantidades extras del elemento que producen el exceso.

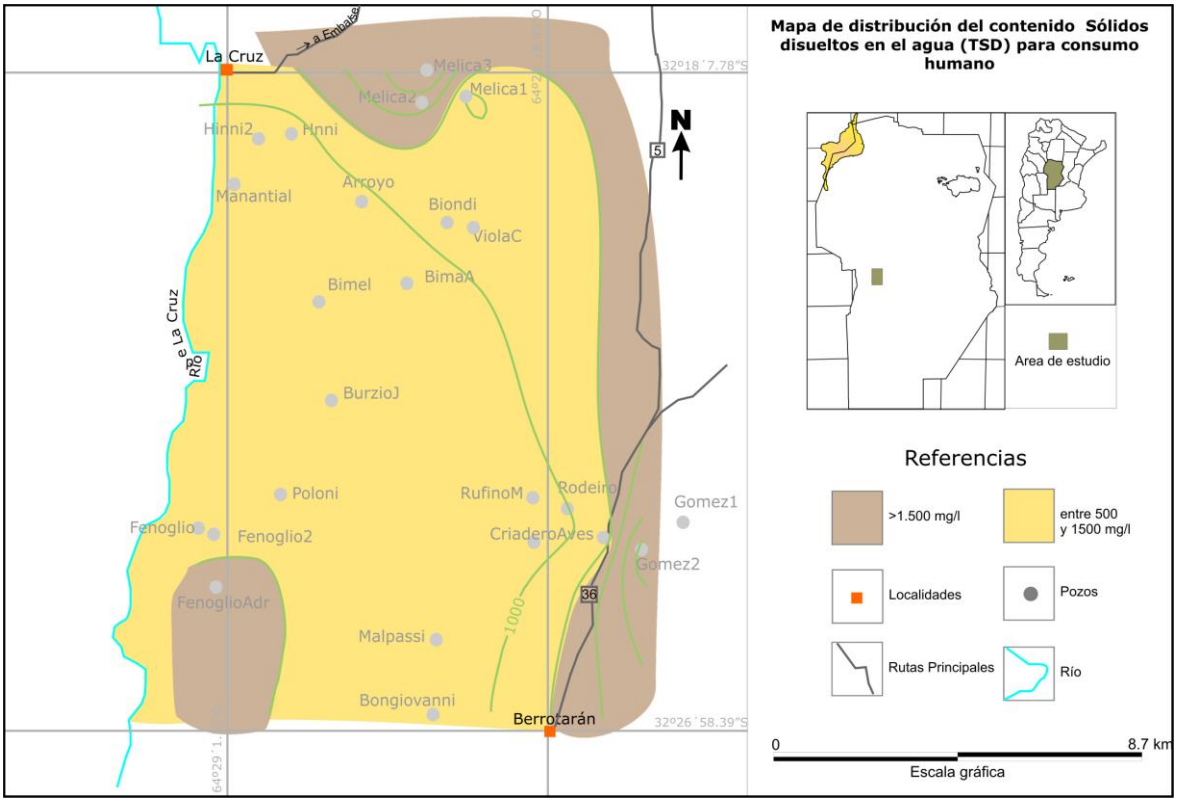
Distintos trabajos coinciden de modo general en indicar como fuentes de flúor a actividades tales como: utilización diaria de pastas dentales; consumo de alimentos envasados para niños (leches, jugos, etc.) preparados con agua fluorada; cereales procesados; jugos de uvas procesados con su piel debido al uso de insecticidas fluorados durante el período de crecimiento de los frutos; consumo frecuente de té, bebidas gaseosas,

cervezas; consumo de pescados y mariscos; utilización de sal fluorada en la dieta diaria; distintos modos de cocción de los alimentos y, finalmente, el hábito de fumar.



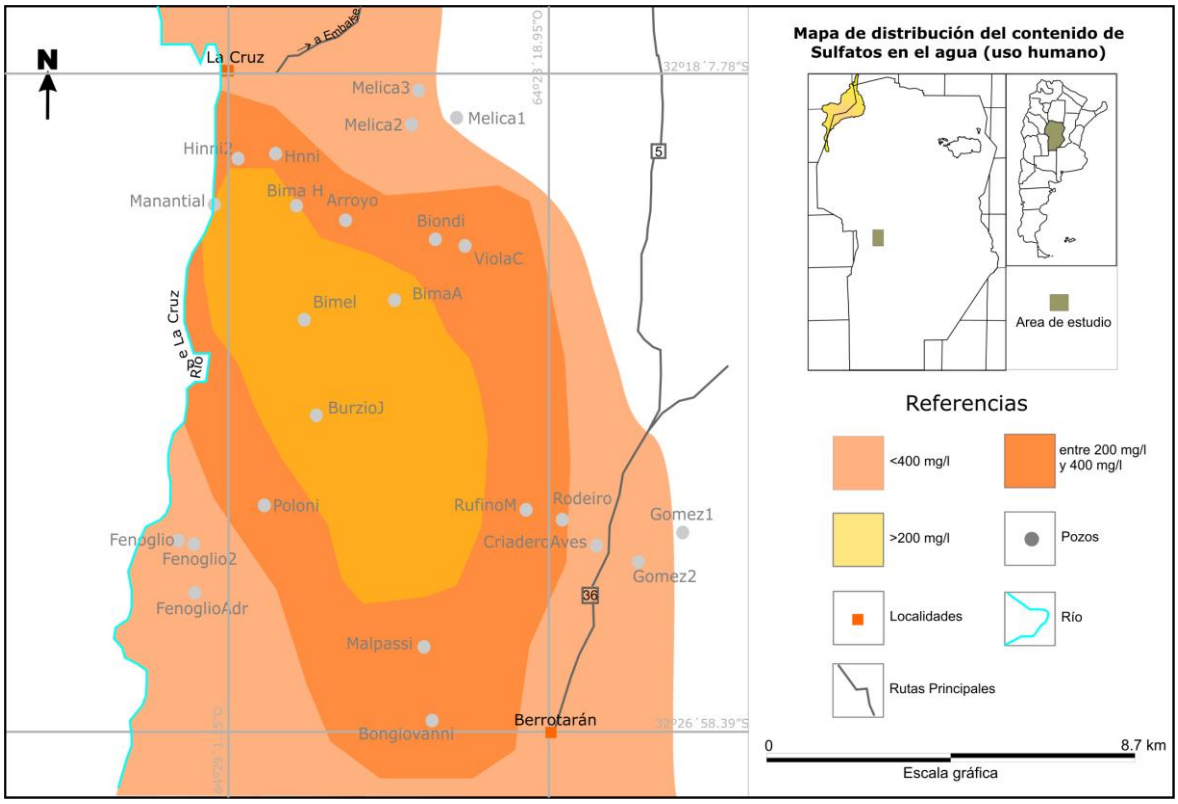
Parámetro	Valor aceptable	Valor límite
arsénico	0.05 mg/l	<0.1 mg/l

Figura 5.7.1.a. Mapa de distribución espacial de los contenidos de As en el agua.



Parámetro	Valor aceptable	Valor límite
Sólidos disueltos	500 mg/l	1500 mg/l

Figura 5.7.1.b. Mapa de distribución espacial de los contenidos de sólidos disueltos en el agua.

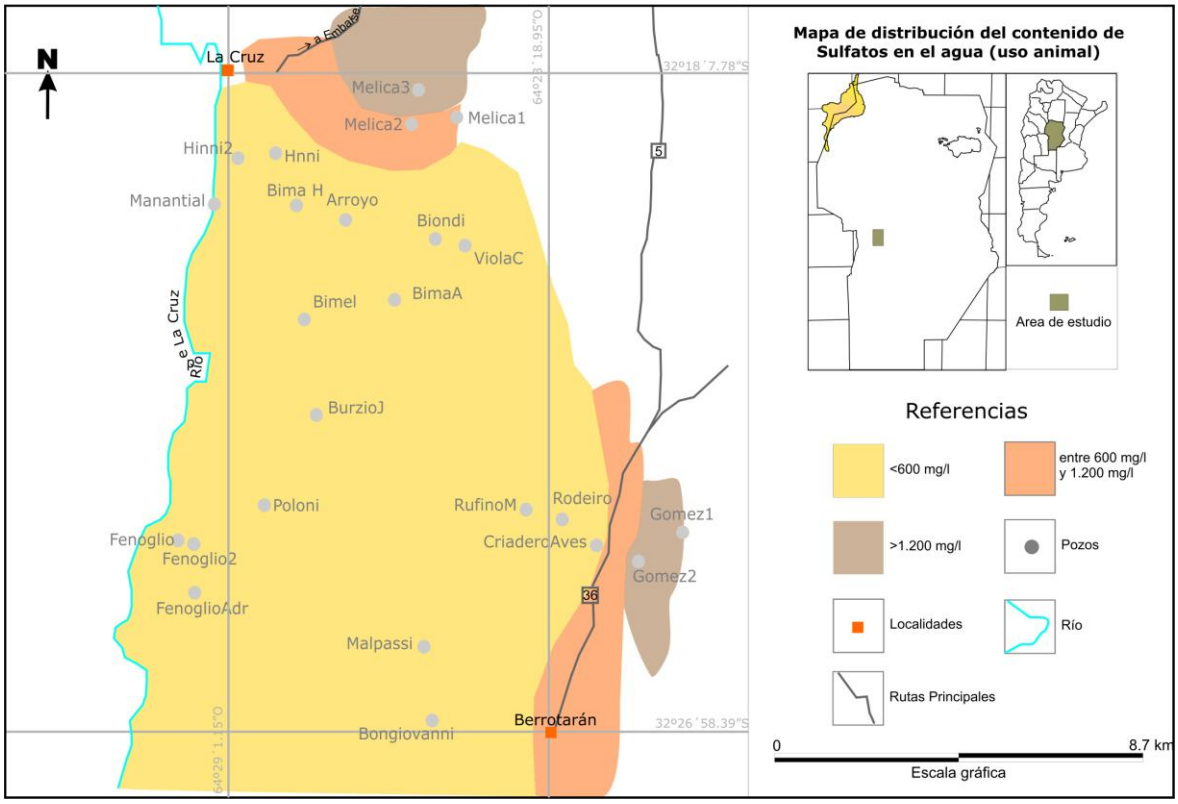


Parámetro	Valor aceptable	Valor límite
sulfatos	<200 mg/l	400 mg/l

Figura 5.7.1.c. Mapa de distribución espacial de los contenidos de sulfatos en el agua.

5.7.2. Bebida animal

Las zonas de aptitud para bebida animal se establecieron tomando como referencia valores máximos recomendados de cloruros, sulfatos y TSD por la Agencia córdoba Ambiente, en base experiencias de la EEA INTA Marcos Juárez, para bovinos. De los elementos químicos mencionados se consigna la distribución de los sulfatos, por ser este el único elemento cuya concentración supera el límite máximo de referencia.



Parámetro	Valor aceptable	Valor límite
sulfatos	600 mg/l	1200 mg/l

Figura 5.7.2.a. Mapa de distribución espacial de los contenidos de sulfatos en el agua.

5.7.3. Riego suplementario a la lluvia

La zonificación del grado de aptitud del agua para riego (figura 5.4.3.a) considera las cualidades químicas tomando como referencia la clasificación según la Norma Riverside (Richards, L. A. 1954) que determina la potencialidad para aumentar la salinidad y contenido de sodio en el suelo. Las clases de agua que determina la norma surgen de la relación entre la conductividad eléctrica y el índice RAS.

Se evaluaron las muestras de agua obtenidas en los pozos consignados en el mapa de la figura 5.7.3.a en base a los resultados del Laboratorio de aguas y Suelos de la Agencia Córdoba Ambiente.

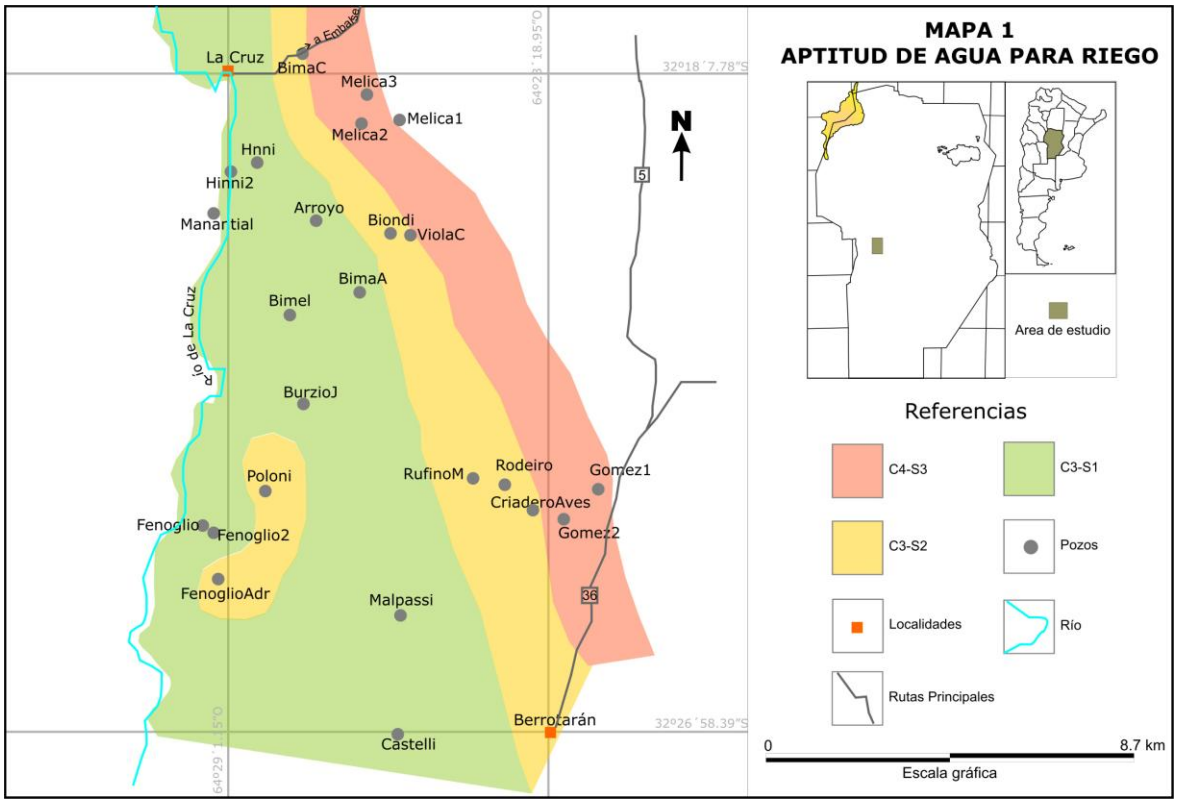


Figura 5.7.3.a. Mapa de distribución de las clases de agua según aptitud para riego

C_3: Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C_4: Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
S_1: Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S_2: Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiable del suelo, corrigiendo en caso necesario
S_3: Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.

Se evaluó también el contenido de flúor, el cual no representa ninguna limitante. Las determinaciones se realizaron en la cátedra de Hidrología y Riego del departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. La tabla siguiente muestra los resultados de las muestras de agua analizadas.

Muestra	F (ppm)
Pozo Fenoglio	1.67
Pozo Viola	0.92
Pozo Castelli	0.22
Pozo criadero de aves	0.93
Pozo Alfredo Bima	0.52
Pozo Hinni	0.31
Pozo Melica 1	0.61
Pozo Carlos Bima	1.46

Si bien la factibilidad de riego de un sector determinado no depende únicamente de la calidad química del agua, sino que se deben juzgar también factores como la estructura del suelo, entre otros, en este estudio no se toman en consideración debido al objetivo predominantemente hidrogeológico. En cambio, dado que la actividad económica predominante en la región es la agricultura, se ha evaluado la necesidad de riego suplementario para cultivos de soja, maíz, sorgo granífero y trigo, con el software CROPWAT versión 8.

El software estima los Requerimientos de Agua del Cultivo (RAC) para todas las etapas, desde siembra hasta cosecha, a partir del procesamiento de datos climáticos mensuales, coeficientes de cultivo Kc para cada etapa y de condiciones de humedad del suelo. En base a los datos climáticos, estima y utiliza la ETo de Penmann – Monteith.

Básicamente determina el requerimiento de agua para las distintas especies calculando la diferencia entre la precipitación efectiva (Pe) y la evapotranspiración del cultivo (ETc). El algoritmo realiza la estimación del RAC para diversos escenarios que contemplan desde: riegos a intervalos fijos por etapa, hasta agotamiento crítico de la humedad del suelo, reducción de ET de cultivo fijada por etapa, entre otras opciones.

En este caso se programó un riego a intervalo fijo (cada 10 días) para reponer la humedad del suelo a la capacidad de campo con una eficiencia del riego de 70%. Los montos obtenidos de requerimientos de agua son los siguientes:

- Cultivo de soja 229.8 mm, por el período de cultivo
- Cultivo de maíz 197.9 mm, por el período de cultivo
- Cultivo de trigo 136.4 mm, por el período de cultivo
- Cultivo de sorgo granífero 142.6 mm, por el período de cultivo

Los volúmenes de agua que estas láminas implican pueden ser complementadas o suplementadas con riego mecanizado en los sectores donde el acuífero tiene buen espesor (mas de 80 metros) y aguas del tipo C3-S1, aunque la utilización de éste recurso debe ser regulado a los efectos de una explotación racional.

CAPITULO VI
MODELO HIDROGEOLÓGICO

En este capítulo se sintetiza el conocimiento obtenido sobre los aspectos geológicos e hidrogeológicos del sistema acuífero y, en base a ello, se propone un modelo conceptual de funcionamiento del mismo.

El esquema que se propone para el modelo está fundamentado en el relevamiento de las formaciones litológicas, de las características geomorfológicas, en el resultado de la prospección geofísica y especialmente en el relevamiento geohidrológico realizado. El esquema hidrogeológico resulta de las características de las unidades hidroestratigráficas deducidas y la hidrodinámica se deduce del análisis de la superficie piezométrica, de las características químicas del agua y de las condiciones de recarga estimadas para dicho sistema, entre otras.

6.1. Unidades Hidroestratigráficas

La prospección geofísica ha permitido definir cuatro formaciones litológicas en relación con el comportamiento eléctrico del subsuelo. En base a la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales, observaciones de campo y experiencias en la zona; a las formaciones se las caracteriza de la siguiente manera:

6.1.1. Unidad I. Rocas paleozoicas (basamento cristalino)

Comprende los esquistos y gneis que constituyen la base de los depósitos sedimentarios antiguos y modernos que rellenan el valle, por lo tanto conforman el basamento cristalino y también el basamento hidrogeológico. Se caracterizan por tener Resistividades mayores a 100 ohms/m. Se trata de rocas acuífugas por definición aunque pueden tener una limitada circulación de agua por fracturas.

6.1.2. Unidad II. Areniscas y conglomerados del complejo volcánico – sedimentario Sierra de Los Cóndores.

Estos materiales forman parte del subsuelo del sector este del área de estudio y yacen sobre el basamento cristalino; en algunos sitios la formación está expuesta en la

superficie y en otros, está cubierta por lavas del mismo período o por los sedimentos cuaternarios. Desde el enfoque hidrogeológico se caracterizan por su baja permeabilidad a causa del contenido de arcillas que conforman parte de la matriz, tanto del conglomerado como de las areniscas. Manifiestan Resistividades aparentes menores de 50 ohms/m.

Diversos autores, como Stappenbeck, (1926) y registros de perforaciones en esta formación, destacan que en general produce aguas de elevada mineralización, en concordancia con la baja permeabilidad de los sedimentos. Desde el punto de vista hidrogeológico, ésta unidad se la puede clasificar como acuitardo.

Los niveles freáticos encontrados coinciden aproximadamente con niveles de cambios litológicos. En unos sitios el nivel piezométrico se encuentra aproximadamente a la profundidad del contacto entre esta formación y los limos – loess.

En algunos pozos cavados existentes en la región, se observa a simple vista la diferencia de permeabilidades entre las formaciones. El limo - loess de la zona no saturada, con mayor permeabilidad, permite la percolación de agua hasta el conglomerado cuya permeabilidad es notablemente menor; como consecuencia, éste actúa como base de niveles saturados, tal vez colgados, en su parte superior.

6.1.3. Unidad III. Sedimentos fluviales – aluviales.

Esta unidad es importante por la extensión que ocupa y por presentar las mejores condiciones de permeabilidad encontradas en el subsuelo del área de estudio. Su origen se debe la interacción de procesos fluviales y aluviales del río La Cruz y la descarga de materiales erosionados de la Sierra Grande, es la formación que provee el agua de mejor calidad química de todos los pozos muestreados.

Los sedimentos que la componen son limos, arena de diversas granulometrías y en algunos sitios se encontraron bloques rodados. Coherentemente con la génesis fluvial – aluvial que se ha propuesto para el depósito, aparecen algunos niveles de arenas finas con intercalaciones de arcillas, lo que origina que el agua de la capa freática presente elevada

mineralización (pozo Fenoglio A.), en cambio otros pozos que solo atraviesan arenas tienen agua de buena calidad química (pozo Hinni)

6.1.4. Unidad IV. Loes y Limos Pampeano.

Esta unidad está prácticamente en toda el área cubriendo a modo de manto los depósitos más antiguos. La elevada resistividad eléctrica, mayor que 100 ohms/m. en la parte superior de los S E V. representa la zona no saturada de alta porosidad que caracteriza al loess. La zona no saturada contendría el vidrio volcánico, mineral que podía proveerle de arsénico al agua subterránea.

La zona saturada presenta, a priori, buenas condiciones para la explotación del recurso hídrico subterráneo del sector.

6.2. Acuíferos

En los cortes esquemáticos de las figuras 6.2.a, 6.2.b y 6.2.c, se indican las formaciones acuíferas inferidas de la interpretación de los SEV cuyo nivel freático se verifica en los pozos censados (línea llena azul). Sus espesores pueden alcanzar un máximo de 100 m aproximadamente hacia la parte central del valle (Perfil 3), mientras que hacia el este se acuñan sobre los sedimentos cretácicos caracterizados como acuitardo.

Las formaciones de comportamiento acuitardo, presentan espesores medios de 25 m aproximadamente y se apoyan sobre el basamento cristalino que constituye el basamento hidrogeológico. Este último se encuentra a profundidades que varían desde 10 m en la población de La Cruz, 100 m en la parte central del valle hasta aflorar en superficie, en algunos sitios del flanco este.

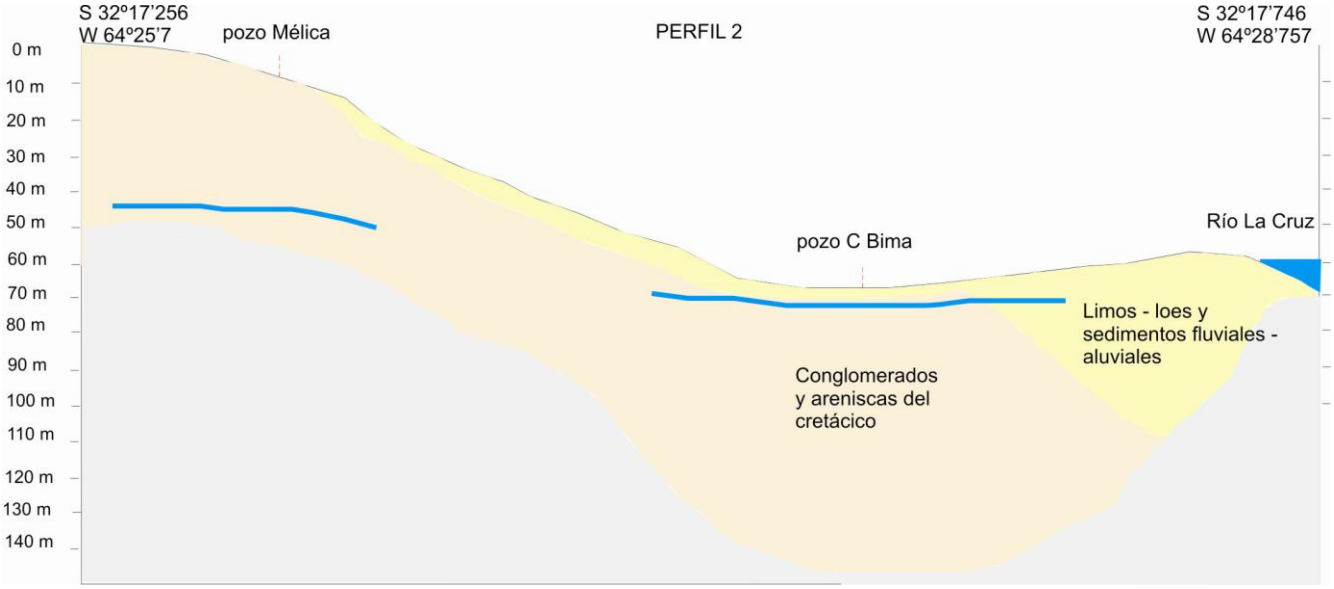


Figura 6.2.a. Sección Hidrogeológica a lo largo del Perfil 3 de SEV.

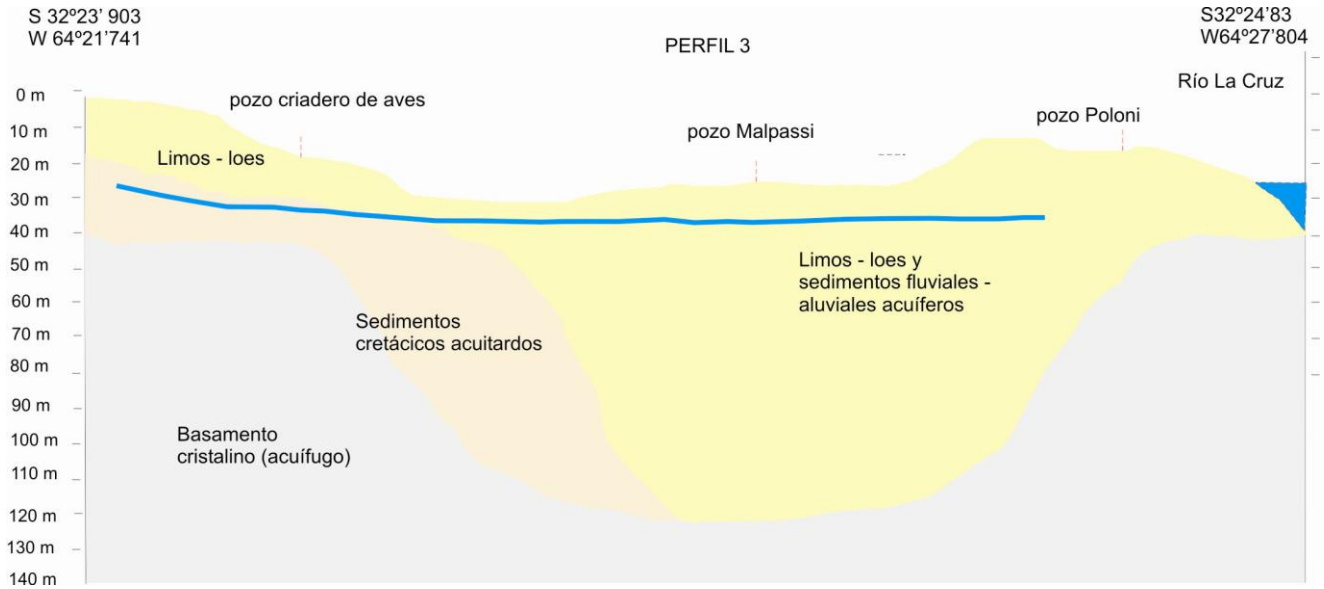


Figura 6.2.b. Sección Hidrogeológica a lo largo del Perfil 1 de SEV.

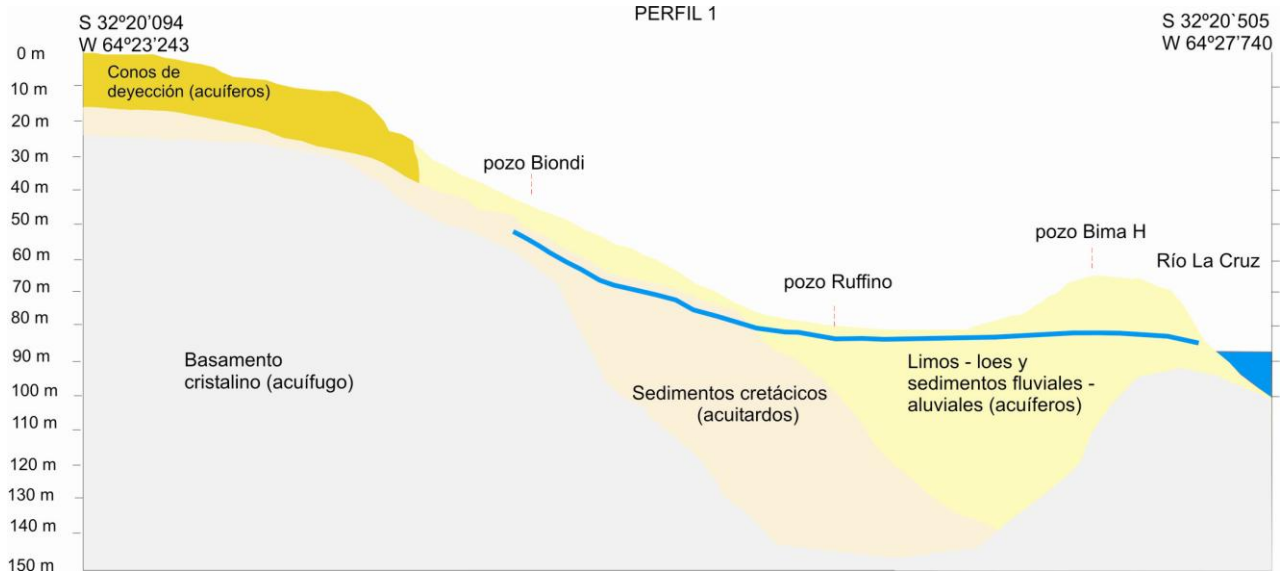


Figura 6.2.c. Sección Hidrogeológica a lo largo del Perfil 2 de SEV.

En la zona central del valle, el nivel piezométrico se encuentra a una profundidad promedio de 5 m mientras que, hacia las zonas laterales del oeste, el nivel se encuentra a aproximadamente 20 m de profundidad. Hacia el este, los niveles saturados corresponden aproximadamente con el nivel del cambio litológico entre sedimentos pampeanos y cretácicos, encontrándose el agua en los materiales a los que los lugareños llaman la "tosca o greda colorada" como denominan a esos sedimentos de característico color rojizo. Hacia el oeste los niveles freáticos se encuentran en sedimentos fluviales – aluviales.

A lo largo de una faja de terreno próxima al límite este del valle, el nivel se encuentra a mayor profundidad, alcanzando en algunos sitios aproximadamente 40 m (pozos Mélica y Gómez por ejemplo).

6.3. Modelo conceptual de funcionamiento del sistema hidrológico

El área de estudio, aunque relativamente reducida, abarca morfologías de valle, piedemonte y relieve plano, lo cual genera condiciones diversas en relación con el proceso de transferencia de agua hacia el subsuelo (Figura 6.3.a.)

Se reconocen principalmente mecanismos de recarga difusa en las partes planas del relieve, cuya magnitud podría tener algunas variaciones poco significativas relacionadas con variaciones de pendiente. También se evidencian mecanismos de recarga localizada en vaguadas labradas en los conos de deyección en el flanco este y por el río La Cruz, en el tramo que va desde el Paso Cabral (Las Caleras) hasta La Cruz, donde presentaría un comportamiento influente.

Aproximadamente desde la localidad de Berrotarán hacia el sur – suroeste y sureste hasta la divisoria de aguas, en un área semejante a un anfiteatro, el relieve conforma una planicie elevada respecto del resto del valle con una pendiente media de alrededor de 3.5 ‰, en este sector predomina la recarga difusa, tal como puede interpretarse del mapa de distribución de cloruros (capítulo Hidroquímica) donde la línea de concentración 55 mg/l delimitaría aproximadamente el área de recarga al sistema. Desde Berrotarán hacia el norte el relieve conforma también una planicie que ocupa el fondo del valle aunque con una pendiente media de 2.5 ‰ y origina del mismo modo un proceso de recarga difusa.

En el sector elevado que constituyen los conos de deyección de la Sierra de Los Cóndores, en la ladera este, (zona de pozos Mélica) los terrenos descienden hacia el valle con una pendiente cuyo valor medio es del 13 ‰. Si bien existe esta acentuada pendiente, las vaguadas o vías de escurrimiento del agua superficial están ligeramente marcadas en el relieve lo que denota escasa erosión; por ello se infiere que el proceso de recarga localizada, por las precipitaciones, en el piedemonte, es importante.

Aunque sería necesario un estudio altimétrico de precisión, es probable que la relación entre el acuífero y el agua del río La Cruz , en determinados sectores y épocas del año, cambie de afluencia a influencia y por lo tanto el río pueda aportar al acuífero a través de un proceso de recarga localizada y producir almacenamiento de ribera o banco.

La descarga del sistema se produce hacia el norte, siguiendo la pendiente hacia el lago de Embalse, como flujo subterráneo y como caudal básico del Aº La Dormida que, de comportamiento hidráulico efluente, descarga el acuífero freático del sector que se extiende desde aproximadamente el campo Rufino hasta la divisoria de aguas del sur.

Respecto del mencionado arroyo, se advierte que es de carácter temporal, en el sentido que drena como manantial cuando se suceden varios años con precipitaciones superiores a la media. Fluye hacia el nivel de base en el lago de Embalse, pero se infiltra casi totalmente en su recorrido. En los períodos de precipitaciones escasas, como en la época actual, no hay drenaje de agua subterránea.

El mencionado cauce conforma un bajo que se extiende aproximadamente de sudeste a noroeste, en la parte central del valle y aproximadamente paralelo al río La Cruz. Éste, corre con el mismo sentido pero por el borde oeste. La situación de ambos cursos apoya el modelo geológico propuesto, en el sentido que habría una elevación del basamento entre el bajo La Dormida y el valle del río, impidiendo que converjan.

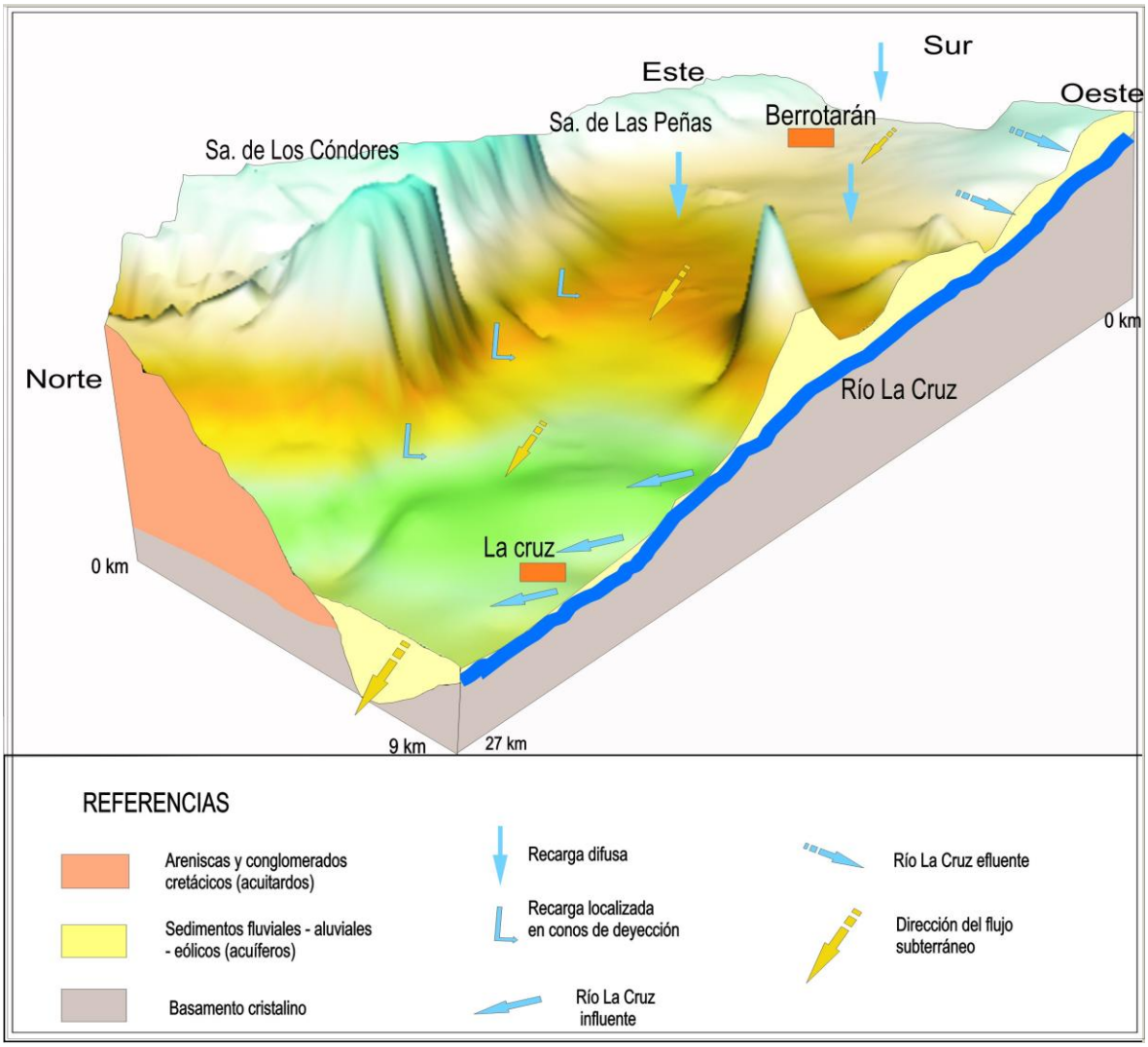


Figura 6.3.a. Figura esquemática del modelo conceptual del sistema acuífero

6.4. Estimación de las reservas

Las reservas en aguas subterráneas representan el volumen almacenado en los sistemas acuíferos, cuyo movimiento o flujo está sometido a la fuerza de gravedad. Su magnitud está condicionada por características geológicas tales como las estructuras, ya que éstas determinan la forma y dimensiones de los cuerpos contenedores y las características hidrogeológicas de los mismos, representadas por el coeficiente de almacenamiento.

Las reservas totales o naturales son aquellas conformadas por la suma de las reservas geológicas y de las reservas regulatrices y representan el total del agua almacenada en el sistema en un instante determinado.

Las reservas regulatrices constituyen la cantidad de agua libre almacenada en los acuíferos por alimentación natural en el curso de una recarga importante. Su evolución está directamente vinculada con la recarga y consecuentemente con las variaciones estacionales o interanuales de las precipitaciones y por lo tanto, la estimación del volumen está ligada al año hidrológico.

Por otra parte, las reservas geológicas mencionadas, están conformadas por el agua almacenada durante períodos plurianuales de precipitaciones y permiten una explotación de mayor cuantía que las reservas regulatrices. Están reguladas por la evolución de los aportes hídricos a lo largo de varios años.

Los montos de reservas obtenidos deben ser considerados como una solución de primera aproximación al problema y, en consecuencia, con atributo de provisorios.

6.4.1. Cálculo de las Reservas Naturales

Por tratarse de un ámbito de sierras donde coexisten geoformas variadas, el sistema acuífero dista mucho de aproximarse a un cuerpo tabular o lenticular, como suelen asemejarse en los ámbitos de llanura.

Dada esa circunstancia, se tomó como base para el cálculo una geometría del acuífero surgida del modelo geológico - geofísico propuesto. Se hizo la estimación considerando al sistema dividido en sectores en función de diferencias litológicas y, en consecuencia, con diferentes valores de porosidad específica y espesores. Luego, para cada sector se calculó un volumen y se obtuvo el total sumando los volúmenes parciales.

Para los sectores ubicados al este, donde se infiere la existencia de las rocas sedimentarias de la formación Sierra de Los Cóndores la porosidad eficaz asignada es baja, del orden del 7% (Davis y de Wiest, 1971), por lo que el cálculo sólo se realiza sobre las unidades acuíferas predominantes que serían los sedimentos fluviales – aluviales – eólicos y los sedimentos pampeanos. Para el cálculo se tomó como referencia la porosidad eficaz media asignada a los materiales del acuífero Pampeano, 12.5% (Albouy et al, 2005).

Del cálculo resulta:

$$\text{Reservas naturales} = \sum \text{área x espesor acuífero medio x Pe}$$

$$26600\ Hm^2 * 0.55\ Hm * 12.5\% = 1828\ Hm^3$$

$$11500\ Hm^2 * 0.25\ Hm * 7\% = 201\ Hm^3$$

$$\text{Reservas naturales} = 2036\ Hm^3$$

6.4.2. Cálculo de las Reservas Regulatrices

Normalmente, las reservas regulatrices se estiman conociendo la amplitud de la variación del nivel piezométrico a lo largo del año hidrológico, lo que representa el nivel de almacenamiento mínimo y máximo en el acuífero, para ese período. Relacionando el valor de dicha variación con la porosidad eficaz se obtiene el monto de las reservas expresado en mm de altura de agua. Pero este procedimiento de cálculo requiere de medidas de niveles piezométricos a lo largo de varios años hidrológicos, que en el caso de este estudio no se pudieron llevar a cabo.

Por tal motivo y, considerando que las reservas regulatrices representan la variación de almacenaje vinculada a las precipitaciones a lo largo del año hidrológico, se las asume iguales a la recarga anual media estimada para el sistema acuífero. Se acepta también que

no hay transferencias significativas de agua hacia la atmósfera, ya que no hay cuerpos lacustres o límnicos efluentes (lagunas, bañados, etc.).

Para el cálculo, se consideró una recarga anual media de 99.2 mm (0.000992 Hm) igual al monto promedio de los tres métodos de estimación aplicados y una superficie media del sistema acuífero de 381 Km^2 (38100 Hm^2).

Reservas regulatrices = Área x recarga anual media

38100 Hm^2 x 0.000992 Hm = 37.8 Hm^3

Reservas regulatrices = 37.8 Hm^3

RESUMEN Y CONCLUSIONES

La investigación realizada permitió definir importantes aspectos del acuífero freático, los que complementados con futuras investigaciones de mayor detalle, permitirán definir una explotación racional del acuífero dentro del marco de una planificación hidrológica integral de los recursos hídricos de la zona. Del estudio realizado surgen las siguientes conclusiones:

- Las particulares condiciones de litología y escasa profundidad de yacencia del basamento cristalino, particularmente en el flanco este del valle, limitan la presencia de acuíferos y consecuentemente el almacenamiento de agua en el subsuelo.

- Las características hidrogeológicas del sistema acuífero estudiado, están condicionadas por el modo de ordenamiento estructural de los bloques de basamento.

- Según los resultados de la prospección geoeléctrica, el área más favorable para explorar por agua subterránea, queda delimitada por una faja de terreno longitudinal al valle y definida por los SEV 4, 5 y 6 del perfil 1; SEV 3, 4 y 5 del perfil 2 y SEV 3, 4, 5 y 6 del perfil 3.

- Para eventuales evaluaciones de disponibilidad y gestión del recurso hídrico se ha estimado un valor medio de recarga por lluvias al sistema acuífero de 99.2 mm/año, equivalente al 10.4 % de las precipitaciones. Con estos valores se han calculado las reservas regulatrices en 37.8 Hm^3 anuales.

- La estimación de la geometría del cuerpo acuífero y de sus rendimientos específicos permitió calcular las reservas totales del agua en 2036 Hm^3.

- Los recursos subterráneos calculados no permiten realizar una explotación intensiva de los mismos o incontrolada a los fines de riego, ya que el recurso es limitado, por

lo que se requiere una explotación racional (sostenible) basada en una buena planificación y gestión hidrológica.

- El agua subterránea del valle que incluye las poblaciones de La Cruz y Berrotarán tiene limitaciones para distintos usos a causa de su composición química. La calidad química y aptitud de uso del agua subterránea mejora en grado creciente desde el este hacia el oeste donde, con limitaciones, es apta para todo tipo de uso.

- El contenido de As es la más importante limitante para el consumo humano y constituye un verdadero problema ya que está presente en toda la comarca en concentraciones superiores a los 0.05 mg/l. Las menores concentraciones están restringidas a la zona que ha sido caracterizada como ambiente de sedimentación fluvial – aluvial.

RECOMENDACIONES

- Se deberán realizar estudios posteriores en un grado mayor de detalle de las características geológicas e hidrogeológicas del sistema y densificar la malla de S E V para ajustar los valores de reservas obtenidos.

- Se recomienda analizar la factibilidad de tratamiento del agua para eliminación del As, con las tecnologías basadas en el uso de hipoclorito de sodio como oxidante del As y alguna sal inorgánica como coagulante. Esta tecnología es altamente efectiva y de muy bajo costo de operación y mantenimiento.

BIBLIOGRFÍA

Albouy R, J. Carrica y G. Bonorino, 2005. *Identificación y análisis del fenómeno de drenaje diferido en sedimentos pampeanos.* Cuenca del Arroyo Napostá Chico, Provincia de Buenos Aires. IV Congreso Argentino de Hidrogeología Actas, Tomo I: 261- 268.

Appelo, C. A. J. y D Postma, 2009. Geochemistry, Graunwater and pollution. A A Balkema Publishers, Leiden.

Bahil J, Gorgas J, Zamora E, Bosnero H, Lovera E, Ravelo Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi. (2003). Mapa de suelos de la Provincia de Córdoba.

Cabrera, A., Blarasin M., Matteoda E., Villalba G. y Gomez M. L. 2005. Composición Química del Agua Subterránea en el Sur de Córdoba: Línea de Base Hidroquímica o Fondo Natural en Referencia a Arsénico y Flúor. Dpto. de Geología. Fac. de Cs. Ex., Fco.- Qcas. y Nat. UNRC, Río Cuarto. Córdoba. Argentina.

Bonorino, A.G., Albouy E. y J. Carrica. 2001. *Hidroquímica de un acuífero loéssico.* Geoacta 26-33-45.

Brook, G. A., Folkoff, M. E. y Box, E. O. 1983. Earth surface proccedings, 79 – 88.

Burgos, J. y Forte Lay, J., 1978a. Capacidad de almacenaje de agua en los suelos de la región pampeana. Taller argentino-estadounidense sobre sequías. CONICET. Mar del Plata. Ed.J. Burgos 122-143 Buenos Aires. Argentina. Noviembre 1983.

Cantú, M. P., 1992. Provincia de Córdoba. En: M. Iriondo (Ed.). El Holoceno en La Argentina, I, 1-16.

Capitanelli, R. G. 1979: Clima. En J. Vázquez, R. Miatello & M. Roque (eds.), Geografía Física de la provincia de Córdoba. Ed. Boldt.45- 138. Buenos Aires,

Carrica, J., 1993. Balshort: Un programa de balance hidrológico diario del suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas Tomo VI: 243-248.

Carrica, J. 2009. Cálculo de la recarga en zonas áridas y semiáridas. En Recarga de Acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas. Jorge Carrica, Mario Hernández y Eduardo Mariño (Eds). 2009. AIH-Fac. Exactas y Naturales UNLPam. ISBN 978-987-1082-39-1: 71-80. Santa Rosa.

Castany, G. 1971. Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ed. Omega S.A. Barcelona, pp 22-43.

Custodio, E. y M. Llamas, 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vol. 1-2350.

Custodio, 1997. Recarga a los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En Custodio E., M. R. Llamas y J. Samper (editores), 1997. La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. GE-AIH. ITGE. Madrid. 455 pp. (19-39)

Davies, S. N. y R De Wiest, 1971. Hidregeología. Ediciones Ariel. Barcelona. Página 473.

Frenguelli, J. 1925. Loess y limos pampeanos. Gaea 1: 7-91.

Fuentes y Cruz. 1990. Formulas para la estimación de la CC y Pm En: SAMPER, J. Manual el usuario del programa Visual Balan v.1.0. Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga.

Gordillo, C.E. y Lencinas, A.N. 1967: Geología y petrología del extremo norte de la Sierra de los Cóndores, Córdoba. Bol. Acad. Nac. de Ciencias, XLVI: 73-108. Córdoba.

Gordillo, C.; Lencinas, A. 1979: Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En Turner, J.C. (De.): Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, Vol. I., 2: 577-650 Córdoba.

Guereschi, Alina. 2000. Estructura y Petrología del Basamento Metamórfico del Flanco Oriental de la Sierra de Comechingones. Pedanía Cañada de Alvarez y Río de los Sauces. Dto. Calamuchita - Pcia. de Córdoba. Tesis Doctoral Inédita. Escuela de Geología. F.C.E.F y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba.

Kay, S. M. Y V. A. Ramos, 1996. El magmatismo cretácico de las Sierras de Córdoba y sus implicancias tectónicas. Actas 13º Congreso Geológico Argentino y 3er Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 3: 453-464. Buenos Aires.

Lerner, D.N; Issar, A. and Simmers I. 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. International Contribution to Hydrogeology, Verlag Heinz Heise. Vol. 8: 345 pp.

Matteoda, E., Blarasin, M, Damilano, G. y Cabrera, A. 2007. Valores característicos del fondo natural de flúor y arsénico en aguas subterráneas en la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba. II Taller sobre arsénico en aguas. V Congreso Hidrogeológico Argentino. Entre Ríos. 31-41. ISBN: 978-987-23936-4-9.

Poire, D.; Sánchez, M.L. y Villegas, M. 1989. Sedimentary facies of Lower Sierra de los Cóndores Group, Córdoba Province, Argentina. Contrib. Simp. Cretaceous América Latina, Part A: Sedimentary Register and Events (Abstract). 2 pág.

Richards, L. A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. U.S. Salinity Laboratory Staff. Ed. U. S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C

Sánchez Toribio, M. I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Sociedad española de Geomorfología, Geoforma ediciones. Logroño.

Sanders, L. 1998. A manual of field hidrogeology. Prentice Hall. New Jersey.

Santa Cruz, J. 1972. Geología al este de la Sierra Chica (Córdoba. Valle del Río Primero. Boletín Asociación Geológica de Córdoba. I (3-4): 102-109.

Stappenbeck, R. 1926. Geologie und Grundwassekunde der Pampa. Editor Erwin Nägele. Stuttgart.

Terrón, P. U. 1995. Tratado de Fitotecnia general. Ediciones Mundi Prensa. Barcelona. Páginas 22-25.

Troha y Falasca; 1991. Estimación de la evapotranspiración potencial diaria mediante fórmulas poco utilizadas en la República Argentina. V Reunión Argentina de Agrometeorología realizada en La Falda (Córdoba) Octubre 1991. Actas.

Thornthwaite, C.W. And Mather (1948), "An approach towards a rational classification of climate", Geographical Review, Vol. 38, pp. 55-94.

World Health Organization, 1994. Fluorides and Oral Health. WHO Technical Report Series 846.

ANEXO I
Análisis Físico Químicos de Agua

Muestra: Pozo Sr. Bima

Fecha: 11/02/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	limpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	1210.0
Residuo a 105º C (mg/l)	898.0
Alcalinidad total (mg/l)	407.9
Dureza Total (mg/l)	264.5
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	194.2
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	72.9
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	407.9
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	47.3
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	34.0
Sodio (Na^+) (mg/l)	154.6
Potasio (K^+) (mg/l)	16.4
Nitratos (NO_3) (mg/l)	19.1
Nitritos (NO_2) (mg/l)	0.026
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.05
pH (a 25º C)	7.59

Muestra: Pozo Sr. Biondi

Fecha: 11/02/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	1772.0
Residuo a 105º C (mg/l)	1282.0
Alcalinidad total (mg/l)	429.8
Dureza Total (mg/l)	306.1
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	286.4
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	125.8
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	429.8
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	78.7
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	23.3
Sodio (Na^+) (mg/l)	276.0
Potasio (K^+) (mg/l)	9.8
Nitratos (NO_3) (mg/l)	29.9
Nitritos (NO_2) (mg/l)	0.08
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.1
pH (a 25º C)	7.88

Muestra: Criadero de aves

Fecha: 05/03/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (µS/Cm) 25ºC	1505.0
Residuo a 105º C (mg/l)	1108.0
Alcalinidad total (mg/l)	552.4
Dureza Total (mg/l)	194.5
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	433.0
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	29.8
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	552.4
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	37
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	24.2
Sodio (Na^+) (mg/l)	321.9
Potasio (K^+) (mg/l)	12.5
Nitratos (NO_3) (mg/l)	7.8
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	>0.1 <0.5
pH (a 25º C)	7.6

Muestra: Pozo Campo Fenoglio

Fecha: 27/03/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	930
Residuo a 105º C (mg/l)	595
Alcalinidad total (mg/l)	233.7
Dureza Total (mg/l)	202.6
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	608.2
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	76.5
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	233.7
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	162.1
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	9.1
Sodio (Na^+) (mg/l)	166.5
Potasio (K^+) (mg/l)	23.5
Nitratos (NO_3) (mg/l)	3.92
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	No contiene
pH (a 25º C)	7.2

Muestra: POZO Sr. GOMES 1

Fecha: 05/03/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (µS/Cm) 25ºC	174.6
Residuo a 105º C (mg/l)	108
Alcalinidad total (mg/l)	82.1
Dureza Total (mg/l)	54.4
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	56.2
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	11.3
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	82.1
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	14.5
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	4.4
Sodio (Na^+) (mg/l)	5.1
Potasio (K^+) (mg/l)	36.8
Nitratos (NO_3) (mg/l)	4.05
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	No contiene
pH (a 25º C)	6.43

Muestra: POZO Sr. GOMES 2

Fecha: 05/03/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (µS/Cm) 25ºC	4050
Residuo a 105º C (mg/l)	3392
Alcalinidad total (mg/l)	487.5
Dureza Total (mg/l)	697.5
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	1366.6
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	180
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	487.5
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	142.3
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	82.8
Sodio (Na^+) (mg/l)	698.7
Potasio (K^+) (mg/l)	24.2
Nitratos (NO_3) (mg/l)	1.52
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.05
pH (a 25º C)	7.2

Muestra: Pozo Hector Bima

Fecha: 27/03/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	1293.0
Residuo a 105º C (mg/l)	821.4
Alcalinidad total (mg/l)	374.8
Dureza Total (mg/l)	174.4
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	245.2
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	46.1
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	374.8
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	38.7
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	3.7
Sodio (Na^+) (mg/l)	229.9
Potasio (K^+) (mg/l)	9.4
Nitratos (NO_3) (mg/l)	18.43
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.05
pH (a 25º C)	7.5

Muestra: Pozo Sr. Hinni

Fecha: 11/02/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	879.0
Residuo a 105º C (mg/l)	748.0
Alcalinidad total (mg/l)	271.9
Dureza Total (mg/l)	205.1
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	130.0
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	39.2
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	271.9
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	56.2
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	15.5
Sodio (Na^+) (mg/l)	112.7
Potasio (K^+) (mg/l)	10.1
Nitratos (NO_3) (mg/l)	5.9
Nitritos (NO_2) (mg/l)	0.017
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.05
pH (a 25º C)	7.56

Muestra: Pozo Lorenzo Bima

Fecha: 27/03/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	932
Residuo a 105º C (mg/l)	590
Alcalinidad total (mg/l)	385.8
Dureza Total (mg/l)	129
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	90.7
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	46.1
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	385.8
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	43.1
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	5.2
Sodio (Na^+) (mg/l)	158.9
Potasio (K^+) (mg/l)	8.2
Nitratos (NO_3) (mg/l)	22.13
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.10
pH (a 25º C)	7.6

Muestra: Pozo Sr. Juan A Mélica - Casa 1

Fecha: 11/02/08

Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	1349.0
Residuo a 105º C (mg/l)	896.0
Alcalinidad total (mg/l)	309.9
Dureza Total (mg/l)	213.2
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	271.6
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	56.0
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	309.4
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	30.4
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	32.9
Sodio (Na^+) (mg/l)	221.7
Potasio (K^+) (mg/l)	17.6
Nitratos (NO_3) (mg/l)	0.04
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.1
pH (a 25º C)	7.8

Muestra: Pozo Sr. Juan A Mélica - Casa 2

Fecha: 11/02/08

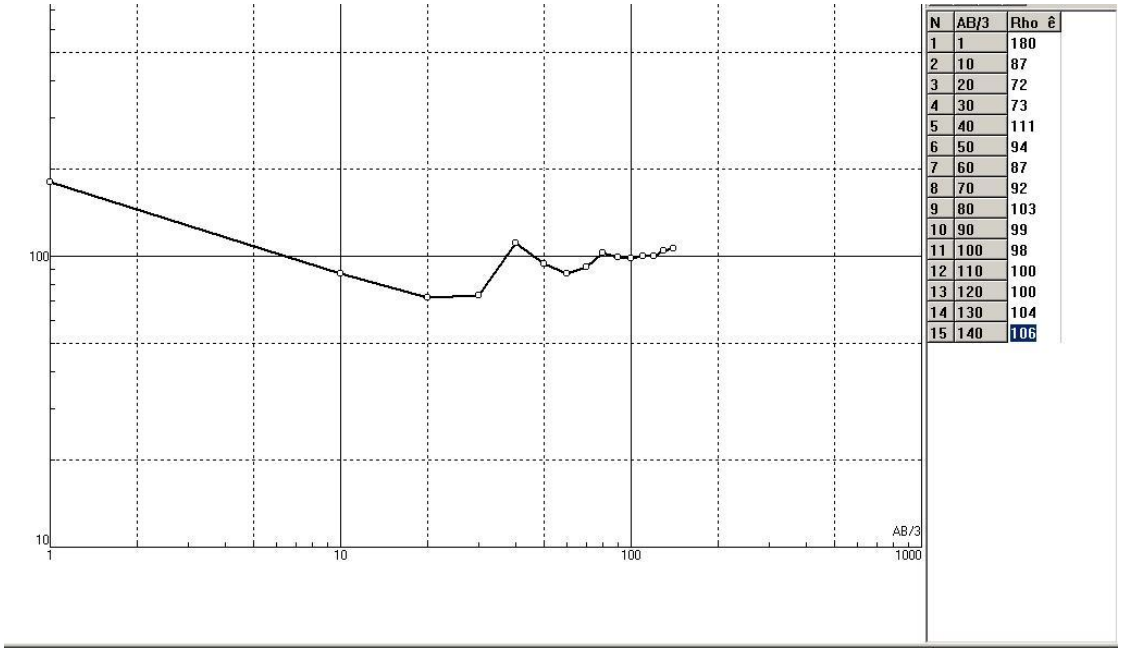
Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	3020.0
Residuo a 105º C (mg/l)	2206.0
Alcalinidad total (mg/l)	262.1
Dureza Total (mg/l)	608.8
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	1201.7
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	197.0
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	262.1
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	80.0
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	50.1
Sodio (Na^+) (mg/l)	577.3
Potasio (K^+) (mg/l)	30.0
Nitratos (NO_3) (mg/l)	4.09
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.05
pH (a 25º C)	7.5

Muestra: Pozo 3 Sr. Juan A Mélica

Fecha: 11/02/08

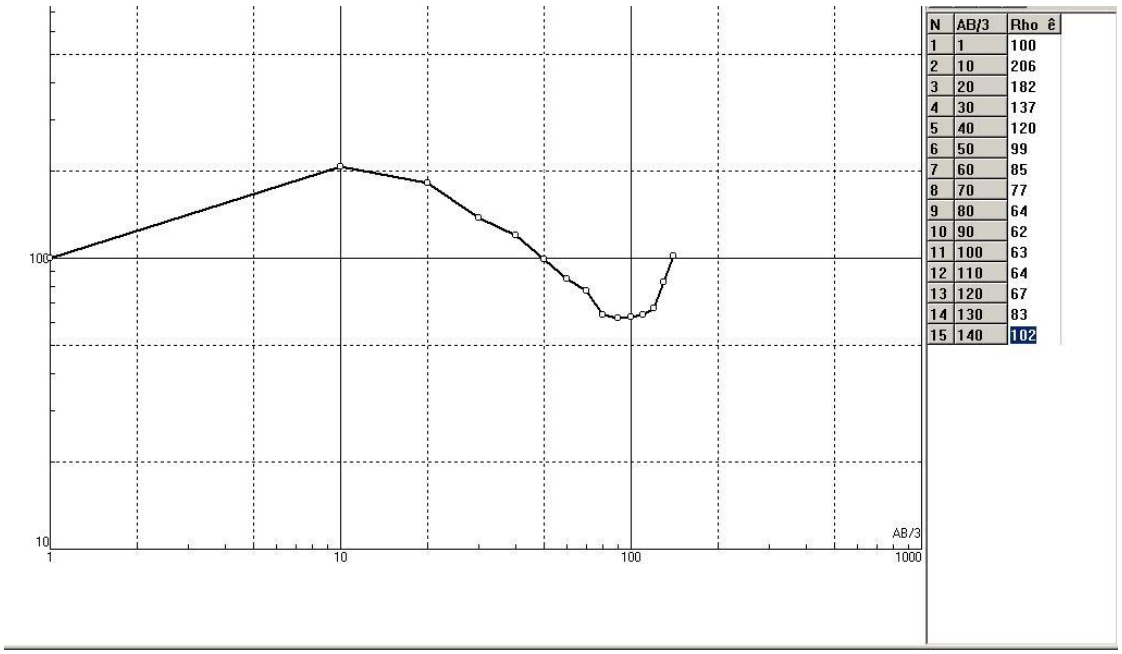
Color	incolora
Olor	inodora
Aspecto	límpida
Conductiv. Eléctrica (MS/Cm) 25ºC	4310.0
Residuo a 105º C (mg/l)	3170.0
Alcalinidad total (mg/l)	269.5
Dureza Total (mg/l)	735.8
Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l)	1716.9
Cloruros (Cl^-) (mg/l)	228.1
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l)	No contiene
Bicarbonatos (HCO_3) (mg/l)	269.5
Calcio (Ca^{2+}) (mg/l)	133.5
Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l)	96.5
Sodio (Na^+) (mg/l)	768.7
Potasio (K^+) (mg/l)	34.7
Nitratos (NO_3) (mg/l)	0.24
Nitritos (NO_2) (mg/l)	No contiene
Arsénico (As^{3+}) (mg/l)	0.1
pH (a 25º C)	7.6

ANEXO II
Graficas de Campo de Sondeos Eléctricos Verticales



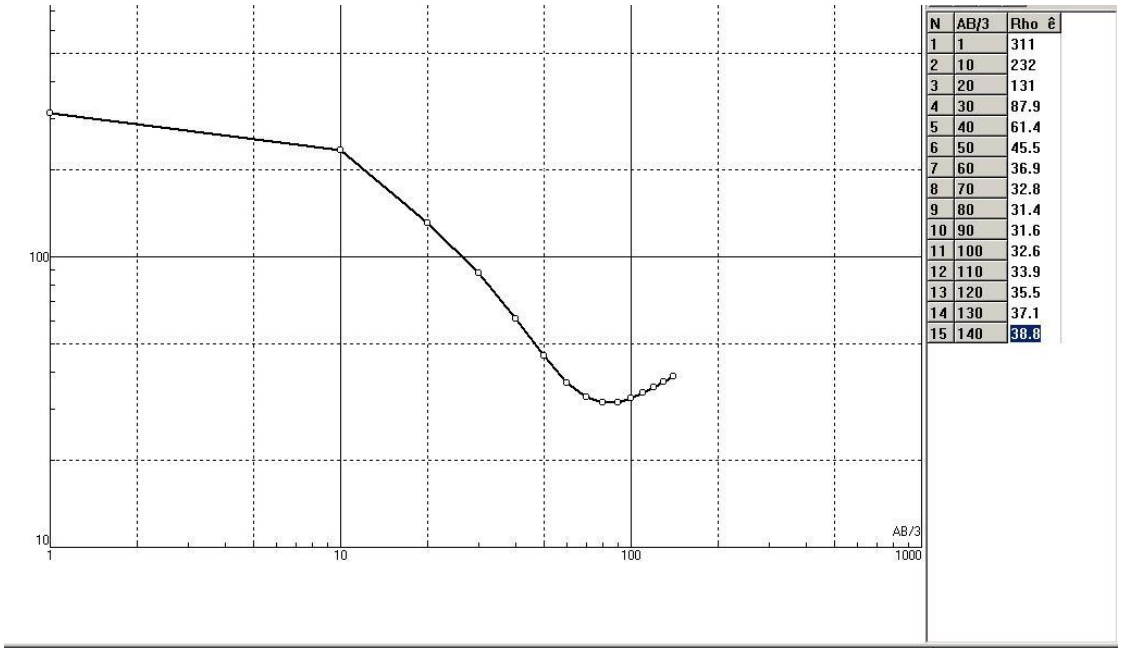
N	AB/3	Rho ê
1	1	180
2	10	87
3	20	72
4	30	73
5	40	111
6	50	94
7	60	87
8	70	92
9	80	103
10	90	99
11	100	98
12	110	100
13	120	100
14	130	104
15	140	106

SEV 1 Perfil 1



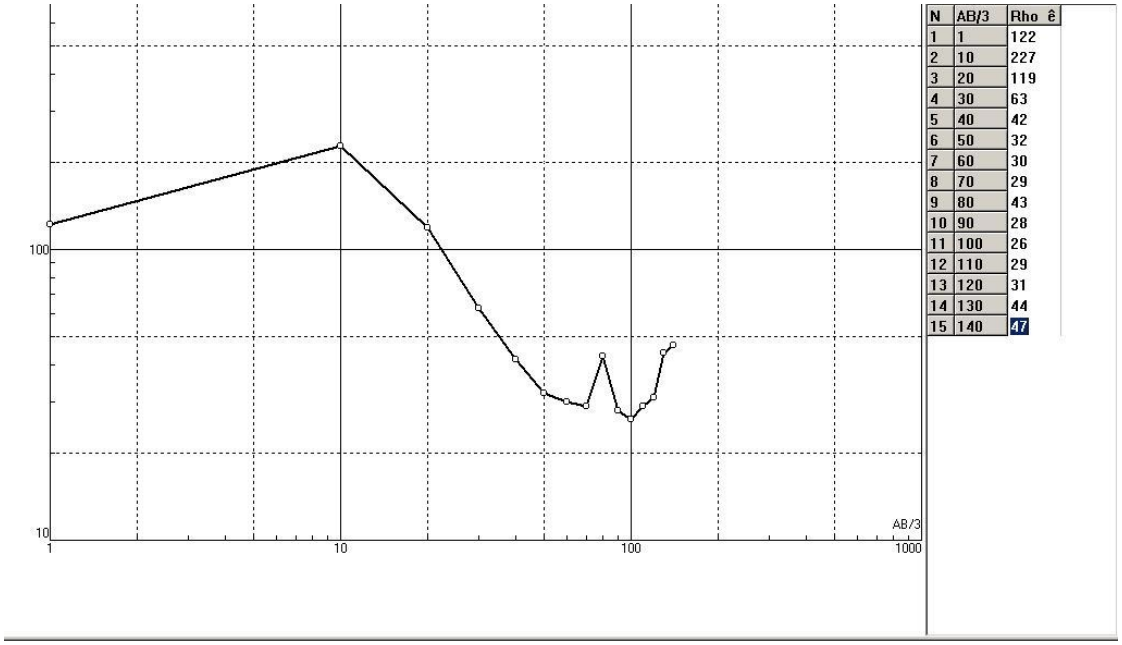
N	AB/3	Rho ê
1	1	100
2	10	206
3	20	182
4	30	137
5	40	120
6	50	99
7	60	85
8	70	77
9	80	64
10	90	62
11	100	63
12	110	64
13	120	67
14	130	83
15	140	102

SEV 2 Perfil 1



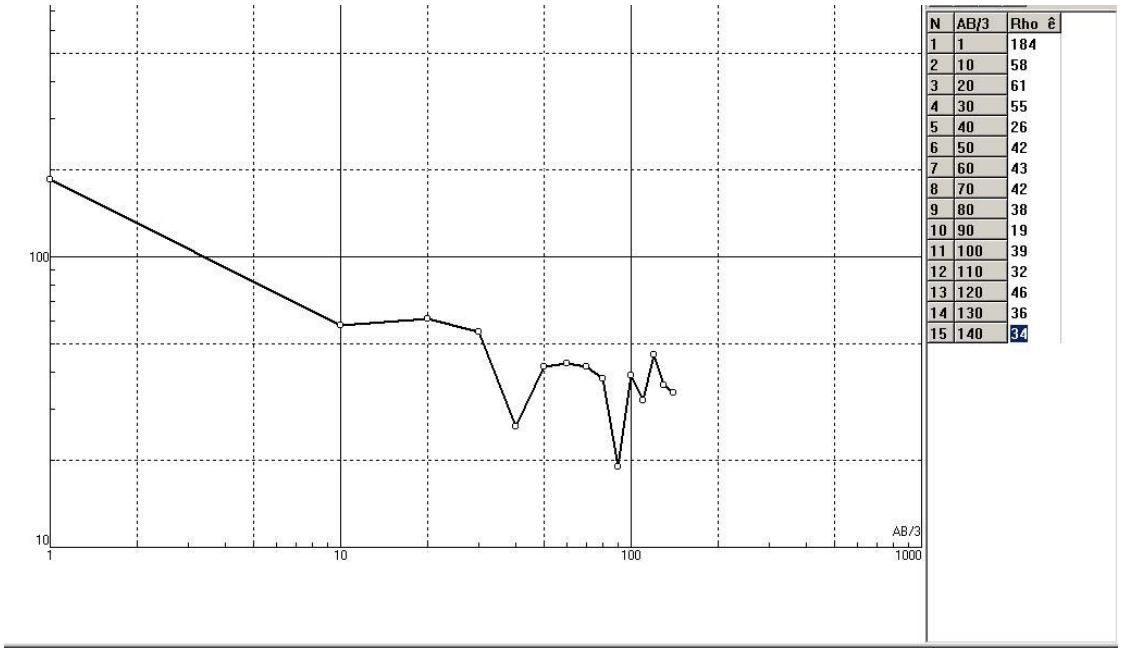
N	AB/3	Rho ê
1	1	311
2	10	232
3	20	131
4	30	87.9
5	40	61.4
6	50	45.5
7	60	36.9
8	70	32.8
9	80	31.4
10	90	31.6
11	100	32.6
12	110	33.9
13	120	35.5
14	130	37.1
15	140	38.8

SEV 3 Perfil 1



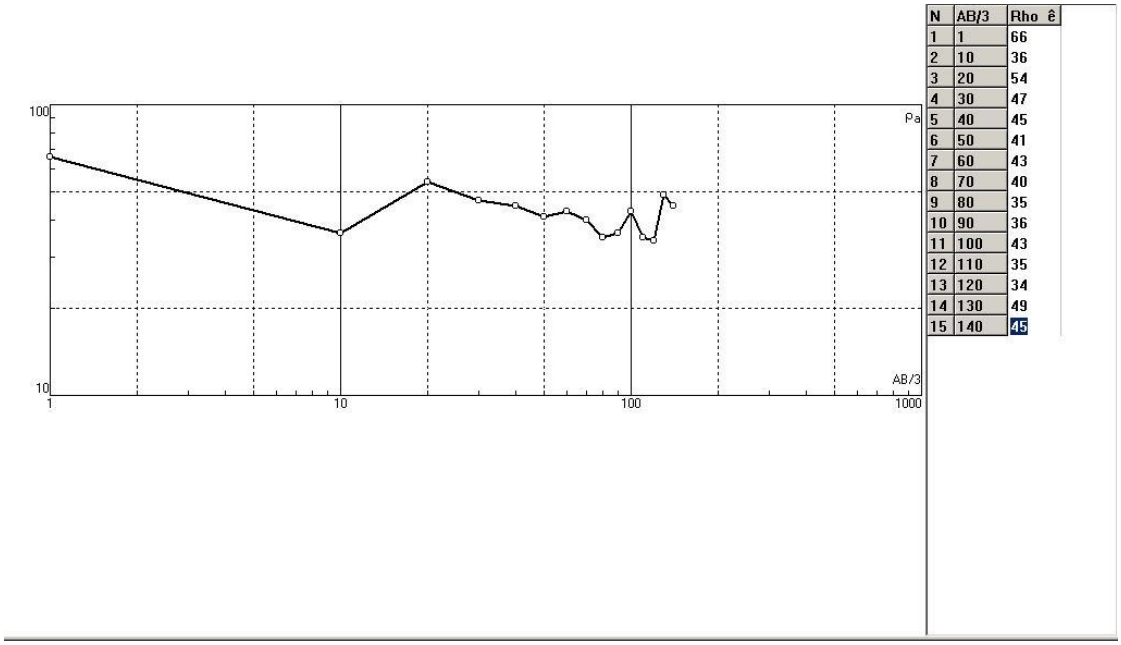
N	AB/3	Rho ê
1	1	122
2	10	227
3	20	119
4	30	63
5	40	42
6	50	32
7	60	30
8	70	29
9	80	43
10	90	28
11	100	26
12	110	29
13	120	31
14	130	44
15	140	47

SEV 4 Perfil 1



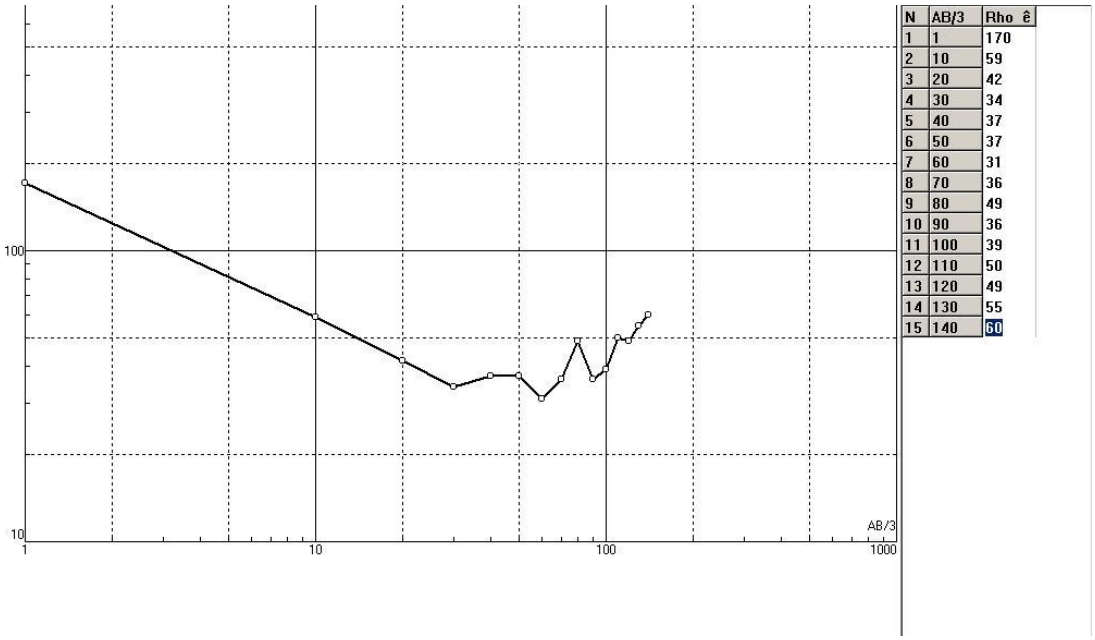
N	AB/3	Rho ê
1	1	184
2	10	58
3	20	61
4	30	55
5	40	26
6	50	42
7	60	43
8	70	42
9	80	38
10	90	19
11	100	39
12	110	32
13	120	46
14	130	36
15	140	34

SEV 5 Perfil 1



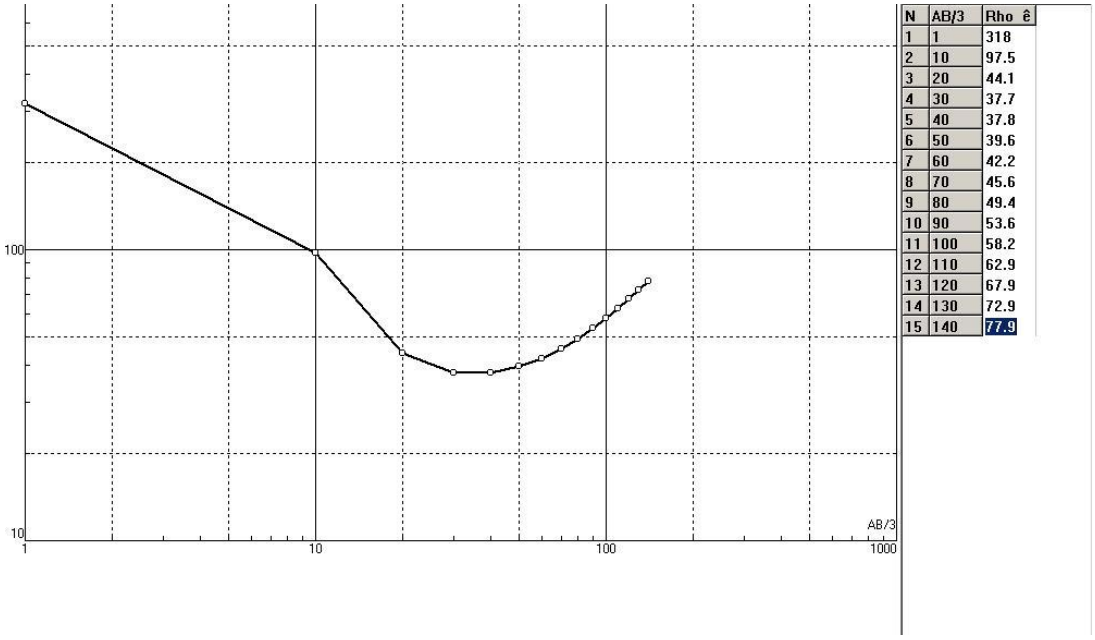
N	AB/3	Rho ê
1	1	66
2	10	36
3	20	54
4	30	47
5	40	45
6	50	41
7	60	43
8	70	40
9	80	35
10	90	36
11	100	43
12	110	35
13	120	34
14	130	49
15	140	45

SEV 6 Perfil 1



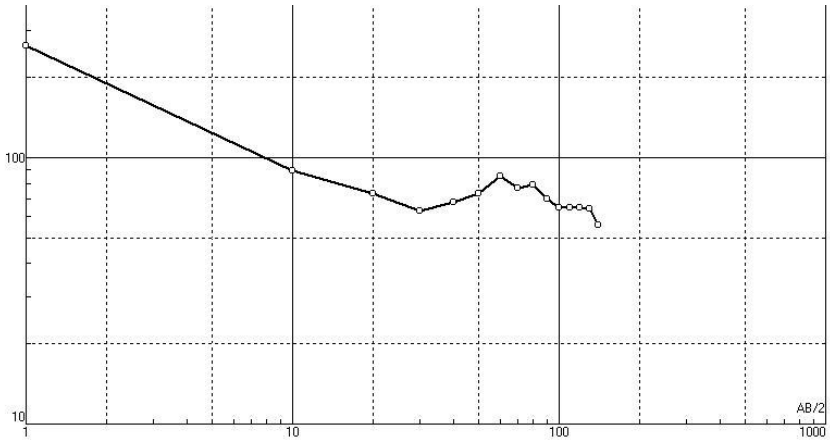
N	AB/3	Rho ê
1	1	170
2	10	59
3	20	42
4	30	34
5	40	37
6	50	37
7	60	31
8	70	36
9	80	49
10	90	36
11	100	39
12	110	50
13	120	49
14	130	55
15	140	60

SEV 7 Perfil 1



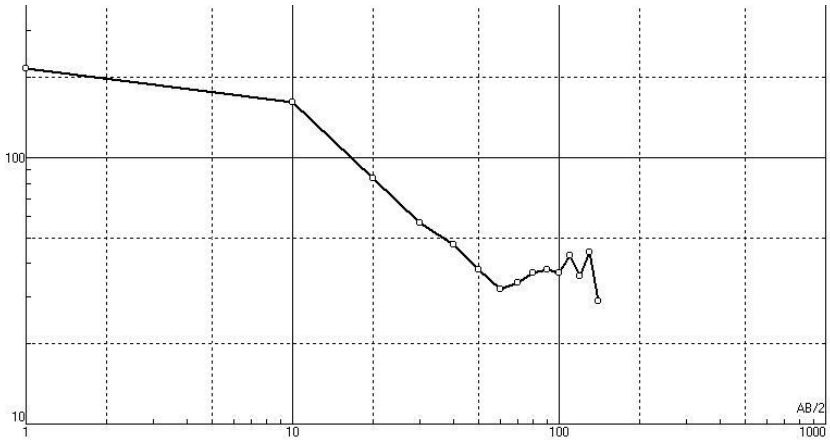
N	AB/3	Rho ê
1	1	318
2	10	97.5
3	20	44.1
4	30	37.7
5	40	37.8
6	50	39.6
7	60	42.2
8	70	45.6
9	80	49.4
10	90	53.6
11	100	58.2
12	110	62.9
13	120	67.9
14	130	72.9
15	140	77.9

SEV 8 Perfil 1



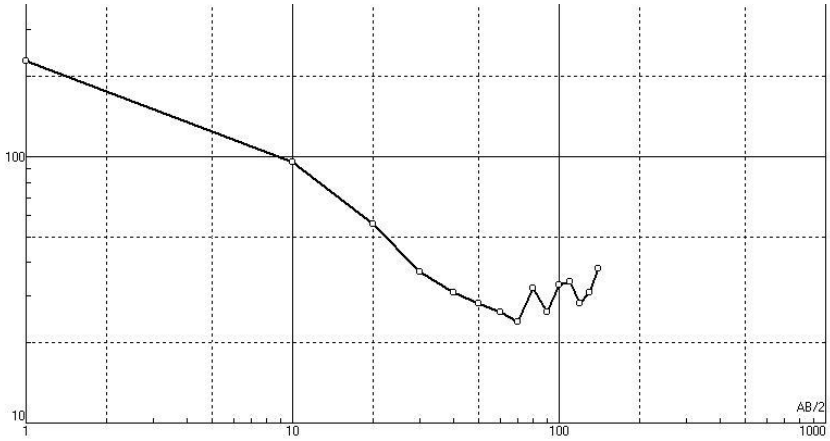
N	AB/2	Rho ê
1	1	264
2	10	89
3	20	73
4	30	63
5	40	68
6	50	73
7	60	85
8	70	77
9	80	79
10	90	70
11	100	65
12	110	65
13	120	65
14	130	64
15	140	56

SEV 1 Perfil 2



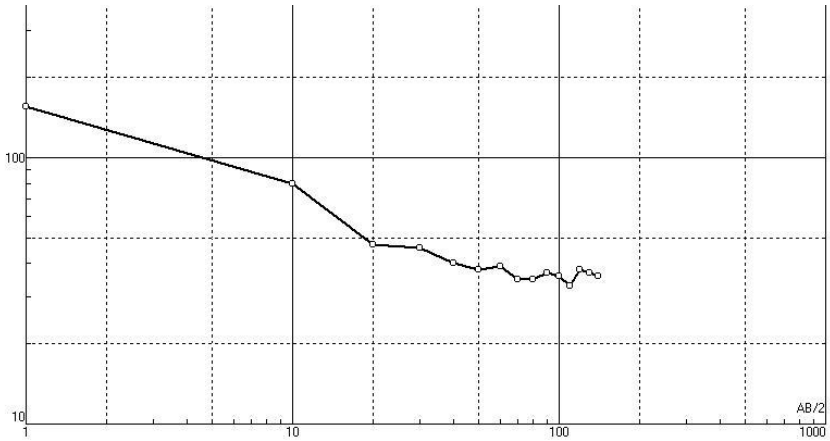
N	AB/2	Rho ê
1	1	217
2	10	161
3	20	84
4	30	57
5	40	47
6	50	38
7	60	32
8	70	34
9	80	37
10	90	38
11	100	37
12	110	43
13	120	36
14	130	44
15	140	29

SEV 2 Perfil 2



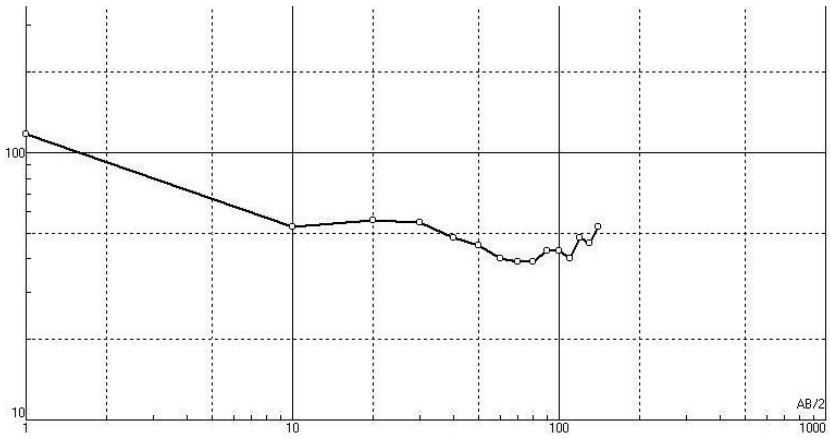
N	AB/2	Rho ê
1	1	228
2	10	95
3	20	56
4	30	37
5	40	31
6	50	28
7	60	26
8	70	24
9	80	32
10	90	26
11	100	33
12	110	34
13	120	28
14	130	31
15	140	38

SEV 3 Perfil 2



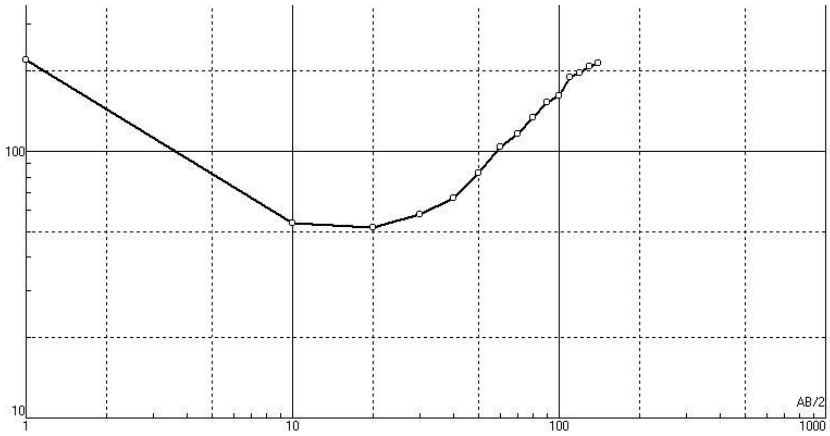
N	AB/2	Rho ê
1	1	155
2	10	80
3	20	47
4	30	46
5	40	40
6	50	38
7	60	39
8	70	35
9	80	35
10	90	37
11	100	36
12	110	33
13	120	38
14	130	37
15	140	36

SEV 4 Perfil 2



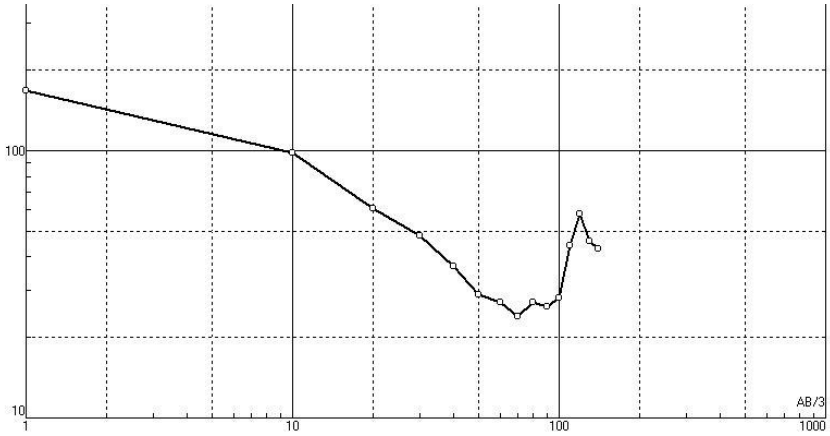
N	AB/2	Rho ê
1	1	117
2	10	53
3	20	56
4	30	55
5	40	48
6	50	45
7	60	40
8	70	39
9	80	39
10	90	43
11	100	43
12	110	40
13	120	48
14	130	46
15	140	53

SEV 5 Perfil 2



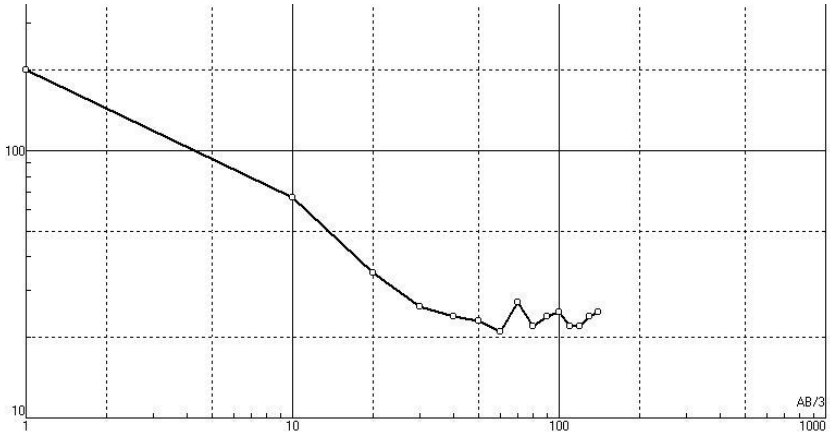
N	AB/2	Rho ê
1	1	221
2	10	54
3	20	52
4	30	58
5	40	67
6	50	83
7	60	104
8	70	116
9	80	134
10	90	152
11	100	161
12	110	189
13	120	196
14	130	208
15	140	214

SEV 6 Perfil 2



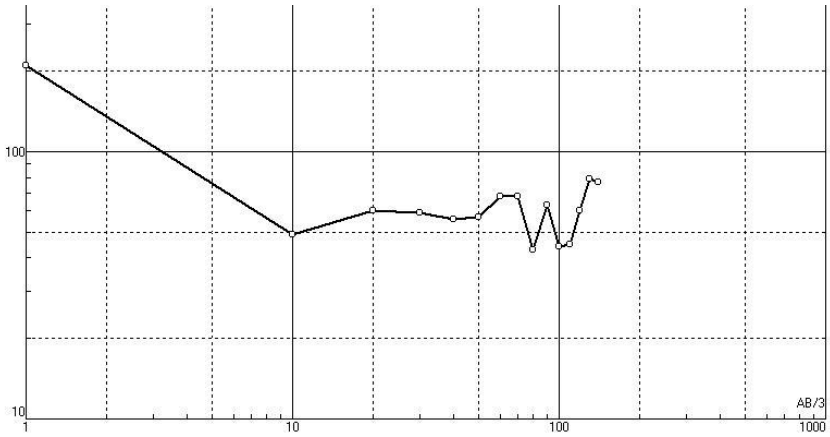
N	AB/3	Rho ê
1	1	167
2	10	98
3	20	61
4	30	48
5	40	37
6	50	29
7	60	27
8	70	24
9	80	27
10	90	26
11	100	28
12	110	44
13	120	58
14	130	46
15	140	43

SEV 1 Perfil 3



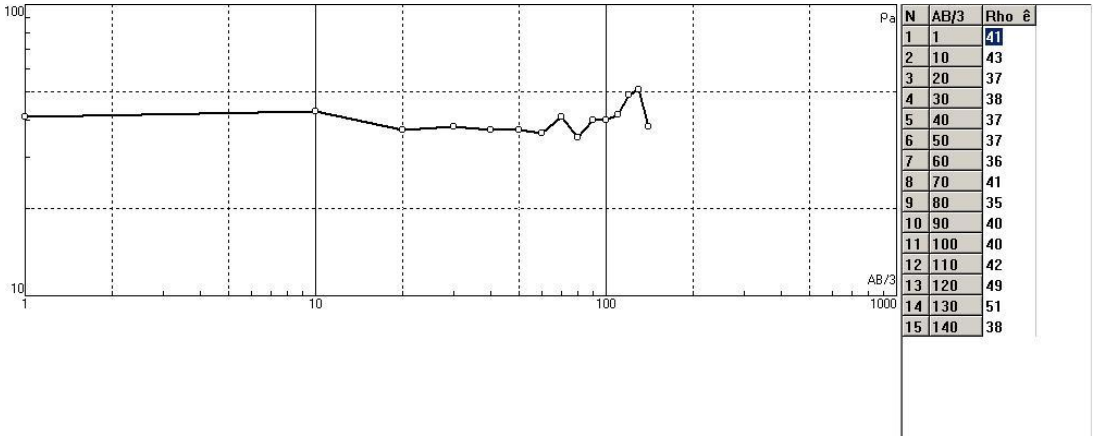
N	AB/3	Rho ê
1	1	200
2	10	67
3	20	35
4	30	26
5	40	24
6	50	23
7	60	21
8	70	27
9	80	22
10	90	24
11	100	25
12	110	22
13	120	22
14	130	24
15	140	25

SEV 2 Perfil 3

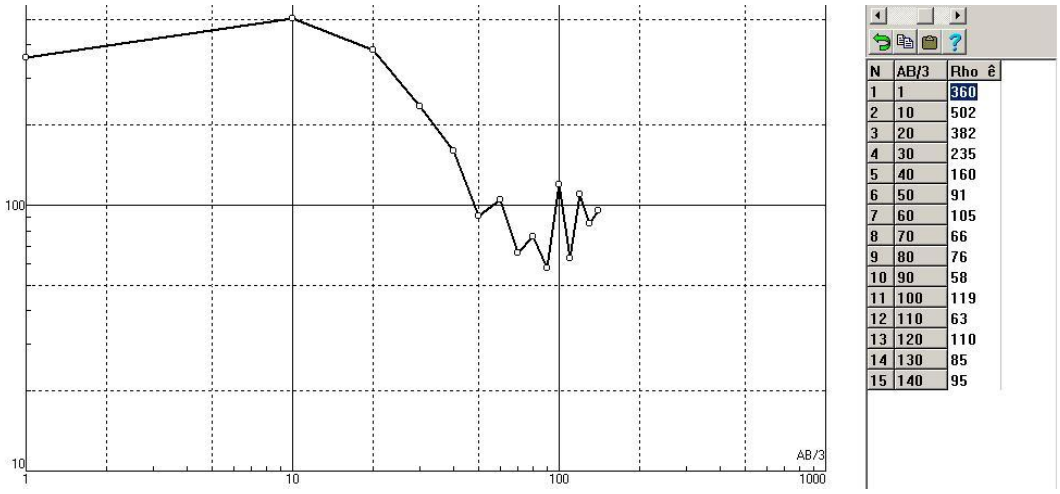


N	AB/3	Rho ê
1	1	211
2	10	49
3	20	60
4	30	59
5	40	56
6	50	57
7	60	68
8	70	68
9	80	43
10	90	63
11	100	44
12	110	45
13	120	60
14	130	79
15	140	77

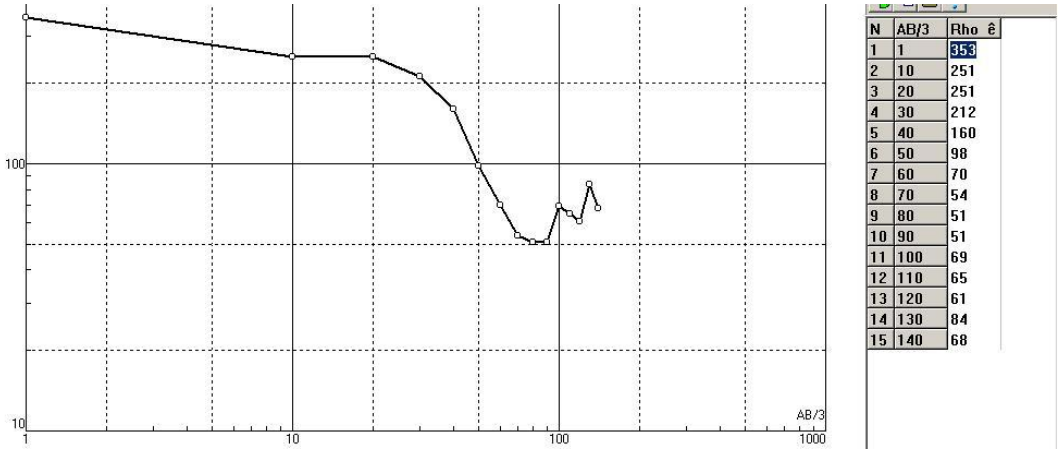
SEV 3 Perfil 3



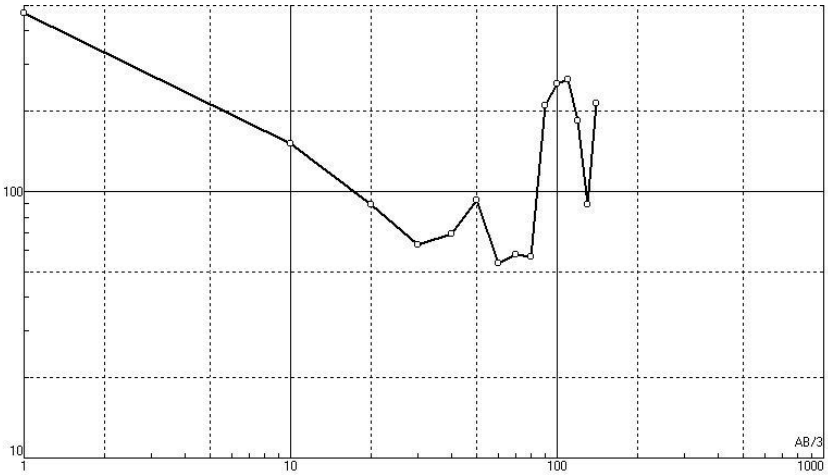
SEV 4 Perfil 3



SEV 5 Perfil 3



SEV 6 Perfil 3



N	AB/3	Rho ê
1	1	469
2	10	151
3	20	89
4	30	63
5	40	69
6	50	93
7	60	54
8	70	58
9	80	57
10	90	211
11	100	254
12	110	264
13	120	184
14	130	89
15	140	214

SEV 7 Perfil 3