

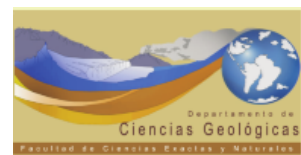
Estudio hidrogeológico en el área periserrana de la sierra La Barrosa, Balcarce, Provincia de Buenos Aires



Trabajo Final de Licenciatura
Autor: Nicolás Ariel Benítez
Director: Adrián Silva Busso



2018



El agua es un elemento esencial del desarrollo sostenible. Los recursos hídricos, y la gama de servicios que prestan, juegan un papel clave en la reducción de la pobreza, el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental. El agua propicia el bienestar de la población y el crecimiento inclusivo, y tiene un impacto positivo en la vida de miles de millones de personas, al incidir en cuestiones que afectan a la seguridad alimentaria y energética, a la salud humana y al medio ambiente (Naciones Unidas, Día Mundial del Agua 2018).

ÍNDICE

RESUMEN	Páginas 5 a 6
<u>1 INTRODUCCIÓN.....</u>	Páginas 7 a 10
1.1 Objetivos	
1.2 Ubicación	
1.3 Metodología	
<u>2 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</u>	Páginas 10 a 18
2.1 Descripción climática	
2.2 Suelos de Balcarce	
2.3 Flora y Fauna	
2.4 Estructura poblacional del Partido de Balcarce	
<u>3 GEOLOGÍA.....</u>	Páginas 18 a 45
3.1 Antecedentes geológicos	
3.1.1 Precámbrico	
3.1.2 Paleozoico	
3.1.2.1 Formación Balcarce	
3.1.3 Cenozoico	
3.1.3.1 Formación Barker (pre Pampeano)	
3.1.3.2 Formación Ensenada (Ensenadense o Pampeano inferior)	
3.1.3.3 Formación Buenos Aires (Bonaerense o Pampeano superior)	
3.2 Geología del área de estudio.....	Páginas 31 a 45
3.2.1 Descripción de afloramientos del área de estudio	
3.2.1.1 Afloramientos de rocas ígneas	
3.2.1.2 Afloramientos de rocas sedimentarias	
3.2.1.3 Descripción litológica en el área de estudio	
3.2.2 Estratigrafía del área de estudio	
3.2.2.1 Perfilaje de pozos	
3.2.2.2 Interpretación del perfilaje	
3.2.2.3 Correlación de perfiles en el área de estudio	
<u>4 GEOMORFOLOGÍA.....</u>	Páginas 46 a 54
4.1 Antecedentes geomorfológicos	
4.2 Geomorfología del área de estudio	
4.2.1 Sierras	
4.2.2 Franja eólica periserrana	
4.2.3 Planicie fluvio-eólica	
<u>5 Estructura y evolución tectónica del Sistema de Tandilia.....</u>	Páginas 54 a 58

<u>6 HIDROGEOLOGÍA</u>	Páginas 58 a 91
6.1 Antecedentes hidrológicos e hidrogeológicos	
6.2 Hidrogeología del área de estudio	
6.2.1 Balance hídrico	
6.2.1.1 Balance hídrico por el método de Thornwaite	
6.2.1.2 Cálculo de la ETR e infiltración anual por Turc-Coutagne	
6.2.1.3 Cálculo de infiltración por Goldschmidt	
6.3 Relación agua superficial y agua subterránea	
6.4 Hidrodinámica del área de estudio.....	Páginas 71 a 75
6.4.1 Parámetros hidráulicos en el área de estudio	
6.4.1.1 Cálculo de la porosidad total	
6.4.1.2 Cálculo de la permeabilidad	
6.4.1.3 Cálculo de la transmisividad	
6.5 Hidráulica de captaciones del área de estudio.....	Páginas 75 a 91
6.5.1 Ensayo de bombeo a caudal variable	
6.5.2 Ensayo de aforo	
6.5.3 Ensayo de recuperación	
6.5.4 Ensayo de bombeo a caudal constante (régimen variable)	
6.5.5 Análisis de resultados	
<u>7 HIDROQUÍMICA DEL ÁREA DE ESTUDIO</u>	Páginas 91 a 107
7.1 Hidroquímica de captaciones	
<u>8 RESERVAS, RECARGAS, TRÁNSITO Y DESCARGAS</u>	Páginas 107 a 113
8.1 Cálculo de reservas del acuífero	
8.2 Cálculo de recargas, tránsito y descargas del acuífero	
8.3 Recomendaciones sobre el consumo urbano del recurso	
<u>9 MODELO HIDROGEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO</u>	Páginas 114 a 117
<u>10 CONCLUSIONES</u>	Páginas 117 a 120
Agradecimientos.....	Página 121
Bibliografía.....	Páginas 122 a 131
Anexos.....	Página 132

RESUMEN

En el sudeste de la Provincia de Buenos Aires se encuentra el Sistema de Tandilia, un conjunto de sierras con elevaciones que apenas superan los 300 msnm y presentan una orientación NO-SE sobre el cual se han desarrollado centros urbanos de distinta magnitud. Entre estos se encuentra la ciudad de San José de Balcarce que, desde 1876, se desarrolla a orillas del arroyo Pantanoso extendiéndose con el pasar de los años hacia el sector periserrano de la sierra La Barrosa, donde se ha establecido el conocido Autódromo Juan Manuel Fangio.

Desde su fundación los pobladores han desarrollado distintas actividades agropecuarias aprovechando la calidad de los suelos y el clima húmedo presente en este lugar. Las primeras casas se establecieron cerca de la Estación Ferroviaria Balcarce (ex FFCC Gral. Roca) y cerca del curso de agua principal desde donde obtenían el recurso tan necesario. A medida que el sector urbano se fue desarrollando, aumentando su población y la demanda del recurso, fue necesario comenzar a desarrollar una gestión integrada de las aguas subterráneas y superficiales, priorizando el abastecimiento público.

Desde 1994 esta tarea se encuentra en manos de Aguas de Balcarce SA para brindar los servicios de abastecimiento y agua potable de la ciudad de Balcarce, donde actualmente se cuenta con 15 captaciones de agua diseñadas para extraer el recurso desde distintas profundidades del acuífero Pampeano. Pero debido al creciente consumo, principalmente en el verano, el municipio estableció la necesidad de realizar más perforaciones y obtener un mayor caudal de abastecimiento.

El presente trabajo se realizó con el objetivo de establecer las características hidrogeológicas del área periserrana de la sierra La Barrosa, lugar hacia donde se desarrolla el crecimiento demográfico de la ciudad de Balcarce y principal área de explotación del agua subterránea.

Como primera medida se realizó un relevamiento geológico e hidrogeológico del área, obteniendo muestras de suelo y afloramientos rocosos para describir la geología y geomorfología local con más detalle. Además, se realizó un censo de pozos, tanto de las captaciones municipales que actualmente explotan el acuífero como de captaciones particulares y fabriles, obteniendo datos hidrogeológicos e hidroquímicos para su posterior interpretación. Es importante destacar la información y predisposición que brindaron los representantes de la empresa Aguas de Balcarce.

Durante las campañas realizadas para este estudio se realizaron 2 ensayos de bombeo *in situ*, donde actualmente se han instalado las dos últimas captaciones de agua, que son importantes si se quiere establecer fehacientemente las características del acuífero y su comparación con antecedentes locales y regionales. El análisis del rendimiento de los ensayos de bombeo en las captaciones municipales permitió obtener valores de caudales máximos promedio de 111,0 m³/h, caudal específico medio de 6,0 m³/h, depresiones medias de 20,1 m, permeabilidad media de 3,2 m/día, transmisividad media de 125,1 m²/día y coeficiente de almacenamiento medio de 6,90.10⁻⁶.

El resultado de este estudio describe aguas bicarbonatadas sódicas y aptas para el consumo humano, que fueron muestreadas para analizar las principales especies químicas. Se reconocen valores de concentración de nitratos que superan los límites potables y que son atribuibles a la falta de gestión del recurso.

Los ensayos realizados en los pozos que actualmente explotan el agua subterránea definen caudales máximos de explotación de $111 \text{ m}^3/\text{h}$ y rendimientos medios de 84%, que son aconsejables en futuras captaciones.

El acuífero Pampeano en el área de estudio presenta un esquema hidrogeológico de recarga regional, aunque se reconocen aportes locales debido a las abundantes precipitaciones. Las reservas totales se estimaron en $539,4 \text{ Hm}^3$ y las reservas efectivas en $37,4 \text{ Hm}^3$ capaces de sustentar el consumo actual, tanto en el sector urbano como rural, y la futura demanda del recurso.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal cumplir con los requisitos formales que exige el Departamento de Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, para el otorgamiento del título de Licenciado en Ciencias Geológicas. Los estudios se orientaron en caracterizar la hidrogeología superficial y subterránea del área periserrana ubicada entre la sierra La Barrosa y la ciudad de Balcarce. Lo que permitirá establecer los parámetros hidrogeológicos tanto de la zona urbana como de las distintas explotaciones rurales próximas.

La mayor necesidad del recurso hídrico a futuro presenta un escenario favorable para la realización de diversos estudios hidrogeológicos que pueden emplearse a futuro en la prospección y explotación del recurso.

1.2 Ubicación

La zona de trabajo se encuentra ubicada en los alrededores de la ciudad de San José de Balcarce, en el sureste de la provincia de Buenos Aires, a 412km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Comprende el área periserrana que se extiende desde la sierra La Barrosa (334 msnm), ubicada en el límite sur del área urbana, hasta el sector urbano. Se extiende entre los 37°48'01,32"S y 37°52'57,12"S de latitud y los 58°13'01,02"O y 58°19'04,02"O de longitud, comprendiendo un total de 81 km² (ver figura 1).

Se accede a la localidad a través de la ruta nacional N°226 (Mar del Plata – Tandil – General Villegas) y el cruce con la ruta provincial N°55. Mientras que el acceso principal a la Sierra La Barrosa se realiza desde la intersección de las calles 40 y 55 (Camino El Mirador), en el extremo sur de la ciudad de Balcarce. Desde ese punto se continúa por un camino angosto de tierra hasta El Mirador desde donde se llega a pie a la cima de la sierra.

También se analizaron distintos trabajos, realizados por el INTA Balcarce, sobre los suelos, el clima, flora y fauna de la zona de estudio.

Al acceder al lugar se realizó un relevamiento geológico del área determinando las principales unidades de interés hidrogeológico (ver figura 1), así como la ubicación de afloramientos rocosos, vegetación y relieve característico de la zona periserrana bajo estudio. También se tomaron distintas muestras de roca características para su análisis en gabinete. Además se realizó un relevamiento geomorfológico para poder establecer las distintas características de cada sector (ver figura 42, capítulo 4.2)

Se levantó un perfil en una cantera próxima a la Sierra La Barrosa (ver Figura 1). Siendo este uno de los lugares donde se obtuvieron muestras para su posterior estudio en gabinete.

Además, se realizaron dos perforaciones, tanto en el área periserrana próxima como en el extremo distal del área de estudio, en donde se obtuvo información geológica del subsuelo, así como de los acuíferos realizando ensayos para analizar la respuesta hidráulica del acuífero. También se realizó un censo de pozos tomando información de más de 20 puntos de control, entre los que se cuentan pozos de bombeo, piezómetros, molinos y pozos domiciliarios urbanos y rurales.

El mapa topográfico de base que se presenta en este trabajo se elaboró mediante la digitalización de las 4 hojas topográficas a escala 1:50.000; N°3757-31-1 Cinco Cerros, N° 3757-31-2 Sierra Bachicha, N° 3757-31-3 Balcarce y N° 3757-31-4 Sierra del Volcán, editadas por el Instituto Geográfico Militar, actual Instituto Geográfico Nacional o IGN, en conjunto con el Ejército Argentino (Sistema Geodésico Castelli 1937).

Empleando programas tipo CAD, con el fin de confeccionar un mapa base, se realizaron las siguientes modificaciones:

- Se compaginaron las 4 hojas topográficas, al tamaño de trabajo para lograr mejor precisión.
- Se digitalizaron en pantalla todas las hojas.
- Se digitalizaron todas las curvas de nivel con equidistancia de 5 m (Cinco Cerros, Sierra Bachicha y Balcarce) y 10 m (Sierra del Volcán).
- Se digitalizaron arroyos, traza del ferrocarril, rutas 55 y 226 y límite de amanzanamiento (sector urbano).
- Se compensaron las diferencias observadas en los empalmes de hojas vecinas.
- Se digitalizó una imagen satelital del área de mapeo, para corregir la información de arroyos, traza de ferrocarril y rutas 55 y 226, así como del actual límite de amanzanamiento (sector urbano).
- Se definió una aceptable precisión en la comparación de los trazados de rutas y ferrocarril, aunque menor en el caso de cursos fluviales, al comparar las hojas y la imagen satelital.
- Se convirtieron las coordenadas del Sistema Geodésico Castelli al Sistema Geodésico Campo Inchauspe (Faja 6).
- Se agregaron los puntos de ubicación de los pozos, lugares de muestreo y sitios de interés.

Combinando esta información cartográfica con la obtenida en los distintos puntos de muestreo y medición que se realizaron en el área de estudio se pudo comprender los distintos parámetros que caracterizan al acuífero bajo estudio.

Durante las campañas realizadas en este trabajo se obtuvo información de dos ensayos de bombeo *in situ*, así como de los respectivos perfilajes de pozo y análisis de perforación.

Combinando la información antecedente y la obtenida en las distintas campañas se realizaron distintos análisis para obtener las características hidrogeológicas del acuífero en la zona de estudio. Finalmente, se definió el mapa hidrogeológico que describe los resultados obtenidos.

2 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Descripción climática

El Partido de San José de Balcarce se sitúa dentro del Distrito Austral de la Provincia Fitogeográfica Pampeana, la cual se comprende las llanuras del este de la República Argentina entre los grados 31° y 39° de latitud sur, aproximadamente (cubre el sur de Entre Ríos, Santa Fe y Córdoba, casi toda Buenos Aires y el este de La Pampa). Al norte, oeste y sur limita con la Provincia Fitogeográfica del Espinal, al este y sureste con el Océano Atlántico (Cabrera, 1976).

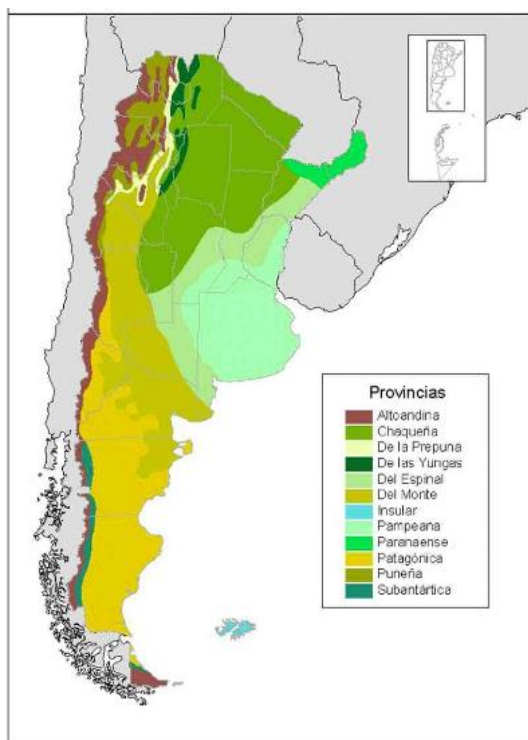


Figura 2. Provincias Fitogeográficas de Argentina (Cabrera, 1976).

El sector suroeste comprende las sierras y ondulaciones interserranas y pedemontanas del Sistema de Tandilia donde se destacan afloramientos rocosos y pedemontanos formados por sedimentos cenozoicos periserranos, con pendientes atenuadas a medida que se alejan de las sierras, descendiendo hacia el Océano Atlántico, al sureste, superando zonas barrancosas o medanosas. Las características climáticas regionales del régimen hídrico muestran una distribución irregular de las precipitaciones durante el año, siendo el invierno la estación menos lluviosa. La precipitación anual media va de 1100 mm en el sector norte a 550 mm en el suroeste (Suero et al., 2008). Generalmente se registran balances hidrológicos anuales equilibrados o con ligeros excesos, aunque

en meses de alta demanda atmosférica (Enero) ocurren deficiencias hídricas entre 20 y 50 mm en 5 de 10 años y entre 30 y 100 mm en 2 de 10 años (Damario y Pascale, 1988). Según Thornthwaite el clima se clasifica como subhúmedo-húmedo (ACRHSRA, 2010).

A continuación, se muestran los distintos valores promedios climatológicos que se midieron en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Balcarce, ubicado en sector noreste del área de estudio (RP 226, km 73,5), durante el período 1971-2016.

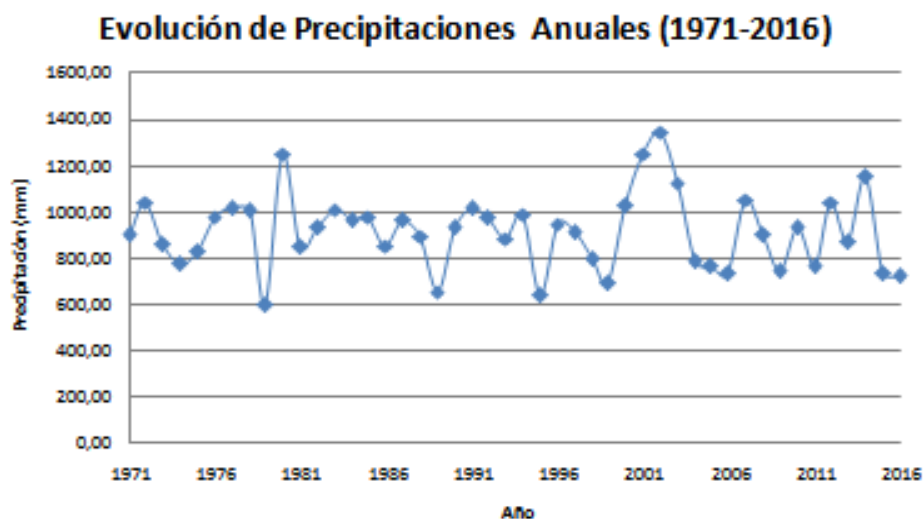


Figura 3. Precipitación total anual registrada en la EEA del INTA Balcarce.

Se reconocen precipitaciones que varían entre 600 y más de 1300 mm con promedio de 912 mm en el total anual, siendo los meses de Octubre a Enero los más lluviosos y de Junio a Agosto los más secos. Además, se han registrado lluvias extremas que alcanzan los 154 mm.

La temperatura promedio anual registrada durante el período analizado indica un leve aumento del promedio a partir del año 2006 y hasta la actualidad. Los promedios mensuales muestran que los meses de Diciembre a Febrero son los más calurosos, mientras que Junio a Agosto son los meses más fríos. Se registran temperaturas promedio de 14,18 °C con días extremos entre 0,2 y 30,9 °C de temperatura promedio.

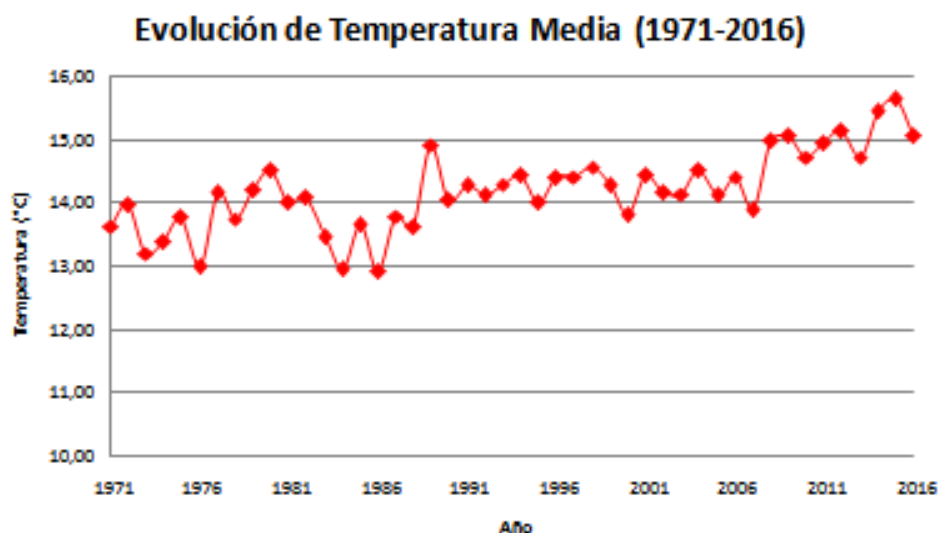


Figura 4. Precipitación total anual registrada en la EEA del INTA Balcarce.

Las condiciones climáticas son un importante condicionante a la hora de determinar la infiltración y recargas de los acuíferos locales, así como en la elección de los distintos tipos de cultivos. Diversos estudios se han realizado para comprender como influyen los distintos factores climáticos que afectan a las etapas fenológicas de cada cultivo y su rendimiento ante distintas situaciones climáticas (Havlin et al., 1990; Gardiol et al., 1997; Della Maggiora et al. 1998; Echarte et al., 1998; Andrade y Sadras, 2000; Elichiry, 2002; Zalba y Villamil, 2002; Righetti y Gassmann, 2013; entre otros).

Tricart (1973) realizó distintas mediciones de la proveniencia de los vientos durante el período 1941-1950 (Tabla 1), en lo que se observa una predominancia del sector norte y noroeste.

Mes / Direcciones	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Calma
Enero	139	142	90	110	155	100	70	165	29
Febrero	143	171	69	119	100	116	82	155	45
Marzo	149	172	66	124	120	128	64	117	60
Abril	169	91	28	77	82	137	87	185	144
Mayo	148	91	26	52	70	129	101	177	206
Junio	126	72	35	49	74	143	123	186	192
Julio	159	126	22	43	75	158	134	148	135
Agosto	122	143	42	85	95	169	110	91	143
Septiembre	130	166	59	72	131	154	84	140	64
Octubre	163	183	48	81	109	142	70	162	42
Noviembre	178	140	56	98	139	114	74	169	32
Diciembre	142	148	62	98	151	106	83	185	25
Promedio Anual	147	137	50	84	108	133	90	157	93

Tabla 1. Medición de proveniencia de vientos en la zona de trabajo (editado de Tricart, 1973).

2.2 Suelos de Balcarce

Los suelos del Partido de San José de Balcarce presentan un gran interés por su uso agrícola para diversos cultivos. Por esto distintos autores han realizado estudios para determinar los tipos de suelo.

- Ferreras et al. (2000) describen la asociación de suelos desarrollados a partir de materiales de textura franco arenosa a franco limosa y la denominan Gran Grupo Natralbol-Natracuol.
- Suero et al. (2008) describen que los suelos regables pertenecen al orden de los Molisoles, Gran Grupo Argiudoles o Paleudoles, desarrollados sobre sedimentos loésicos, bajo régimen údico-térmico.
- Righetti y Gassmann (2013) describen la asociación de suelos altos, que se presentan en zonas con relieve normal a normal subnormal, como Argiudoles con varios subgrupos de los cuales los más importantes son Argiudoles típicos y Argiudoles petrocálcicos.

Diovisalvi et al. 2006 indican que los sistemas de labranza alteran la dinámica de la materia orgánica (MO) del suelo. La labranza convencional (LC) crea condiciones para que se produzca una rápida descomposición de los residuos de cosecha y de la MO nativa. Bajo siembra directa (SD) ocurre lo contrario, produciéndose una acumulación de MO (Havlin et al. 1990) o una reducción de la tasa de pérdida en los primeros centímetros del perfil. Por otro lado, si bien la merma de la MO es directamente proporcional a la agresividad de la labranza, depende además del retorno de carbono al suelo, ya que cuanto mayor es la cantidad de carbono devuelto menores serán las pérdidas de MO (Studdert y Echeverría 2000).

Cabria et al. (2005) agregan que, cuando la materia orgánica es el agente estabilizador principal y la estructura de los agregados es jerárquica, el mecanismo de formación de los agregados conduce a recluir el carbono orgánico en macroagregados estables.

Tomás et al. (2005) reconocen, en el Partido de Balcarce, distintos tipos de suelos; los suelos bien drenados ocupan el 46,2% de la superficie, 7% corresponden a los suelos someros y 39,2% a los moderadamente profundos y profundos. Un 1,95% de la superficie del partido presenta afloramientos rocosos, un 0,51% son lagunas y el 0,33% a áreas misceláneas (sectores urbanos). También describen que los suelos que presentan algún grado de exceso de humedad y/o sodicidad ocupan el 51% de la superficie del Partido, entre los que el 28,5% corresponde a suelos alcalinos e hidromórficos, el 13,7% a suelos con leve a moderado grado de alcalinidad y exceso de humedad y sólo el 8,8% a suelos con algún grado de hidromorfismo pero sin sodicidad ni salinidad.

Otra información disponible es el Índice de Productividad, el cual se interpreta como una proporción del rendimiento máximo potencial de los cultivos más comunes de la región, ecotípicamente adaptados, bajo un nivel de manejo medio a alto, caracterizado por el empleo de maquinarias, semillas híbridas, agroquímicos y escaso uso de fertilizantes (teniendo en cuenta factores climáticos).

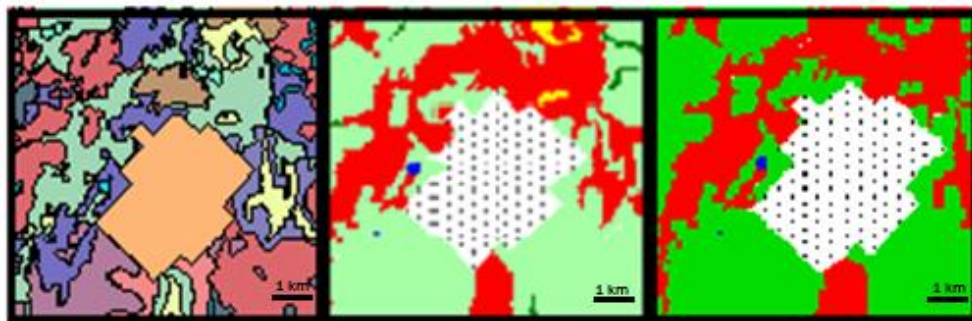


Figura 5. Tipos de suelos, Agua útil y Aptitud de riego en el área de estudio (editado de ACRHSRA, 2010).

En el Atlas digital Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina (ACRHSRA, 2010) se definen para el área de este estudio tres sectores principales (ver figura 5):

- Sierras: suelos someros, levemente hidromórficos y aptos para riego.
- Franja eólica periserrana: suelos moderadamente profundos a profundos (según la distancia a la sierra), alcalinos e hidromórficos y, en su mayoría, aptos para riego.
- Planicie fluvioeólica: suelos profundos, alcalinos e hidromórficos y con menor aptitud para riego.

Las posibilidades de desarrollo que posee el área, ya sea desde la producción agrícola-ganadera, la explotación forestal o minera, están estrechamente relacionadas con el conocimiento de los recursos renovables y no renovables de la región.

El uso del suelo está restringido debido a las limitaciones de profundidad de los suelos (presencia de tosca o roca a menos de 1,5m de profundidad) y a las pendientes pronunciadas que los exponen a continuos procesos de erosión hídrica asociados a precipitaciones locales. Aunque la actividad agrícola-ganadera, tanto como la urbanización, han modificado la vegetación natural de la región aprovechando la disponibilidad de fuentes hídricas superficiales y subterráneas de buena calidad tanto para riego como para bebida animal (abrevaderos).

En el Partido de Balcarce predomina la agricultura que se realiza en siembra directa (SD), por lo que se debe tener un mayor entendimiento del impacto de esta modalidad de labranza sobre las propiedades físicas del suelo, y en qué medida este cambio pueda afectar la producción de los cultivos.

Los estudios realizados por Álvarez y Steinbach (2006) sobre los suelos de Balcarce los clasifican como Paleodol Petrocálcico y Argiudol Petrocálcico, describiendo la estabilidad estructural, que caracteriza la estabilidad del sistema de poros edáfico y, por lo tanto, afecta a la infiltración del agua en el suelo. Además, describen que la siembra directa aumenta la densidad aparente y la dureza del suelo y reduce su porosidad, pero estos efectos no llegan a niveles de riesgo agronómico. Por lo que la estabilidad estructural y la infiltración se incrementan significativamente bajo siembra directa, permitiendo un mayor almacenaje de agua del suelo para los cultivos. Esto determina que los suelos bajo este manejo sean menos susceptibles a la erosión hídrica y “planchado” y, en consecuencia, puedan almacenar mayor cantidad de agua para los cultivos (Álvarez y Steinbach, 2006).

Tosi (2015) describe que las principales producciones agropecuarias de la zona combinan la actividad agrícola (trigo, soja, girasol y maíz, así como hortalizas y frutos) y la actividad ganadera

(bovinos para carne y lácteos, avicultura). Sin embargo, la evolución de los sistemas de producción agropecuarios del sureste bonaerense muestra cambios en la combinación de actividades productivas. Estos sistemas se caracterizan por tener, de la superficie operada, el 80-90% ocupado con cultivos, mientras que el resto se utiliza en actividades ganaderas bovinas (primordialmente de Ciclo Completo). Como se observa en la figura 6, en los sistemas se produjo una disminución de la superficie de cultivos de fina (el trigo es reemplazado por la cebada cervecera) y un aumento de los cultivos de gruesa (la soja desplaza al girasol).

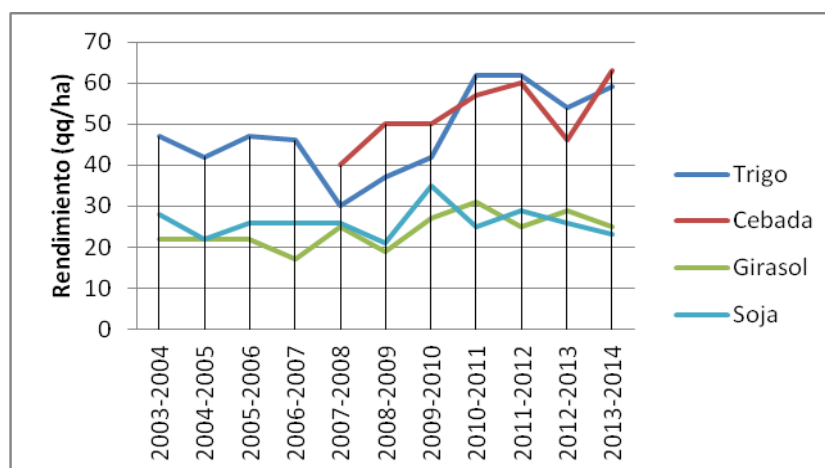


Figura 6. Elaboración propia en base a datos fuente (Tosi, 2015).

Por lo tanto, es necesario el conocimiento del comportamiento de cada cultivo en particular frente al consumo de agua para la aplicación de balances hídricos. El patrón de extracción de agua de los cultivos depende del tipo de suelo, contenido de humedad y patrón de distribución de raíces (Gardioli et al., 1997). Distintos estudios se han realizado tanto sobre los cultivos de papa (Mosciaro, 2004), de maíz y soja (Gardioli et al. 1997; Andrade y Sadras, 2000; Della Maggiora et al. 1998; Echarte et al., 1998, entre otros).

Estos trabajos son una pequeña parte de los tantos estudios fenológico-climáticos asociados a los cultivos que se realizan en el área de estudio, impulsados por distintas instituciones a nivel local, nacional e internacional (entre las que se destaca el INTA Balcarce), lo que demuestra el interés creciente de distintos sectores.

La demanda de materia prima para el procesamiento industrial se incrementa rápidamente a partir de la instalación de plantas elaboradoras de papa pre-frita con destino al mercado interno y externo. Este destino resulta especialmente importante en el sudeste bonaerense por la presencia de importantes firmas procesadoras (por ejemplo, la empresa McCain).

2.3 Flora y Fauna

El Distrito Fitogeográfico Pampeano Oriental se extiende desde el norte y este de Buenos Aires, hasta Tandil y Mar del Plata. Su límite austral lo forman las cadenas de sierras que nacen en el cabo Corrientes y llegan hasta el oeste de Olavarría (Cabrera, 1976).

Bertonatti y Corcuera (2000) describen a la provincia de Buenos Aires como integrante de la Ecoregión Pampas. Se caracterizan por la ausencia de árboles siendo la fisonomía dominante la de pastizal, de altura media y alta. Se presentan excepcionalmente bosques caducifolios con un fuerte

control edáfico o topográfico sobre suelos calcáreos, médanos y bordes de lagunas. La vegetación herbácea es predominante y carece de endemismos importantes. La comunidad estable es la pradera de flechillares; limitantes edáficas pueden dar lugar a pastizales halófitos (jumales) y pajonales anegadizos (ACRHSRA, 2010).

Diversos estudios (Zalba y Villamil, 2002; Alonso et al., 2009) realizaron distintas observaciones en el partido de Balcarce, donde una de las sierras con mayor impacto antrópico es La Barrosa, cuya ladera oeste es sede del autódromo “Juan Manuel Fangio” y presenta sectores densamente forestados con especies exóticas, lo cual modifica considerablemente la composición florística original. Además, tanto la cima como los faldeos son pastoreados y objeto de actividades deportivas, turísticas y extractivas, que también pueden afectar la composición florística y poner en riesgo los recursos nativos de importancia por su valor actual o potencial.

Las principales especies observadas son *Mimosa rocae* (zarzaparrilla), *Lathyrus pubescens* var. *pubescens* (arvejilla chica o arvejilla enana), *Sommerfeltia spinulosa* (flor blanquita), *Pavonia cymbalaria* (malva de la sierra o malvavisco), *Gomphrena perennis* (moco-yuyo), *Achyrocline satureioides* (marcela, marcela hembra, virará, yatei caá), *Eupatorium subhastatum* (pilarcito o yerba del Charrúa), *Senecio pulcher* (margarita del bañado), *Hysterionica pinifolia* y *Eupatorium tanacetifolium*.



Figura 7. Fotografías representativas de la flora descrita por Alonso et al (2009).

La fauna autóctona se encuentra desplazada por la intensa modificación del hábitat. En el área de estudio se reconoce una importante variedad de aves, asociada al microclima local. También son importantes los tucos, peludos, cuises, zorro gris, zorro de las pampas, entre otros (ACRHSRA, 2010).

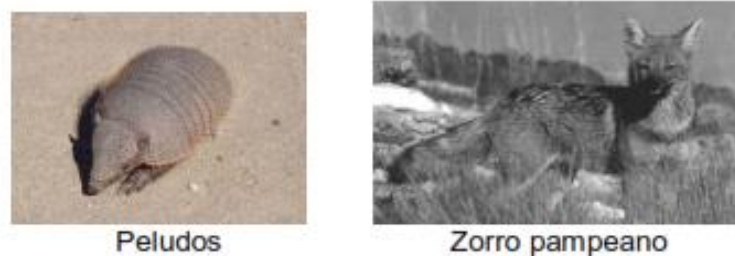


Figura 8. Fauna característica del área de estudio (ACRHSRA, 2010).

2.4 Estructura poblacional del Partido de Balcarce

El partido de San José de Balcarce, fundado el 22 de Junio de 1876, tiene una población de 43.823 habitantes (INDEC, Censo 2010) de los cuales el 83,6% reside en la ciudad de Balcarce, mientras que el 16,4% reside en distintos parajes cercanos a la ciudad cabecera del partido (Parajes San Agustín, Los Pinos, Napaleufú, Villa Laguna La Brava y Ramos Otero), asociadas a Explotaciones Agropecuarias Productivas o EAPs (es decir, que mantienen características rurales). (ZAH III).

Partido	Localidad / Paraje	Población Total
Balcarce	Balcarce	35.150
	Rural Dispersa (*)	5.243
	San Agustín	539
	Los Pinos	464
	Napaleufú	377
	Villa Laguna La Brava	174
	Ramos Otero	92

Tabla 2. Distribución poblacional del Partido de Balcarce (editado de ZAH III Balcarce).

(*) Rural Dispersa: población que reside en la zona pero no pertenece a ninguna localidad/paraje.

Se reconoce que el 65% de la población comprende el rango de edades entre 15 y 64 años, entre los cuales el 86,6% ha completado estudios primarios y el 5% estudios universitarios o terciarios (INDEC, Censo 2010). Además de la población que reside en las EAPs, el 39,4% de la fuerza laboral (población mayor de 14 años) estaba inactiva y el 41,8% estaba empleada, desarrollando sus actividades principalmente en el sector de Servicios, Industria o Construcción y en el sector primario (Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca).

Es importante destacar la estructura productiva regional ya que Balcarce se ubica en una posición de privilegio por su cercanía a importantes centros de consumo, de provisión de insumos y polos agroindustriales (Tandil y Mar del Plata), así como especialmente a los puertos de Quequén, Bahía Blanca y Buenos Aires (Tomás et al., 2005). Así mismo, dispone de una cantidad y variedad de servicios en salud, educación y financieros (se destaca la cantidad de profesionales públicos y privados que brindan asesoramiento en distintas áreas, entre las que se destaca la producción agropecuaria).

La infraestructura de transporte se compone de un importante sistema de transporte vial, ferroviario y aéreo, permitiendo un tráfico ágil de productos, insumos y personas. Se destacan la Ruta Nacional 2 y las Rutas Provinciales 55, 77, 88 y 226.

El acceso ferroviario al Partido de Balcarce se realiza por medio del ramal Ayacucho-Necochea del Ferrocarril General Roca S.A. (no se utiliza desde 1982), uniendo los principales polos productivos del sur y sureste de la Provincia de Buenos Aires. Este ramal conecta al Partido de Balcarce con el importante puerto cerealero y agroexportador de Quequén (Partido de Necochea).

La estructura industrial es liderada por las industrias agroalimentarias radicadas en la zona, principalmente en las ciudades de Tandil y Mar del Plata (chacinados, productos lácteos, apicultura, molinos harineros y frigoríficos, entre otros). El Partido de Balcarce forma parte de la zona ecológica homogénea denominada “Mixta Papera” en donde los cultivos se realizan en explotaciones con dimensiones de entre 50 y 250ha, trabajada principalmente bajo el régimen de propiedad (por sus propios dueños), cubriendo aproximadamente el 38% de la superficie del partido (descontando las áreas urbanas y lugares no aptos para aplicación de riego como afloramientos rocosos y suelos con problemas de drenaje y erosión). Se destaca la presencia de una importante empresa procesadora de papas (Tomás et al., 2005).

3 GEOLOGÍA

3.1 Antecedentes geológicos

El Partido de San José de Balcarce, con 4.121,11km², comprende el sector central del Sistema de Tandilia, ubicado en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires (Tomás et al, 2005). El cual conforma un cordón alargado que se extiende en dirección NO-SE, desde la localidad de Blancagrande hasta Cabo Corrientes (Teruggi y Kilmurray, 1975). Limita al oeste y suroeste con la provincia geológica de Cuenca de Claromecó (Ramos, 1999), mientras que al norte y al este limita con la Cuenca del Salado.

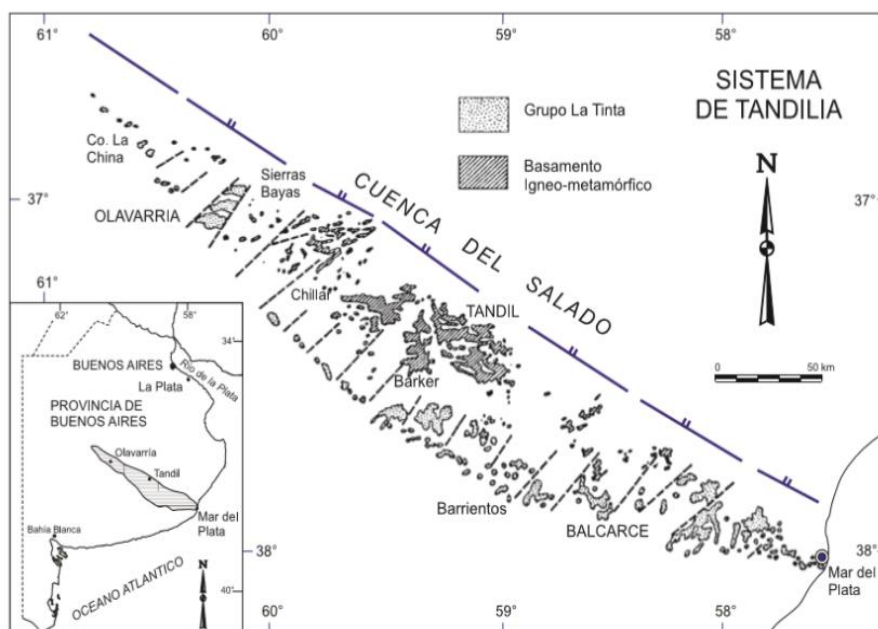


Figura 9. Rasgos geológicos principales del Sistema de Tandilia (Ramos, 1999).

Poiré y Spalletti (2005), sobre la base de los distintos estudios realizados, han podido integrar la información para configurar la secuencia estratigráfica del Sistema de Tandilia (figura 13).

ERAS- PERIODOS	Unidades estratigráficas					SECUEN- CIAS DEPOSITA- CIONALES
	REGION NO		REGION CENTRAL		REGION SE	
CAMBRO- ORDOVICICO	Fm. Balcarce		Fm. Balcarce		Fm. Balcarce	Secuencia Batán
?CAMBRICO						Secuencia La Providencia
	Fm. Cerro Negro		Fm. Cerro Negro		Diamictitas Sierra del Volcán	
NEO- PROTE- ROZOICO	Grupo	Fm. Loma Negra	Grupo	Fm. Loma Negra		Secuencia Villa Fortabat
		Fm. Ola- varría		Fm. Las Águilas		Secuencia Diamante
	Sierras	Fm. Cerro Largo	Fm. Cerro Largo	Secuencia Malegni		
	Bayas	Fm. Villa Mónica	Bayas	Fm. Villa Mónica		Secuencia Tofoletti
PROTERO- ZOICO	Complejo Buenos Aires					

Figura 10. Cuadro estratigráfico y secuencial de la cubierta sedimentaria precámbrica/paleozoica inferior del Sistema de Tandilia (Poiré y Spalletti, 2005).

El Sistema de Tandilia, definido como provincia geológica por Nágera (1932, 1933), comprende un bloque de basamento que expone las rocas más antiguas de la región central de la pampa bonaerense hasta el sector costero en Mar del Plata (Holmerg, 1972). Otros autores han realizado distintos trabajos para definir los límites de esta provincia geológica (Windhausen, 1931; Bonarelli, 1932).

3.1.1 Precámbrico

En la región de Tandilia, la asociación ígneometamórfica fue llamada Complejo Buenos Aires por Marchese y Di Paola (1975).

Las primeras dataciones describen rocas plutónicas y metamórficas de edad transamazónica o tandileana (Teruggi y Kilmurray, 1980). Estudios petrológicos y geoquímicos posteriores, realizados en estas rocas, permiten inferir que corresponden a granodioritas, tonalitas y granitos asociados a subducción con edades entre 1.900 – 2.100 Ma alojados en metamorfitas gnéissicas correspondientes a facies de anfibolita de mediano a alto grado cuya edad absoluta se desconoce,

pudiendo alcanzar hasta el Arqueano inclusive (Dalla Salda y Francese, 1985). Además, en el sector al sur de Tandil las rocas metamórficas son intruidas por granitos leucocráticos postcolisionales con edades de 1.600 a 1.800 Ma (Varela et al., 1988). También, Cingolani et al. (2002), realizaron dataciones radiométricas (U-Pb) de las rocas del complejo ígneo-metamórfico del basamento y describen edades entre 1960 y 2176 Ma.

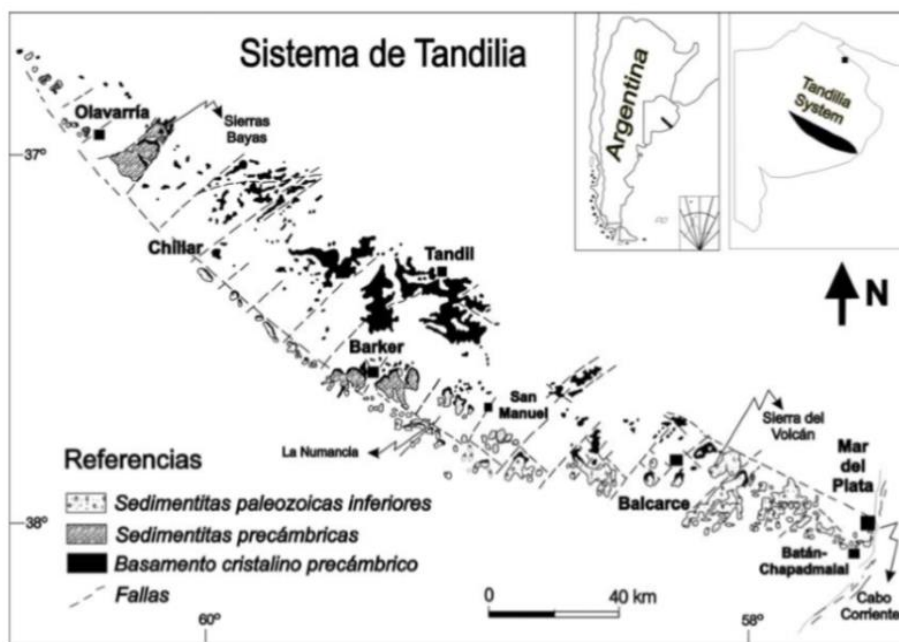


Figura 11. Mapa del basamento cristalino y cubierta sedimentaria precámbrica/paleozoica inferior del Sistema de Tandilia (Poiré y Spalletti, 2005).

Otros autores (Dalla Salda et al., 2006) describen al Complejo Buenos Aires como una típica asociación de rocas ígneo-metamórficas de gneises graníticos a tonalíticos, migmatitas, anfibolitas, esquistos, mármoles y plutones de granitoides, con escasas rocas metavolcánicas (ácidas y básicas) y diques básicos tardíos y discordantes. En el Cerro El Triunfo, en sectores se relacionan con granulitas ortopiroxénicas y hornblenda, de una edad de 2197 Ma (U-Pb, Cingolani et al., 2002).

En este trabajo se analizaron distintas muestras de campo obtenidas de afloramientos observados en el Parque Municipal Cerro El Triunfo, que se describen como Tonalitas (ver figuras 21 a 23, capítulo 3.2.1.1) y forman parte del basamento hidrogeológico que aflora en distintos lugares debido a la estructura local (ver figuras 35 y 46, capítulo 3.2.2.3).

3.1.2 Paleozoico

Las investigaciones de la geología y estratigrafía de las coberturas sedimentarias, comienzan con los estudios regionales de Heusser y Claraz, (1863) y Hauthal (1896) a los que se pueden sumar los trabajos en el sector de Sierras Bayas (Tandil) de Aguirre (1897) y Nágera (1919) quienes reconocieron la cobertura sedimentaria como unidad estratigráfica compleja.

Con posterioridad se destacan los trabajos estratigráficos y paleontológicos de Borrello (1961 y 1965), quien sobre la base de los icnofósiles descriptos, ubicó la sucesión clástica en el Ordovícico

e introdujo modificaciones en el ordenamiento estratigráfico, reconociendo dos unidades: Grupo La Tinta y Cuarcitas Balcarce. Las observaciones de Dalla Salda & Iñiguez (1979) llevaron a separar las unidades Sierras Bayas y Balcarce, asignándolas al Precámbrico superior y Paleozoico inferior, respectivamente.

Spalletti y Del Valle (1984) describen la presencia de diamictitas entre el basamento cristalino y la Formación Balcarce (es una característica peculiar que se observa en la Sierra del Volcán).

3.1.2.1 Formación Balcarce

Teruggi y Kilmurray (1975) describen a la Formación Balcarce de edad Paleozoico Inferior, la cual suprayace en discordancia erosiva al Basamento Cristalino. Los afloramientos principales de esta unidad se encuentran entre las localidades de Balcarce y Mar del Plata, expuestos en las sierras.



Figura 12. Fotografía panorámica desde la Sierra La Barrosa hacia el sur, se observan los afloramientos principales de la Formación Balcarce.

Se describe como una sucesión sedimentaria silicoclástica que se presenta con disposición subhorizontal y muy suave buzamiento hacia el sur (Teruggi et al, 1958). Aflora fundamentalmente en el sector oriental de Tandilia, desde Balcarce hasta Mar del Plata. Presenta espesores expuestos de hasta 90m, donde se reconocen cuerpos mantiformes de areniscas y sabulitas cuarzosas con abundantes capas entrecruzadas planares (así como tangenciales y sigmoidales) de escala mediana-gruesa, asociadas a niveles arenosos macizos, gradados y ondulíticos. Además se reconocen intercalaciones pelíticas (ricas en caolinita) de menos de 1 m de espesor, macizas, así como secciones heterolíticas, con texturas tipo flaser, ondulosa y lenticular. También se identifican escasos y delgados niveles de conglomerados cuarzosos finos a medianos, bien seleccionados, de

geometría mantiforme principalmente y con menos de 0,3 m de espesor, aunque apreciable continuidad lateral (Poiré y Spalletti, 2005).

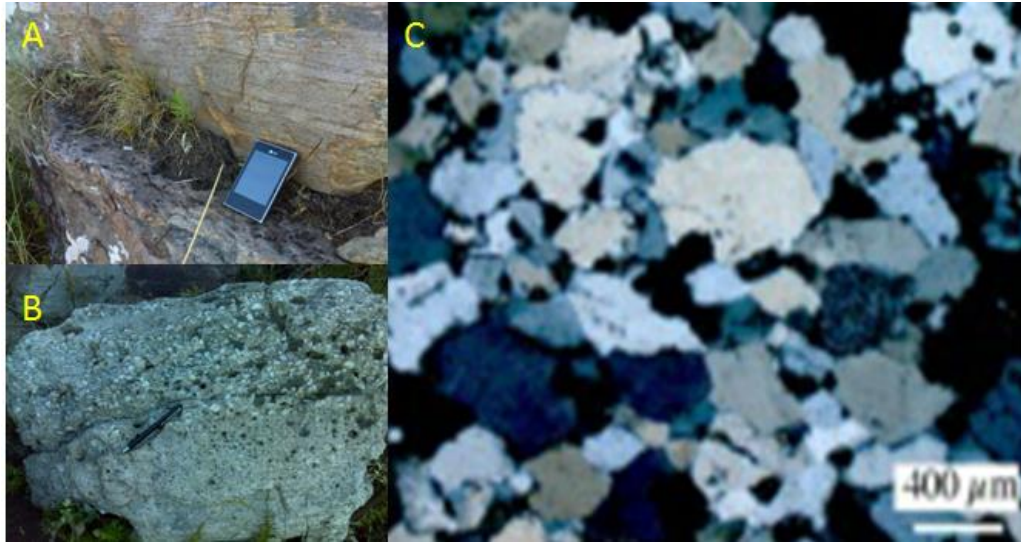


Figura 13. Fotografías tomadas en sierra La Barrosa; (A) estructura sedimentaria y, (B) contacto entre niveles de arenisca y sabulita. (C) Corte petrográfico de la arenisca cuarzosa de la Formación Balcarce, con luz polarizada (Zimmermann y Spalletti, 2009).



Figura 14. Estructura sedimentaria de la Formación Balcarce en Sierra de los Padres (Adrián Silva Busso).

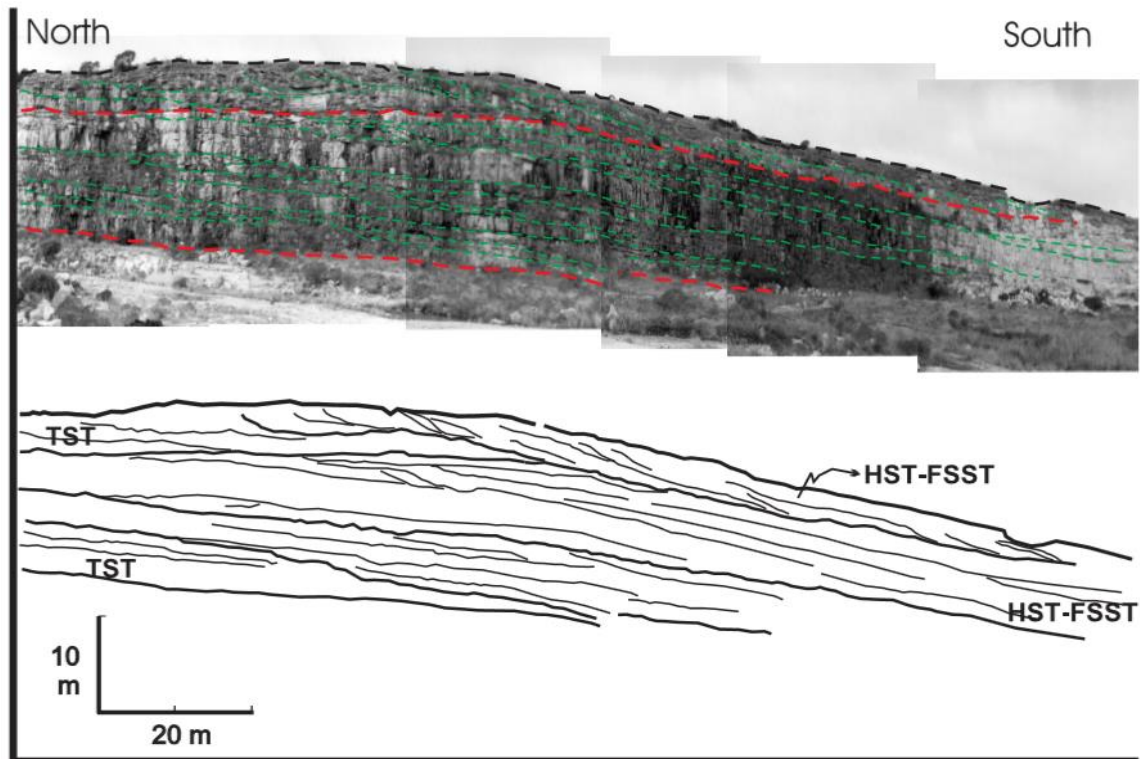


Figura 15. Clinoformas depositacionales reconocidas en afloramientos de la Formación Balcarce en Batán-Chapadmalal; TST: secuencia transgresiva; HST-FSST: secuencia de máximo nivel del mar y nivel discordante (Poiré y Spalletti, 2005).

En el área Batán-Chapadmalal, el análisis de facies ha permitido interpretar que la Formación Balcarce se ha formado esencialmente por procesos mareales en ambiente de plataforma marina silicoclástica somera (cara de playa hasta plataforma interna). Los mismos cuerpos de areniscas y sabulitas entrecruzadas se han formado por migración de barras arenosas submareales, mientras que las secciones finas, heterolíticas, corresponden a las zonas submareales de interbarras. Además se destacan niveles generados por la actividad de olas de tormenta (Rapela et al., 1974).

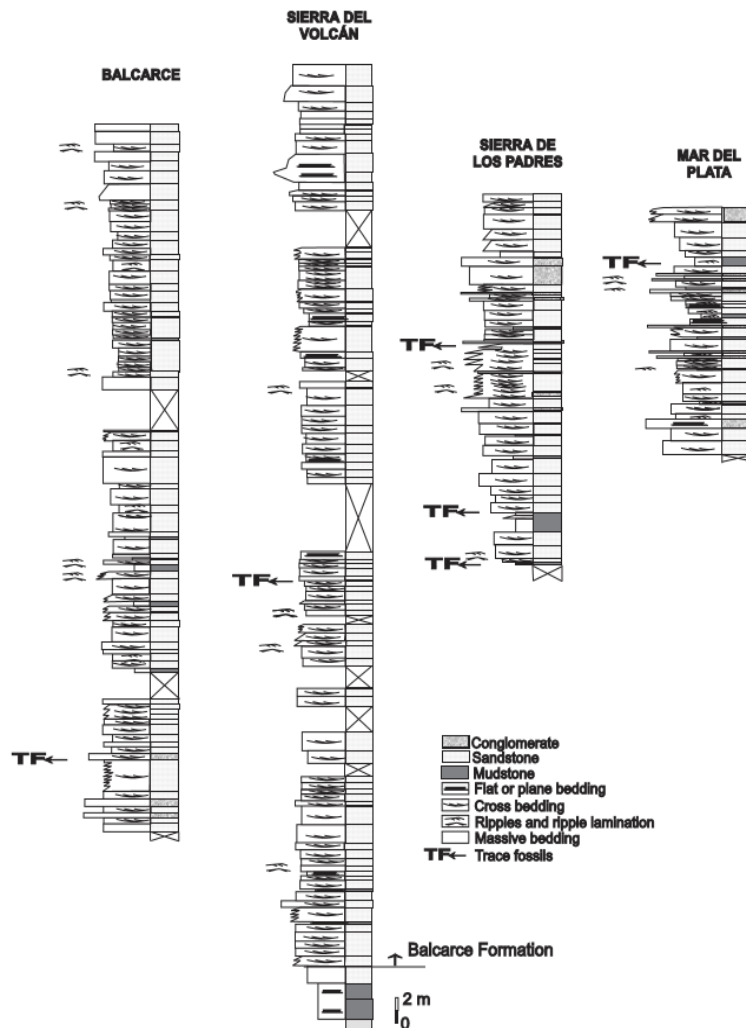


Figura 16. Perfiles estratigráficos de Formación Balcarce mostrando las distintas facies (Poire et al., 2003).

Para determinar la edad de la Formación Balcarce varios autores han realizado distintos estudios. Cingolani et al. (1991) analizaron la subyacente Formación Cerro Negro en donde las dataciones radimétricas y la presencia de acritarcos la datan en el Vendiano (680Ma). Mientras que Rapela et al. (1974) concluyen que en el límite superior de la Formación Balcarce se reconoce un cuerpo de diabasa intrusivo de alrededor de 450-498 Ma (por datación radimétrica), que sugiere el lapso Cámbrico Superior-Ordovícico Superior (ICS 2013).

Rapela et al. (1974) también proponen la datación por trazas fósiles, donde la presencia de los icnogéneros *Cruziana furcifera*, *Arthropycus alleghaniensis*, *Didymaulichnus isp.*, *Monomorphichnus isp.*, *Phycodes isp.*, *Plagiognus* y *Palaeophycus tubularis* sugieren el período Cámbrico-Ordovícico.

Poiré et al. (2003) reconocen en la Formación Balcarce distintos icnofósiles entre los que se cuentan *Daedalus labeckei*, *Arthropycus alleghaniensis*, *Cruziana furcifera* y *Herradurichnus scagliai* *Scolicia isp.*, entre otros, en los sitios estudiados en el Cabo Corrientes, Mar del Plata.

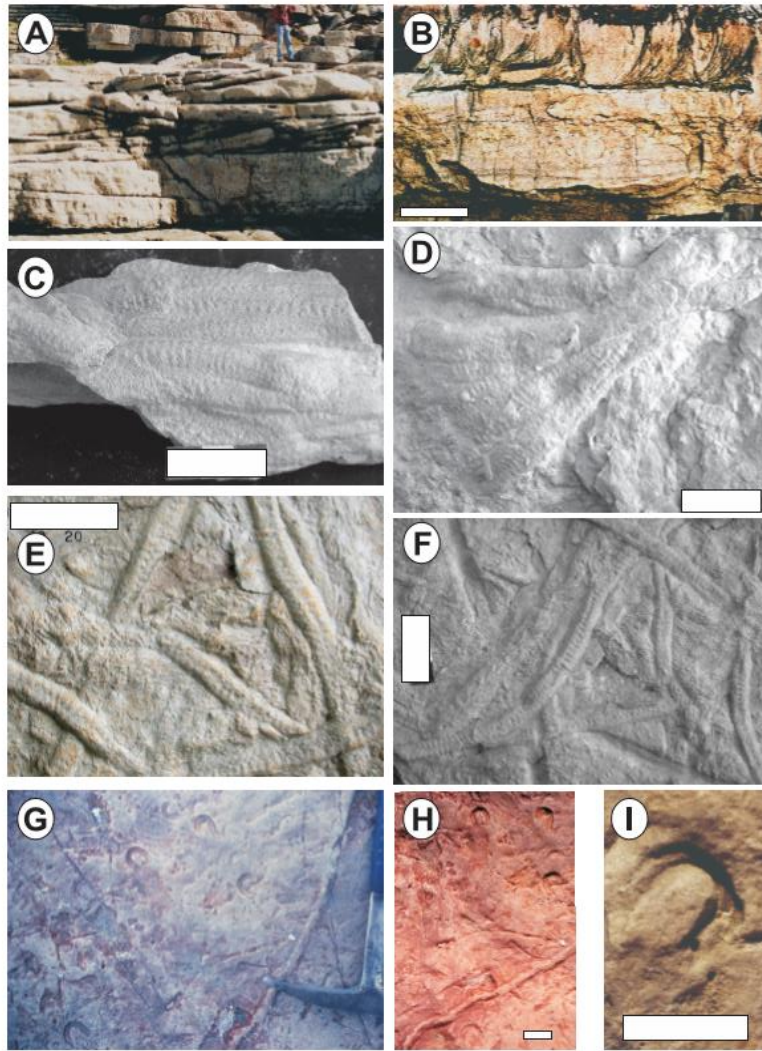


Figura 17. Principales trazas fósiles reconocidas en las areniscas entrecruzadas (A) de la Formación Balcarce. B: *Daedalus labeckel* en Cabo Corrientes; C-F: *Arthropycus alleghaniensis* en la cantera San Ramón asociada con *Cruziana furcifera* (E); G-I: *Herradurichnus scaglii* asociado con *Scolicia isp.*, Cabo Corrientes (Poiré et al., 2003).

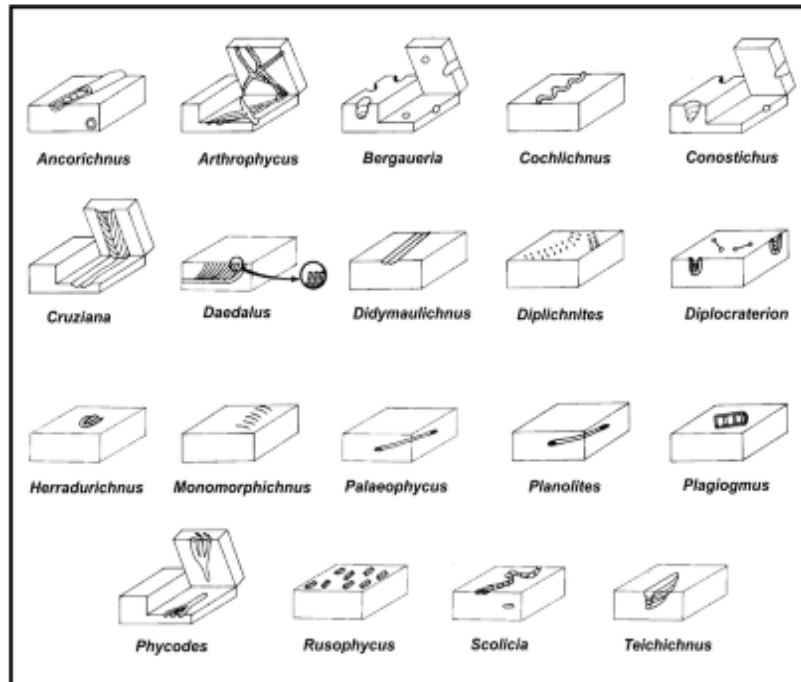


Figura 18. Descripción de las principales trazas fósiles de la Formación Balcarce (Poiré et al., 2003).

3.1.3 Cenozoico

El conocimiento del relleno cenozoico en la Llanura Bonaerense se sustenta en el aporte de numerosos trabajos, desde la época de Darwin (1846) y Ameghino (1889) hasta el presente. Tricart (1973) describe una importante discordancia depositacional entre el basamento premesozoico y los depósitos cenozoicos.

Los depósitos presentan un espesor variable en el área de mapeo, entre decenas hasta cientos de metros. Se reconocen depósitos en las áreas de llanura, zonas interserranas y sectores periserranos donde cubren a las unidades precámbricas y paleozoicas anteriormente descriptas conteniendo el acuífero más importante de la región (Suero et al., 2008). En el área de Tandilia se reconoce una sección aflorante de depósitos neógenos que, mediante perforaciones se ha descripto con espesores de 90 a 120 m (Tapia, 1937).

Los depósitos neógenos más antiguos conforman una secuencia sedimentaria que, de acuerdo con las asignaciones temporales que se han llevado a cabo, abarca desde el Mioceno tardío al Plioceno tardío, desarrollada aproximadamente con posterioridad a los 11-12 Ma y antes de los 3 Ma de años. La distribución geográfica señala que apoyan directamente sobre el basamento. Por esto representa el primer ciclo de sedimentación posterior al retiro del *mar paranense* y se encuentran cubiertos actualmente por un manto eólico Pleistoceno Superior – Holoceno que enmascara su extensión (Folguera y Zárate, 2009).

Frenguelli (1950), y posteriormente Tricart (1973), reconocen entre los *Sedimentos Pampeanos* (denominación informal) dos unidades muy similares de difícil identificación litológica (Formación Ensenada y Formación Buenos Aires), por lo que generalmente se las estudia en conjunto en los trabajos hidrogeológicos ya que abarcan gran parte de la llanura Chaco-Pampeana. Aunque muchas

veces son interpretados como *loess pampeano*, debido a su origen eólico, no constituyen un loess típico (Suero et al., 2008).

Se han realizado diversos estudios petrográficos del loess pampeano en distintos lugares (Doering, 1907; Wright y Fenner, 1912; Teruggi, 1957) que definen un origen volcano-piroclástico, debido a la presencia de abundantes montmorillonitas y fragmentos de vidrio en la fracción fina, que ha sido transportado por los vientos desde la región andina hasta el lugar de deposición. Estos ciclos de deposición eólica cubrieron las áreas interserranas y parcialmente las cumbres de algunas sierras (Suero et al., 2008).

Distintos estudios realizados por Martínez (2007) definen que los registros sedimentarios de los reparos rocosos del Sistema de Tandilia, que abarcan el lapso Pleistoceno Superior – Holoceno, se desarrollaron durante eventos interglaciales debido a condiciones climáticas más cálidas y húmedas similares al actual interglacial (sedimentación más actual a la par de los depósitos periserranos actuales).

Edad	Frenguelli (1950)	Unidades Formacionales	Unidad Hidrogeológica (EASNE, 1972)
Holoceno	Sedimentos Post-Pampeanos	Sedimentos Post-Pampeanos	Epipuelches (acuífero libre)
Pleistoceno – Holoceno	Sedimentos Pampeanos	Formación Buenos Aires Formación Ensenada	Epipuelches (acuífero libre y semilibre)

Tabla 3. Secuencia sedimentaria cenozoica (Santa Cruz y Silva Busso, 1999).

Zárate (2005) propuso cuatro intervalos estratigráficos separados por discordancias que denominó:

- Subciclo Mioceno Superior (12-11 Ma hasta 7-6 Ma).
- Subciclo Mioceno Superior – Plioceno (7-6 Ma hasta 3,2 Ma).
- Subciclo Plioceno – Pleistoceno Superior (3,2 Ma hasta 40.000 años).
- Subciclo Pleistoceno – Holoceno (40.000-30.000 años hasta el presente).

En este trabajo se realizaron diversos estudios de campo de donde se obtuvo información con la que se diagramó la estructura local de los depósitos cenozoicos (ver figuras 35 y 36, capítulo 3.2.2.3). Gómez Samus et al. (2016) estudiaron los sedimentos del Cenozoico Superior, expuestos en una excavación realizada en el faldeo suroeste de sierra La Bachicha, muy próxima a uno de los sitios de muestreo de este trabajo (ver figura 1, capítulo 1). Los autores reconocieron, hacia la base, gravas y arenas de origen coluvio-fluvial que fueron cubiertos por secuencias de psefitas coluvio-fluviales intercaladas con sedimentos arenosos y loessoides. Entre estas secuencias se registra el cese de la sedimentación por el desarrollo de impregnaciones de CaCO_3 y mantos de tosca, que interpretaron como un horizonte B calcimórfico, de considerable importancia regional que denominaron Paleosuperficie Tandil (ver figura 19).

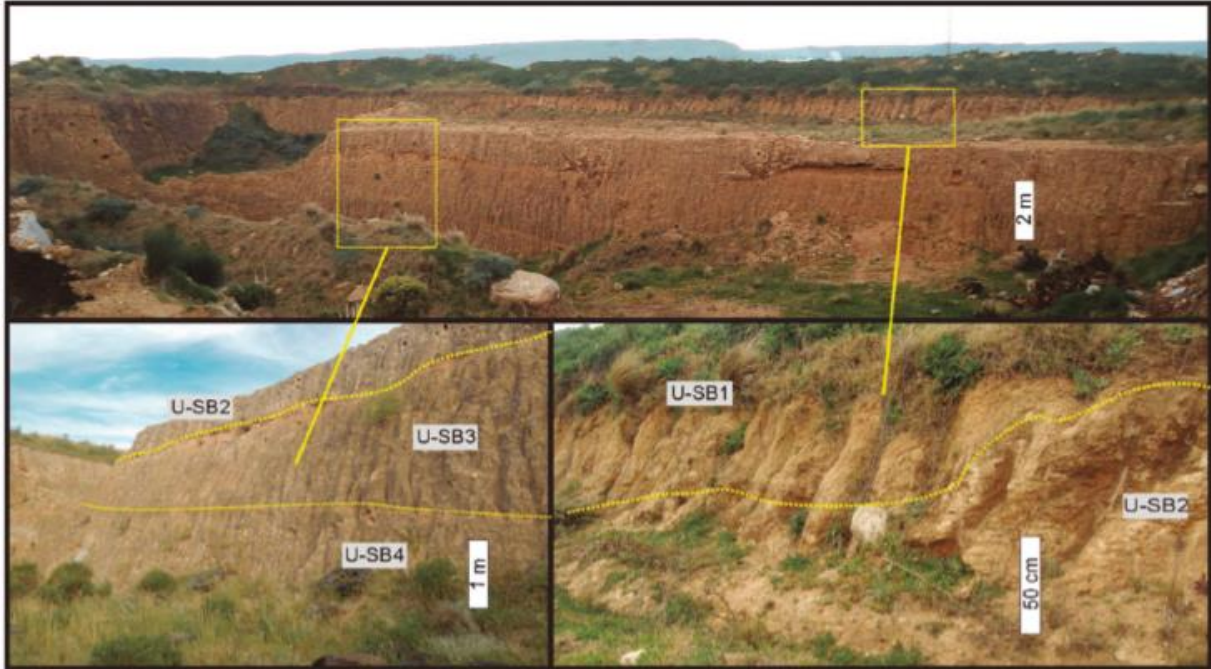


Figura 19. Fotografías de la sección estratigráfica de Sierra Bachicha y unidades litológicas identificadas (Gomez Samus et al., 2016).

En este trabajo se analizaron distintas muestras de campo obtenidas al pie de la sierra La Barrosa (en una cantera abandonada). En las mismas se reconocen distintos niveles carbonáticos (*calcretes*) intercalados entre depósitos limo arcillosos (ver figuras 25 a 29, capítulo 3.2.1.2) que representan la secuencia cenozoica descripta.

3.1.3.1 Formación Barker (pre Pampeano)

En el área de Tandilia, Rabassa (1973) definió la Formación Barker para agrupar a todos aquellos depósitos aflorantes en las divisorias de aguas, apoyados directamente sobre rocas del basamento. El autor describe su litología formada por limolitas arcillosa de color castaño rojizo, con evidencias de pedogénesis, que contienen escasos niveles carbonáticos (*muñecos de tosca*). Son característicos para este depósito su color, la presencia de impregnaciones ferruginosas diseminadas en la masa de la sedimentita y su homogeneidad en cuanto a estructura y granulometría.

Según Pascual et al. (1965) la sedimentación cenozoica tardía continental de la región pampeana se habría iniciado con la prefase del tercer movimiento de la orogenia andina, cuyo primer efecto sería el inicio de la regresión del mar Paranense. Posteriormente, Zárate (2005) indicó que dicha sedimentación habría comenzado en el Mioceno Superior (11-12 Ma).

Los análisis granulométricos, realizados por Rabassa (1973), describen limos arcillosos a limo arcillo-arenosos, con contenidos de 15 a 25% de arena muy fina.

Estos depósitos también han sido descriptos por distintos autores en otros lugares, pero los depósitos definidos como Formación Barker (Rabassa, 1973) son los que mejor representan el registro sedimentario observado en los pozos de la zona de estudio de este trabajo ya que muestran condiciones similares tanto en la descripción del depósito como en su relación estratigráfica con el basamento (ver figuras 35 y 36, capítulo 3.2.2.3). Además, es la nomenclatura más antigua empleada (CAE, 1992) y más próxima al área de estudio de este trabajo.

A continuación se mencionan distintos trabajos que describen depósitos correlacionables con la Formación Barker, tanto por su edad como por su descripción litológica. Folguera y Zárate (2009) realizaron un estudio para integrar la información en un marco regional describiendo los diversos depósitos como parte de la sedimentación neógena continental que se desarrolló en el sector extraandino de la región central de Argentina, el cual se extiende entre los 33° y 39°S y desde el pie oriental del bloque de San Rafael hasta los sistemas de Ventania y Tandilia.

	Cuenca del Colorado	Bloque de Chadileuvú	Cuenca de Macachín	Positivo Bonaerense	Bloque de San Rafael	Edad Mamífero
Holoceno	Loess					
Pleistoceno	Calcrete	Calcrete	Calcrete	Calcrete	Calcrete	
Plioceno	Depósitos fluviales gruesos					
Mioceno tardío		Fm. Cerro Azul	Fm. Epecuén	Fm. La Norma	Fm. La Toma	Fm. Chapadmalal
	Fm. Río Negro		Fm. Sal-dungaray	Fm. Irene	Fm. Barker	Fm. Monte Hermoso
	Fm. Arroyo Chasicó					
Mioceno medio	Fm. Barranca Final		Fm. Barranca Final		Fm. Cerro Azul	Chapadmalense
Cretácico	F. Colorado					Montehermosense
Jurásico-Precámbrico	Rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias pre-Jurásicas					Huayqueriense
						Chasicuense

Figura 20. Correlación y edades propuestas para los depósitos neógenos (Folguera y Zárate, 2009).

Folguera y Zárate (2009) concluyen que la Formación Cerro Azul, definida por Llambias (1975), se extiende al sur de la provincia de La Pampa y se agrupa los sedimentos neógenos pre-cuaternarios aflorantes (unidad de mayor extensión areal que se ha definido sobre la base de criterios litológicos). Está formada por limos, limos arenosos y arenas muy finas limosas, de color castaño rojizo, de aspecto general homogéneo y macizo, con nódulos carbonáticos muy frecuentes y evidencias de procesos pedogenéticos.

Además, Folguera y Zárate (2009) asignan estos depósitos como equivalentes a la Formación Cerro Azul en sectores interserranos del Sistema de Tandilia, separados estratigráficamente de depósitos neógenos suprayacentes mediante un contacto discordante erosivo que hasta hoy no se ha podido establecer. Zárate et al. (2007) realizaron perfiles magnetoestratigráficos de alta resolución con los que obtuvieron valores numéricos que le asignaron edades entre 9,43 y 9,07 Ma (Mioceno Superior). Mientras que Linares et al. (1980) aclararon que no se podían diferenciar litológicamente de la Formación Cerro Azul.

En la provincia de Buenos Aires, dentro del ámbito de la cuenca del Colorado, Pascual (1961, 1965), definió la Formación Arroyo Chasicó con su localidad tipo en el curso inferior del arroyo homónimo. Zambrano (1980) indicó un espesor de 160 m medido en una perforación realizada en el tramo inferior del arroyo (Vivero Provincial Von Humboldt) próximo a su desembocadura en la laguna Chasicó, donde describió un ambiente de depositación continental, fluvial, de llanura aluvial y probablemente con participación eólica. Los depósitos se describen como limos arenosos de colores rojizos, en parte calcáreos.

Furque (1973) define que la Formación Saldungaray agrupa los depósitos aflorantes en el ámbito sur de Ventania y su piedemonte. A lo largo de las barrancas del río Sauce Grande, este autor

diferenció dos niveles que conforman una secuencia en la que predominan los limos color rojizo, que apoyan sobre las sedimentitas paleozoicas mediante una discordancia angular y las asigna al Plioceno Superior.

Otros estudios realizados por distintos autores (De Francesco, 1992; Fidalgo et al., 1975) definen a la Formación La Norma en las divisorias de aguas del sector pedemontano del flanco sur de la sierra de Curamalal, como limolitas color castaño a rojizo, de aspecto macizo y espesores mínimos de 45 m (según datos de pozos) que apoyan sobre sedimentitas paleozoicas.

Además distintos autores (Reig, 1957; Kraglievich, 1960; Verzi y Montalvo, 2008) han descripto a la Formación Irene en el sector de la pampa interserrana, en afloramientos de las márgenes del río Quequén Salado entre las localidades de Irene y Oriente. Se la describió como un conjunto de limos a limos arenosos de color rojizo con aporte volcánico. Los registros fósiles indican que estos depósitos no serían más modernos que el Mioceno Superior.

Finalmente, hacia el extremo sudeste del Sistema de Tandilia, los depósitos aflorantes en los acantilados de la costa atlántica bonaerense, desde el sur de Punta Mogotes hasta Miramar, fueron estudio de diversos investigadores (Ameghino, 1908; Terruggi et al., 1957; Marshall et al., 1983; Orgeira y Valencio, 1984; Zárate, 1989 y 2005), particularmente por su contenido de restos fósiles de vertebrados. Se describen limolitas arenosas y arcillosas, de naturaleza volcaniclastica, con niveles de paleosuelos y estructuras de corriente desarrolladas durante el Plioceno. Además se reconoce hacia el techo una secuencia de ambiente fluvial dominante, separada mediante una discordancia erosiva desarrollada durante el Plioceno Superior – Pleistoceno.

3.1.3.2 Formación Ensenada (Ensenadense o Pampeano inferior)

Diversos estudios se han realizado sobre los depósitos de la Formación Ensenada (Ameghino, 1909; Frenguelli, 1957; Bonorino, 1965). Los describen constituido por un limo más oscuro que el superior, más compacto y gran cantidad de tosca (al compararlo con el bonaerense, del cual estaría separado por una discordancia erosiva). Contiene abundantes restos de mamíferos fósiles entre los cuales se destaca el género *Typotherium* y su espesor sería de 10 a 12 m”. En su composición mineralógica se reconoce la abundancia de arcillas de tipo illita y la predominancia de plagioclasa en los clastos de tamaño limo-arena.

3.1.3.3 Formación Buenos Aires (Bonaerense o Pampeano superior)

Diversos estudios realizados en los depositos de la Formación Buenos Aires (Ameghino, 1909; Frenguelli, 1957; Bonorino, 1965) describen el limo loessico “clásico de la Pampa”, de grano fino, poroso (por la presencia de finos canalículos dejados por finas raíces), con niveles calcáreos y de color pardo claro y tonalidades rojizas, con espesores entre 6 y 12 m. La composición mineralógica se caracteriza por la abundancia de arcillas de tipo montmorillonita, con caolinita subordinada, y la predominancia de cuarzo en los clastos de tamaño limo-arena.

3.2 Geología del área de estudio

3.2.1 Descripción de afloramientos del área de estudio

Durante las campañas realizadas del 13/01 al 01/02/2015, se realizó la descripción de los afloramientos observados en el área de estudio y se obtuvieron distintas muestras de campo para su descripción y clasificación en gabinete. A continuación, se describen por su ubicación.

3.2.1.1 Afloramientos de rocas ígneas

Las muestras BAL 1 y BAL 2 se extrajeron del afloramiento ubicado en el Anfiteatro Roberto Cambaré (recordatorio del músico local) dentro del Parque Municipal Cerro El Triunfo. Los afloramientos se destacan por una forma de anfiteatro “natural”, pero no son más que los restos de una antigua cantera de la cual se sacó material para las primeras construcciones de la ciudad. Estas muestras representan al Complejo Buenos Aires.



Figura 20. Acceso y anfiteatro del Parque Municipal Cerro El Triunfo.

Descripción macroscópica:

Roca de color gris con tonalidades azuladas que presentan una textura granosa con fractura irregular (figura 21). Está compuesta, en orden de abundancia, por cristales traslúcidos de plagioclasa y cuarzo (con tamaños entre 1 y 2 mm) y cristales de minerales opacos (en menor proporción y tamaño).

Además, se reconocen fracturas frescas con tonalidades castaño claras asociadas al diaclasamiento del cuerpo ígneo, donde se reconoce la presencia de arcillas.



Figura 21. Fotografía de la muestra donde se realizaron los cortes petrográficos BAL 1 y BAL 2.

Descripción microscópica:

Roca de textura granosa holocristalina, en la que se distinguen plagioclasa y cuarzo como minerales principales; biotita y anfíbol como accesorios característicos y como minerales accesorios menores sericita, opacos y circón.

La plagioclasa (40%) se presenta en cristales de hábito anhedral con maclas polisintéticas, de mayor desarrollo que los demás. Se reconoce alteración sericítica (5%) leve a moderada en los bordes de los cristales de mayor tamaño, los cuales se caracterizan por tamaños promedios entre 0,5 y 1,5 mm (algunos llegan a hasta 2 mm).

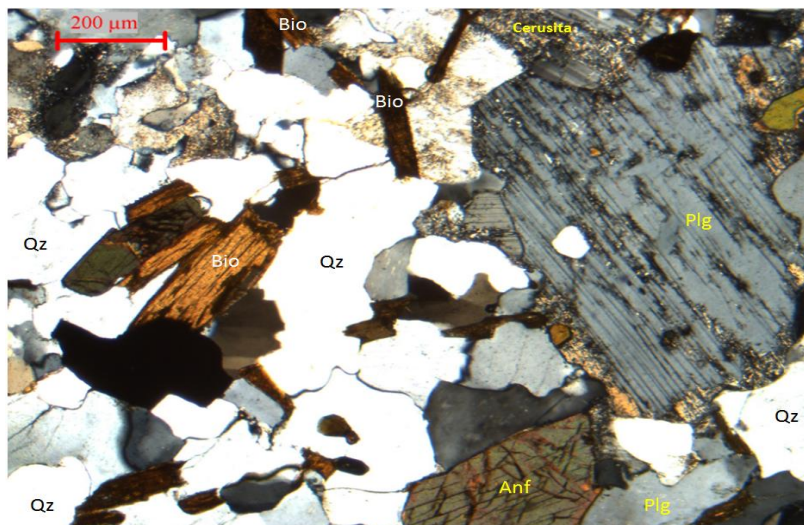


Figura 22. Fotografía representativa de los cortes petrográficos BAL 1 y BAL 2 (luz polarizada).

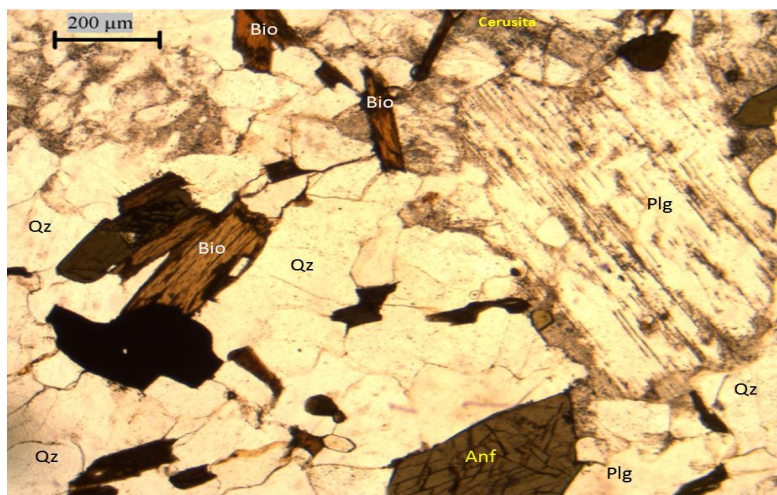


Figura 23. Fotografía representativa de los cortes petrográficos BAL 1 y BAL 2 (luz directa).

Sobre las maclas polisintéticas se midió el ángulo de extinción y se registró un promedio de $18,3^\circ$ lo que, según el método Michel Levy, indica que la plagioclasa es Andesina (ver Anexo 3).

El cuarzo (30%) se observa en cristales anhedrales, sin alteración y bordes con engolfamientos. Se caracterizan por tamaños promedios entre 0,5 y 1 mm (algunos llegan hasta 1,5 mm).

También se observan cristales laminares de biotita (10%) con fuerte pleocroísmo castaño-verdoso y leve alteración a minerales opacos (4%) asociados al clivaje del mineral. Se midieron tamaños entre 0,25 y 0,5 mm.

Los cristales subhedrales de hornblenda (10%) presentan pleocroísmo verde con tonalidades claras a oscuras y leve alteración a opacos (4%) asociados al clivaje del mineral. Se midieron similares a la biotita.

Entre los minerales accesorios menores, que ya se describieron, se destaca la presencia de zircón con halos pleocroicos, asociado a algunos cristales de hornblenda.

De acuerdo con la composición mineralógica y los porcentajes totales recalculados para el diagrama QAPF (ver Anexo 2), la roca se clasifica como una TONALITA del campo 5 de la clasificación de la IUGS para rocas plutónicas (Streckeisen 1973 y Teruggi 1980).

3.2.1.2 Afloramientos de rocas sedimentarias

Las muestras que se describen a continuación se extrajeron de los afloramientos ubicados en una cantera abandonada en el sector periserrano noreste de la sierra La Barrosa, la misma forma parte de una serie de tosqueras realizadas en distintos lugares de Balcarce para obtener material de construcción (ver figura 24).



Figura 24. Fotografía panorámica desde la sierra La Barrosa hacia el norte.

Muestras BAL 3, BAL 4 y BAL5:

Estas muestras representan los niveles carbonáticos semipermeables de la Formación Buenos Aires.

Descripción macroscópica:

Se reconoce una roca de color castaño claro en donde predomina una matriz compuesta de carbonatos (reacciona al ácido clorhídrico). También se observan fragmentos líticos de cuarcitas con tamaños promedio de 3 mm y cristales de cuarzo de 1 mm. Además, se reconocen diaclasas por disolución (figura 25).



Figura 25. Fotografía de la muestra donde se realizaron los cortes petrográficos BAL 3 y BAL 4 (Izq.) y BAL 5 (Der.).

Descripción microscópica:

Se reconocen abundante matriz (90%) compuesta de carbonatos, lo que le da la coloración pardo grisácea clara, en donde se reconocen cristales subhedrales (10%) de cuarzo y plagioclasa (con macla polisintética). En menor proporción, y asociados a cavidades en la muestra, se reconoce sericita y arcillas (por alteración de plagioclasa) y escasos fragmentos líticos.

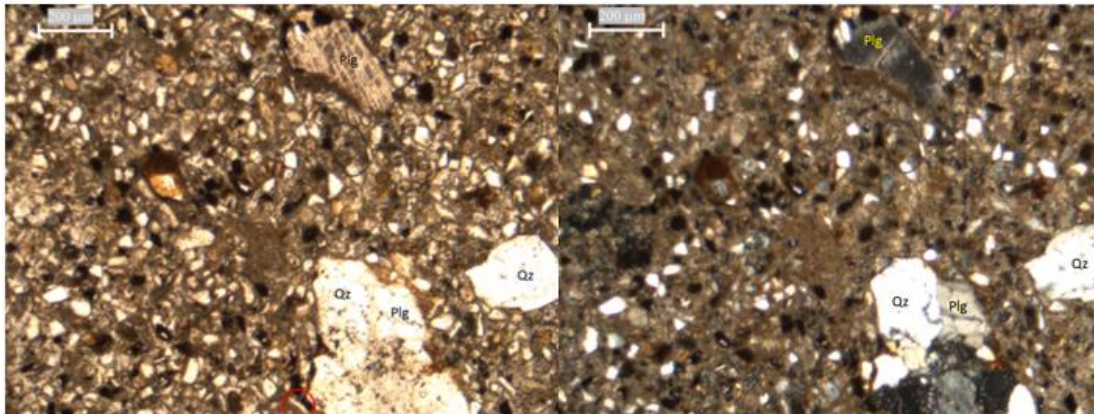


Figura 26. Fotografía representativa de los cortes petrográficos BAL 3 y BAL 4 (luz directa a la izquierda y luz polarizada a la derecha). Se destaca la presencia de trizas vítreas escasas.

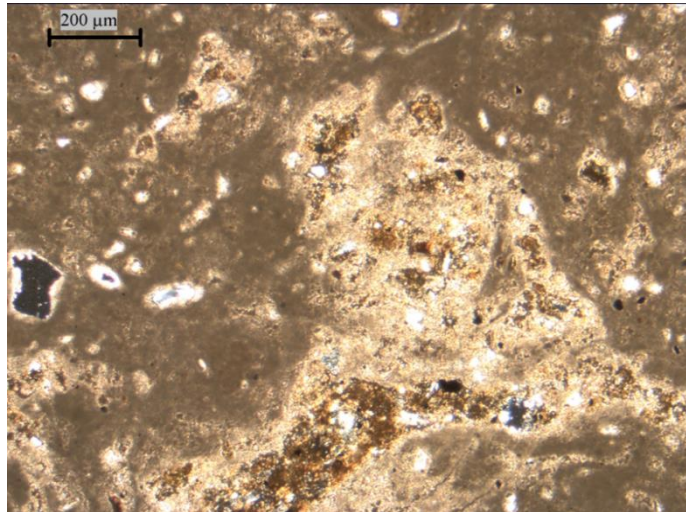


Figura 27. Fotografía representativa del corte petrográfico BAL 5 (luz polarizada).

Muestra BAL 6:

Esta muestra representa los niveles limo-arcillosos permeables de la Formación Buenos Aires.

Descripción macroscópica:

Se describe como de granulometría limo-arcillosa de color castaño rojiza (se desagrega al tacto, figura 28).



Figura 28. Fotografía de la muestra donde se realizó el corte petrográfico BAL 6.

Descripción microscópica:

Se reconocen fragmentos líticos (15%) de cuarcitas y rocas volcánicas oxidadas con tamaños entre 1 y 2 mm, así como cristales subhedrales de cuarzo (5%) de hasta 0,5 mm, en una matriz (80%) compuesta de pequeños cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y opacos (con tamaños entre 0,1 y 0,2 mm). Se destaca una intensa alteración a óxidos y arcillas que le dan la coloración rojiza que caracteriza a la muestra.

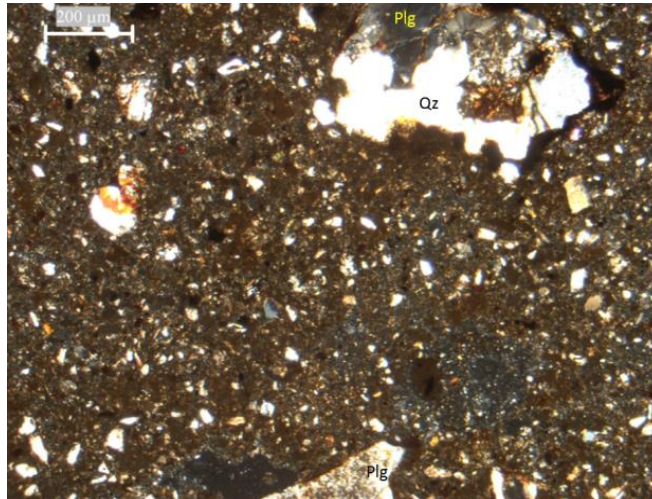


Figura 29. Fotografía representativa del corte petrográfico BAL 6 (luz polarizada).

A continuación, se observa un perfil esquemático realizado en la cantera ubicada en el sector periserrano próximo donde se obtuvieron las muestras descritas anteriormente.

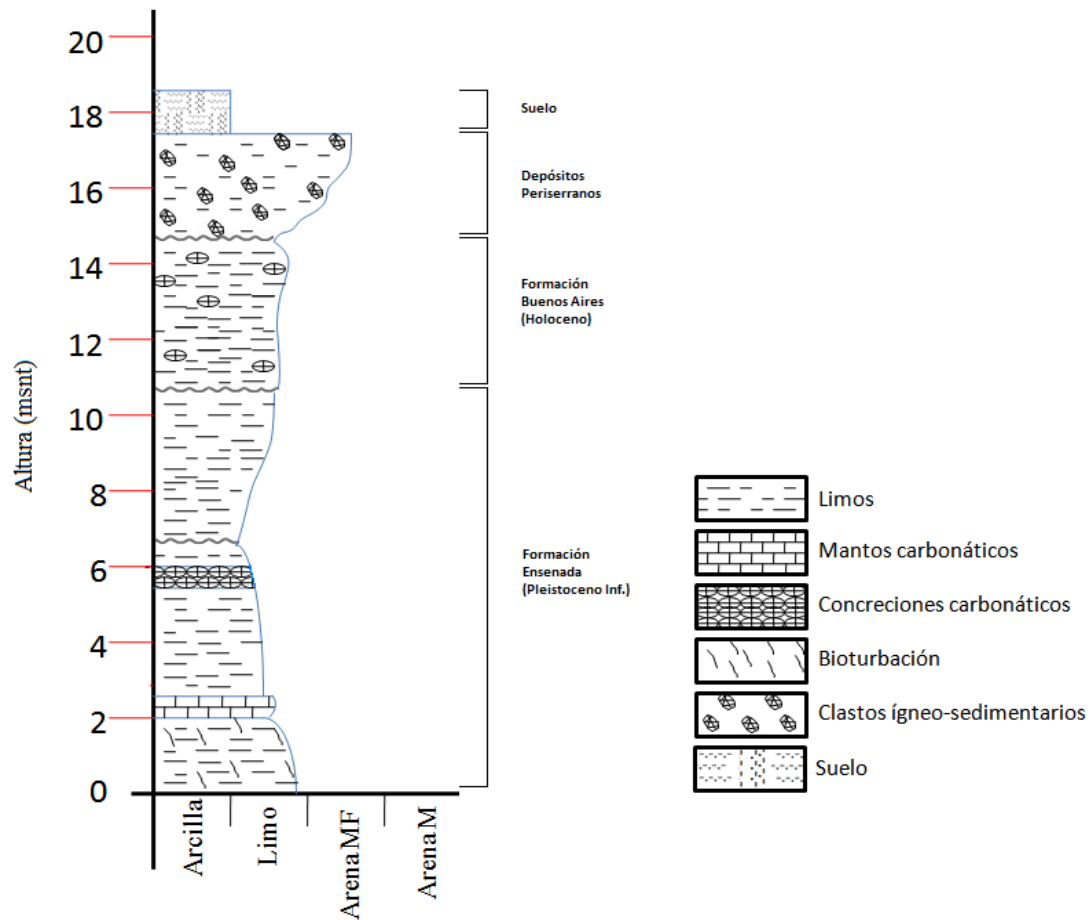


Figura 30. Perfil esquemático realizado en cantera abandonada en la sierra La Barrosa.

3.2.1.3 Descripción litológica en el área de estudio

Durante las campañas realizadas en este estudio se obtuvieron datos de dos perforaciones ubicadas en la zona periurbana de la ciudad de Balcarce (ver tabla 4). Las perforaciones fueron ubicadas en coordenadas WGS84 (POSGAR 2007) y determinadas con un sistema de posicionamiento GRAMIN GPS45 Dakota de 36 canales, con una precisión de determinación de 3 m.

Pozo	Latitud	Longitud	Cota	Profundidad	Ubicación
14B	37°50'43,9" S	58°16'36,6" O	114 msnm	108 mbbp	Calle 35 esq. Calle D
15	37°51'36,8" S	58°16'07,5" O	129 msnm	104 mbbp	Calle 20 esq. Calle 47

Tabla 4. Datos de los pozos realizados en las campañas de este estudio.

A continuación, se observan las descripciones de los recortes de perforación realizadas en cada perforación durante las campañas de este estudio.

Profundidad (mbbp)	Descripción litológica
0 a 0,5	Cubierta Edáfica y Relleno
0,5 a 7	Limos de color castaño, poco consolidada, presenta cementación con carbonatos y muñecos de tosca.
7 a 21	Limos de color castaño claro, poco consolidada, presenta cementación con carbonatos y muñecos de tosca.
21 a 24	Limos de color castaño, consolidados y moderadamente cementados con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos (calcretes).
24 a 33	Limos de color castaño rojizo, poco consolidada y cementada con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos y muñecos de tosca.
33 a 39	Limos de color castaño oscuro, consolidados, moderadamente cementados con carbonatos. Intercala niveles o bancos carbonáticos (calcretes).
39 a 51	Limos de color castaño rojizo, poco consolidada y cementada con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos y muñecos de tosca.
51 a 54	Limos de color castaño oscuro, consolidados, moderadamente cementados con carbonatos. Intercala niveles o bancos carbonáticos (calcretes).
54 a 84	Limos de color castaño rojizo, poco consolidada y cementada con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos y muñecos de tosca.
84 a 87	Limos arcillosos de color castaño, poco consolidada y cementada con carbonatos.
87 a 96	Limos de color castaño oscuro, poco consolidada y cementada con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos y muñecos de tosca.
96 a 108	Limos arcillosos de color castaño, poco consolidada y cementada con carbonatos.

Tabla 5. Descripción litológica del pozo 14B.

Profundidad (mbbp)	Descripción litológica
0 a 0,5	Cubierta Edáfica y Relleno
0,5 a 9	Limos de color castaño rojizo, poco consolidada, presenta cementación con carbonatos y muñecos de tosca.
9 a 14	Limos de color castaño rojizo, poco consolidada, presenta cementación con carbonatos y muñecos de tosca.
14 a 21	Limos de color castaño rojizo, consolidados y moderadamente cementados con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos (calcretes).
21 a 27	Limos de color castaño rojizo, poco consolidada y cementada con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos y muñecos de tosca.
27 a 34	Limos de color castaño oscuro, consolidados, moderadamente cementados con carbonatos. Intercala niveles o bancos carbonáticos (calcretes).
34 a 48	Limos de color castaño, consolidada y cementada con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos y muñecos de tosca.
48 a 61	Limos de color castaño oscuro, consolidados, moderadamente cementados con carbonatos. Intercala niveles o bancos carbonáticos (calcretes).
61 a 88	Limos de color castaño, consolidada y cementada con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos y muñecos de tosca.
88 a 92	Limos de color castaño claro, muy consolidada y cementada con carbonatos. Intercala escasos niveles o bancos carbonáticos y muñecos de tosca.
92 a 101	Limos de color castaño claro, muy consolidados y cementada con carbonatos.
101 a 104	Cuarcita o Arenisca cuarzosa de color gris blanquecino, textura sacaroides y fuertemente consolidada con cemento silíceo. Muestra rasgo de microfisuración.

Tabla 6. Descripción litológica del pozo 15.

3.2.2 Estratigrafía del área de estudio

3.2.2.1 Perfilaje de pozos

El perfilaje de pozos es un método geofísico de amplia y probada utilización y eficacia. Consiste básicamente en bajar dentro del pozo recién terminado y con el lodo de inyección sin extraer, una serie de sondas específicas conectadas a un cable obteniendo el registro a lo largo de todo el perfil de distintos parámetros (potencial espontáneo, resistividades y gamma entre otros posibles). La combinación de todos estos registros, que dependen de las características físicas intrínsecas de los terrenos atravesados y su relación y comportamiento con el lodo de inyección, permite identificar los sectores más y menos permeables del subsuelo, grado de mineralización del agua subterránea (resistividades), arcillas, y ajustar el perfil litológico obtenido por el recorte de la perforación de estudio.

Desde 1994 la empresa Aguas de Balcarce S.A. es la encargada de realizar los pozos para abastecimiento urbano de la ciudad de Balcarce, entre los que se cuentan 15 pozos que bombean el recurso directamente del acuífero pampeano. De algunos de estos pozos se pudo analizar información del perfilaje resistivo que se emplea para definir los distintos horizontes del subsuelo y correlacionar la información entre los pozos.

Durante las campañas realizadas en este trabajo, del 13/01 al 01/02/2015, se obtuvo información de los pozos 14 y 15, donde se realizaron los perfilajes resistivos, análisis del recorte de perforación y mediciones de posicionamiento geodésico.

Pozo	Latitud	Longitud	Cota (msnm)
10	37°51'40,1"S	58°16'23,5"O	133
11	37°51'53,5"S	58°16'43,3"O	122
12	37°51'40,5"S	58°14'12,6"O	115
13	37°51'51,1"S	58°13'58,9"O	120
14 ^a	37°50'45,1"S	58°14'26,2"O	108
14B	37°50'43,9"S	58°16'36,6"O	114
15	37°51'36,8"S	58°16'07,5"O	129

Tabla 7. Ubicación de los pozos donde se realizaron los perfilajes.

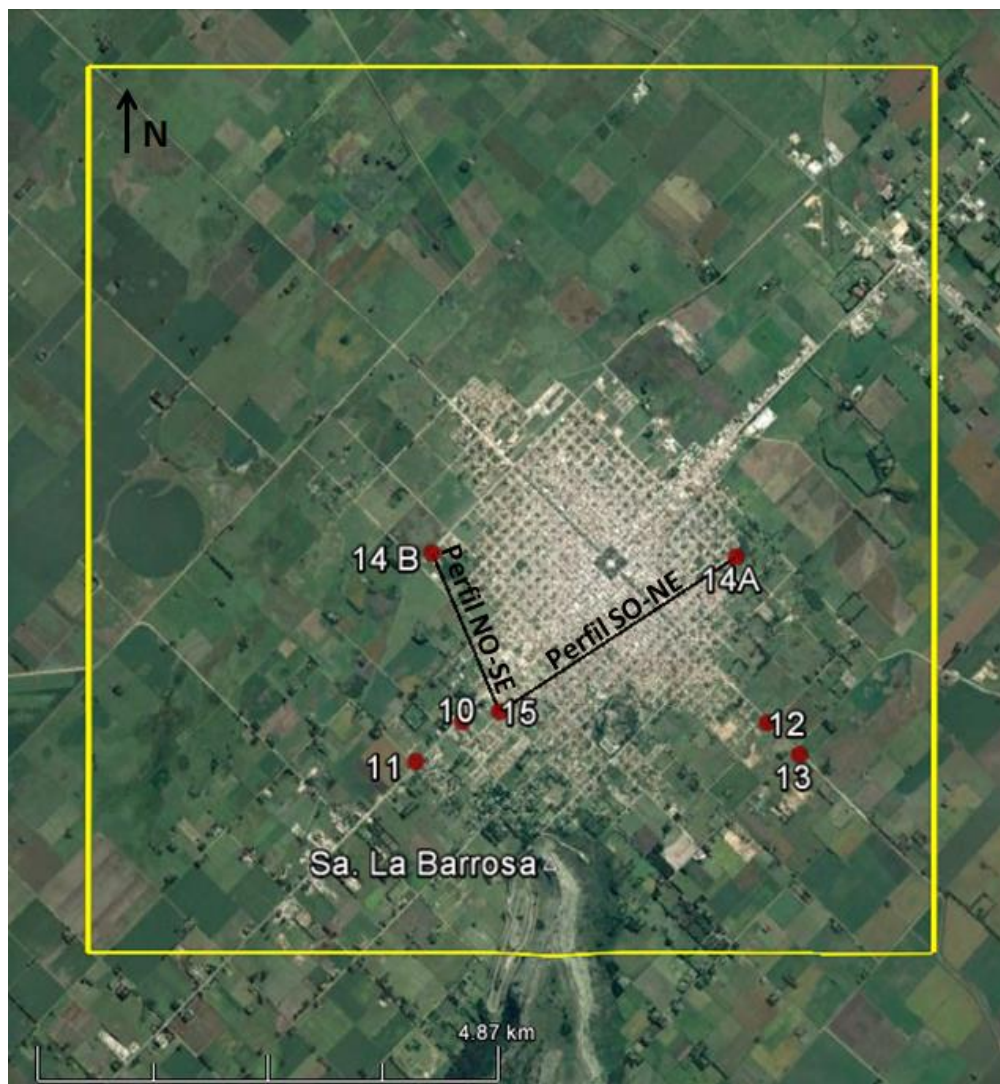


Figura 31. Ubicación de los pozos con información de perfilaje y las transectas de los perfiles integrados.

A continuación, se muestran los resultados de los perfiles resistivos realizados para este estudio.

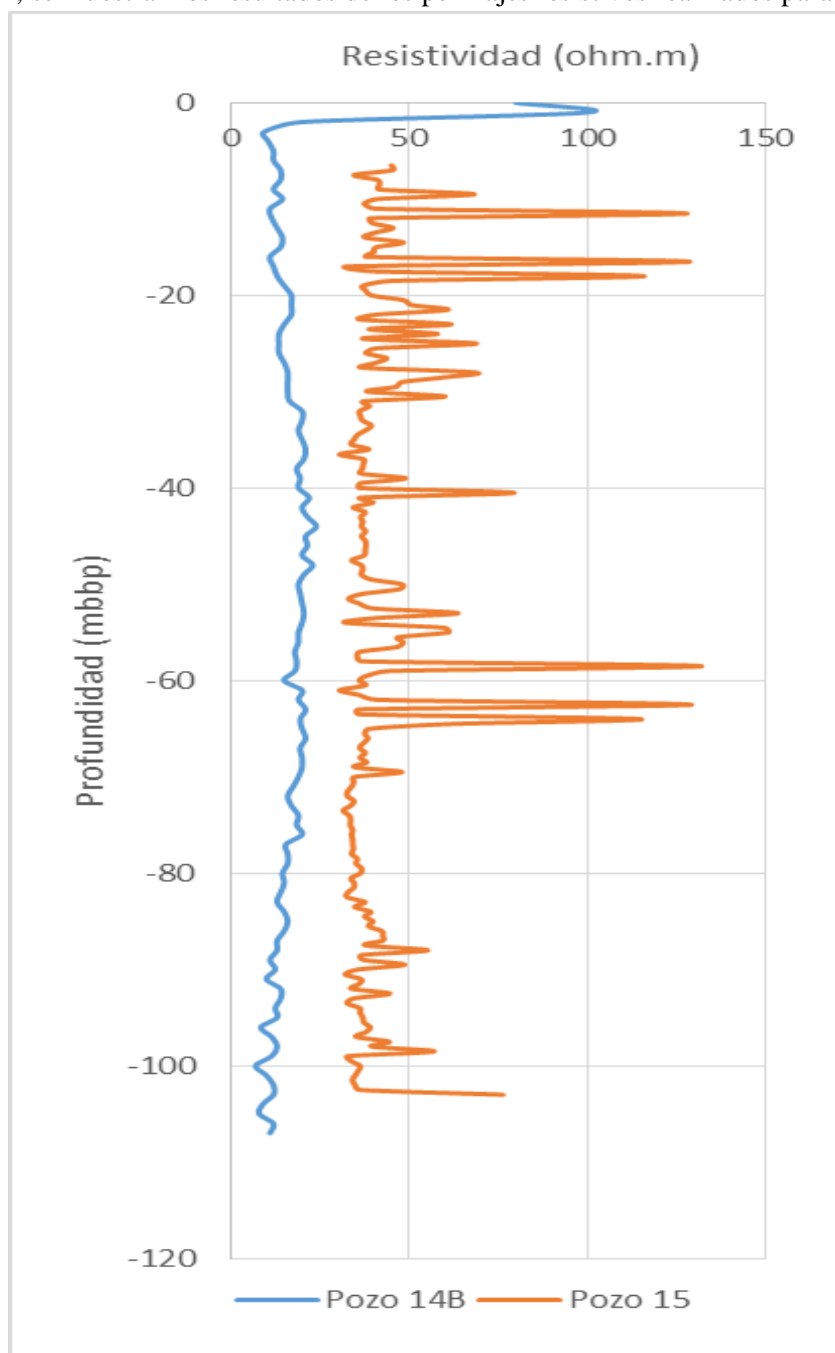


Figura 32. Perfiles realizados en el área de estudio.

3.2.2.2 Interpretación del perfilaje

Al interpretar la información de los perfilajes resistivos de los pozos realizados en las campañas de este trabajo, y compararlos con la de los pozos previos informados por Aguas de Balcarce, se pudieron reconocer distintos niveles en el subsuelo que, con la ayuda de la información bibliográfica, fueron clasificados con distintos niveles formacionales.

- **Horizonte resistivo 1:** se encuentra a nivel superficial. Presenta resistividades altas y espesores de hasta 1 m. Se describe como la cobertura edáfica o suelo.
- **Horizonte resistivo 2:** presenta espesores variables entre 20 y 27 m. Las resistividades bajas, donde se reconocen limos moderadamente consolidados intercalados por distintos niveles de concreciones carbonáticas que se destacan por una mayor disparidad entre la medición de los distintos electrodos de la herramienta. Este nivel se atribuye a la Formación Buenos Aires.
- **Horizonte resistivo 3:** presenta espesores entre 61 y 63 m, con resistividades con valores bajos, donde se reconocen limos moderadamente consolidados intercalados por niveles de mayor consolidación en los que se reconocen niveles de concreciones carbonáticas dispuestas en forma de bandas o mantos. Este nivel se atribuye a la Formación Ensenada.
- **Horizonte resistivo 4:** presenta espesores entre 25 y 26 m, con resistividades con valores bajos, donde se reconocen niveles de limos moderadamente consolidados con escasas intercalaciones de concreciones carbonáticas y niveles de limos arcillosos poco consolidados y moderadamente plásticos. Este nivel se atribuye a la Formación Barker.
- **Horizonte resistivo 5:** presenta espesores desde 8 m, con resistividades de valores bajos, donde se reconocen un nivel de arenisca gruesa a sabulita hacia el techo y otro nivel de arenisca fina a mediana por debajo. Este nivel se atribuye a la Formación Balcarce (basamento hidrogeológico local).

Combinando esta información con las muestras de los recortes de perforación (cutting), obtenidos en los pozos 14B y 15 durante las campañas realizadas en este trabajo, se realizaron los perfiles geológicos que se describen a continuación.

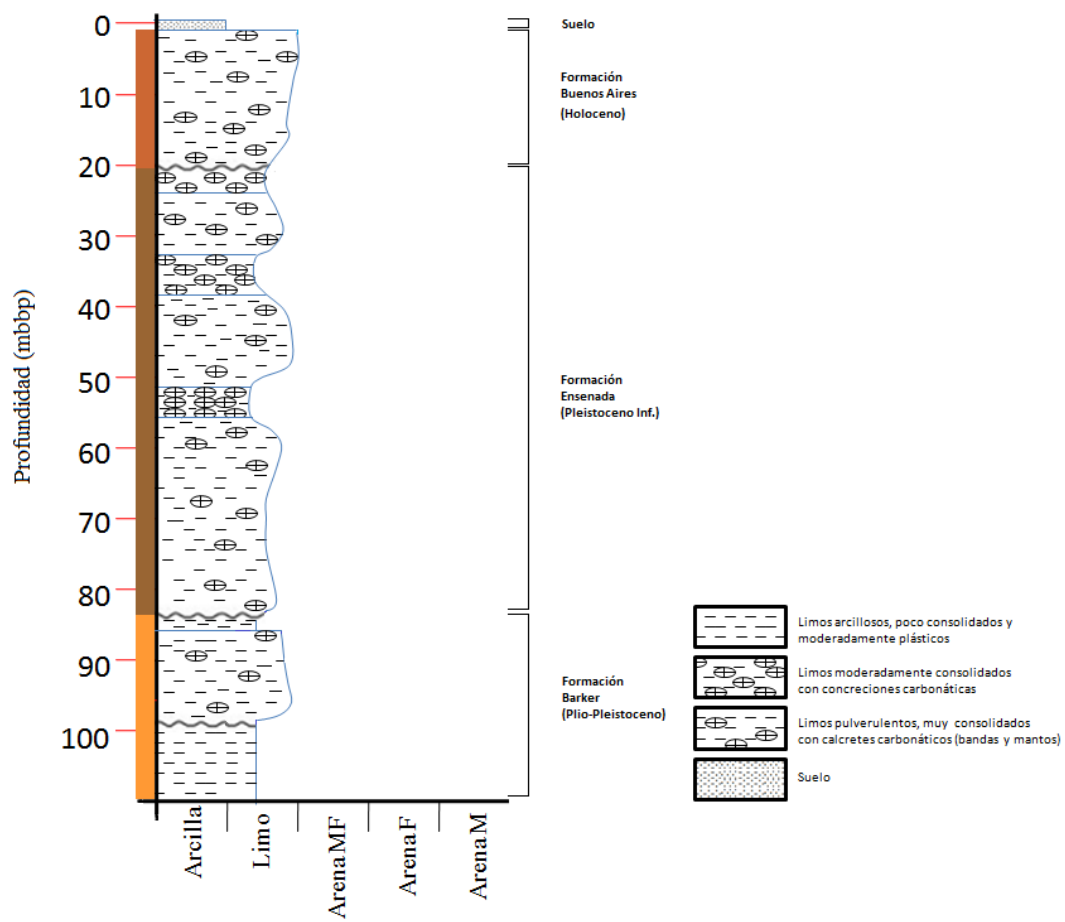


Figura 33. Perfil geológico del Pozo 14B.

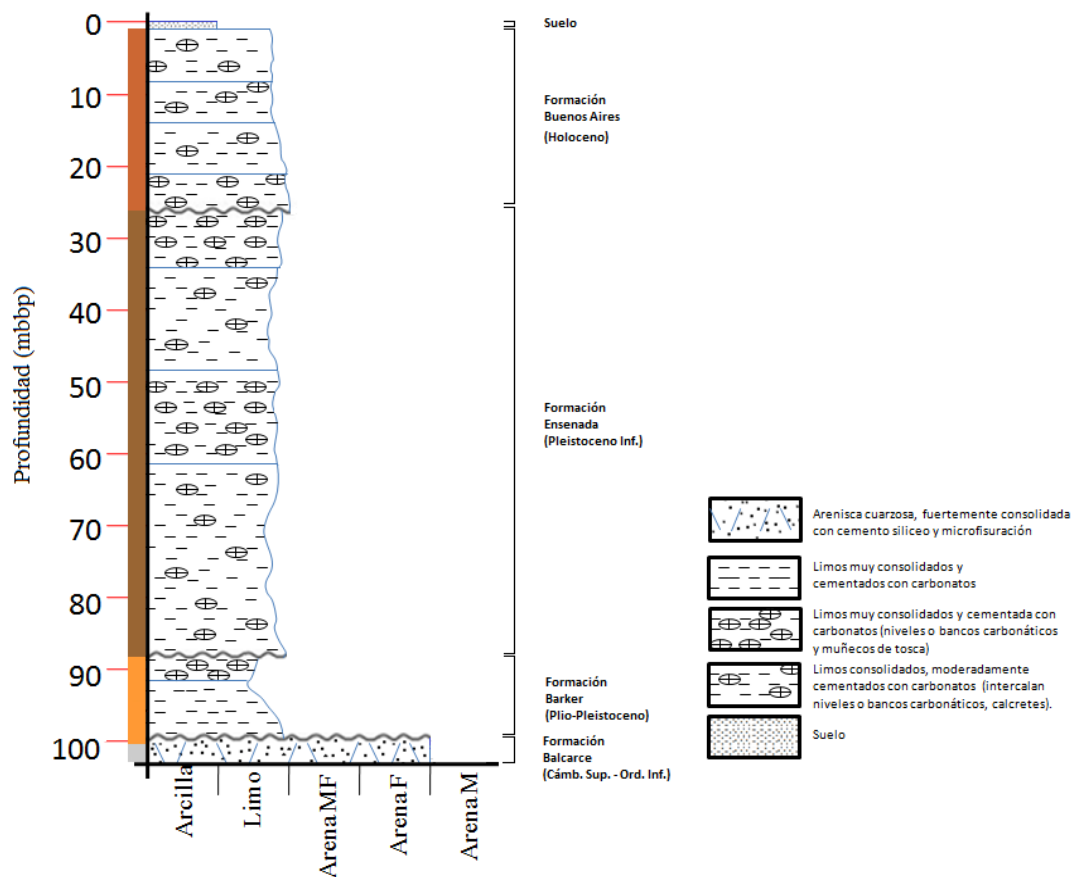


Figura 34. Perfil geológico del Pozo 15.

3.2.2.3 Correlación de perfiles en el área de estudio

La información de los perfiles resistivos se analizó con el fin de establecer las características hidrogeológicas y poder correlacionar los distintos niveles formacionales presentes en el área de estudio. Con la información obtenida se pudo construir un modelo interpretativo, para así comprender la complejidad del subsuelo bajo estudio.

Combinando la información geoelectrica interpretada y los perfiles geológicos se elaboraron dos perfiles representativos del área de estudio; uno con orientación sureste-noroeste, en base a los datos extrapolados de los pozos 14B y 15 realizados en las distintas campañas de este trabajo, extendiéndose desde el sector periserrano norte de la Sierra La Barrosa hacia el Arroyo Pantanos. Mientras que el segundo perfil presenta una orientación suroeste-noreste, en base a los datos extrapolados de entre los pozos 15 y 14A (este último se obtuvo de información previa a este estudio), extendiéndose desde el mismo sector periserrano hacia el Parque Municipal Cerro El Triunfo (ver figura 20, capítulo 3.2.1.1).

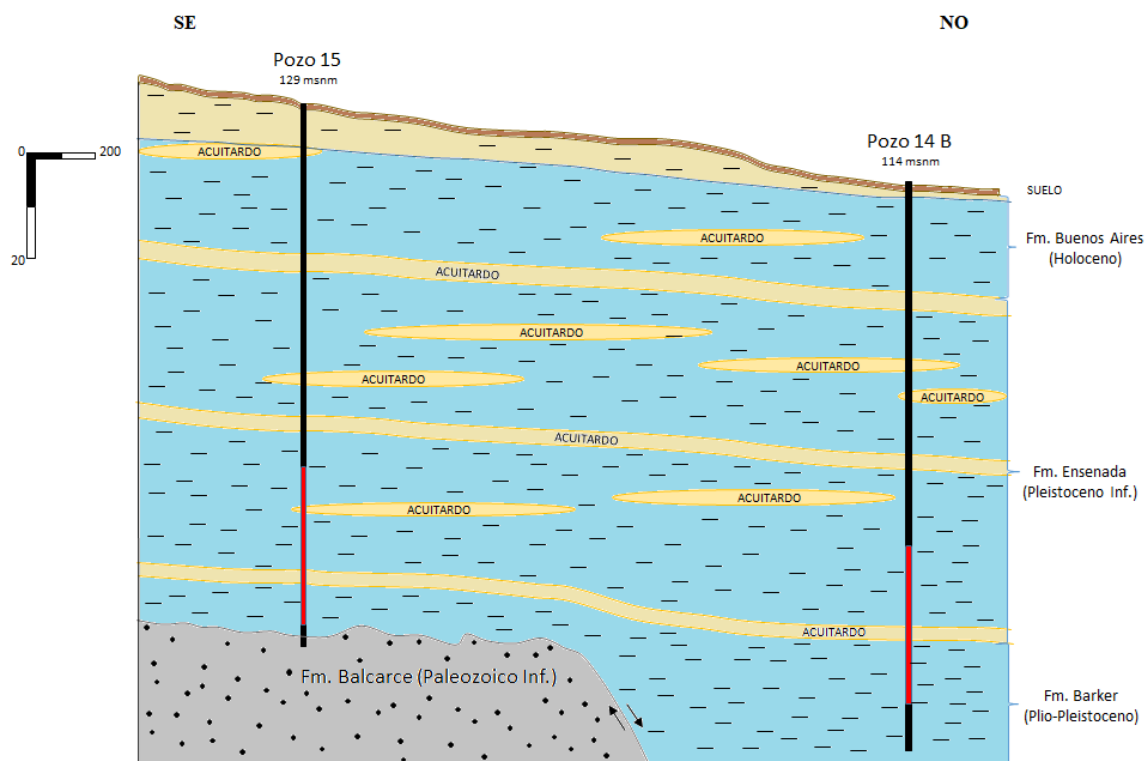


Figura 35. Esquema SE-NO diseñado en base a la información de los pozos realizados en las campañas de este estudio (se destaca en rojo la profundidad de los filtros).

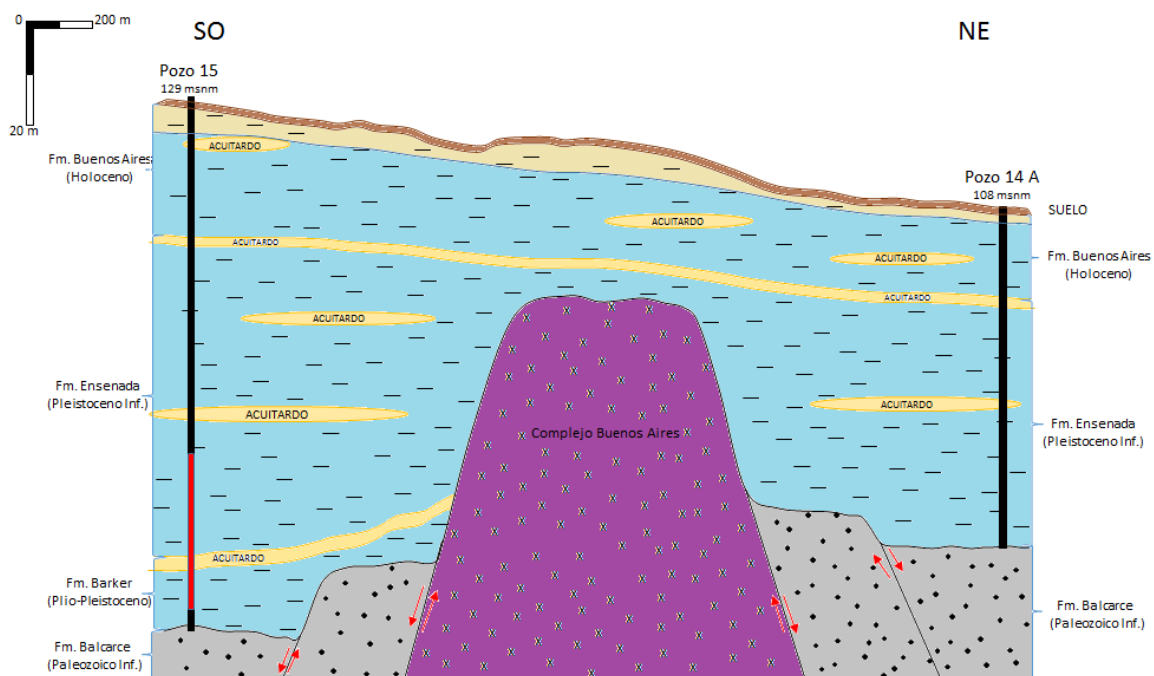


Figura 36. Esquema SO-NE diseñado en base a la información de los pozos realizados en las campañas de este estudio (se destaca en rojo la profundidad de los filtros).

4 GEOMORFOLOGÍA

4.1 Antecedentes geomorfológicos

El Sistema de Tandilia presenta un relieve serrano constituido por una serie de cerros alargados, de cumbres chatas, en forma de mesa y aislados entre sí. Están integrados esencialmente por ortocuarcitas con estratificación subhorizontal de la Formación Balcarce (Teruggi y Kilmurray, 1975). Dichas sedimentitas están expuestas en forma de aleros (aunque también se hallan en el subsuelo, conocidas por perforaciones) para cuya formación se han propuesto distintos orígenes que abarcan desde mecanismos de fallamiento y erosión diferencial (Dumovich y Moneda, 1965) hasta procesos de disolución (Teruggi 1968 y Martínez 2001). Suprayacen en discordancia erosiva al Basamento ígneo-metamórfico, el cual no es visible en estas sierras por estar cubierto por depósitos coluviales y aflora solamente en algunos sectores interserranos. Estos mismos afloramientos también son formas que controlan el relieve local (Nagera, 1940).

Teruggi y Kilmurray (1975) concluyen que el ascenso de los bloques fue acompañado por la implantación de un drenaje de tipo subsecuente en las dos vertientes de las sierras de Tandilia, controlado por líneas de debilidad preexistentes (fallas y diaclasas).

Las máximas alturas se reconocen hacia el noroeste donde se registran 525 msnm en la sierra La Juanita (Tandil), descendiendo progresivamente hacia el noreste y sureste.

Los estudios realizados por Martínez (2007) en las cuevas y reparos rocosos de las Sierras de Tandilia, describen que la erosión diferencial sobre los estratos subhorizontales de ortocuarcitas (Formación Balcarce) se origina a partir de los planos de falla. La profundización y colapso de las cuevas y aleros se produce por la disolución del cemento silíceo por drenaje interno de aguas meteóricas en los afloramientos de la Formación Balcarce. La evolución de las vertientes rocosas lleva a que las cavidades tengan un tiempo limitado de duración, ya que la evolución de las mismas conduce al colapso de los techos. A medida que retroceden los frentes serranos, el material caído pasa posteriormente a formar parte de los coluvios depositados en los sectores medios de las laderas y al pie de las sierras (ver figura 37).

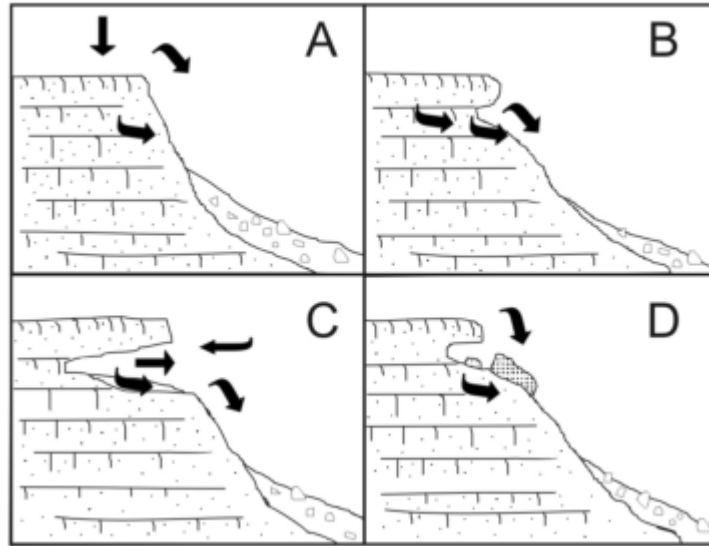


Figura 37. Proceso de generación de cuevas y aleros en el Sistema de Tandilia. A: las flechas indican el ingreso de agua por planos de diaclasas y salida por planos de estratificación y paredes de la ladera. B: agrandamiento de la cavidad por disolución. C: relleno parcial de la cueva con material detrítico y aporte eólico externo. D: colapso del techo y sepultamiento de parte de la estratigrafía. (Martínez, 2001).



Figura 38. Fotografía panorámica desde la ladera occidental de la Sierra La Barrosa hacia la ciudad de Balcarce. Se reconocen bloques que se van derramando por la ladera y provienen de la Formación Balcarce (Isabel Silvia Elola, Panoramio.com).



Figura 39. Fotografía panorámica del principal acceso al mirador de Sierra La Barrosa. Se reconoce un gran bloque desprendido de la Formación Balcarce que, por gravedad, se deslizó varios metros colina abajo (Isabel Silvia Elola).

Tricart (1973) menciona la zona de basamento premesozoico, como consecuencia del alzamiento tectónico que la afecta, ha sido vigorosamente disectada desde el Terciario. Los relieves originales han sido enteramente devastados y reducidos a un sinnúmero de colinas aisladas, entre las cuales se intercalan depresiones, a veces muy anchas y con un relieve muy poco marcado. A pesar de ello, la disección ha multiplicado las pendientes empinadas, lo que permite un escurrimiento importante. Durante las lluvias fuertes, el escurrimiento superficial es importante, dando origen a las crecidas y a una cierta torrencialidad en los arroyos. Pero esta torrencialidad no llega a ser exagerada, porque las depresiones anchas y chatas actúan como amortiguadores naturales de las puntas de crecidas. Este hecho debe ser tomado en cuenta para apreciar la geomorfología del piedemonte serrano. Se observaron depósitos periserranos en el sector suroeste de la sierra La Barrosa, cuyo probable origen se deba a frecuentes lluvias torrenciales que provocan descensos en forma de mantos en la ladera de la sierra. Estos flujos mantiformes descienden rápidamente por la ladera periserrana, transportando parte del material suelto hasta sectores bajos, donde forma los depósitos periserranos. En el Partido de Balcarce se reconoce dicho relieve, controlado por la presencia de sierras que componen el Sistema de Tandilia, con elevaciones que llegan a 383 msnm (Sierra La Bachicha), un ambiente periserrano asociado y llanuras que se extienden hacia el norte y noreste donde se registran los niveles promedio más bajos (35 msnm). Tomás et al (2005) describen rocas de tres ambientes geomorfológicos principales: Sierras, Franja Eólica Periserrana y Planicie Fluvioeólica (hacia el norte). Los rasgos dominantes del paisaje corresponden a los afloramientos serranos del Sistema de Tandilia. Estas sierras y serranías se presentan aisladas entre sí y separadas por amplios valles, que han sido cubiertos por depósitos eólicos, esencialmente limosos (loess) que forman un paisaje de colinas.

Martínez (2002) reconoce un ambiente constituido por lomas interserranas, de morfología compleja, en los frentes serranos y en los amplios valles interserranos. Pueden alcanzar alturas relativas de hasta 60m y su morfología es compleja, pasando de formas elongadas a subcirculares, debido a que sobre ellas se ha implantado un drenaje de pequeños cauces temporarios que modifican parcialmente su morfología.

Tricart (1973) describe que la zona de piedemonte cercana a los cerros, durante el último período seco, los cauces alimentados por este escurrimiento hipodérmico se secaban como consecuencia de la mayor evaporación. Este proceso originó una fuerte concentración de sales en las zonas más propicias para el estancamiento del agua (sectores de ensanchamiento de los valles o de disminución de la pendiente) perjudicando así la vegetación, cuya ausencia permitió la acción de deflación y la excavación de cubetas. Como consecuencia de este proceso de deflación, toda una serie de cubetas aparecen en la parte baja de los valles, excavados en la zona de lomadas del piedemonte, a lo largo de los pequeños cursos de agua.

Tricart (1973) propone que las lluvias de cenizas fueron retomadas por el agua y luego abandonadas en forma de inmensos derrames, los cuales se presentan como una serie de gigantescos abanicos coalescentes, con sus vértices ubicados al pie de las sierras en los puntos donde desembocan las principales cuencas. Actualmente, los arroyos corren a lo largo de las líneas de contacto entre los abanicos, donde el relieve más deprimido favorece la concentración del agua.

4.2 Geomorfología del área de estudio

En el área de estudio de este trabajo se pueden reconocer tres ambientes geomorfológicos principales: las sierras, la franja eólica periserrana y la planicie fluvio-eólica.

4.2.1 Sierras

Están constituidas por una serie de cerros alargados, de cumbres chatas, en forma de mesa (ver Figura 40), que son el producto de fallamiento y erosión de los mantos subhorizontales de las ortocuarcitas de la Formación Balcarce (Teruggi y Kilmurray, 1975).



Figura 40. Vista panorámica desde la sierra La Barrosa, 334 msnm, hacia el noreste.

En el sector interserrano se reconoce un relieve compuesto de suaves lomadas que, según la descripción de Martínez (2002) del capítulo 4.1, corresponden a depósitos eólicos aunque no se han podido reconocer geoformas debido a las modificaciones causadas por el crecimiento demográfico y la cobertura vegetal.

La sierra La Barrosa (334 msnm) presenta un relieve primario generado por fallamiento a partir del cual en los afloramientos de ortocuarcitas de la Formación Balcarce que afloran en la cima se han reconocido al menos 4 familias de diaclasas que, por meteorización fluvial y eólica, generan desprendimientos de bloques de distintos tamaños (desde centímetros a más de 2 m) que son removilizados ladera abajo por la gravedad y se acumulan en la ladera periserrana próxima donde vuelven a ser alterados por agentes meteóricos (lluvias, viento) y se degradan paulatinamente a tamaños menores. Este es el principal proceso de erosión de la sierra, aunque se reconoce una matriz fina (limo-arcillosa) que es producto del transporte eólico de partículas finas a partir de los vientos que predominan del sector N-NO. Los mismos depósitos que Kraglievich (1953) reconoció en la sierra Del Volcán (próxima al área de estudio).

Entre los distintos niveles de afloramientos que presenta la Formación Balcarce, en la sierra La Barrosa, se reconoce abundante vegetación que se desarrolla al reparo de los vientos y forma una fina cubierta de suelo orgánico que protege los mismos afloramientos de los agentes erosivos (ver figura 41).



Figura 41. Vista panorámica de la ladera occidental de la sierra La Barrosa.

Además, en la figura 41 se pueden observar los distintos sectores de la sierra que se han forestado con el fin de proteger las construcciones cercanas (casas, autódromo). Se puede observar vegetación arbórea en el extremo oeste de la sierra y distintos sectores forestados con vegetación herbácea cerca de la traza del autódromo.

Al pie de las cumbres planas, la sierra termina en rupturas abruptas de pendiente (entre 25 y 90°) dando lugar a frentes rocosos. Estos sectores de roca desnuda pasan pendiente abajo transicionalmente a acumulaciones de detritos, los cuales presentan diferentes procesos de remoción en masa (dominan esencialmente los procesos de meteorización física) y se extienden hasta los 130 msnm. Estos procesos afectan a los afloramientos de las ortocuarcitas de la Formación Balcarce en los que se reconocen cuatro familias principales de diaclasas, a partir de los cuales se generan clastos de variado tamaño, luego removidos por el agua y la gravedad pendiente abajo (Martínez, 2001).

Los pobladores locales comentan que durante las lluvias intensas se observa una “cortina” de agua descender por la ladera de la sierra, esta observación hace alusión al comportamiento de tipo flujo laminar que desarrollan las aguas de escorrentía superficial y que son un importante agente erosivo y de transporte de los detritos ladera abajo. Para evitar la erosión de este proceso, las autoridades municipales están forestando la ladera principal sobre el autódromo para proteger a las personas que asisten a los eventos del riesgo geológico descrito (en la figura 41 se pueden observar sectores forestados recientemente).

4.2.2 Franja eólica periserrana

Aunque los procesos anteriormente descriptos son los que mejor se han podido reconocer en el relevamiento geomorfológico del área de estudio, no son los principales debido a que su evolución es lenta.

A partir de las fracturas presentes en las sierras se desarrollan procesos de remoción en masa (vuelcos, caídas, deslizamientos y flujos) que movilizan distintos bloques a lo largo del talud de detritos periserrano conformando los depósitos coluviales, compuestos por una mezcla heterogénea que va de bloques de algunos metros hasta arcilla (estos depósitos se extienden desde el frente serrano hasta más de 1 km de distancia con pendientes que se van atenuando hacia el norte). Sobre estos Martínez (2002) reconoce un ambiente constituido por lomas interserranas, de morfología compleja, en los frentes serranos y en los amplios valles interserranos. Pueden alcanzar alturas relativas de hasta 60m y su morfología es compleja, pasando de formas elongadas a subcirculares, debido a que sobre ellas se ha implantado un drenaje de pequeños cauces temporarios que modifican parcialmente su morfología.

Este relieve complejo, que se extienden entre los 115 y 130 msnm en el área de estudio, está vinculado con los ciclos de deposición eólica del Pleistoceno Superior – Holoceno, dando lomas de formas complejas debido a la interferencia que ofrecieron los cuerpos de las sierras a los paleovientos del oeste y sudeste, favoreciendo la mayor deposición de los limos que transportaban. También se debe tener en cuenta la influencia de los relieves positivos del basamento rocoso que, si bien no llega a aflorar, controla la forma de las lomas (ver figura 42).

4.2.3 Planicie fluvio-eólica

Hacia el sector norte del área de estudio, por debajo de los 115 msnm, se reconoce una extensa llanura que presenta un relieve con escasa pendiente (10^{-4}) orientado hacia los arroyos. Está caracterizado, hacia sector noroeste, por zonas deprimidas e inundables donde se desarrolla un drenaje dendrítico, de baja densidad, y que alimentan los principales cauces que drenan la escorrentía superficial (ver figura 42). Hacia el noreste, no es posible reconocer estas características debido al desarrollo del casco urbano.

Aunque el drenaje es bueno, hacia el oeste y noroeste existen zonas donde se reconocen superficies anegadizas interserranas, que podrían considerarse como superficies de captación hídrica, en donde se forman bañados en épocas de abundante precipitación (son suaves depresiones que presentan una cobertura vegetal de menor densidad que los alrededores).

Dentro del área de estudio se reconocen dos cauces fluviales permanentes que presentan un diseño dendrítico y un drenaje SO-NE. Reciben el nombre de Arroyo Pantanoso y su afluente el Arroyo Seco. Debido a las modificaciones antropogénicas que se reconocen en los cauces, los mismos presentan un diseño subparalelo orientado para favorecer su drenaje.

Aunque los depósitos sedimentarios no son visibles en superficie, debido a las modificaciones antrópicas, gracias a la bibliografía citada en los antecedentes se describen granulometrías limo-arcillosas (similares al loess pampeano) transportadas por el viento.

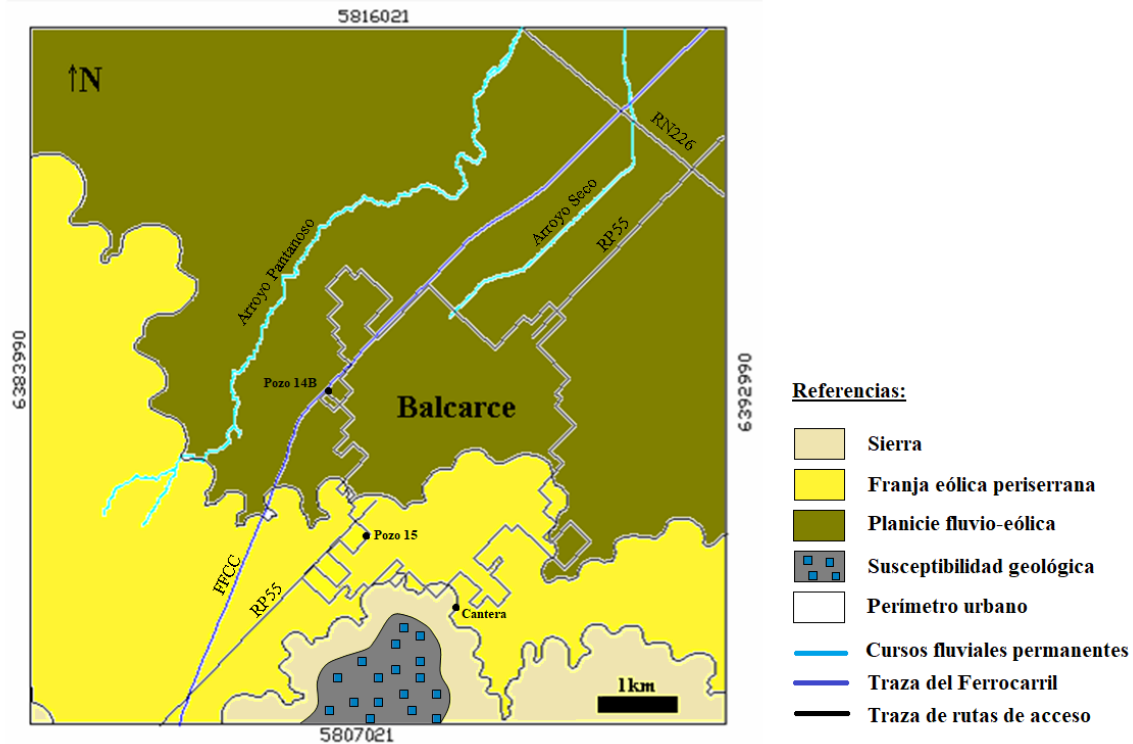


Figura 42. Mapa geomorfológico del área de estudio.

Analizando las características geomorfológicas del área de estudio, y teniendo en cuenta los antecedentes bibliográficos citados, se puede describir un ambiente periserrano en donde se reconocen distintos procesos erosivos actuantes que dieron como resultado una topografía en donde se destacan sectores elevados (sierras) que superan los 300 msnm y se presentan en afloramientos rocosos subhorizontales mayormente desarrollados en sentido NE-SO. Los procesos geomorfológicos son del tipo fluvial, remoción en masa y eólicos (paisaje compuesto), que actúan sobre los afloramientos rocosos y fabrican los depósitos periserranos e interserranos.

Debido al importante desarrollo de vegetación natural y al avance de la actividad agropecuaria, la cobertura de las morfologías es casi total y los procesos erosivos, aunque siguen actuando, no afectan en gran medida al paisaje actual.

Los procesos fluviales se reconocen hacia el sector norte donde se observan los cursos permanentes de los arroyos Pantanoso y Seco los cuales presentan un hábito subparalelo, aunque presentan importantes canalizaciones para evitar la inundación del sector urbano. Estos conforman una red de diseño dendrítico subparalelo extendida en dirección NO-SE con drenaje hacia el Océano Atlántico al SE. En las zonas de cabecera se reconocen distintos bajos interserranos que concentran el escurrimiento superficial proveniente de los sectores serranos elevados durante las precipitaciones.

Hacia el sector sur del área de estudio se observan pendientes mayores debido a la presencia de la sierra La Barrosa sobre cuyas laderas no es posible reconocer patrones de escurrimiento debido a la cobertura vegetal. Aunque es importante destacar el efecto erosivo que producen sobre las diaclasas de los afloramientos rocosos que cubren las sierras y sobre los cuales se acumulan pequeños cuerpos de agua, de carácter efímero, que drenan a través de las diaclasas.

Sobre el sector periserrano se reconocen bloques de distintas dimensiones, desde 0,5 m a más de 1 m, que son producto de los procesos de remoción en masa que actúan sobre los afloramientos rocosos. Estos desprendimientos se pueden reconocer hasta 200 m de distancia, aunque la forestación enmascara la distancia real que pueden alcanzar.

Además, sobre el sector periserrano, se destacan depósitos sedimentarios de texturas finas (limo-arcillosas) que son producto del transporte eólico y fluvial. Los mismos cubren parcialmente los afloramientos rocosos y los protegen de la erosión fluvial directa.

Finalmente, con la información detallada, es posible interpretar la evolución geomorfológica del área de estudio. La misma comienza desde el desarrollo de movimientos relativos entre los distintos bloques de basamento que generan sectores elevados entre los que se originan depresiones por donde se encauzan los principales cursos fluviales subsecuentes.

A partir de estos cursos se desarrolla erosión retrocedente hacia las cabeceras que afectan a los sectores elevados hasta reducirlos al conjunto de sierras actuales. Los mismos acumulan el producto de la erosión en el sector periserrano inmediato, donde se mezcla con la importante acumulación eólica de sedimentos finos.

El área de estudio se caracteriza por bajas pendientes hacia el sector norte que aumentan notablemente hacia el sector sur donde se reconocen pendientes importantes en el sector periserrano y sobre las laderas de la sierra La Barrosa. No es aconsejable el desarrollo de construcciones sobre las laderas de la sierra, por encima de la cota de 140 msnm, debido a la susceptibilidad por desprendimientos y caídas de bloques desde el frente serrano (ver sector delimitado en figura 42). Aunque es destacable la tarea de reforestación arbórea hacia el sector suroeste de la sierra donde los afloramientos se encuentran poco cubiertos por los depósitos eólicos. Además se está forestando con vegetación herbácea sobre la ladera norte para evitar la remoción eólica de los depósitos limo-arcillosos que cubren los afloramientos rocosos (ver figura 41).

5 Estructura y evolución tectónica del Sistema de Tandilia

Los primeros estudios gravimétricos y magnetométricos (Ramos et al., 1990 y Kostadinoff, 1995) identificaron anomalías positivas al norte de la Faja El Cortijo que permiten interpretar la presencia de rocas máficas y ultramáficas en el sector inmediatamente al norte de las localidades de Tandil y Azul. Las rocas metamórficas están atravesadas discordantemente por diques de diabasa, metavolcanitas ácidas y diques basálticos que se emplazaron en un ambiente extensional de intraplaca y con una edad imprecisa dentro del Proterozoico inferior.

Teixeira et al. (2002) definen al Sistema de Tandilia en el sector más austral del cartón del Río de la Plata (RLPC, ver Figura 43), intruido por dos grupos de diques paleoproterozoicos. El primer grupo, de composición intermedio-ácida y calco-alcalinis, presenta edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre 2020 ± 24 Ma y 2007 ± 24 Ma. En estos, definen los autores, predominan una orientación este-oeste asociada a la etapa transtensional de la orogenia Trans-Amazónica durante la cual se formaron las rocas plutónicas del Sistema de Tandilia (evolución similar al subcontinente de África meridional en la reconstrucción de Gondwana occidental).

Mientras que el segundo grupo, de composición básica y toleítica, presenta edades K-Ar de 803 ± 14 Ma a 1193 ± 18 Ma. Teixeira et al. (2002) definen una orientación principal noroeste-sureste. Este tipo de régimen de intraplaca para el emplazamiento de los diques más jóvenes de Tandilia es consistente con la escala transcontinental, los episodios de extensión diacrónicos en el continente sudamericano que se iniciaron poco después de la orogenia transamazónica.

El panorama general refuerza la idea de que las orogenias transamazónicas – eburneanas desempeñaron un papel importante para la acumulación de cratones juveniles en el sur de América del Sur y su contraparte del sur de África, a la que siguió una tendencia a la dispersión de los fragmentos continentales estabilizados durante el Mesoproterozoico, precediendo el montaje del supercontinente de Rodinia.

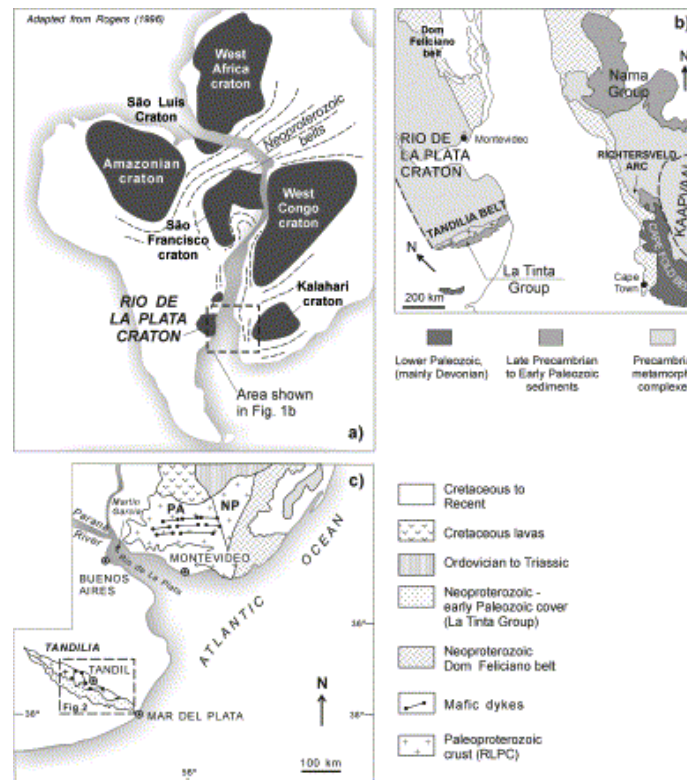


Figura 43. a) Distribución de los cratones principales del Gondwana occidental (Paleoproterozoico); b) mostrando la estructura tectónica meso y neoproterozoica adyacente en el sur de América del Sur y la esquina suroeste de África; c) Mapa geológico del cratón del Río de la Plata (Terreno de Piedra Alta (PA) y Sistema de Tandilia), mostrando las ocurrencias de los diques y la colisión del terreno Nico Pérez (NP) y el cinturón Neoproterozoico Dom Feliciano (Teixeira et al., 2002).

Los movimientos del Ciclo Brasiliano habrían producido importantes fallamientos en las rocas de la corteza sudamericana con la consecuente formación de un sistema de bloques. Al desarrollarse la peneplanización del Basamento Cristalino del Cratón del Río de la Plata, se produjo la sedimentación silicoclástica durante el Paleozoico inferior en un ambiente marino dominado por mareas, representado fundamentalmente por la Formación Balcarce (Suero et al., 2008). Zimmermann y Spalletti (2009) plantean que las areniscas cuarzosas del Paleozoico Inferior denominadas Formación Balcarce comprenden principalmente material detrítico derivado del material de la corteza superior cuyas fuentes eran terrenos magmáticos, sedimentarios y

subordinados félsicos metamórficos asociados a la colisión oblicua/ortogonal del Terreno Precordillera con el margen occidental del Cratón Río de la Plata, al oeste de la zona de estudio de este trabajo.

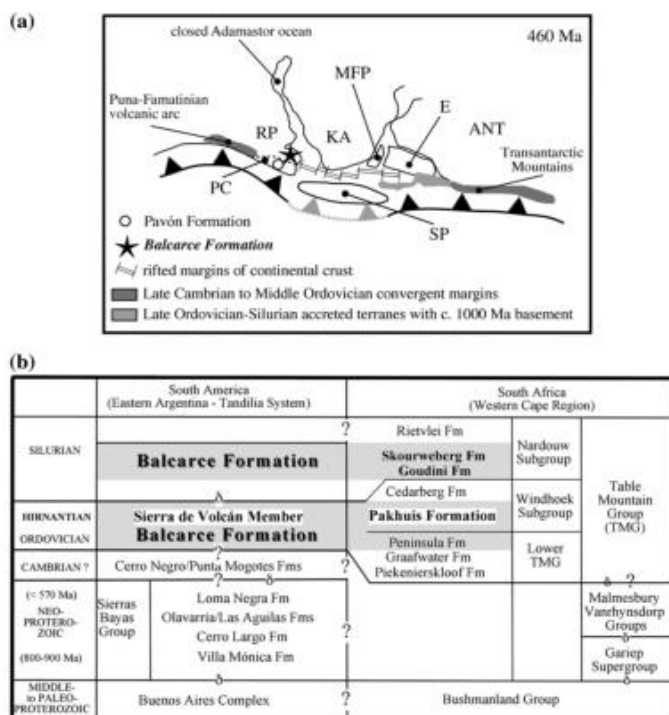


Figura 44. a) Reconstrucción paleogeográfica y paleotectónica de Gondwana occidental donde se muestra la localización de la Formación Balcarce (estrella negra), los márgenes de rifts sobre la corteza continental y el hipotético margen continental activo que conecta el arco Ordovícico en la Argentina y la Antártida. La línea punteada entre la cuenca del Balcarce y la Formación Pavón marca una posible sutura entre la Precordillera y el Cratón del Río de La Plata. b) Litoestratigrafía para el Sistema Tandilia y su correlación con sucesiones equivalentes de Sudáfrica. Las áreas grises marcan las sucesiones propuestas para la correlación. En negritas, los diamictitas glaciares depositadas tanto en el Cratón Río de la Plata y en el Cratón Kalahari (Zimmermann y Spalletti, 2009).

MFP: Malvinas, SP: Patagonia Sur, PC: Terreno de Precordillera, KA: Kalahari, RP: Río de La Plata, ANT = Antártida; E = Montañas Ellsworth.

Los estudios geoquímicos y petrográficos de los depósitos de la Formación Balcarce (Zimmermann y Spalletti, 2009) indican que las principales áreas de aporte detrítico fueron el subsuelo del Cratón Río de la Plata (granitos en Sudáfrica y Sierras Australes en Argentina). Además registran material piroclástico reciclado, asociada con las areniscas cuarzosas, que sugiere fuentes de arco volcánico (posiblemente el arco Puna-Famatina, situado en el norte y centro de la Argentina, o un hipotético margen activo más al sur).

También interpretan, como miembro de la Formación Balcarce, la presencia de depósitos de origen glaciario del Hirnantiano (Diamictita Sierra del Volcán). Lo cual, basado en la reubicación estratigráfica de la diamictita glacial y de los fósiles traza, hace que consideren a la Formación Balcarce con edades del Ordovícico-Silúrico.

A continuación, comienzan a desarrollarse de eventos extensionales que controlan y modelan el patrón de fracturación regional, así como los ascensos y descensos relativos entre bloques. Estos bloques, al estar limitados por fallas de actitud subvertical e incluir el basamento rígido en su estructura, pueden oponer gran resistencia a los esfuerzos compresivos que pudieran haber actuado,

los que, al no poder penetrar en el seno de los bloques, concentraron su acción en dichas fracturas (Selles-Martínez, 1993).

Durante el Ordovícico se registran evidencias de extensión mediante la presencia de cuerpos intrusivos de edad ordovícica y composición diabásica, que afectan a la Formación Balcarce (Rápela et al, 1974). Son descriptos como diques de orientación noroeste-sureste y evidencian reactivación extensional; podrían estar asociados a una fase de atenuación cortical (Selles-Martínez, 1993).

En el Mesozoico se configuran numerosas cuencas sedimentarias alrededor de las Sierras de Tandilia, impulsado desde el este-sudeste por la apertura del Océano Atlántico mediante un ambiente extensional producto del desarrollo de la dorsal centro oceánica del Atlántico Sur, lo que genera fallas directas que estructuran la futura plataforma continental aprovechando los lineamientos noreste-suroeste para extenderse y los este-oeste como fallas transformantes. Mientras que al noreste, durante el precretácico, comienza a insinuarse la apertura de la cuenca del Salado, aprovechando las fallas noroeste-sudeste (Selles-Martínez, 1993).

Actualmente las Sierras de Tandilia presentan una orientación noroeste-sureste, alcanzando una longitud aproximada de 350 km y un ancho máximo de 50km (en su parte media), acuñándose los afloramientos hacia ambos extremos (Selles-Martínez, 1993).

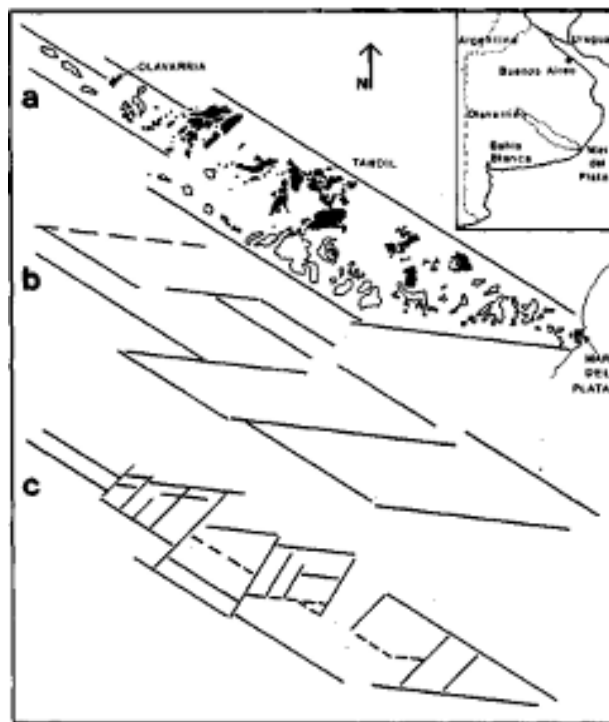


Figura 45. Lineamientos regionales del Sistema de Tandilia (a), destacando los principales bloques (b) y la fragmentación local (c). Sellés-Martínez, 1993.

Aunque las fracturas señaladas en la figura 45 son inferidas a partir de mapas geológicos regionales, debido a que su reconocimiento en el terreno se encuentra sumamente dificultado por la cubierta cenozoica y el retroceso de la escarpa de falla por erosión (Selles-Martínez, 1993).

La evolución estructural del Sistema de las Sierras de Tandilia se define como una típica tectónica de bloques limitados por fallas de alta inclinación y desplazamientos reactivados en diferentes episodios.

La composición litológica, las relaciones estratigráficas y las edades inferidas sugieren que los depósitos neógenos de la región extraandina central de Argentina, que se desarrollaron durante el Plioceno, se ubican fundamentalmente en la cuenca del Colorado y en el margen sudeste del positivo bonaerense (Folguera y Zárata, 2009).

6 HIDROGEOLOGÍA

6.1 Antecedentes hidrológicos e hidrogeológicos

En la República Argentina existen distintas unidades acuíferas, algunas de ellas de gran extensión regional, siendo identificables como unidades hidrogeológicas que se encuentran explotadas de manera diversa, ya que el país contiene regiones con diferentes características climáticas, geológicas e hidrológicas, de desigual desarrollo económico y de alto desequilibrio demográfico (ACRHSRA, 2010).



Figura 46. Mapa de las Regiones Hidrogeológicas Argentinas (ACRHSRA, 2010).

La Región de la Llanura Pampeana (VII en la Figura 46) presenta distintas características que la destacan (Suero et al., 2008).

- Su gran extensión areal aunque de difícil delimitación.
- Los límites hidrogeológicos de cuenca no se corresponden con los superficiales
- Suelen poseer varias capas acuíferas conectadas entre sí por niveles geológicos que los semiconfinan.
- Contiene a los acuíferos más explotados del país e hidrogeológicamente los más complejos de estudiar.
- Poseen recarga vertical alimentándose de las precipitaciones de la región, por lo cual se comportan en clara correspondencia con el ciclo hidrológico externo.
- Los parámetros hidráulicos también dependen de la litología, y del espesor de la capa acuífero, pero varían frecuentemente a causa de su variable grado de confinamiento y de la variación en permeabilidad.
- En régimen natural estos acuíferos alimentan los cursos fluviales de la región, que se constituyen en las zonas de descarga.

El Partido de Balcarce se encuentra ubicado en lo que, según Santa Cruz y Silva Busso (1999), se define como Subregión Periserrana de Tandilia (ver Figura 47).

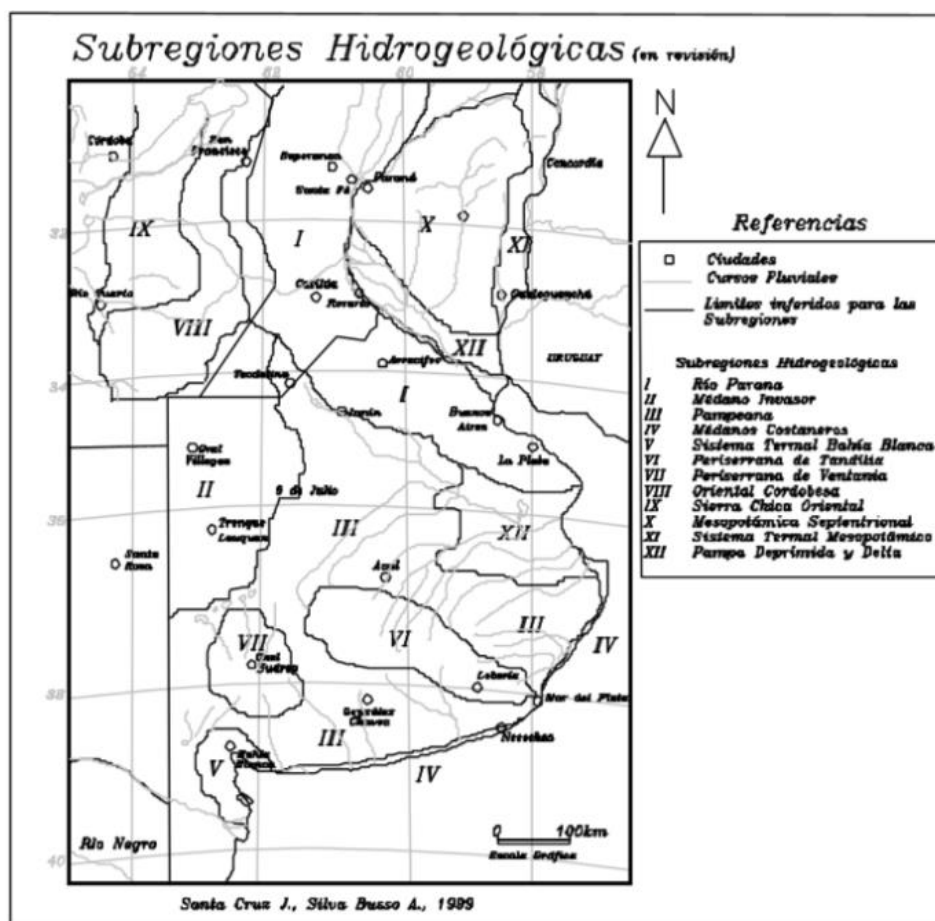


Figura 47. Subregiones Hidrogeológicas Argentinas (Santa Cruz y Silva Busso, 1999).

La Subregión Hidrogeológica VI (Periserrana de Tandilia) comprende las zonas ubicadas al pie y en las cercanías de las Sierras de Tandilia, alineadas en el sentido NW-SE desde las zonas cercanas al mar hasta la Sierra de la China, en Olavarría (Santa Cruz y Silva Busso, 1999). Esta subregión tiene como características comunes la conformación morfológica superficial caracterizada por lomadas suaves que pasan en transición al ambiente de llanura. La mayoría de las perforaciones realizadas para la captación de agua con distintas finalidades alcanzan el techo del Basamento hidrogeológico a distintas profundidades, con variaciones notables en su profundidad en cortas distancias, aunque como regla general puede decirse que se profundizan en relación directa con las distancias desde las sierras (Suero et al., 2008).

La hidrografía regional se presenta como una red compuesta por cursos de agua, tanto permanentes como intermitentes, estos últimos predominan y presentan sus nacientes en el área serrana y periserrana, descendiendo para ser afluentes de arroyos permanentes, al noreste, los cuales drenan en dirección este-oeste hacia el océano Atlántico (presentan cauces pequeños y bajos caudales) hasta converger en la serie de lagunas cercanas a la localidad de Mar Chiquita, que conforman una albufera y constituye el nexo entre las aguas continentales y oceánicas del Océano Atlántico Sur. Se define así la región VII o región de la Laguna Mar Chiquita (ver figura 48), en una superficie aproximada de 12.100 km².



Figura 48. Región hídrica VII o Cuenca Laguna Mar Chiquita (ACRHSRA, 2010).

La llanura donde se desarrolla esta cuenca es una extensa planicie de origen reciente, con pendiente general hacia el este hasta el sector costero donde el escurrimiento se desvía naturalmente hacia el sur por la presencia de médanos costeros. La región presenta características propias de la llanura donde las pendientes son casi nulas y los microrelieves adquieren importancia, en zonas más bajas se acumula el agua y constituyen bañados y lagunas (ACRHSRA, 2010).

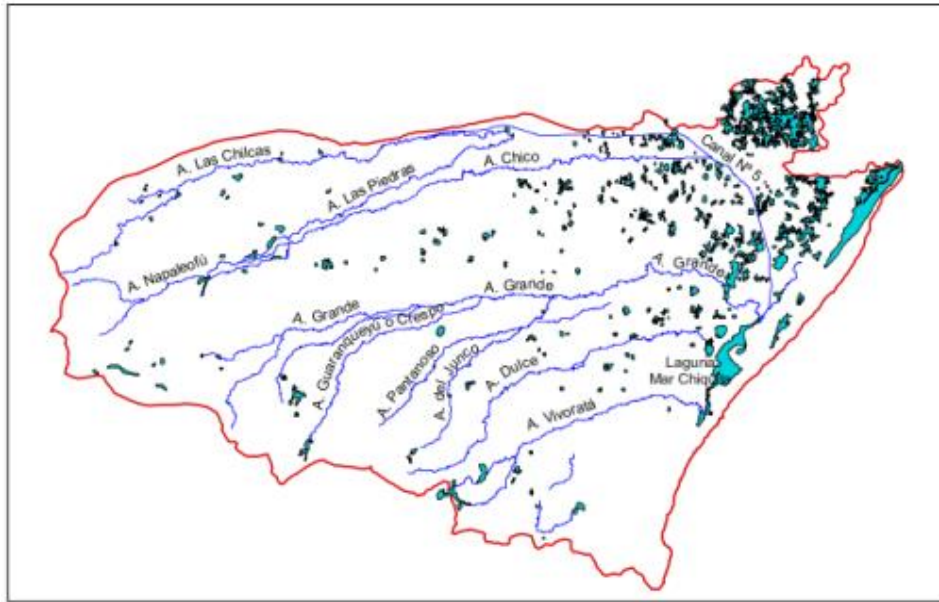


Figura 49. Cursos fluviales permanentes en la región VII (ACRHSRA, 2010).

La hidrografía del Partido de Balcarce, que forma parte de la vertiente oriental del Sistema de Tandilia, se caracteriza por cursos de escasa expresión topográfica, a menudo de régimen intermitente. El arroyo más destacado, por su caudal y extensión, es el Arroyo Grande ($1,59 \text{ m}^3/\text{s}$) que recorre el Partido de oeste a este. Este arroyo recibe cuatro afluentes de régimen permanente (Arroyo El Invierno, Arroyo Bachicha o El Verano, Arroyo Guaranguayú o Crespo y Arroyo Pantanoso) y presenta un diseño de drenaje básicamente subparalelo asociado a numerosos colectores secundarios de régimen temporario o efímero (Massone, 2003).

Las lagunas deben su origen principalmente a procesos de erosión del viento, durante épocas más áridas, donde la cubierta de vegetación era lo suficientemente escasa como para permitir al viento excavar huecos, que posteriormente se transformaron en lagunas con climas más húmedos en la actualidad (Tricart, 1973).

La cuenca del Arroyo Pantanoso presenta una superficie de 489 km^2 , donde sus nacientes se encuentran en la planicie fluvioeólica lindante al sector norte de la sierra La Barrosa, y se extiende al noreste hacia su desembocadura en el Arroyo Grande (Coronel Vidal, Partido de Mar Chiquita). El Precámbrico y Paleozoico inferior de la región constituyen en el marco de este estudio, el Basamento Hidrogeológico (ver tabla 8), constituido por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias con alto grado de diagénesis, las cuales poseen características hidrogeológicas poco adecuadas para su explotación, aunque la fracturación y alteración de la roca puede permitir el desarrollo de acuíferos fisurados locales, de poca extensión y bajos rendimientos (Suero et al, 2008).

ESTRATIGRAFÍA	HIDROESTRATIGRAFÍA	ACUÍFEROS PRINCIPALES
Sedimentos Pampeanos, (F. Buenos Aires)	Epiparaneano	Acuífero Pampeano
Sedimentos Pampeanos, (F. Ensenada)	Epiparaneano	Acuitardo
Basamento Cristalino, Metamorfitas Precámbricas	Basamento Hidrogeológico	Acuífugo

Tabla 8. Acuíferos en la Subregión VI (Santa Cruz y Silva Busso, 1999).

Sobre el basamento hidrogeológico se reconocen los Sedimentos Pampeanos que conforman el “Complejo Clástico Permeable” donde se reconocen sedimentos más modernos de espesor variable, gran extensión areal y corresponden a limos, areno-arcillosos con abundantes niveles de calcretes, presentan permeabilidad secundaria importante y se describe como un acuífero multiunitario. Principalmente en los sectores periserranos de la región se han registrado los mejores rendimientos en las explotaciones acuíferas, donde se destacan en Tandil y Azul bombeos de hasta 140 m³/h, caudales específicos de 4,5 m³/h, transmisividad de 700-800 m²/d y coeficientes de almacenamiento de 10⁻⁴, en Azul y Tandil (Santa Cruz y Silva Busso, 1996; 1999).

Gonzalez (2005) describe distintas regiones hidrogeológicas entre las que se destaca la Región Interserrana-Periserrana, donde los depósitos presentes en la zona no saturada conforman un acuífero freático, adquiriendo en profundidad un carácter de semilibre (cuando el espesor es considerable) en función de la anisotropía vertical.

En el Sudeste de la Provincia de Buenos Aires las aguas subterráneas constituyen la única fuente de abastecimiento para fines urbanos, agrícolas e industriales. Los ríos y arroyos si bien no son significativos desde el punto de vista de abastecimiento, lo son desde la dinámica de los procesos hidrológicos (Calderón et al., 2014). Para lo que Tricart (1973) propone que es necesario, mediante el uso de adecuadas prácticas de manejo combinadas con un aprovechamiento intensivo de todas las posibilidades de almacenamiento naturales (recarga de capas freáticas, utilización de las depresiones, etc.), aumentar al máximo el volumen de aguas de lluvias retenidas en lugar donde precipitan las lluvias para combatir las sequías que son las que causan más daños a la producción agropecuaria. Además, evitando el rápido escurrimiento del agua se logra impedir que las sales solubles extraídas principalmente de las cenizas volcánicas fueran evacuadas hasta el océano Atlántico por las precipitaciones abundantes. Aunque las condiciones geomorfológicas de la región hacen que los riesgos de la erosión hídrica y eólica, en las condiciones actuales de cobertura vegetal y de pedogénesis sean casi nulos. Pero si se destruye la cobertura vegetal y se degradan los suelos, el riesgo de erosión eólica se torna muy grave.

6.2 Hidrogeología del área de estudio

6.2.1 Balance hídrico

6.2.1.1 Balance hídrico por método de Thornwaite

Los datos meteorológicos se obtuvieron de las mediciones realizadas por la Estación Experimental Agropecuaria (INTA) de la localidad de Balcarce (EEA Balcarce), Provincia de Buenos Aires (37°45'40,44''S y 58°18'03,94''O, Altitud 150,39 msnm, Coordenadas POSGAR 2007). De los cuales se tomaron los datos pertenecientes al período 1971-2016.

Empleando el método Thornwaite (1948) se calcularon la evapotranspiración potencial (ETP) y real (ETR), utilizando los datos de temperatura diaria media mensual (t) para calcular el índice de calor anual (I) con la sumatoria de los índices de calor mensuales:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1,514}$$

Para calcular la ETP diaria (ε) se emplea la expresión:

$$\varepsilon = 16 \cdot \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

Donde,

$$a = 0,49239 + (1,792 \cdot 10^{-2})I - (7,71 \cdot 10^{-5})I^2 + (6,751 \cdot 10^{-7})I^3$$

Finalmente, para obtener la ETP mensual se aplica una corrección a la ETP diaria (ε) teniendo en cuenta la cantidad de horas de radiación solar directa por mes:

$$ETP = K \cdot \varepsilon$$

Siendo

$$K = \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30}$$

Donde

- N es el número máximo de horas de sol según datos de heliofanía de la EEA Balcarce.
- d son los días del mes.

Aplicando el método de balance hídrico propuesto por Thornwaite (1948) se calculó la ETP. Los resultados obtenidos, mediante el método explicado, se muestran en la tabla siguiente:

	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
T_{MEDIA} (°C)	8,30	9,60	11,20	14,00	17,20	20,70	21,70	21,00	18,70	15,50	11,90	8,90
Heliofanía (hs)	4,12	4,90	5,89	6,54	8,04	8,80	8,81	8,25	7,06	5,86	4,48	4,00
ETP (mm)	8,21	12,18	17,90	28,82	46,87	70,23	75,53	61,32	48,29	29,17	15,43	8,57

Tabla 9. Balance hídrico del acuífero pampeano por método de Thornwaite (1948).

El balance de agua del suelo es un método que permite estimar el almacenaje de agua y deducir deficiencias y excesos. Los resultados del balance resultan de interés tanto para la programación de riego como para orientar prácticas de manejo tendientes a lograr la mayor coincidencia entre la oferta y demanda de agua de un cultivo (Della Maggiora et al., 1998).

Se han realizado diversos estudios regionales analizando los distintos parámetros del balance hídrico. Entre estos se puede nombrar a Sanmartino et al. (1996) que consideran valores crecientes de precipitación que alcanzan hasta los 912 mm anuales. Mientras que Sierra et al. (1994) describe que, en el sudeste bonaerense, se registran diferentes estaciones pluviométricas: lluviosa (Octubre a Marzo), moderadamente lluviosa (Abril, Mayo, Septiembre) y poco lluviosa (Junio a Agosto). Destacándose el mes de Marzo con las mayores precipitaciones promedio, así como el mes de Agosto de menores precipitaciones.

Finalmente, se obtuvo una evapotranspiración potencial (ETP) anual de 422,5 mm, que representa el 46,3% de las precipitaciones anuales promedio registradas en Balcarce. Otros estudios describen valores regionales, del sudeste bonaerense, de ETP con promedio de 750 mm anuales (Damario y Pascale, 1988) según el método de Thornthwaite y valores mayores según el método Penman (1948) con promedios de 950 mm por año.

6.2.1.2 Cálculo de la ETR e infiltración anual por Turc-Coutagne

Algunos autores han propuesto fórmulas para calcular la evapotranspiración real (ETR) empleando variables climáticas como precipitación y temperatura. El método Turc-Coutagne (1951, 1954) propone:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

Siendo,

$$L = 300 + 15t + 0,05 t^2$$

Donde,

- **P** es la precipitación anual (mm)
- **t** es la temperatura media anual (°C)

Empleando este método se calculó la ETR anual para el período 1971 – 2016, luego se obtuvo el parámetro de infiltración anual para cada año con la expresión:

$$I = \left(\frac{(PPT_{\text{anual}} - ETR_{\text{anual}})}{PPT_{\text{anual}}} \right) \cdot 100$$

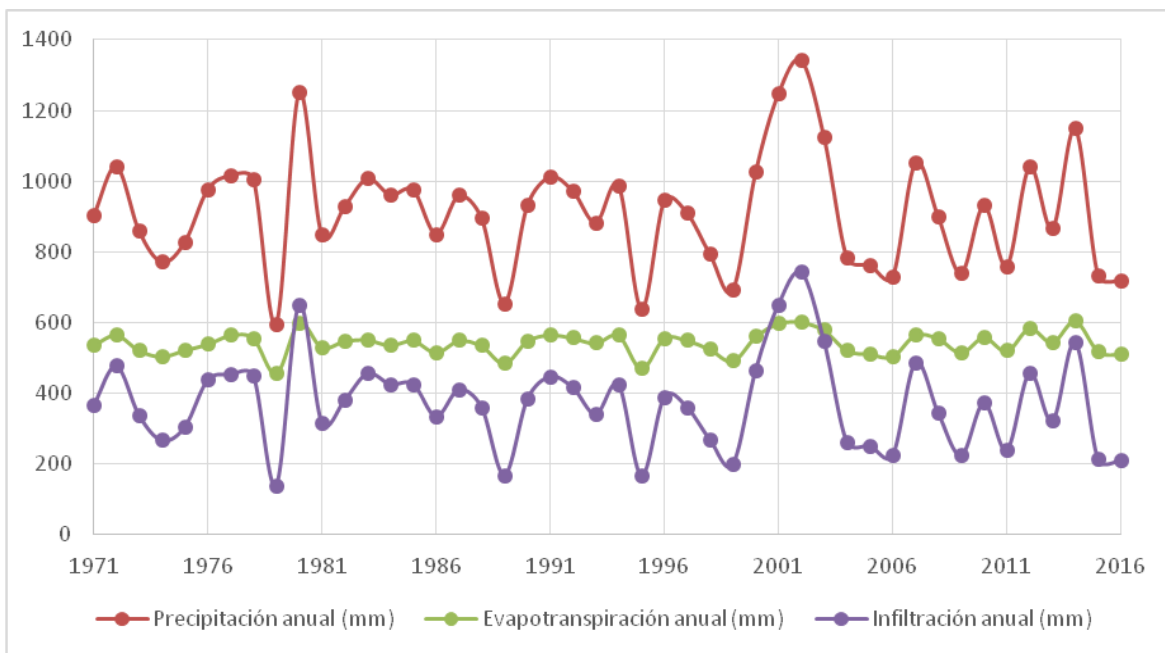


Figura 50. Gráfico comparativo de los parámetros calculados con el método Turc – Coutagne (1951, 1954).

Finalmente, se obtuvieron valores anuales promedio de precipitación de 912,32 mm, de evapotranspiración real (ETR) de 540,92 mm (59,29% PPT) y de infiltración de 98,10 mm (10,75% PPT).

6.2.1.3 Cálculo de infiltración por Goldschmidt

Se empleó el método Goldschmidt (1958) para calcular la infiltración potencial, mediante:

$$I = \alpha (P_{pa} - P_{pc})$$

Donde,

- ***I*** es la infiltración en mm/año.
- ***α*** es un coeficiente adimensional para la región con valores entre 0,78 y 0,87
- ***P_{pa}*** es la precipitación media anual en mm
- ***P_{pc}*** es la precipitación característica de la región (promedio de todas las series, en mm)

Analizando los datos climáticos de la EEA Balcarce, del período 1971 – 2016, considerando un coeficiente de cuenca de 0,87, se obtuvieron los resultados que se muestran en el siguiente gráfico.

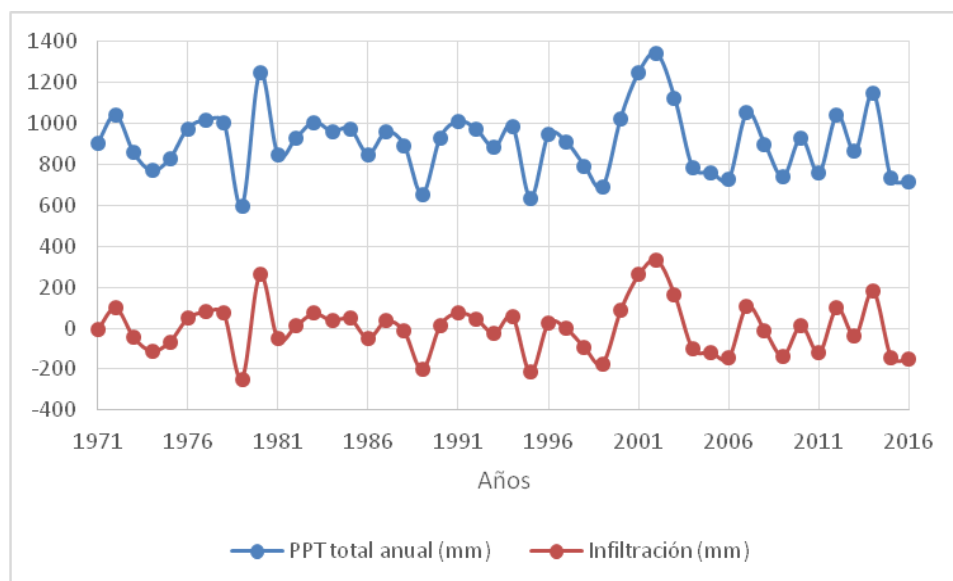


Figura 51. Gráfico comparativo de los parámetros calculados con el método Goldschmidt (1958).

Considerando que solo en los años en que las precipitaciones son superiores al promedio característico son los cuales aportan al valor de infiltración anual, se obtuvo un valor de infiltración media anual de 98,10 mm/año lo que representa un 10,75% de la precipitación promedio anual. Cabe destacar que se observan valores de infiltración con máximos de 335,31 mm para el año 2002, donde representa el 24,98% de la precipitación de ese año, así como valores mínimos de 12,39 mm/año en 1982 (1,33% de la precipitación de ese año).

Si bien el valor promedio de infiltración anual es bajo respecto de la precipitación promedio que se registra en Balcarce, esto dependerá del período de tiempo analizado puesto que se han observado distintas variaciones notables dentro del período de estudio de este trabajo (1971-2016).

En la región sudeste de la provincia de Buenos Aires se han realizado diversos estudios de infiltración y recarga efectiva del acuífero Pampeano, registrando valores regionales de infiltración entre 1-10% de las precipitaciones anuales (Santa Cruz y Silva Busso, 1996), destacando a Balcarce con 11,8% según el método Thornwaite (1948) y 5,77% según el método Goldschmidt (1958).

Los distintos parámetros anuales descriptos permiten calcular los índices de humedad (I_h), aridez (I_a) y el índice de humedad característico del área de estudio (I_m):

$$I_h = \frac{100 \cdot e}{ETP}$$

$$I_a = \frac{100 \cdot d}{ETP}$$

$$I_m = I_h - 0,6 \cdot I_a$$

Donde:

- **e** es el excedente hídrico anual.
- **d** es el déficit hídrico anual.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente:

T_{MEDIA} (°C)	14,2
PPT_{ANUAL MEDIA} (mm)	912,3
ETP_{ANUAL MEDIA} (mm)	422,5
ETR_{ANUAL MEDIA} (mm)	540,9
Déficit_{ANUAL} (mm)	98,1
Excedente_{ANUAL} (mm)	98,1
Índice de Humedad	50,2
Índice de Aridez	50,2
Índice PROMEDIO	20,2

TABLA 10. Parámetros anuales del Acuífero Pampeano, según Thornwaite (1948).

Siendo $20 < I_m < 40$, al emplear el método Thornwaite (1948), la región de estudio se clasifica como húmeda (Categoría B₂).

El Partido de Balcarce presenta un evidente potencial como productor agrícola por lo que se debe tener en cuenta la influencia de los cultivos en el cálculo de la evapotranspiración, especialmente en el sector norte del área de estudio y durante los meses que comprenden el período vegetativo (Marzo a Septiembre) donde predomina la influencia del cultivo por sobre la vegetación natural. A continuación, se muestra un gráfico donde se pueden apreciar las distintas variables climáticas calculadas para el período 1971-2016, donde los meses con excedentes hídricos presentan valores positivos mientras que aquellos con déficit tienen valores nulos.

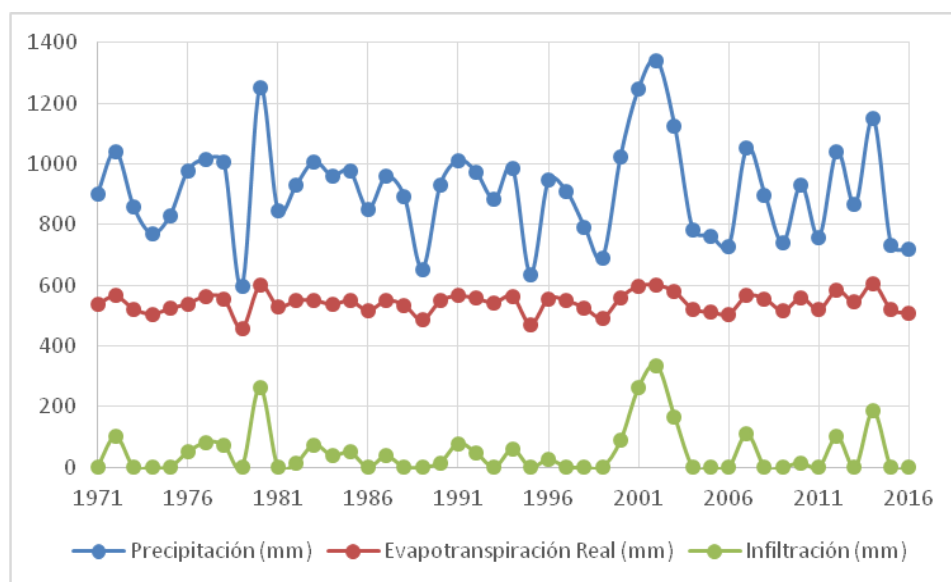


Figura 52. Gráfico comparativo de los parámetros calculados del balance hídrico.

Finalmente, se empleó la ecuación del balance hídrico:

$$\text{Precipitación} = \text{Evapotranspiración} + \text{Infiltración} + \text{Escorrentía}$$

De donde se obtuvo que el valor promedio anual de la escorrentía superficial es de 273,3 mm y que expresa el recurso que se moviliza superficialmente desde sectores serranos elevados donde no se observa una red fluvial integrada, debido a las características geomorfológicas (ver Capítulo 4.1), sobre la cual el agua se mueve sobre la superficie hacia zonas deprimidas al norte, encauzándose en los sistemas fluviales (Arroyo Pantanoso y Arroyo Seco).

A continuación, se observa una tabla con los valores anuales promedio obtenidos para la ecuación del balance hídrico.

Precipitación	912,3 mm
Evapotranspiración	540,9 mm
Infiltración	98,1 mm
Escorrentía	273,3 mm

Tabla 11. Valores obtenidos en el área de estudio.

6.3 Relación agua superficial y agua subterránea

En la topografía del área de estudio se pueden reconocer sectores con pendientes características, entre los que se destaca la sierra (10^{-2}), la franja eólica periserrana (10^{-3}) y la llanura fluvio-eólica (10^{-4}). Los estudios realizados por Elichiry (2002), en la Estancia El Volcán, describen que en las pendientes del orden de 10^{-2} se verifican regímenes temporarios de los cursos provocando una desconexión hidráulica de los cauces con el acuífero libre. Mientras que Sala et al. (1983) describen que en las pendientes del orden de 10^{-4} se reconoce una descarga del acuífero libre sobre los arroyos. Finalmente, con pendientes del orden de 10^{-3} la relación de los cauces con el acuífero libre es variable y depende del régimen hidrológico pudiendo funcionar como áreas de recarga o descarga.

Debido a que en el área de estudio de este trabajo no se observa una red fluvial integrada fue necesario analizar este comportamiento en una zona cercana donde se pudiesen medir los caudales en los cauces. Por esto se eligió la zona de la sierra Del Volcán (ver figura 53) que presenta valores de pendiente topográfica del orden de $1,0 \cdot 10^{-2}$ y hacia el noreste de $2,0 \cdot 10^{-3}$ en los arroyos Del Junco y Dulce (Elichiry, 2002).

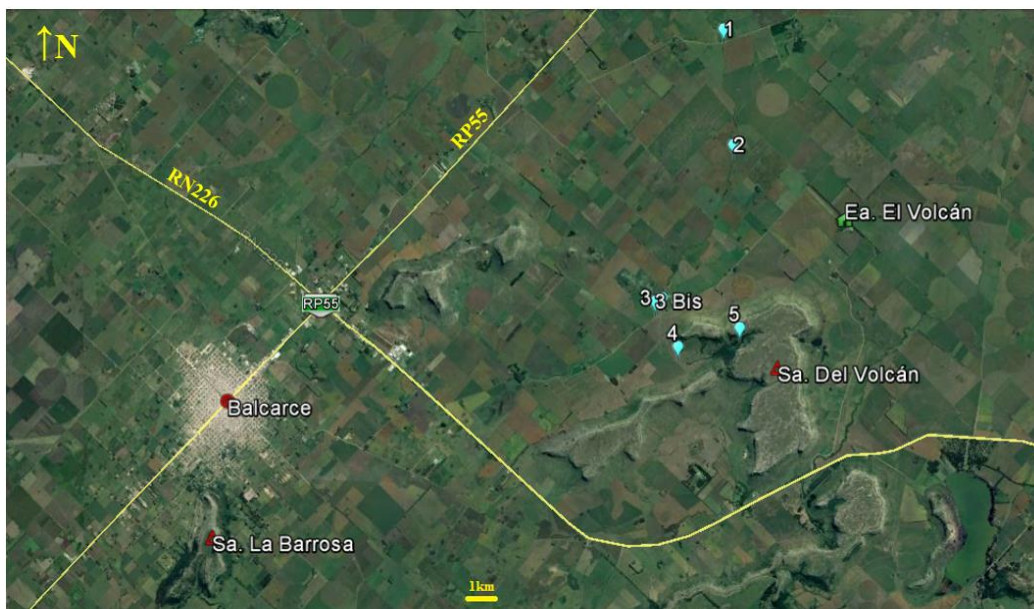


Figura 53. Ubicación de los aforos.

Durante las campañas realizadas en este trabajo fue posible observar el comportamiento de los cauces secundarios que alimentan al Arroyo Del Junco, sobre las laderas de la sierra Del Volcán (20 km al este del área de estudio), durante precipitaciones locales. Donde se obtuvieron datos precisos que confirman el comportamiento hidráulico descripto anteriormente (ver tabla 12).

Aforo	Gradiente	Caudal medido (m ³ /s)
1	$8,00 \cdot 10^{-4}$	2,12
2	$1,10 \cdot 10^{-3}$	1,87
3	$6,00 \cdot 10^{-3}$	0,55
4	$9,00 \cdot 10^{-2}$	0,75
5	$4,00 \cdot 10^{-2}$	Seco
3 Bis	$6,00 \cdot 10^{-3}$	0,08

Tabla 12. Caudales obtenidos en la sierra Del Volcán.

El aforo 3 Bis fue medido sobre un cauce secundario (ver figura 54) que desemboca en el cauce principal del arroyo Del Junco y proviene de un sector con escasa pendiente al oeste de la sierra Del Volcán. Se registró un caudal muy bajo lo que indica que aporte principal proviene directamente de la sierra Del Volcán.



Figura 54. Ubicación de los aforos.

Sobre la base de lo expuesto es posible suponer un proceso de infiltración vertical que puede incluir el cauce del arroyo Del Junco que, hacia el noreste podrían comportarse como zona de descarga.

Finalmente, es de esperar que este mismo comportamiento hidrológico se desarrolle en la sierra La Barrosa puesto que presenta pendientes similares a las descritas y, por lo tanto, el proceso de infiltración vertical será el mismo. Se han descrito comportamientos de flujo laminar generados por las precipitaciones intensas sobre la ladera de la sierra (ver capítulo 4.1).

A continuación, se observa una imagen que muestra lo descrito.

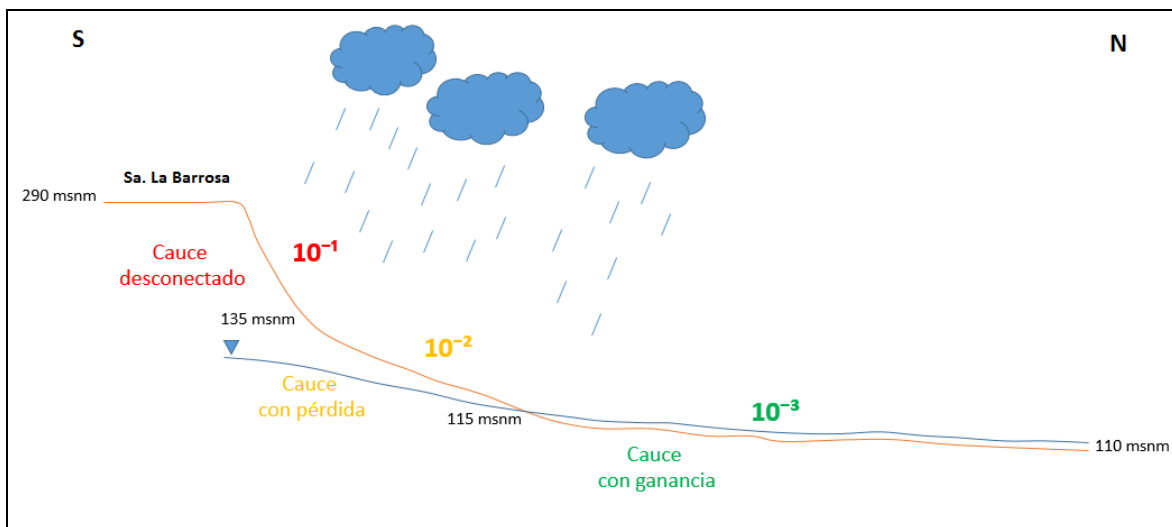


Figura 55. Comportamiento hidrológico del sector periserrano de la sierra La Barrosa.

Teniendo en cuenta que la escorrentía superficial (273,3 mm) es notablemente mayor que la infiltración subterránea (98,1 mm), con un índice de relación de 2,79, se entiende que la infiltración

local no es el principal mecanismo de recarga en el área de estudio (el acuífero presenta una recarga regional).

6.4 Hidrodinámica del área de estudio

En las campañas realizadas para este trabajo se observaron 15 puntos entre pozos de bombeo para la red urbana y molinos particulares (Tabla 13). En cada uno de estos puntos se realizó la medición de la profundidad del nivel freático, en forma directa mediante la utilización de una sonda piezométrica (ver figura 56).

POZO	Descripción	Latitud	Longitud	Cota (msnm)	NE (mbbp)
1	Pozo con electrobomba	37°52'03,0" S	58°14'39,1" O	127	s/d
2	Pozo con electrobomba	37°51'49,7" S	58°14'56,0" O	127	s/d
3	Pozo con electrobomba	37°51'45,8" S	58°14'44,2" O	124	s/d
4	Pozo con electrobomba	37°50'45,2" S	58°15'24,3" O	125	s/d
5	Pozo con electrobomba	37°51'51,9" S	58°14'25,4" O	123	s/d
6	Pozo con electrobomba	37°52'10,5" S	58°14'28,4" O	126	s/d
9	Pozo con electrobomba	37°50'58,8" S	58°15'34,0" O	118	2,68
10	Pozo con electrobomba	37°51'40,1" S	58°16'23,5" O	133	7,13
11	Pozo con electrobomba	37°51'53,5" S	58°16'43,3" O	122	5,22
12	Pozo con electrobomba	37°51'40,5" S	58°14'12,6" O	115	4,78
13	Pozo con electrobomba	37°51'51,1" S	58°13'58,9" O	120	4,05
14B	Pozo con electrobomba	37°50'43,9" S	58°16'36,6" O	114	2,69
15	Pozo con electrobomba	37°51'36,8" S	58°16'07,5" O	129	5,35
BS	Pozo Molino con electrobomba "BS"	37°53'11,2" S	58°16'27,4" O	168	40
LM	Pozo Molino con electrobomba "LM"	37°49'53,0" S	58°13'37,0" O	112	5

Tabla 13. Localización de los puntos muestreados (WGS 1984).



Figura 56. Mediciones con sonda piezométrica en piezómetros (A) y en pozos de bombeo (B).

En algunos de los pozos de estudio no se pudo obtener datos debido a que el diseño de los mismos no permite el acceso de la sonda piezométrica.

Aunque la cantidad de puntos medidos presenta una buena distribución en el área de estudio, se reconocieron sectores con falta de información donde, apelando a diferentes metodologías, fue posible desarrollar una red más densa de modo de obtener resultados coherentes que se muestran en el mapa hidrogeológico de este trabajo (ver figura 88, Capítulo 9). El mismo presenta curvas piezométricas que describen un comportamiento de drenaje regional en dirección SO-NE, con descarga local que alimenta el cauce del arroyo Pantanoso y su afluente (arroyo Seco) hacia el norte. Mientras que hacia el sur se observa una pequeña zona de recarga próxima a la sierra La Barrosa, aunque no se reconoce este comportamiento alrededor de la misma sierra, donde se observa como las líneas equipotenciales se acercan entre si evidenciando un mayor gradiente hidráulico.

6.4.1 Parámetros hidráulicos en el área de estudio

Utilizando los datos de los perfilajes resistivos que se realizaron en los pozos 14B y 15 durante las campañas de este trabajo, se calcularon los distintos parámetros hidráulicos para caracterizar la sección acuífera bajo estudio.

6.4.1.1 Cálculo de la porosidad total

Durante las campañas que se realizaron en este estudio se obtuvo información de los perfilajes geoelectricos de los pozos 14B y 15 (ver figura 32, capítulo 3.2.2.1), de los cuales se emplearon los valores de resistividad obtenidos a distintas profundidades dentro de las perforaciones.

Se ha establecido experimentalmente que la resistividad de la formación (R_o) es proporcional a la resistividad de la solución salina (R_w) con la cual está saturada. La constante que las relaciona se denomina Factor de Formación (F).

$$F = R_o / R_w$$

Teniendo en cuenta que la resistividad de la solución salina es función inversa de la conductividad, que se obtiene de los muestreos de agua en cada pozo, se obtuvo el valor del Factor de Formación para los distintos niveles dentro de cada perforación. El mismo es importante ya que se emplea para calcular la porosidad total mediante la expresión de Archie (1952) y reformada por Winsauer (1958), que se observa a continuación:

$$F = \phi_t^{-m} \text{ (Ley de Archie)}$$

$$F = a / (\phi_T^m) \text{ (corrección de Winsauer)}$$

Donde,

- F es el factor de formación
- ϕ_T es la porosidad total
- a es el factor de cementación empírico
- m es el factor de cementación empírico

Entonces, se obtiene:

$$\phi_T = (a/F)^m$$

Además, Winsauer (1958) emplea valores de **a** y **m** para definir y tabular distintos ábacos según el tipo de formación.

$$F = 0,62 / \phi_T^2 \text{ (para areniscas)}$$

Teniendo en cuenta que los pozos que se analizan en este estudio presentan un diseño con filtros que están en contacto directo con las formaciones Barker, principalmente, y Ensenada (ver figuras 35 y 36, capítulo 3.2.2.3), se reconoce una importante presencia de la fracción arena en los sedimentos explotados durante el bombeo.

Según Custodio y Llamas (1983) se puede determinar la *porosidad efectiva media* (ϕ_{Ef}) teniendo el valor de *porosidad total* (ϕ_T), calculada anteriormente, y el factor de retención (m_r) calculado a partir del análisis granulométrico correspondiente al recorte de perforación (*cutting*) en cada pozo. La ecuación se describe a continuación:

$$\phi_{Ef} = \phi_T - m_r$$

La retención específica (m_r) se obtiene de la ecuación de Briggs y Schantz (Johnson, 1967) que, a partir de las distintas fracciones granulométricas analizadas, se define como:

$$m_r = 0,03(\%arena) + 0,35(\%limo)$$

En los análisis granulométricos, obtenidos de los niveles de interés de este estudio, se definió una predominancia de arenas (90%) y, en menor medida, limos (10%).

En la siguiente tabla se muestran los resultados promedios obtenidos:

Pozo	Conductividad ($\mu S/cm$, 20°C)	Factor de Formación	Retención Específica (%)	Porosidad Total (%)
14B	1425,50	24,72	6,20	16,72
15	670,00	28,63	6,20	15,17

Tabla 14. Resultados obtenidos

6.4.1.2 Cálculo de la permeabilidad

Para calcular el coeficiente de permeabilidad Custodio y Llamas (1983) proponen la ecuación de Hazen que emplea el tamaño efectivo de los poros, o sea, el percentil de 10 (Φ_{10}) en centímetros tomado a partir de las curvas acumulativas de cada pozo perfilado y **c** que es una constante que Schöeller (1962) propone corregir en función de la porosidad. A continuación, se muestran las ecuaciones descriptas:

$$k = c (\Phi_{10})^2$$

$$c = 150 \cdot (\varphi_T / 0,45)^6$$

$$K = (k \cdot P_e) / \mu$$

Donde,

- φ_T es la porosidad total
- Φ_{10} es el percentil de 10
- c es la constante de Schöeller
- P_e es el peso específico del agua (0,9982 g/cm³)
- μ es la viscosidad dinámica del agua (0,001005 kg/m²seg)

Los resultados promedio obtenidos se observan en la siguiente tabla:

Pozo	Φ_{10}	Constante de Schöeller	Porosidad Total (%)	Permeabilidad (m/día)
14B	0,003	0,56	16,72	4,37
15	0,003	0,26	15,17	2,04

Tabla 15. Resultados obtenidos.

6.4.1.3 Cálculo de la transmisividad

Teniendo los valores de permeabilidad (k) se calculó la transmisividad (T) de la sección de estudio. Los valores obtenidos se expresan como parámetros hidráulicos de un perfil sedimentario continuo de referencia, con la idea de compararlos posteriormente con los resultados de los modelados de los datos obtenidos con los ensayos de bombeo en las mismas locaciones (Custodio y Llamas, 1983).

La transmisividad queda expresada como:

$$T = k \cdot z$$

Donde,

- k es la permeabilidad del estrato
- z es la potencia del estrato o longitud de los filtros de la captación

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Pozo	Permeabilidad (m/d)	Espesor del acuífero (m)	Transmisividad (m ² /d)
14B	4,37	30,00	131,06
15	2,04	30,00	61,28

Tabla 16. Resultados obtenidos analizando los datos del área de estudio.

La diferencia entre los valores de transmisividad obtenidos entre los ambos pozos se debe a la ubicación de cada uno y su distancia a la sierra. Se observa que el pozo 14B, que se encuentra más alejado de la sierra, presenta transmisividades mayores debido a que la mayor extensión de los filtros está en contacto con la Formación Barker, de litología más arenosa. Mientras que el pozo 15, que se encuentra más cerca de la sierra, presenta transmisividades relativamente menores debido a que los filtros explotan principalmente a la Formación Ensenada, donde predominan los limos arcillosos con porosidad secundaria.

6.5 Hidráulica de captaciones del área de estudio

Luego de las operaciones de desarrollo de la captación de estudio, la misma es sometida a una serie de estudios de hidráulica, que consisten en efectuar bombeos a regímenes permanentes a caudales constante, con la finalidad de determinar los caudales máximos sostenibles de los niveles explotados. A continuación se detallara y se presenta la metodología de los estudios y ensayos realizados.

El ensayo de bombeo es el conjunto de operaciones que se realiza bombeando un pozo continuamente y observando sistemáticamente la depresión de los niveles dentro del pozo y preferentemente también en otros pozos de observación, y su recuperación.

Permite determinar los parámetros hidráulicos del acuífero, para estudios de manejo del mismo. El ensayo de bombeo es el conjunto de operaciones que se realiza bombeando un pozo continuamente y observando sistemáticamente la depresión de los niveles dentro del pozo y preferentemente también en otros pozos de observación, y su recuperación. Permite determinar los parámetros hidráulicos del acuífero, para estudios de manejo del mismo. Se propone realizar dos tipos de bombeos:

- Bombeo a régimen permanente
- Bombeo a régimen variable

Es importante conocer las diferencias de carga de bombeo, ya sea por variaciones estacionales del nivel estático, descenso del nivel dinámico por sobrebombeo o por interferencia con otros pozos. También se deberá tener en cuenta las pérdidas de carga o por fricción. Todo ello determinará la elección de la bomba en función de su curva característica, eficiencia y potencia. En cuanto a las bombas, se deberá contar, ante todo, con datos concretos de capacidad, diámetro, condiciones de funcionamiento y carga total de bombeo.

Durante las campañas realizadas en este estudio se obtuvo información directa de dos ensayos de bombeo en los pozos 14B y 15 (ver figura 57). En los mismos se analizaron los datos del descenso del nivel dinámico, en los pozos y sus respectivos piezómetros, durante los distintos bombeos ensayos y sus respectivas recuperaciones (al cesar el bombeo).



Figura 57. Ensayos de bombeo durante las campañas de este estudio en el pozo 15 (A) y en el pozo 14B (B y C).

También se tuvo en cuenta la información previa, gracias al registro de Aguas de Balcarce S.A., sobre los 11 pozos en explotación. Los mismos proveen agua potable para consumo a la población del sector urbano-periurbano de la Ciudad de Balcarce.

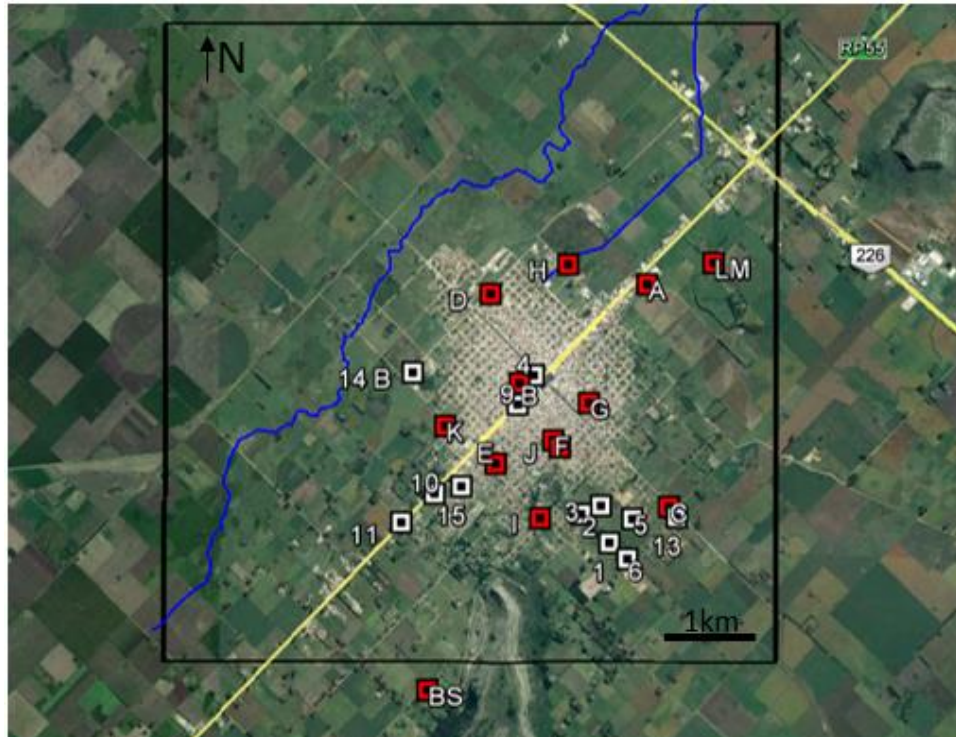


Figura 58. Ubicación de los pozos numerado (en blanco) y lugares de muestreo alfabetizados (en rojo).

Los pozos 14B y 15 presentan un diseño a partir del cual los filtros se ubicaron entre los 68 y 98 mbbp y una aislación con caño camisa entre 0 y 68 mbbp, para evitar la interacción de los distintos niveles acuíferos. Además se realizaron las perforaciones de los respectivos piezómetros de estudio aledaños a los pozos de bombeo.

Previamente a comenzar los respectivos ensayos de bombeo de ambos pozos se realizaron las siguientes tareas:

- Mediante GPS se obtuvo la ubicación del pozo y su cota.
- Se midió la distancia desde el pozo de bombeo al piezómetro de control.
- Para corregir la altura de las mediciones al nivel del suelo se midió la altura de boca de pozo.
- Se midió la profundidad del nivel estático, tanto en el pozo como en el piezómetro, empleando una sonda piezométrica.

6.5.1 Ensayo de bombeo escalonado (régimen constante)

Los ensayos de bombeo a régimen variable se realizaron en las captaciones, posteriormente a la operación de desarrollo. En los mismos se realizaron bombeos a diferentes caudales hasta alcanzar la estabilización del nivel dinámico en cada captación, pasando por los distintos caudales de bombeo.

Durante las campañas de este estudio se realizaron estos ensayos en los pozos 14B y 15, donde se obtuvieron los distintos caudales de explotación, mediante tubo pitot, así como las mediciones del descenso del nivel dinámico en las captaciones a lo largo de los respectivos ensayos. Los resultados obtenidos en los ensayos de bombeo realizados durante las campañas para este estudio se observan a continuación:

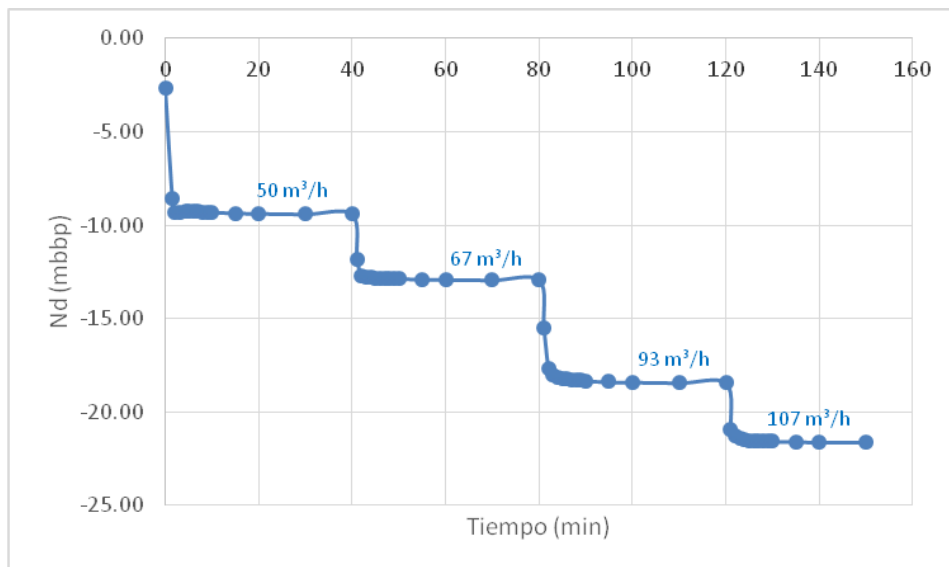


Figura 59. Evolución del nivel dinámico, durante los respectivos ensayos escalonados, en el piezómetro 14B.

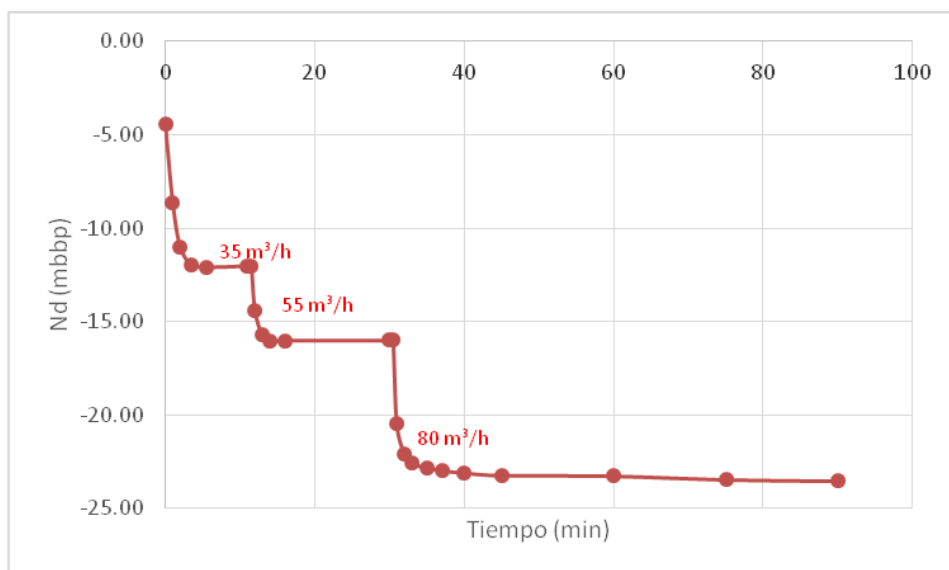


Figura 60. Evolución del nivel dinámico, durante los respectivos ensayos escalonados, en el piezómetro 15.

La finalidad de este tipo de ensayo es definir:

- Caudal máximo explotable
- Caudal específico
- Pérdidas de carga
- Rendimiento

Las pérdidas de carga de una captación o perforación constituyen el conjunto de perdidas en el entorno de los niveles acuíferos que atraviesa la perforación y la totalidad de las perdidas en la misma perforación (Villanueva e Iglesias, 1984). Sobre la base de la información obtenida en los ensayos a caudal variable de las perforaciones en el área de estudio se estimarán las pérdidas de carga totales de la perforación.

Villanueva e Iglesias (1984) establecen que las pérdidas de carga totales se calculan a partir de:

$$d = AQ + BQ^n$$

Donde,

- d es el descenso medido en el piezómetro
- Q es el caudal medido en el pozo
- A es el coeficiente de pérdidas de Jacob
- B es el coeficiente de pérdidas de carga

Entonces, al realizar el ensayo se pasa por etapas de las que se obtienen distintos datos que definen las siguientes ecuaciones:

$$d_1 = AQ_1 + BQ_1^n$$

$$d_2 = AQ_2 + BQ_2^n$$

$$d_3 = AQ_3 + BQ_3^n$$

$$d_m = AQ_m + BQ_m^n$$

Donde,

- A y B son las variables que se deben obtener
- Q es el caudal según la etapa del estudio
- d es la depresión máxima al bombear con el caudal Q
- n es un valor adimensional que se obtiene mediante aproximación

El valor del coeficiente **n** varía en función del diseño de la captación y de las características del acuífero en que se ubica. Se tantea mediante una comparación gráfica donde se define el mejor ajuste lineal entre los valores de las ordenadas (Q/d) y los valores de las abscisas (Q^{n-1}).

Se realizaron los cálculos con el fin de obtener las distintas variables necesarias, tanto para los bombeos realizados en las campañas de este trabajo como para los bombeos realizados previamente según los datos provistos por Aguas de Balcarce SA.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos, empleando un valor de **n** igual a 3 para todos los casos (el de mejor ajuste).

Pozos	Caudal (m ³ /h)	Depresión (m)	A	B	Rendimiento (%)	Pérdidas (%)
15	80,0	19,1	0,19	8,34E-06	77,7	22,3
14B	107,0	18,9	0,15	2,13E-07	85,8	14,2
13	122,0	18,9	0,12	2,25E-06	78,3	21,7
12	129,3	19,1	0,14	5,26E-07	94,1	5,9
11	118,0	24,4	0,17	2,57E-06	82,7	17,3

Tabla 17. Rendimientos de bombeo de pozo a caudal máximo.

Los resultados obtenidos definen que la explotación de la batería de pozos bajo estudio se caracteriza por rendimientos promedios de 83,7% y pérdidas de carga promedio de 16,3%, cuando los pozos se explotan con caudales máximos entre 80 y 129,3 m³/h.

6.5.2 Ensayo de aforo

Para explicar este método se deben considerar las condiciones que plantea el método de Thiem (1906) para acuíferos confinados (Villanueva & Iglesias, 1984), por lo que se suponen con cierta aproximación las circunstancias físicas del acuífero que se describen a continuación:

- Régimen permanente
- No existen recargas exteriores
- El acuífero es homogéneo, isótropo e infinito
- El pozo de bombeo es de diámetro cero
- El pozo atraviesa completamente la formación permeable
- El agua que se bombea produce un inmediato descenso del nivel y no vuelve a introducirse al acuífero (no hay pérdidas)
- El flujo de agua hacia el pozo es radial y no tiene componentes verticales
- El caudal de bombeo Q es constante

Con todas estas limitaciones o condiciones de contorno introducidas en la ecuación general se llega a la fórmula de Thiem:

$$d_1 - d_2 = \frac{Q}{2 \pi T} \cdot \text{Ln} \left[\frac{r_2}{r_1} \right]$$

Donde,

- d_1 y d_2 son la depresión producida por el bombeo en los piezómetros 1 y 2, respectivamente
- Q es el caudal de bombeo constante
- T es la transmisividad del acuífero
- r_1 y r_2 son la distancia del pozo de bombeo a los respectivos piezómetros 1 y 2

Teniendo en cuenta que los ensayos de bombeo realizados en las distintas campañas de este estudio se obtuvo datos del descenso dinámico en cada uno de los piezómetros próximos al pozo en explotación y, teniendo los valores de los caudales empleados y el tiempo transcurrido la ecuación previa se simplifica a la siguiente expresión:

$$d_i = 0,366 \cdot \left[\frac{Q}{T} \right] \cdot \log \left[\frac{R_{\max}}{r_i} \right]$$

Que puede modificarse en la siguiente expresión:

$$T = 2,03 \cdot Q \cdot \log \left[\frac{R_{\max}}{r_x} \right] \cdot \frac{1}{[r \cdot s_{\max}]}$$

Por último, el método Logan (1964) establece que cuando se alcanza el régimen permanente el bombeo realizado alcanza el radio máximo de influencia (R_{\max}) y, a partir de ese momento, permanece constante. Por lo que, suponiendo condiciones promedio, Logan asignó un valor de $\log(R_{\max}/r_x)$ de 3,33 para finalmente obtener la siguiente relación:

$$T = 1,22 \cdot \frac{Q}{s_{\max}}$$

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Pozo 14B	Caudal (m ³ /h)	50,0	67,0	93,0	107,0
	Caudal (m ³ /d)	1200,0	1608,0	2232,0	2568,0
	Depresión (mbbp)	6,7	10,3	15,8	18,9
	Transmisividad (m ² /d)	217,9	191,4	172,8	165,5
Pozo 15	Caudal (m ³ /h)	35,0	55,0	80,0	
	Caudal (m ³ /d)	840,0	1320,0	1920,0	
	Depresión (mbbp)	7,6	11,6	19,1	
	Transmisividad (m ² /d)	134,3	138,7	122,4	

Tabla 18. Datos medidos y resultados obtenidos según el método Logan (1964).

Se observan valores de transmisividad elevados respecto a los calculados en los métodos explicados previamente debido principalmente a que el método Logan (1964) es aplicable a acuíferos confinados que cumplan con las condiciones establecidas por Thiem (1906). Además, se determinó que los respectivos pozos presentan pérdidas cuantificables (ver tabla 17, capítulo 6.5.1), lo que indica que no se cumple la condición de que no hay pérdidas. También se sabe que los diseños de captación no atraviesan toda la formación permeable.

Aunque no se cumplan las condiciones ideales definidas por Thiem (1906), emplear este método es útil para descartar la idea de que se está explotando un acuífero de tipo confinado.

6.5.3 Ensayo de recuperación

Este método consiste en interpretar los datos que se obtienen una vez que se detiene la extracción de agua y el nivel dinámico empieza a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel estático inicial (Villanueva & Iglesias, 1984). A continuación, se observan los niveles medidos:

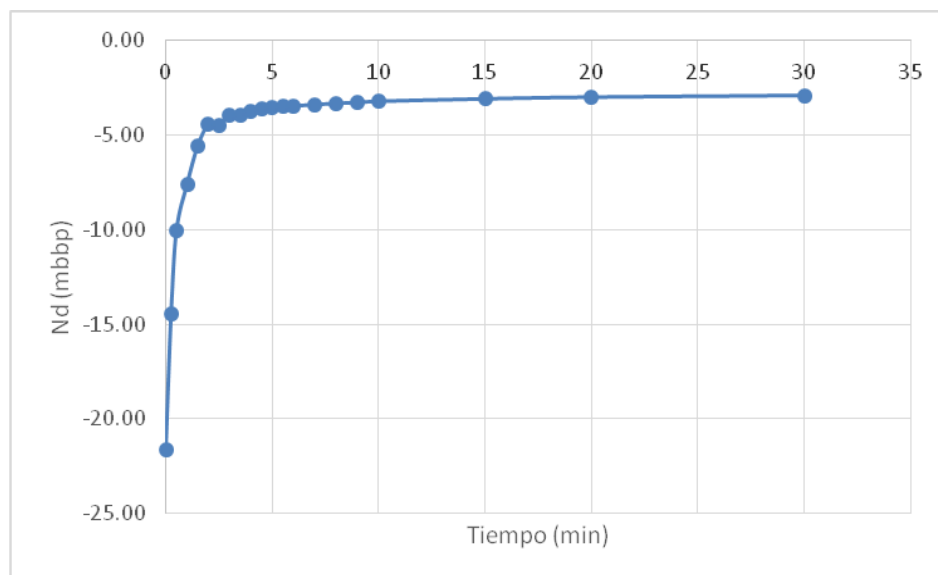


Figura 61. Niveles medidos con sonda piezométrica, durante la recuperación, en el piezómetro 14B.

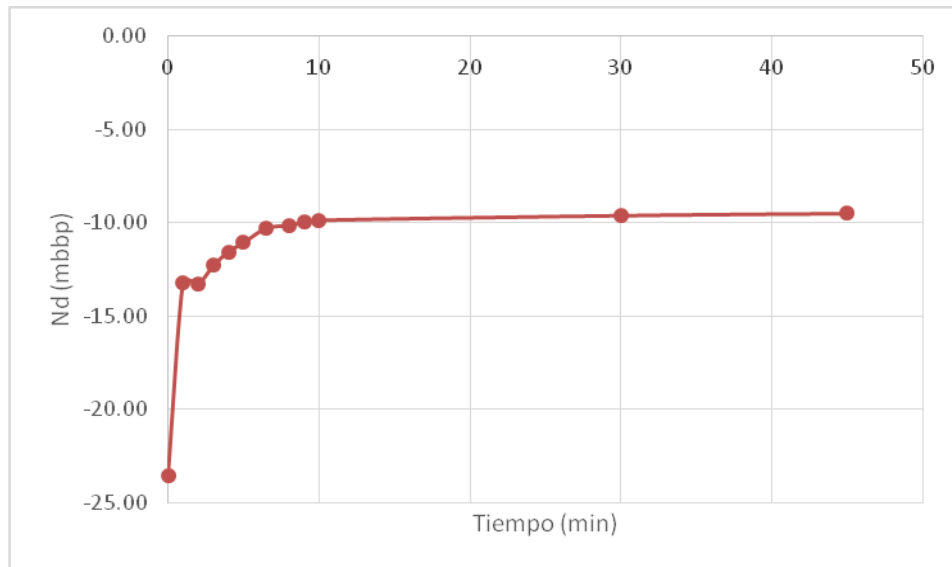


Figura 62. Niveles medidos con sonda piezométrica, durante la recuperación, en el piezómetro 15.

Una vez detenido el bombeo se comienzan a obtener datos de los niveles, empleando una sonda piezométrica en el piezómetro próximo a la captación, y el tiempo transcurrido. Con esta información se confecciona un gráfico semilogarítmico cuyo eje de ordenadas representa los descensos residuales (**Dr**), mientras que el eje de abscisas describe los tiempos de recuperación según la siguiente expresión:

$$\frac{t + t'}{t'}$$

Donde,

- t es el tiempo de bombeo antes del corte
- t' es el tiempo de bombeo después del corte

Se obtiene una curva cuya pendiente se utiliza para calcular la transmisividad mediante:

$$T = 0,183 \cdot \frac{Q}{m}$$

Donde,

- T es la transmisividad en $m^2/día$
- Q es el caudal en $m^3/día$
- m es la pendiente del gráfico de recuperación

Aunque para que este ensayo se obtenga valores razonables deben cumplirse las siguientes condiciones generales para la resolución de la ecuación en medios porosos permeables:

- Régimen permanente de bombeo
- Caudal constante
- No existen recargas exteriores
- El acuífero es infinito (sin límites en el ámbito alcanzado por el cono de depresión), homogéneo e isótropo
- El pozo de bombeo es de diámetro cero y atraviesa completamente la formación permeable
- El agua bombeada produce un descenso inmediato en el pozo y no vuelve a ingresar al acuífero
- El flujo de agua hacia el pozo es radial y no tiene componentes verticales

Durante las campañas realizadas en este estudio se realizaron ensayos de bombeo a caudal variable en los pozos 14B y 15. En la etapa final se midieron distintos parámetros necesarios aplicar este método:

Bombeo	Q max (m³/h)	Nd (mbbp)	t bombeo (min)
14B	107	23,5	90
15	80	21,6	150

Tabla 19. Valores finales del ensayo de bombeo a caudal variable.

Luego de finalizados los ensayos de bombeo escalonado, se procedió a tomar los datos de recuperación. Se obtuvieron las mediciones que pueden verse a continuación:

Piezómetro 14B		Piezómetro 15			
t (min)	Nd (mbbp)	t (min)	Nd (mbbp)	t (min)	Nd (mbbp)
0	21,62	7	3,38	0	23,54
0,25	14,43	8	3,32	1	13,18
0,5	10,04	9	3,27	2	13,27
1	7,59	10	3,21	3	12,28
2	5,57	15	3,08	4	11,54
2,5	4,42	20	2,99	5	11,05
3	4,45	30	2,90	6,5	10,27
4	3,97			8	10,12
4,5	3,92			9	9,96
5	3,72			10	9,84
5,5	3,61			30	9,59
6	3,53			45	9,48

Tabla 20. Mediciones obtenidas durante el ensayo de recuperación.

Al emplear el método de recuperación (Villanueva & Iglesias, 1984) se analizaron los datos previos y se obtuvieron los resultados, de ambos piezómetros, que se muestran en las tablas y gráficos siguientes:

t' (min)	Nd (mbbp)	Dr (m)	$(t+t')/t'$
0	21,62	18,93	∞
0,25	14,43	11,74	601,00
0,5	10,04	7,35	301,00
1	7,59	4,90	151,00
1,5	5,57	2,88	101,00
2	4,42	1,73	76,00
2,5	4,45	1,76	61,00
3	3,97	1,28	51,00
3,5	3,92	1,23	43,86
4	3,72	1,03	38,50
4,5	3,61	0,92	34,33
5	3,53	0,84	31,00
5,5	3,49	0,80	28,27
6	3,46	0,77	26,00
7	3,38	0,69	22,43
8	3,32	0,63	19,75
9	3,27	0,58	17,67
10	3,21	0,52	16,00
15	3,08	0,39	11,00
20	2,99	0,30	8,50
30	2,90	0,21	6,00

Tabla 21. Ensayo de recuperación en el Pozo 14B, según Villanueva & Iglesias (1984).

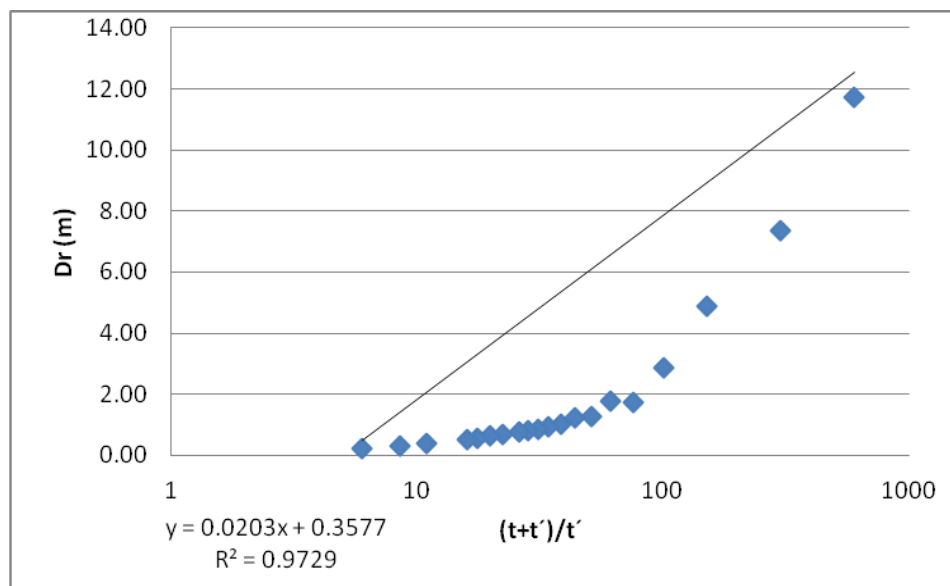


Figura 63. Gráfico semilogarítmico del ensayo de recuperación del Pozo 14B, según Villanueva & Iglesias (1984).

t' (min)	Nd (mbbp)	Dr (m)	$(t+t')/t'$
0	23,54	19,14	∞
1	13,18	8,78	91,00
2	13,27	8,87	46,00
3	12,28	7,88	31,00
4	11,54	7,14	23,50
5	11,05	6,65	19,00
6,5	10,27	5,87	14,85
8	10,12	5,72	12,25
9	9,96	5,56	11,00
10	9,84	5,44	10,00
30	9,59	5,19	4,00
45	9,48	5,08	3,00

Tabla 22. Ensayo de recuperación en el Pozo 15, según Villanueva & Iglesias (1984).

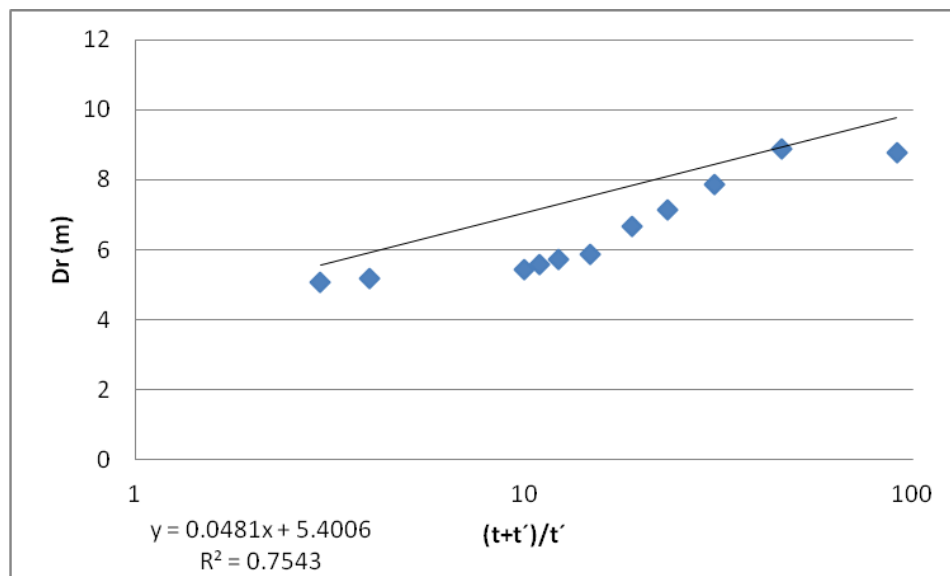


Figura 64. Gráfico semilogarítmico del ensayo de recuperación del Pozo 15, según Villanueva & Iglesias (1984).

Los cálculos realizados mediante el método de recuperación dieron los resultados de transmisividad que se muestran en la siguiente tabla:

Pozo	Transmisividad (m ² /día)
14B	23149,95
15	7304,78

Tabla 23. Valores de transmisividad obtenidos para cada pozo, según Villanueva & Iglesias (1984).

Los resultados del ensayo de recuperación dan valores de transmisividad elevados respecto de los ensayos de bombeo lo que indica que los niveles acuíferos se comportan de distinta manera cuando se realiza la explotación y cuando se recuperan los niveles piezométricos.

Esto puede deberse a que cuando el pozo se está bombeando los niveles que aportan agua a la captación son la base de la Formación Ensenada y la Formación Barker, quedando la Formación Buenos Aires aislada por el diseño de la captación (cementado hasta 31mbbp). Pero cuando se corta el bombeo y los niveles comienzan a recuperarse, ahora si la Formación Buenos Aires aporta agua y los niveles se recuperan más rápido que lo esperado y la transmisividad calculada es mayor. Esto se debe a que el nivel carbonático que separa la Formación Buenos Aires de la Formación Ensenada se comporta como un acuitardo donde se retarda el paso del agua (ver figura 65).

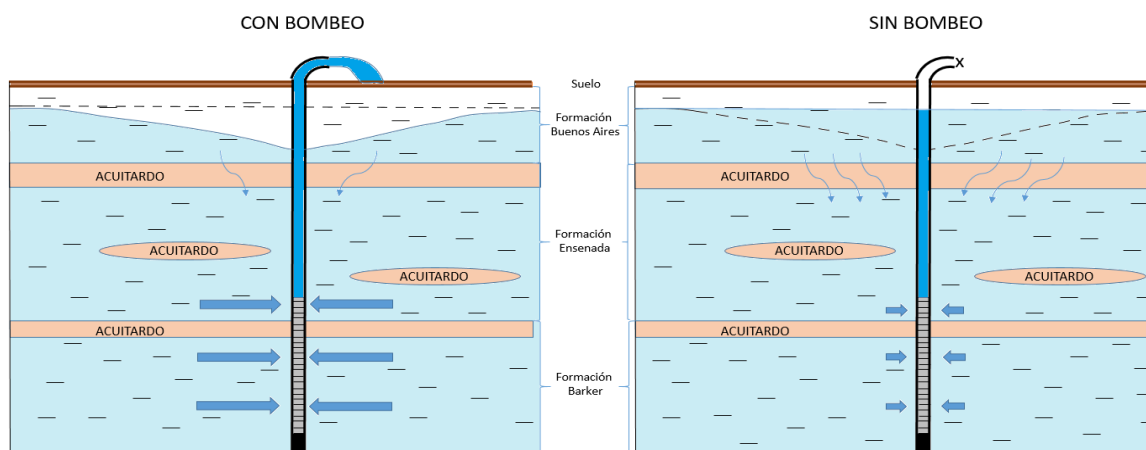


Figura 65. Esquema comparativo del comportamiento del acuífero en las etapas de bombeo (izq.) y recuperación (der.).

6.5.4 Ensayo de bombeo a caudal constante (régimen variable)

El objetivo principal de este tipo de ensayo es observar el comportamiento del pozo cuando se realiza el bombeo con un mismo caudal durante un lapso de tiempo determinado y definir si el nivel piezométrico permanece invariable después de un cierto tiempo de bombeo, es decir se mantiene constante.

La metodología práctica de este tipo de ensayo consiste en realizar mediciones de la profundidad del nivel de agua, tanto en el pozo de bombeo como en el pozo de observación o piezómetro, previo al inicio del bombeo.

Una vez comenzado el bombeo en el pozo con un caudal constante, elegido según el ensayo previamente descrito, se realiza un seguimiento del descenso piezométrico en el pozo de observación (primero en intervalos cortos de tiempo que van aumentando logarítmicamente a medida que se extiende el ensayo).

Generalmente el ensayo de bombeo llega a extenderse más de un día, de explotación continua a caudal constante, momentos en que las mediciones se espacian cada vez más para poder definir a que profundidad se establece el nivel piezométrico constante.

Durante las campañas del presente estudio se realizaron ensayos de bombeo a caudal constante en dos ubicaciones denominadas 14B y 15. A continuación, se presentan los datos medidos en ambos casos:

Piezómetro 14B a 107 m³/h				Piezómetro 15 a 80 m³/h			
t (min)	Nd (mbbp)	t (min)	Nd (mbbp)	t (min)	Nd (mbbp)	t (min)	Nd (mbbp)
0	1,93	15	4,03	0	8,90	15	11,71
0,5	2,11	20	4,13	1	9,42	20	11,85
1	2,35	30	4,26	2	9,85	30	12,01
2	2,79	45	4,35	3	10,45	60	12,21
3	3,15	60	4,39	4	10,68	120	12,30
4	3,50	120	4,47	5	11,12	240	12,33
5	3,54	240	4,49	6	11,13	380	12,33
6	3,60	480	4,51	7	11,21	612	12,33
7	3,67	1113	4,57	8	11,34	1250	12,35
8	3,74			9	11,41	1350	12,32
9	3,81			10	11,46		
10	3,85						

Tabla 24. Mediciones obtenidas durante el ensayo de bombeo a caudal constante.

Una vez finalizado el ensayo de bombeo, teniendo el dato del caudal, depresiones y distancias entre el pozo y el piezómetro, se procedió a interpretar la información obtenida mediante distintos métodos con el fin de determinar valores de transmisividad (**T**) y coeficiente de almacenamiento (**S**).

Para esto se deben comparar las curvas de descenso piezométrico, obtenidas durante el bombeo en cada pozo, con las curvas patrón de cada modelo de acuífero (libre, semi-libre, semiconfinado, confinado, etc). Cada modelo de prueba exige que se definan distintos parámetros a fin de establecer una condición lo más real posible, por lo que se deben cargar datos de las características de construcción del pozo y del piezómetro (profundidad y longitud de los filtros en ambos pozos, distancia entre ambos) así como del caudal de explotación.

Al observar el ajuste de los distintos modelos se reconoció que el modelo Neuman (1975), para acuíferos sin confinar con penetración parcial de los filtros del pozo de explotación, es el que mejor ajusta para los datos de los ensayos de bombeo de ambos pozos. Lo que describe al acuífero bajo estudio como semiconfinado o semilibre (situación intermedia entre los acuíferos confinados y libres).

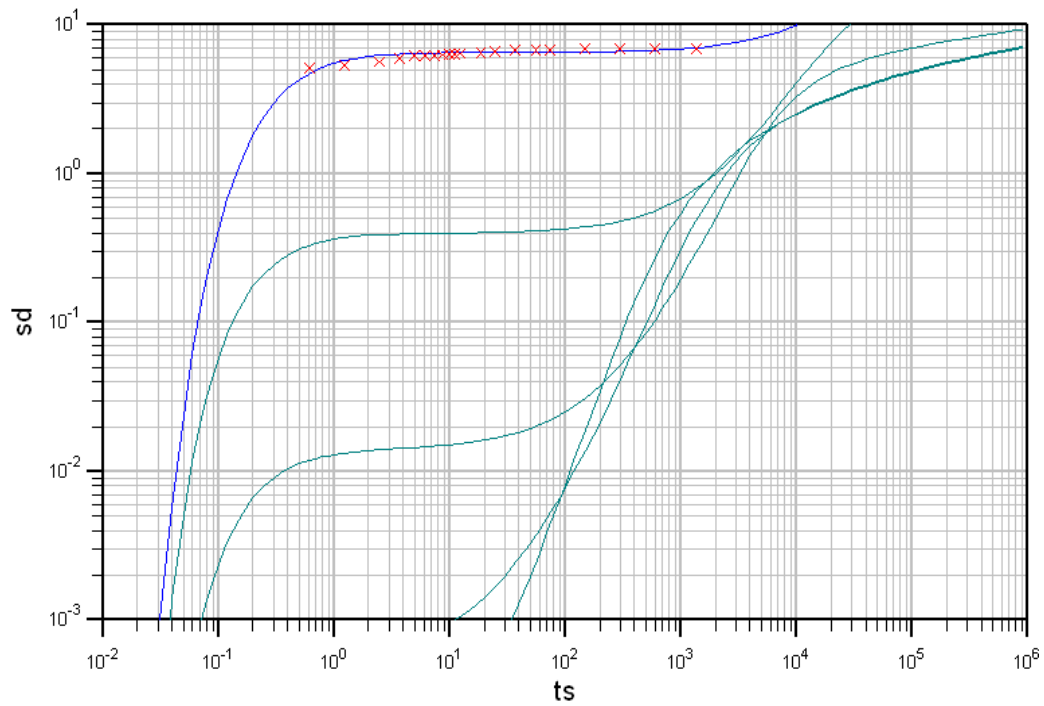


Figura 66. Ajuste de los datos del ensayo de bombeo a caudal constante del pozo 14B.

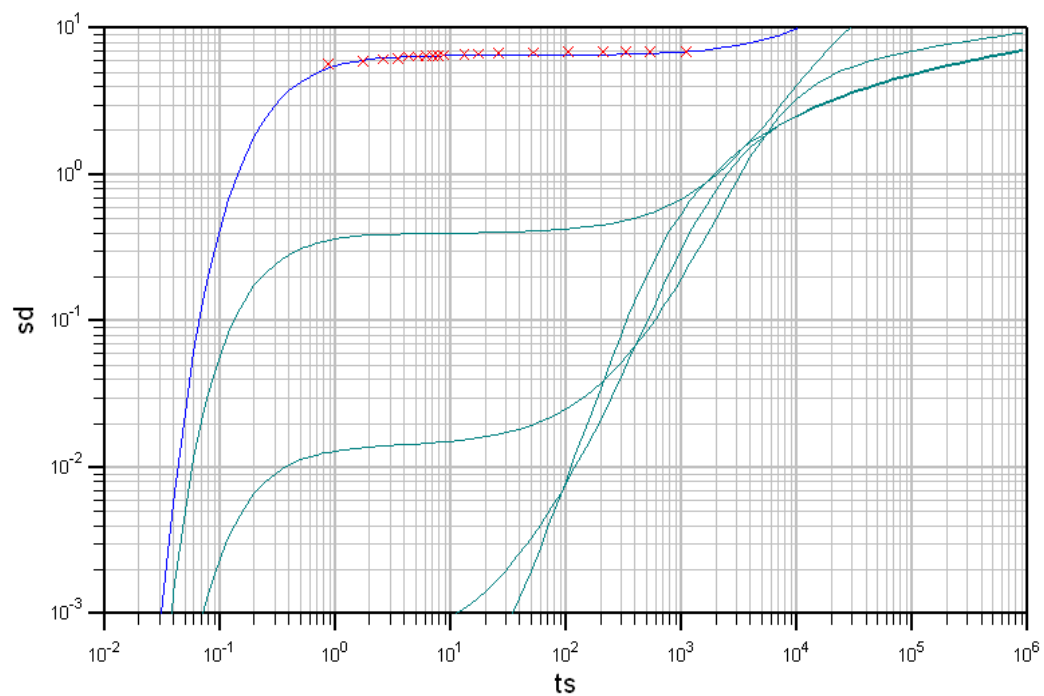


Figura 67. Ajuste de los datos del ensayo de bombeo a caudal constante del pozo 15.

Los resultados obtenidos, al emplear el modelo descripto, fueron comparados con los anteriormente descriptos para poder evaluar el modelado gráfico y definir las principales características del acuífero bajo estudio (se reconoce un muy buen ajuste entre los distintos modelos empleados). A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos.

	Custodio-Llamas (1983)		Neuman (1975)		Logan (1964)	
Piezómetros	Pz 14B	Pz 15	Pz 14B	Pz 15	Pz 14B	Pz 15
Transmisividad (m ² /día)	131,1	61,3	135,6	74,4	186,9	131,8

Tabla 25. Comparación de resultados obtenidos mediante los métodos descriptos.

Se puede observar que los modelos presentan datos comparables lo que valida la utilización del método gráfico en el área de estudio de este trabajo y que definen una transmisividad promedio de 99,96 m²/día. Además, al graficar los datos obtenidos durante los ensayos se observó un mejor ajuste con el método de Neuman (1975) y se obtuvieron los valores de coeficiente de almacenamiento en el pozo 14B ($7,76 \cdot 10^{-7}$) como para el pozo 15 ($6,04 \cdot 10^{-6}$) que definen un valor promedio de $6,90 \cdot 10^{-6}$.

Aunque los valores obtenidos de almacenamiento son muy bajos, comparándolos con los de un acuífero confinado, debe considerarse que los acuíferos pampeanos son en general de carácter semilibre (valores de almacenamiento del orden de 10^{-2}).

Además, es frecuente que las curvas de abatimiento obtenidas en los ensayos del acuífero pampeano no respondan adecuadamente a las curvas patrón de los modelos de interpretación hidráulica. Esto se debe a que las ecuaciones y curvas que se usan en las interpretaciones se adecuan a acuíferos clásticos homogéneos y con porosidad primaria. Mientras que el acuífero pampeano presenta porosidad secundaria por disolución lo que le da un comportamiento “*pseudokárstico*” de forma que se aleja del comportamiento previsto para el uso de estas ecuaciones.

El resultado es que en algunos casos los valores de almacenamiento no son correctamente estimados. No obstante, Elichiri (2002) obtiene valores del orden de 10^{-2} en la cercana Estancia El Volcán, que puede emplearse como referencia.

6.5.5 Análisis de resultados

La ciudad de Balcarce emplea el bombeo de agua subterránea para consumo por lo que los pozos deben entenderse como una batería que aporta sus caudales a una red integrada y controlada por la empresa Aguas de Balcarce. Cuanta mayor información se obtenga de los pozos mejor entendimiento se tendrá del sistema acuífero de Balcarce, por este motivo se ha comparado y analizado los datos de los pozos previos y que actualmente se encuentran en explotación.

Habiendo empleado los distintos métodos de análisis para entender el comportamiento de los distintos ensayos de bombeo, a continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos:

Pozos	15	14B	13	12	11	Batería
Caudal máximo (m ³ /h)	80,0	107,0	122,0	129,3	118,0	111,3
Depresión (mbbp)	19,1	18,9	18,9	19,1	24,4	20,1
Caudal específico (m ³ /h)	4,6	5,7	7,9	6,8	5,0	6,0
Transmisividad (m ² /d, Ensayo de Aforo)	122,4	165,5	243,1	196,8	142,3	174,0
Transmisividad (m ² /d, Custodio-Llamas, 1983)	61,28	131,06				96,2
Transmisividad (m ² /d, Neuman 1975)	74,45	135,59				105,0
Rendimiento (%)	77,7	85,8	78,3	94,1	82,7	83,7
Pérdidas (%)	22,3	14,2	21,7	5,9	17,3	16,3

Tabla 26. Cuadro comparativo de los resultados obtenidos.

Se reconoce que el mejor ajuste se da entre los valores calculados por Custodio y Llamas (1983) y Neuman (1975), aunque se puede observar una diferencia entre estos y el método de Logan (1964). Debido a esta diferencia los valores de transmisividad del método Logan (1964) debieron ser corregidos aduciendo factores que pudieron ser calculados como las pérdidas de carga promedio de la batería de pozos (16,3%). Al realizar esta corrección se observó un mejor ajuste entre los métodos, aunque todavía se observaron diferencias que pueden ser explicadas porque el método Logan (1964) fue establecido para acuíferos confinados y según el método comparación gráfica (ver capítulo 4.5.4) el mejor ajuste de los datos es con un acuífero semilibre o semiconfinado.

7 HIDROQUÍMICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La química del agua subterránea permite conocer los procesos que ha sufrido el agua desde que se infiltra hasta su descarga, el tipo de terreno que ha atravesado, y los procesos de mezcla y contaminación. El conocimiento de las características químicas del agua vinculadas a la hidrogeología tiene como finalidad fundamental establecer relaciones entre la composición, distribución y circulación del agua en los acuíferos y la geología, mineralogía y sistema de flujo de estos. Además, ayuda a establecer la aptitud frente a los posibles usos y prever los eventuales inconvenientes o perjuicios que su utilización podría producir a determinados procesos industriales y/o a la agricultura, ganadería y/o esencialmente al consumo humano (Appelo y Postma, 1993).

La información hidroquímica empleada en este trabajo se obtuvo de las distintas mediciones durante las campañas 2014/2015, el orden numérico de los pozos y el orden alfabético de las muestras fue establecido por Aguas de Balcarce S.A.

Además, la empresa Aguas de Balcarce S.A. proporcionó información sobre el seguimiento que realizaron, entre 2008 y 2014, en distintos pozos dentro del área de estudio de este trabajo. Esta información fue ordenada alfabéticamente de acuerdo a la ubicación provista por la empresa, para poder representarla visualmente en la figura 68.

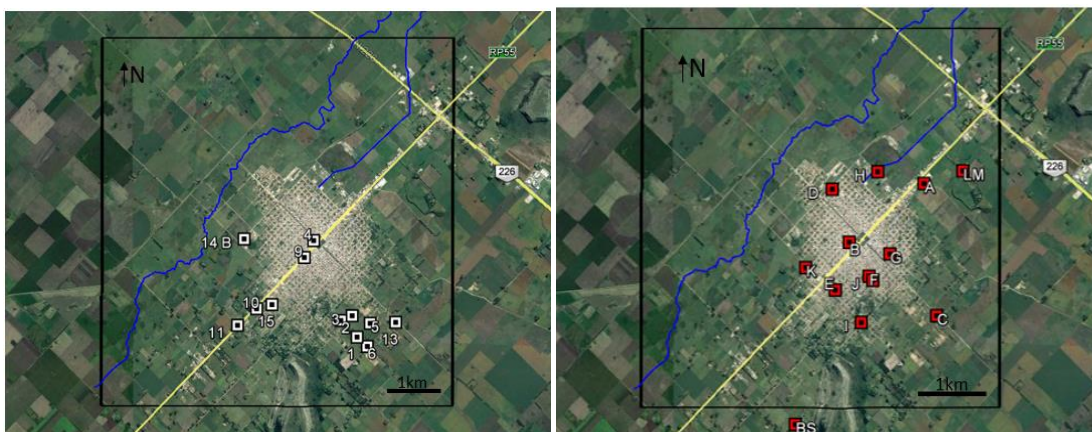


Figura 68. Ubicación de los pozos numerados (izq.) y de los lugares de muestreo alfabetizados (der.).

No obstante, en los pozos se pudo realizar mediciones durante las distintas campañas donde se obtuvo información sobre la temperatura, conductividad, sólidos disueltos totales (TDS), pH y potencial óxido-reducción (ORP) de las muestras de agua extraídas. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos:

Pozo	Temperatura (°C)	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	TDS	Ph	ORP
1	17,3	791,0	547,0	8,0	117,0
2	17,2	935,0	628,0	8,3	119,0
3	16,8	814,0	547,0	8,2	116,0
4	18,6	1165,0	779,0	7,7	132,0
5	20,8	1016,0	679,0	8,2	112,0
6	20,1	846,0	575,0	8,1	92,0
9	19,1	926,0	621,0	7,8	125,0
10	19,7	880,0	587,0	8,0	123,0
11	18,6	849,0	569,0	8,1	122,0
12	20,4	1079,0	721,0	8,1	105,0
13	20,4	1072,0	720,0	8,0	77,0
14B	17,7	1422,6	949,1	8,2	122,6
15	18,9	663,6	446,4	8,4	125,1
BS	19,1	1081,0	724,0	7,5	141,0
LM	17,4	1205,0	805,0	8,1	133,0

Tabla 27. Datos muestreados en las campañas 2014-2015.

Los 13 pozos que se encuentran en explotación, en el sector urbano-periurbano de la Ciudad de Balcarce, alimentan a la red de distribución de agua potable y son controlados por la empresa Aguas de Balcarce SA. La misma realiza controles periódicos de calidad de agua, tomando muestras que son enviadas a analizar al laboratorio de Obras Sanitarias MGP de la Ciudad de Mar del Plata, en donde se define si la muestra cumple con los estándares de calidad establecidos tanto a nivel nacional como internacional. El Código Alimentario Argentino (1992), en su Artículo 982, define

las características físicas, químicas, microbiológicas que debe cumplir el agua potable para consumo humano. A continuación, se resume con el orden alfabético preestablecido, la información puesta a disposición por la empresa.

Pozo	1
Fecha de extracción de muestra	21/10/2008
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C)	901
Sólidos totales disueltos (TDS)	
Ph	7,6
Dureza total (en CaCO_3, mg/l)	114
Alcalinidad total (en CaCO_3, mg/l)	389
Cloruro (mg/l)	40
Sulfato (mg/l)	12,42
Nitrato (mg/l)	34,07
Nitrito (mg/l)	< 0,01
Amonio (mg/l)	< 0,05
Cloro libre (mg/l)	< 0,01
Fluoruro (mg/l)	1,07
Calcio (mg/l)	30
Magnesio (mg/l)	10

Tabla 28. Datos muestreados en 2008 (Aguas de Balcarce SA).

Pozo	1	9	10	11	12	13	A	B	C
Fecha de extracción de muestra	20/4/2009	20/4/2009	20/4/2009	20/4/2009	20/4/2009	20/4/2009	20/4/2009	20/4/2009	20/4/2009
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C)	913	1068	943	904	1115	1207	1013	999	1138
Sólidos totales disueltos (TDS)	623	664	538	525	701	740	640	604	728
pH	7	7,6	7,5	7,5	7,6	7,5	7,5	7,5	7,5
Dureza total (en CaCO_3, mg/l)	130	60	85	73	55	88	83	88	64
Alcalinidad total (en CaCO_3, mg/l)	404	478	395	384	471	502	420	415	477
Cloruro (mg/l)	42	49	46	48	60	72	53	50	63
Sulfato (mg/l)	12,69	18,08	18,8	17,56	28,56	30,22	20,68	20,84	27,75
Nitrato (mg/l)	23,38	17,86	36,07	22,09	21,99	25,68	33,81	34,54	23,48
Nitrito (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01	0,08	< 0,01	< 0,01
Amonio (mg/l)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05
Cloro libre (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoruro (mg/l)	1,07	1,23	1,24	1,35	1,37	0,8	1,34	1,33	1,23
Calcio (mg/l)	12	14	20	19	13	20	20	22	15
Magnesio (mg/l)	9	6	8	6	5	9	8	8	6

Tabla 29. Datos muestreados en 2009 (Aguas de Balcarce S.A).

Pozo	1	11	D	E	F	G
Fecha de extracción de muestra	15/3/2011	15/3/2011	15/3/2011	15/3/2011	15/3/2011	15/3/2011
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C)	936	948	956	958	1072	1072
Sólidos totales disueltos (TDS)	678	645	642	649	727	723
pH	7,8	7,8	7,8	7,7	7,8	7,8
Dureza total (en CaCO_3 , mg/l)	72	65	63	69	54	58
Alcalinidad total (en CaCO_3 , mg/l)	396	407	405	400	500	463
Cloruro (mg/l)	49	49	50	49	58	60
Sulfato (mg/l)	38,1	22,4	22,9	22,3	26,9	28,3
Nitrato (mg/l)	24,1	24,1	24	24	23,3	23,1
Nitrito (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Amonio (mg/l)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cloro libre (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoruro (mg/l)	0,52	1,25	1,24	1,31	1,42	1,4
Calcio (mg/l)	15	16	15	17	12	13
Magnesio (mg/l)	8	6	6	6	6	6

Tabla 30. Datos muestreados en 2011 (Aguas de Balcarce S.A.).

Pozo	2	3	4	5	6	9	11	12	13
Fecha de extracción de muestra	31/1/2012	31/1/2012	31/1/2012	31/1/2012	31/1/2012	31/1/2012	31/1/2012	31/1/2012	31/1/2012
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C)	953	963	1175	1041	1081	977	880	1109	1189
Sólidos totales disueltos (TDS)	476	453	588	520	540	489	440	554	595
pH	8,1	8,1	7,7	8	8	7,8	8	8	7,9
Dureza total (en CaCO_3 , mg/l)	86	80	162	54	49	131	84	54	94
Alcalinidad total (en CaCO_3 , mg/l)	369	366	444	441	469	377	356	463	486
Cloruro (mg/l)	51	47	63	58	58	49	60	63	70
Sulfato (mg/l)	12,5	32,6	29,9	20,2	22,5	10,1	19	28,1	26,6
Nitrato (mg/l)	66,4	42,3	75,6	17,7	11	59,4	7	29,3	38
Nitrito (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Amonio (mg/l)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cloro libre (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoruro (mg/l)	1,26	1,63	0,63	1,33	1,49	0,71	0,94	1,47	0,9
Calcio (mg/l)	20	19	35	12	13	29	19	13	19
Magnesio (mg/l)	9	7	18	6	4	14	9	5	11

Tabla 31. Datos muestreados en 2012 (Aguas de Balcarce S.A.).

Pozo	B	H	A	D	I	J
Fecha de extracción de muestra	31/1/2012	31/1/2012	11/9/2012	11/9/2012	11/9/2012	11/9/2012
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C)	899	925	938	941	1001	888
Sólidos totales disueltos (TDS)	450	462	469	471	500	444
pH	8	7,9	8,1	8,2	8,1	8,2
Dureza total (en CaCO_3 , mg/l)	116	114	94	88	80	83
Alcalinidad total (en CaCO_3 , mg/l)	379	392	379	388	417	376
Cloruro (mg/l)	42	44	35	40	47	42
Sulfato (mg/l)	10,8	12	13	12,4	15,6	13,2
Nitrato (mg/l)	37,2	9,7	36,9	40	29,5	23,3
Nitrito (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Amonio (mg/l)	< 0,05	< 0,05	0,03	0,06	< 0,01	0,01
Cloro libre (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoruro (mg/l)	1,31	1,18	1,41	1,37	1,37	1,27
Calcio (mg/l)	28	28	27	23	19	16
Magnesio (mg/l)	11	11	7	8	8	10

Tabla 32. Datos muestreados en 2012 (Aguas de Balcarce S.A.).

Pozo	A	G	K	14	14
Fecha de extracción de muestra	24/02/2014	24/02/2014	24/02/2014	12/11/2014	4/12/2014
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C)	993	1019	937	1118	1815
Sólidos totales disueltos (TDS)	497	510	469	559	907
pH	8	7,9	7,8	8,2	7,7
Dureza total (en CaCO_3 , mg/l)	84	85	97	58	237
Alcalinidad total (en CaCO_3 , mg/l)	416	416	392	365	334
Cloruro (mg/l)	52	57	49	85	286
Sulfato (mg/l)	19	21,9	19,2	20,4	225
Nitrato (mg/l)	35,4	45,8	37,9	97,1	25,4
Nitrito (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,03	0,05
Amonio (mg/l)	0,03	0,06	< 0,01	< 0,01	0,06
Cloro libre (mg/l)	< 0,01	0,03	0,02	< 0,05	< 0,05
Fluoruro (mg/l)	1,55	1,46	1,34	0,97	0,5
Calcio (mg/l)	19	22	25	18	56
Magnesio (mg/l)	9	7	8	3	23

Tabla 33. Datos muestreados en 2014 (Aguas de Balcarce S.A.).

Se analizaron las muestras obtenidas por Agua de Balcarce con el fin de comparar los distintos parámetros entre las distintas campañas (comportamiento temporal) y entre cada pozo (comportamiento areal).

Analizando la información obtenida de las muestras se obtuvo la evolución temporal de los distintos parámetros entre 2009 y 2014. Los resultados se muestran en los siguientes gráficos según la escala de medición.

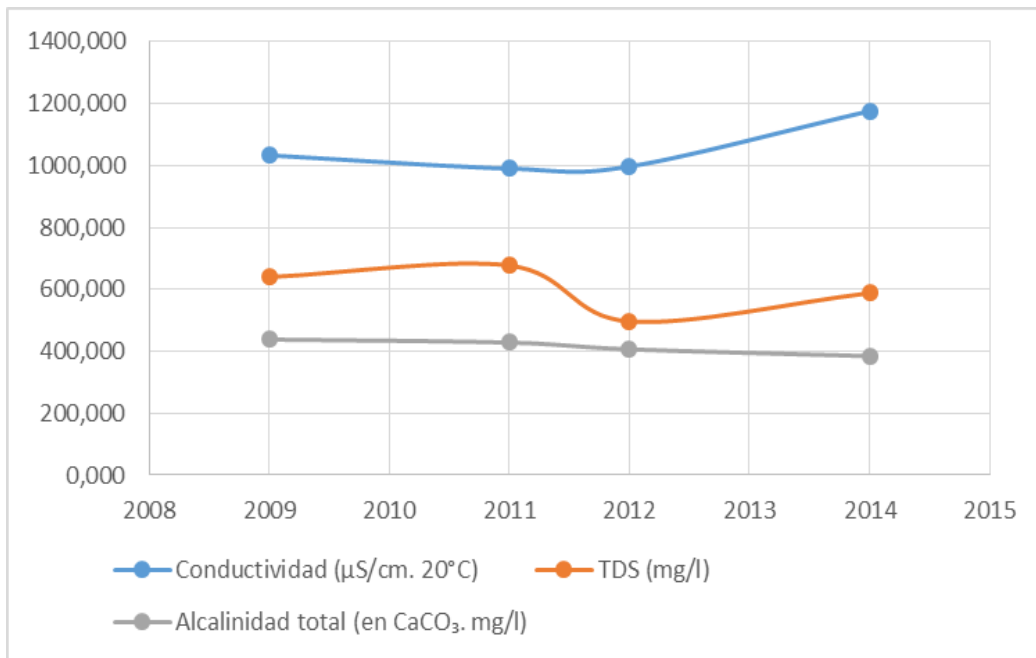


Figura 69. Evolución temporal obtenida de los promedios de conductividad, TDS y alcalinidad total.

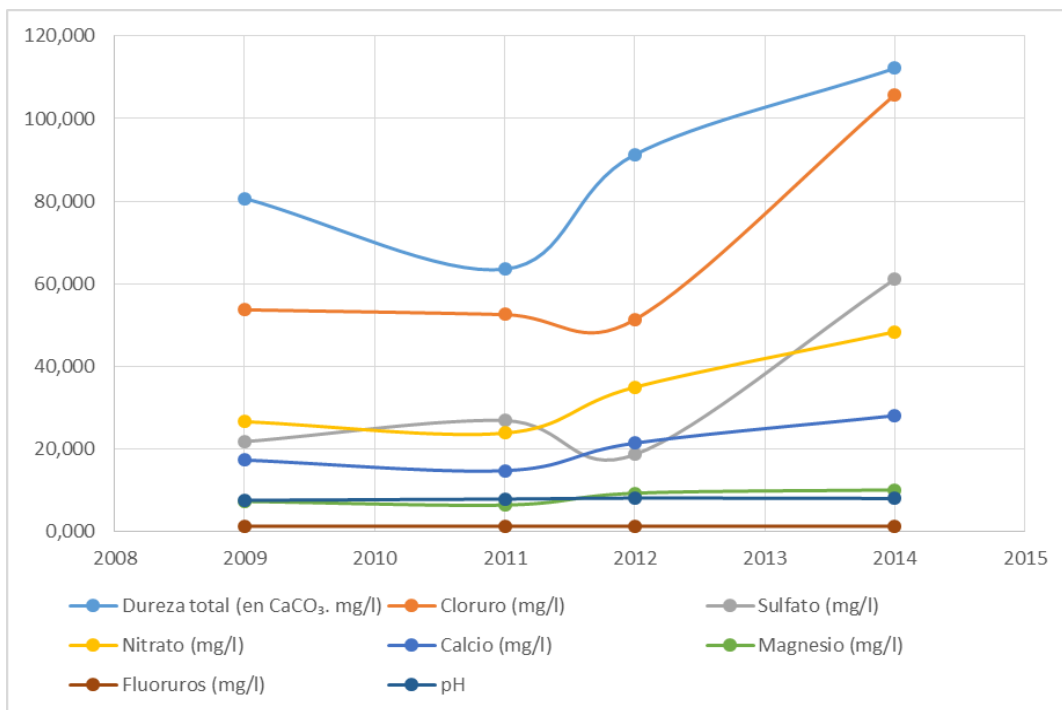


Figura 70. Evolución temporal obtenida de los promedios de dureza total, cloruro, sulfato, nitrato, calcio, magnesio, fluoruro y pH.

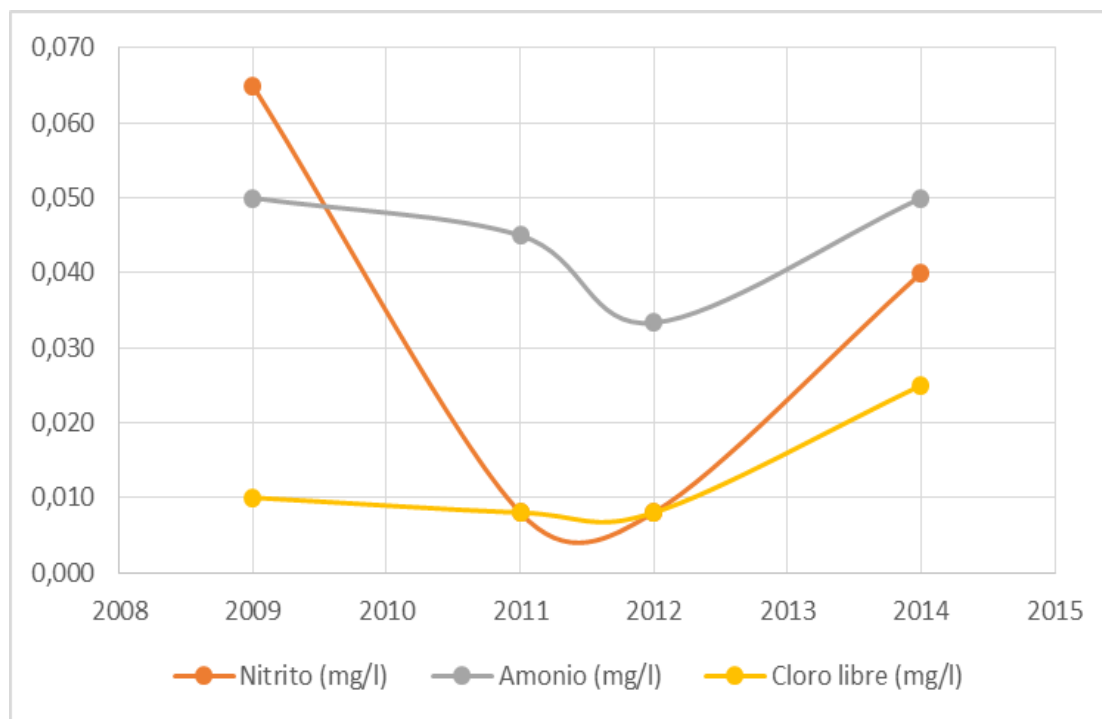


Figura 71. Evolución temporal obtenida de los promedios de nitrito, amonio y cloro libre.

Los resultados obtenidos indican que los distintos parámetros presentan una variación temporal (se destacan sulfatos, nitratos, calcio, flúor y magnesio) que presentan un incremento notable del 2009 y al 2014. Se puede reconocer un aumento de las precipitaciones anuales que en 2009 alcanzan valores de 740 mm y en 2014 aumentan hasta 1148 mm (ver Figura 3, capítulo 2.1). Por esto las variaciones de recarga del acuífero, controlada por la mayor o menor precipitación local, da como resultado un nivel freático variable que alcanza niveles con distintas concentraciones.

También se reconocen importantes variaciones entre los distintos pozos (donde se destacan sulfatos, nitratos, calcio, flúor y magnesio) que pueden deberse a las variaciones del área de influencia de los pozos que, al momento de la extracción de la muestra, estén explotando el acuífero. Es decir, a cada año la empresa, encargada de construir los pozos, va aumentando el número y con esto el área de influencia de los mismos va cambiando y, dependiendo de que pozo se obtenga la muestra, las concentraciones serán distintas. Además, la misma empresa va alternando la cantidad de pozos en explotación, con el fin de realizar el mantenimiento necesario, por lo que también dependerá de los regímenes de bombeo del pozo donde se obtiene la muestra y de los pozos próximos.

Empleando la información obtenida se configuraron distintos mapas con el objeto de contextualizar espacialmente los datos y poder reconocer sectores característicos. Empleando el método de grileo Kriging, se graficaron los datos de Temperatura, pH, ORP, Conductividad, Nitratos y Fluoruros, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

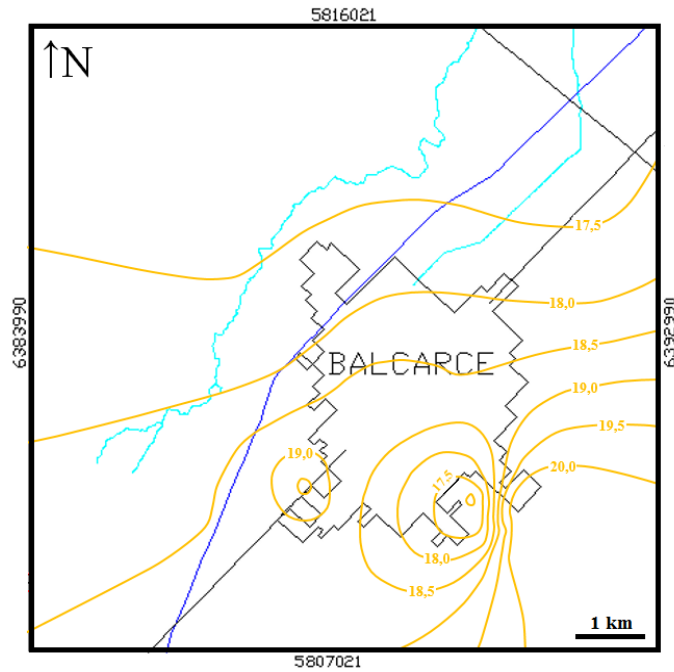


Figura 72. Curvas de temperatura, en °C, obtenidas en el área de estudio.

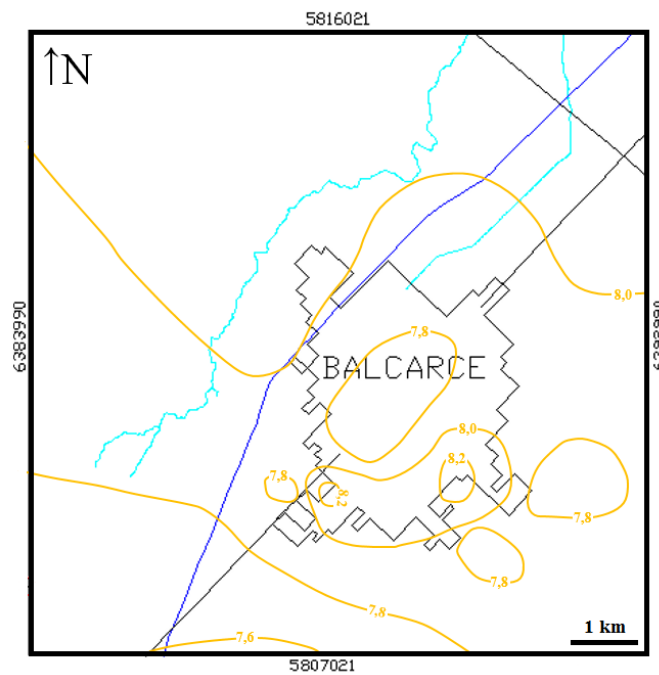


Figura 73. Curvas de pH obtenidas en el área de estudio.

La temperatura presenta valores entre 17,5 y 20 °C (figura 72) en donde se pueden reconocer distintas anomalías principalmente cercanas a los afloramientos del basamento en el Parque Municipal Cerro El Triunfo donde el espesor no saturado pasa de espesores máximos al oeste a espesores mínimos hacia el este (debido a la presencia de las fallas que limitan los bloques del

basamento, ver figuras 48 y 49). Mientras que los valores de pH, aunque se pueden reconocer algunas anomalías puntuales, siempre se mantiene en valores básicos (figura 73).

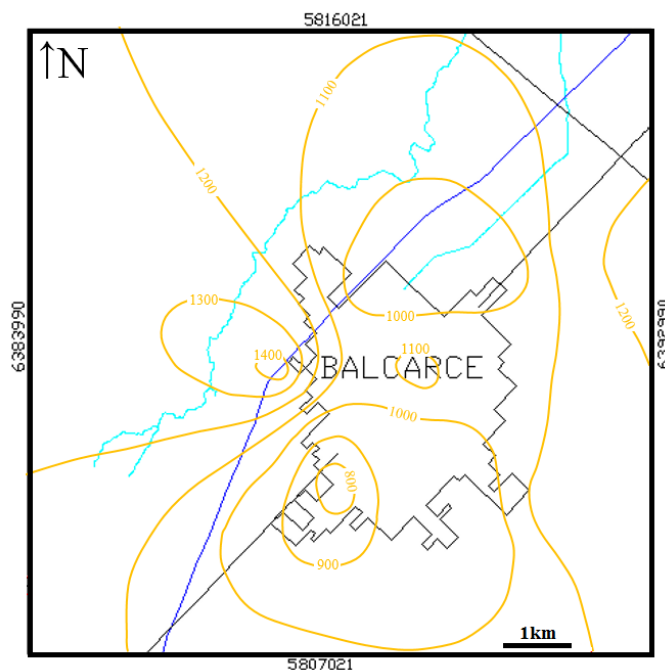


Figura 74. Curvas de conductividad, en $\mu\text{S}/\text{cm}$, obtenidas en el área de estudio.

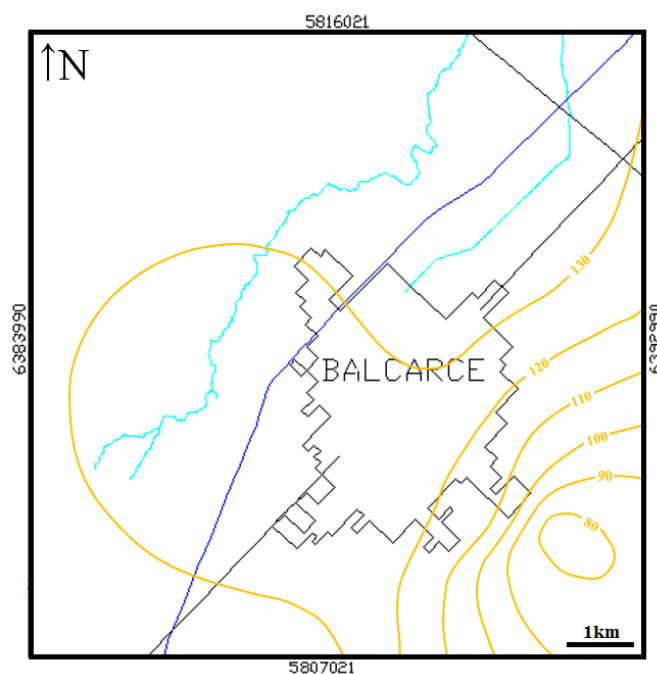


Figura 75. Curvas de ORP obtenidas en el área de estudio.

La conductividad presenta valores entre 800 y 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ donde se observan mayores valores hacia el oeste donde se registra la mayor actividad agropecuaria en el área de estudio (figura 74). Mientras que los valores de ORP describen un ambiente oxidante en general que presenta valores

menores al sureste del sector urbano, debido a la presencia de pozos ciegos sin tratamiento que vuelcan aguas servidas que se infiltran en el subsuelo (figura 75).

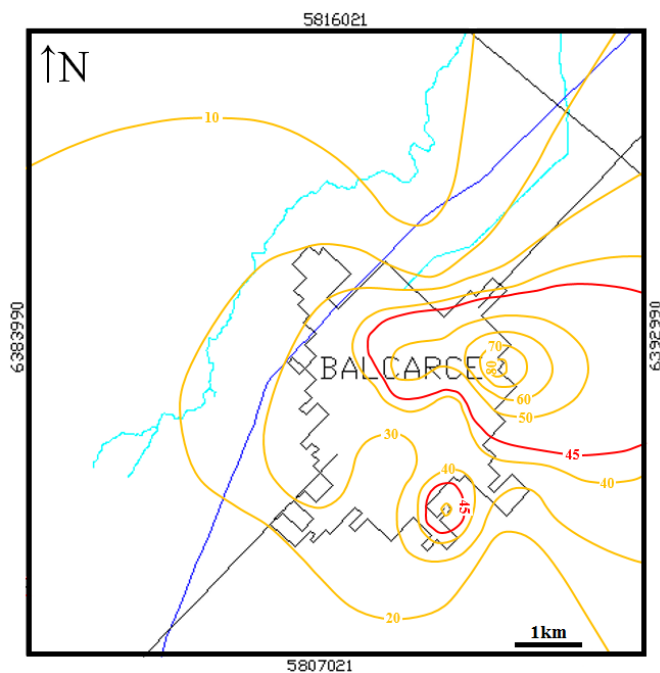


Figura 76. Curvas de concentración de nitratos, en mg/l, obtenidas en el área de estudio

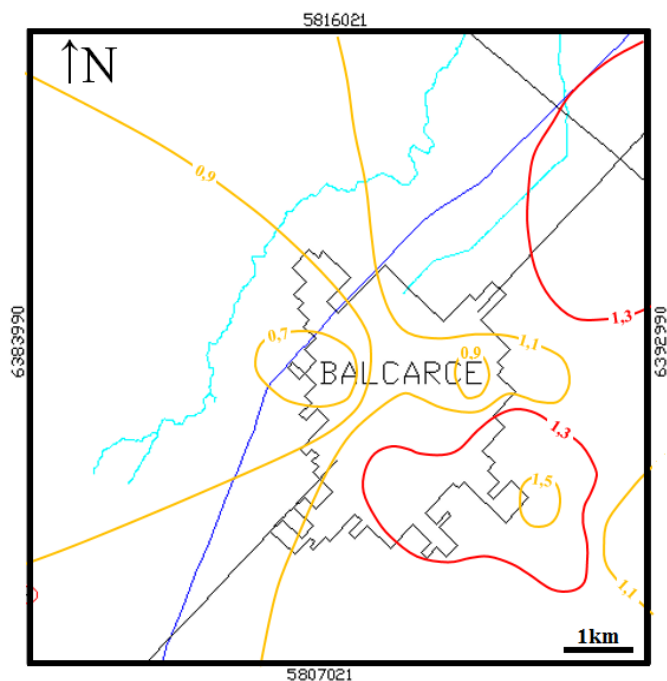


Figura 77. Curvas de concentración de fluoruros, en mg/l, obtenidas en el área de estudio

Las concentraciones de nitratos presentan valores muy variados donde se reconocen, en el sector urbano, valores que superan el límite potable (45 mg/l) y valores bajos y óptimos hacia el sector

serrano (figura 76). Mientras que en los valores de concentración de fluoruros (figura 77) se observan anomalías positivas y negativas puntuales independientes del flujo subsuperficial (pueden estar asociadas a variaciones sedimentarias puntuales), incluso algunas superan el límite potable establecido (1,3 mg/l).

Para poder analizar la información hidroquímica, tanto de los análisis en los pozos como de los ensayos físico-químicos de laboratorio, se empleó el programa INQUAS (Merino y Almudeno de la Losa, IGME, 2009) para clasificar la composición de las aguas mediante los diagramas de Piper-Hill-Langelier (ver Figura 78).

Los diagramas de Piper-Hill-Langelier se emplean con el fin de obtener resultados que faciliten la interpretación de datos mediante el cruzamiento de los valores (en meq/g) de los cationes y aniones principales. El mismo proyecta sobre un rombo central los valores promedio de dos diagramas triangulares que representan a los aniones y cationes respectivamente.

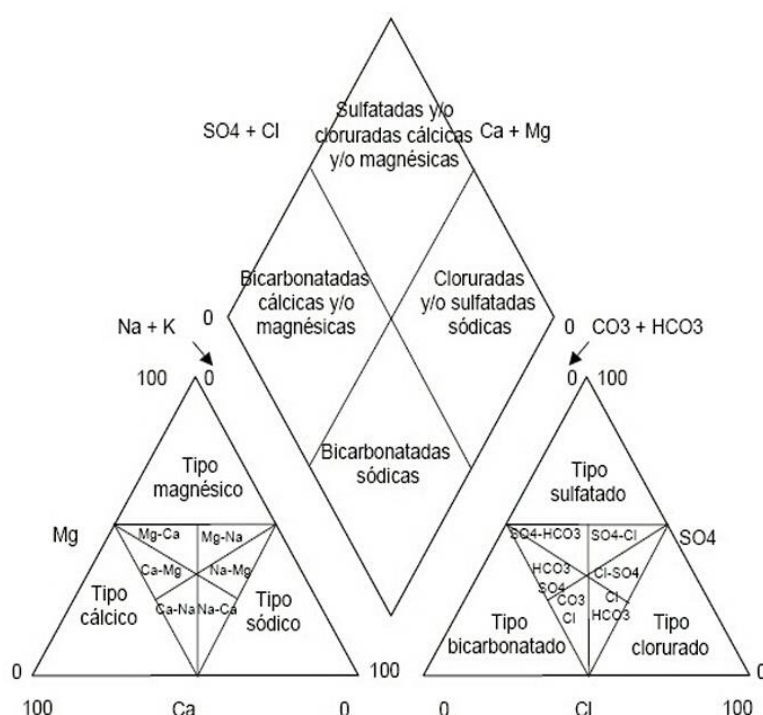


Figura 78. Diagrama de Piper-Hill-Langelier.

7.1 Hidroquímica de captaciones

Durante las campañas realizadas en este estudio se realizaron mediciones tanto en la red de captaciones de Aguas de Balcarce S.A. (parámetros físico-químicos y especies mayoritarias) como en las nuevas perforaciones donde se realizaron los ensayos de bombeo descriptos previamente (parámetros físico-químicos).

Empleando el programa INQUAS (Merino y De la Losa, IGME, 2009) se analizaron los parámetros físico-químicos de las muestras y se obtuvo el correspondiente diagrama Piper (Figura 80) con el que se concluyen que las aguas del área de estudio presentan características

bicarbonatadas sódicas, donde el sodio es el principal catión (94,9%) y el bicarbonato es el principal anión (78,6%).

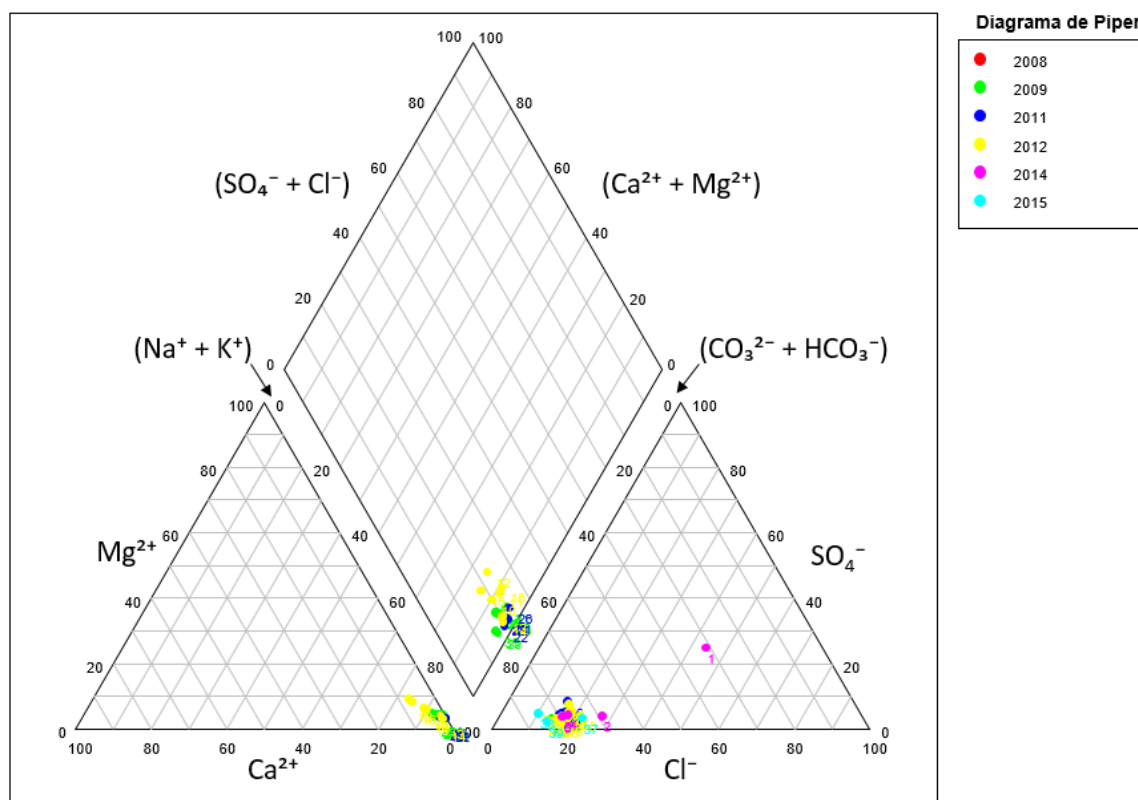


Figura 79. Parámetros físico-químicos de todas las muestras en diagrama Piper.

Según los estudios realizados en los partidos de Balcarce, General Pueyrredón, Olavarría y Tandil (Suero et al., 2008) predominan las aguas bicarbonatadas sódicas con Ca y Mg. Además, destacan que la Subregión VI o Periserrana de Tandilia presenta principalmente aguas bicarbonatadas sódicas (43,7 %), donde el sodio es el catión ampliamente dominante (61,2%), a la vez que el anión dominante es el bicarbonato (68,0%). La subregión comprende el área Periserrana de Tandilia y correspondería a la región con aguas subterráneas de mejor calidad química, incluyendo los acuitardos, ojos de agua y manantiales de la roca fisurada. Estos últimos forman pequeños reservorios de agua que podrían aportar parte de la recarga local por infiltración desde el sector periserrano, aunque faltan estudios al respecto.

En el gráfico de la figura 79 se observa que la muestra 1 registra valores anómalos respecto del resto, pero al graficar todas las muestras obtenidas en el mismo lugar (Pozo 1) se observa que sigue siendo la única que se diferencia del resto (ver figura 80) por lo que probablemente se deba a un parámetro mal evaluado.

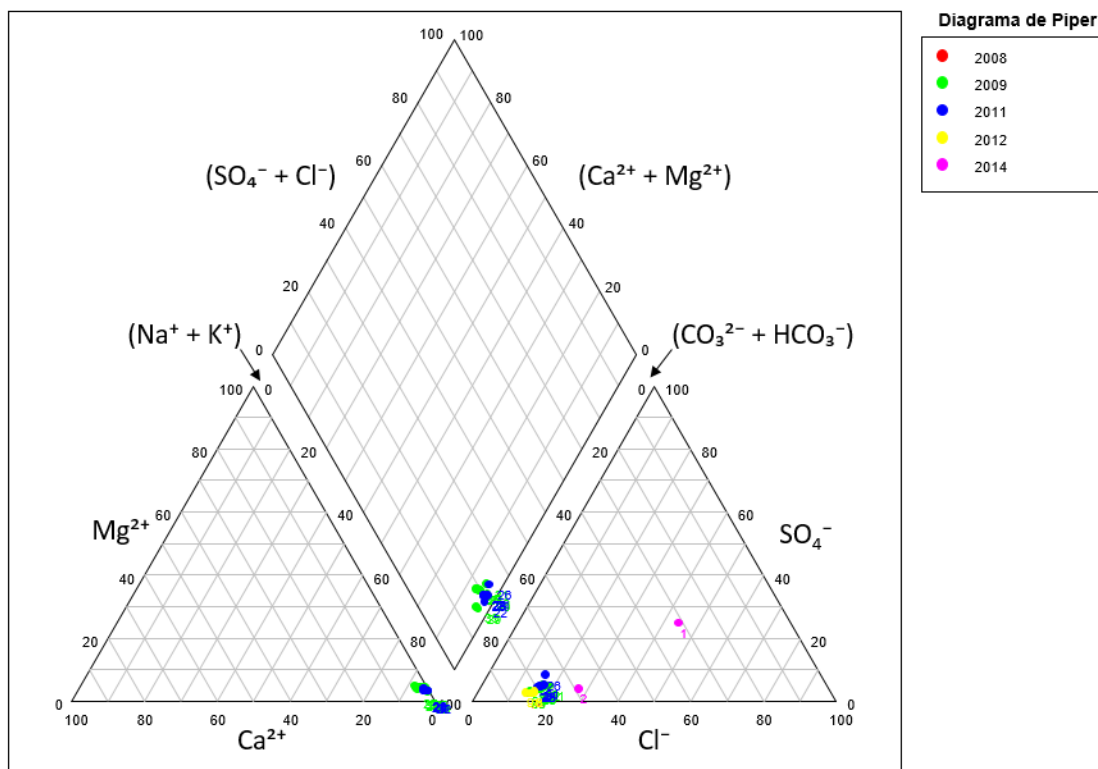


Figura 80. Resultados obtenidos de las muestras del Pozo 1.

Con el fin de ampliar el conocimiento de las características químicas del muestreo se analizaron las muestras en distintos sectores del área de estudio, tanto en el sector sureste como en el sector central-norte donde se observó una mayor densidad de muestreo. Se obtuvieron los siguientes diagramas Piper:

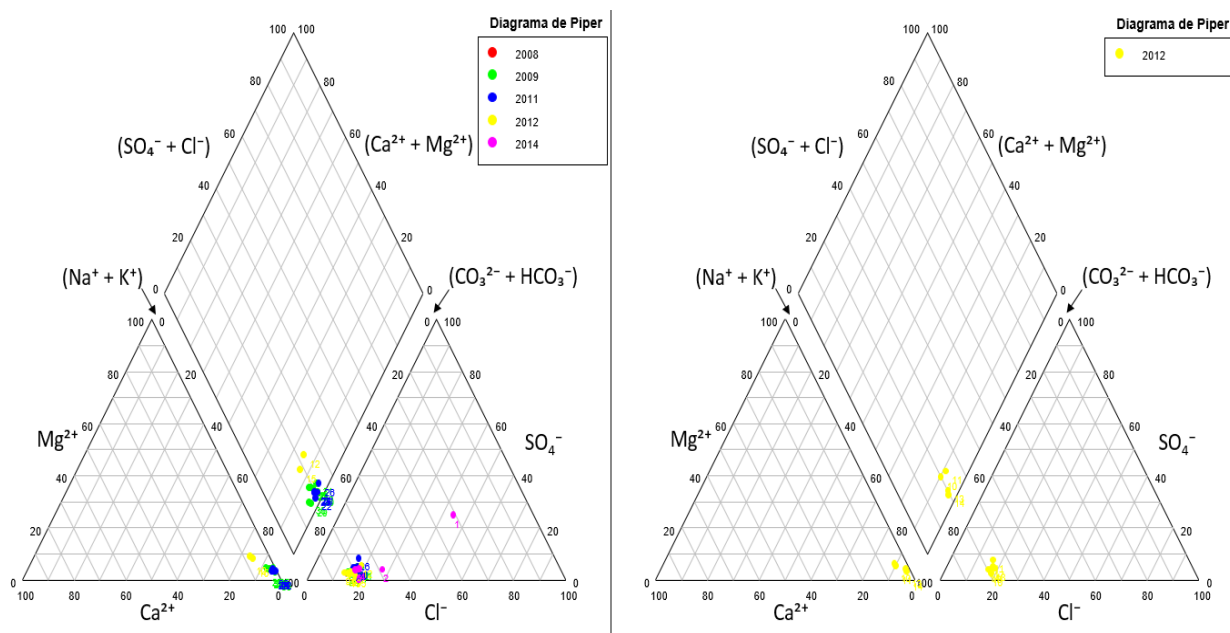


Figura 81. Diagramas Piper del sector central-norte (izq.) y sector sureste (der.) del área de estudio.

Aunque el sector central-norte presenta una mayor densidad de muestreos que el sector sureste (debido a la mayor densidad poblacional), ambos presentan aguas de características muy similares y de tipo bicarbonatadas sódicas.

Al analizar el comportamiento de las especies mayoritarias se reconocen distintos patrones similares en las concentraciones de nitratos, calcio y magnesio a lo largo del tiempo (figura 82) que se asocian a la recarga vertical del acuífero. Donde el agua infiltrada altera los componentes del subsuelo y libera iones disueltos en las aguas, tal como lo describen los estudios realizados por Tricart (1973) que describen la frecuente presencia, a poca profundidad, de costras de carbonato de calcio heredadas de los períodos secos del Cuaternario. Propone su origen a partir de la alteración de rocas graníticas, con feldespatos calcosódicos, que liberan iones disueltos en las aguas. Mientras que el aporte de las areniscas (algo calcáreas) de los cerros de Balcarce es mucho menor, por lo que la precipitación de carbonato de calcio en la zona de piedemonte resulta mucho menos importante pues la principal fuente sólo proviene de las cenizas y del loess (Tricart, 1973).

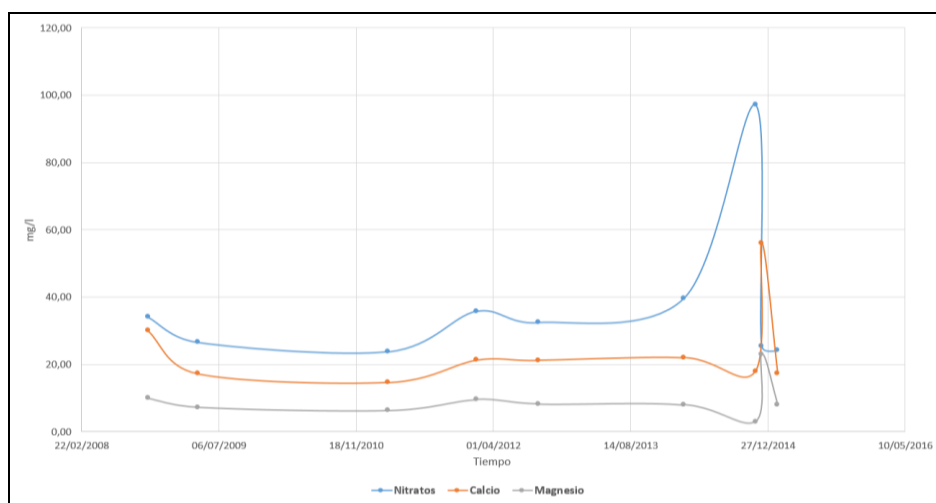


Figura 82. Gráfico comparativo entre Nitratos, Calcio y Magnesio para el período de tiempo muestreado.

Lima et al. (2013) caracterizaron la hidroquímica del agua subterránea del corredor Mar del Plata – Tandil (CMT) y observaron que la concentración de nitratos, en el 30% de las muestras analizadas, está por encima del límite de 45 mg/l (CAA, 2012) y puede ser atribuida a fuentes de contaminación de tipo difusa, principalmente asociada con fertilizantes orgánicos e inorgánicos. También describen la presencia de áreas de espesor de Zona No Saturada (ZNS) menores a 10 m y un uso del suelo esencialmente agrícola, recomiendan realizar una evaluación de peligrosidad de contaminación que contemple la vulnerabilidad del acuífero y las características de la carga contaminante real o potencial.

Un estudio realizado por Elichiry (2002) en la Estancia El Volcán, a pocos kilómetros al este del área de estudio de este trabajo, define un modelo de carga contaminante considerando que el nitrato se difunde de forma advectiva a partir del exceso de fertilizantes en los suelos mediante el análisis de los valores de concentración y su evolución durante el bombeo. El mismo describe que el 20% de las muestras analizadas en los pozos tienen una concentración en nitratos superior al nivel

máximo de potabilidad. Además, destaca que el uso de fertilizantes en los cultivos agrícolas bajo riego es un peligro potencial para los acuíferos de la zona.

En todos los análisis de laboratorio, aportados por la empresa Aguas de Balcarce S.A., se tienen valores de la concentración de nitratos, debido a que se han registrado valores elevados en algunos pozos (incluso se han segado pozos debido a los altos valores). Por esto se intentan proponer ideas de indicadores de nitratos, en el área de estudio, comparándolo con las demás especies químicas, pero no se encontraron indicadores correlacionables.

A continuación, se observa la correlación entre las concentraciones de nitratos y fluoruros en el tiempo, donde se reconocer una relación antitética entre ambas especies.

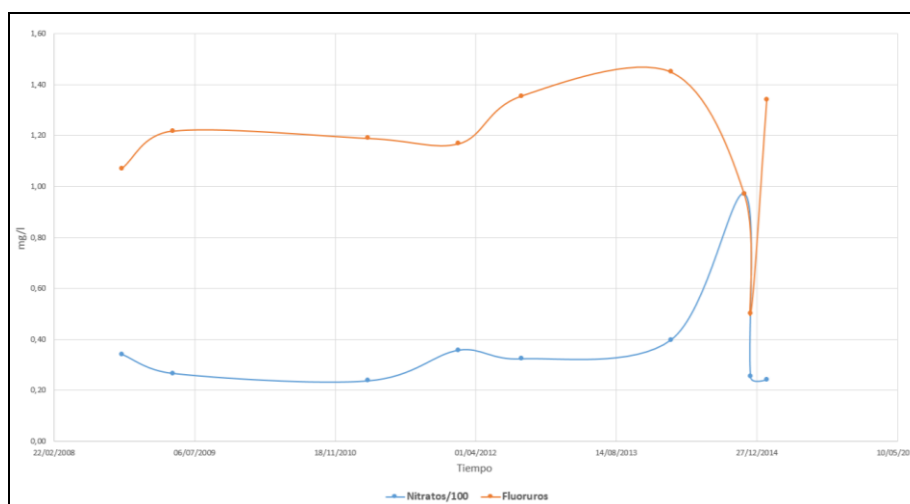


Figura 83. Gráfico comparativo entre Nitratos y Fluoruros para el período de tiempo muestreado.

En resumen, las concentraciones de nitratos son correlacionables solamente con el calcio y el magnesio lo cual se debe a que son producto de la infiltración por recarga vertical que altera los sedimentos superficiales y los concentra en niveles más profundos. Mientras que las demás especies no presentan correlación con los nitratos, además se observa (figura 76) que las muestras están concentradas en el casco urbano antiguo de la ciudad de Balcarce donde la fuente más probable sean los pozos ciegos o cloacas particulares que, aunque no se utilicen actualmente ya que existe una red cloacal, no han sido tratados adecuadamente.

Correlación con	Nitrato (mg/l)
Fluoruro (mg/l)	-0.248341188
Calcio (mg/l)	0.305689969
Magnesio (mg/l)	0.217846209
Sodio (mg/l)	-0.204548511

Tabla 34. Correlación de nitratos con las principales especies químicas medidas.

Aunque algunos pozos no se encuentran en el sector urbano principal, sino que se encuentran en los alrededores o sectores periurbanos (pozos 3, 4, 9, 10 y 13) y también presentan valores de nitratos elevados que no pueden asociarse a pozos ciegos debido a la baja densidad poblacional.

Grondona et al. (2013) describen que la cuenca del Río Quequén Grande está caracterizada por el predominio del cultivo de soja-girasol-trigo siendo el ENDOSULFÁN uno de los principales agroquímicos utilizados. Aunque el área de menor peligrosidad se asocia con la presencia del sistema de Tandilia, donde las actividades agrícolas-ganaderas son menos intensas y el acuífero tiene una profundidad mayor. La zona con mayor peligrosidad se asocia con la parte baja de la cuenca, donde interaccionan niveles freáticos poco profundos, con los cauces de los principales cursos de agua y una intensa actividad agrícola.

Por esto, la presencia de valores elevados de nitratos puede deberse tanto a la contaminación proveniente de depósitos cloacales subterráneos de casas particulares como de la degradación de fertilizantes empleados para los distintos cultivos que se realizan en Balcarce.

Por otro lado, el programa INAUAS (Merino y Almudena de la Losa, IGME, 2009) realiza distintos cálculos y define distintos parámetros, definidos por Custodio y Llamas (2001), que son muy útiles a la hora de describir las muestras de agua para un uso particular. Entonces, se calcularon los distintos parámetros y se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Relación iónica Mg^{2+}/Ca^{2+}** : todas las muestras son aguas continentales, aunque la M35 presenta valores elevados que podrían indicar posibles aportes iónicos desde rocas básicas y ultrabásicas (basamento preCámbrico).
- **Relación iónica Cl/HCO_3^-** : todas las muestras son aguas continentales provenientes de la disolución de $CaCO_3$.
- **Relación iónica SO_4^{2-}/Cl^-** : todas las muestras son aguas continentales, se reconoce en las muestras M11, M26 y M38 que indican contaminación agrícola/industrial. También se destacan las muestras M2, M10, M15, M19 y M37 con valores bajos por reducción de sulfatos.
- **Calidad para Abastecimiento**: en general las muestras cumplen con los parámetros (R.D 140/ 2003), a excepción de las muestras M1, M2, M3, M9, M10, M11, M12, M15, M28, M34, M37 y M39 que presentan excesos en nitratos, nitritos, amonio y flúor.
- **Calidad para Uso Agrícola**: según el método de Carbonato Sódico Residual (CSR, Canovas, 1986) se establece que todas las muestras presentan características adecuadas para el consumo y son recomendables para su uso.
- **Calidad para Uso Agrícola**: según el Coeficiente Alcalimétrico (Índice de Scott, Canovas, 1986) se establece que la mayoría de las muestras presentan características moderadas a buenas para el uso agrícola, a excepción de M1 que se describe como tolerable.
- **Calidad para Uso Industrial**: teniendo en cuenta la clasificación de sectores y parámetros establecidos por el “Department of Water Affaire and Forestry de Sudáfrica (1996)” las muestras presentan características que indican mayor potencial en su utilidad para procesos en los que se requiere una calidad del agua doméstica estándar (ej. Bebidas y Alimentos). Además, se clasifica como agua de tipo corrosiva.

Un tema destacable es la ausencia de valores de concentración de arsénico en los análisis de laboratorio aportados por la empresa Aguas de Balcarce S.A.

Los estudios realizados por Nicolli et al. (1989) demuestran que las cenizas volcánicas presentan distintos oligoelementos como el arsénico y el flúor que, al degradarse, se los puede considerar como una importante fuente de contaminación de las aguas subterráneas. Las muestras de Aguas de Balcarce aportan datos de concentración promedio de fluoruros en 1,20 mg/l, que cumplen las condiciones de potabilidad, y son bajos en relación a las demás especies químicas analizadas.

Mientras que, los estudios realizados por Auge et al. (2013) describe que las aguas de explotación de la ciudad de Balcarce presentan valores entre 0,05 y 0,1 mg/L de arsénico en el agua subterránea. Además, concluyen que el arsénico incorporado a los acuíferos que se aprovechan para abastecimiento humano en la Provincia de Buenos Aires, tiene origen natural y provino de la disolución de minerales vinculados a la alteración de trizas de vidrio volcánico provenientes de erupciones volcánicas y a la actividad hidrotermal, principalmente en la Cordillera de los Andes, en los últimos 5 millones de años.

Además, en las muestras de campo, obtenidas en la cantera al pie de la sierra La Barrosa, que se analizaron al microscopio se observaron escasas trazas vítreas (ver figura 26, capítulo 3.2.1.2). Por lo que las sierras que componen el Sistema de Tandilia, que se extienden en dirección NO-SE, pudieron hacer de barrera geográfica local a los vientos del oeste que transportaron las cenizas volcánicas, disminuyendo la presencia de estos depósitos en el sector periserrano de Balcarce y su posterior degradación en elementos como el arsénico y el flúor aparentemente asociados al mismo origen. Aunque esta afirmación está sujeta a la posibilidad de realizar muestreos y hasta la actualidad no se tiene información.

8 RESERVAS, RECARGAS, TRÁNSITO Y DESCARGAS

En el sector periserrano de la sierra La Barrosa se reconocen secuencias cenozoicas de variables espesores controlados principalmente por la estructura en bloque que se reconoce en los afloramientos serranos. Se caracteriza por un aumento de espesor hacia el norte, a medida que nos alejamos del frente serrano.

Teniendo en cuenta los trabajos de Santa Cruz y Silva Busso (1996), Usunoff et al. (2000) y Suero et al. (2008) se puede establecer que las características hidrodinámicas permanecen relativamente constantes en el sudeste bonaerense. Sin embargo, en este estudio se pudieron reconocer distintos elementos geológicos locales que establecen limitaciones. Los límites del acuífero analizado en este estudio pueden establecerse de la siguiente forma:

- El límite norte se establece en el cauce del arroyo Pantanoso
- El límite sur corresponde a la curva piezométrica de 130 msnm en la sierra La Barrosa, definido por la divisoria de aguas del acuífero donde el flujo se invierte (ver Mapa Hidrogeológico, figura 88, capítulo 9)

- El límite este se definió teniendo en cuenta los lugares deprimidos al este de la sierra La Barrosa.
- El límite oeste se definió teniendo en cuenta los lugares deprimidos al oeste de la sierra La Barrosa y el comienzo de la cuenca alta del arroyo Pantanoso.

Los cálculos realizados en este capítulo se limitan al área indicada en la figura 84, asumiendo como superficie del acuífero el área limitada por los elementos hidrodinámicos y geológicos antes descriptos estableciendo un valor de 50877 km².



Figura 84. Demarcación del área del acuífero periserrano de la sierra La Barrosa.

8.1 Cálculo de reservas del acuífero

Las reservas reguladoras representan la cantidad de agua almacenada por el acuífero al recargarse por alimentación natural, en un período determinado, estacional o interanual, a través de las precipitaciones o recarga por agua superficial (Suero et al., 2008). Por esto los parámetros para su estimación se obtuvieron del balance hídrico detallado anteriormente (ver capítulo 6.2.1).

La reserva efectiva pondera la fluctuación del nivel freático entre los piezómetros medidos (Pz14B y Pz15), para lo que se utilizó la diferencia entre ambos piezómetros. Mientras que la porosidad eficaz se obtuvo del valor medio según Archie (1942) para la Formación Barker, Formación Ensenada y Formación Buenos Aires, que son las que alojan al acuífero bajo estudio (figuras 35 y 36, capítulo 3.2.2.3).

Finalmente, el valor de reserva total se calcula con el espesor saturado del acuífero obtenido del promedio de los pozos analizados en este estudio.

- **Reservas Reguladoras** = Área (m²) . Altura de Lámina Infiltrada (m)
- **Reservas Efectivas** = Área (m²) . Δ Nivel Estático (m) . Porosidad Efectiva
- **Reservas Totales** = Área (m²) . Espesor Saturado Medio (m) . Porosidad Efectiva

Se obtuvieron los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Precipitación Media Anual (mm)	912,32
Infiltración Media Anual (%PPT)	10,75
Altura lámina de Infiltración (mm)	98,07
Porosidad Eficaz (Archie)	0,11
Espesor Saturado medio (m)	100,59
Área de estudio (m²)	50.876.649,16
Reservas Reguladoras (Hm³)	4,99
Reservas Efectivas (Hm³)	37,38
Reservas Totales (Hm³)	539,45

Tabla 35. Reservas calculadas del acuífero periserrano de la sierra La Barrosa.

Se observa una notable diferencia entre las reservas reguladoras y las reservas efectivas (cerca del 87%), lo que confirma la idea de que la infiltración que se registra en el sector periserrano de la sierra La Barrosa influye muy poco en el aumento de las reservas del acuífero Pampeano.

Al calcular las reservas totales, que representan la cantidad de agua extraíble, se obtuvieron valores considerablemente superiores a los precedentes debido a que las mismas están controladas por el tamaño y extensión del acuífero en estudio.

Santa Cruz y Silva Busso (1996) han calculado la recarga de los acuíferos para el sudeste bonaerense, mediante la utilización del Balance Hídrico Regional, empleando el volumen de Precipitación, Ecurrimiento Superficial y Evapotranspiración (Thornthwaite y Turc). Con este método pueden calcularse, en forma aproximada, los valores de infiltración y el volumen anual que se incorpora a las aguas subterráneas o Reservas Reguladoras. Los valores que los autores calculan para el Partido de Balcarce varían entre $9,7 \cdot 10^4$ y $2,09 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1} \cdot 100 \text{ ha}^{-1}$, mientras que el valor obtenido en este trabajo se recalculó en $9,8 \cdot 10^4 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1} \cdot 100 \text{ ha}^{-1}$.

El Partido de Balcarce se caracteriza por una importante actividad agropecuaria por lo que es necesario tener en cuenta el consumo de los cultivos a lo largo del año. Suero y Storti (2000) destacan el consumo de $136,2 \text{ Hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ en una superficie de 86400 ha, representa un gasto de $158 \text{ mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que debieran recargarse para mantener la sustentabilidad del acuífero. Sin embargo, la superficie bajo riego representa sólo el 2,5 % del área agrícola (3.500.000 ha) que la contiene, y un porcentaje mucho menor del área total que incluye agricultura y ganadería) en la cual existe posibilidad de recarga del acuífero. La principal fuente de agua para riego en la región sudeste bonaerense es subterránea de manera que, para no afectar la sustentabilidad del acuífero, debiera producirse la reposición del agua extraída por todos los usuarios en cada período de uso (Suero y Storti, 2000).

A pesar de las deficiencias agrícolas de agua estacionales al menos 100 mm ha⁻¹año⁻¹ exceden del balance entre precipitación y demanda durante el otoño-invierno y pasan por el perfil de suelo contribuyendo a la recarga del acuífero (Suero et al. 2008).

8.2 Cálculo de recargas, tránsito y descargas del acuífero

Empleando la Ley de Darcy se calcularon los caudales de recarga, descarga y tránsito, aplicando la siguiente fórmula:

$$Q = K \cdot A \cdot i$$

Donde,

- **Q** es el caudal en m³/día
- **K** es la permeabilidad de Darcy en m/día
- **A** es el área de la sección en m²
- **i** es el gradiente hidráulico

El acuífero periserrano de la sierra La Barrosa presenta una zona de recarga desde la curva piezométrica de 117 msnm, donde el espesor del acuífero se obtuvo del pozo más cercanos a la sierra (Pozo 15). Mientras que la curva piezométrica de 107 msnm se eligió como límite de la zona de descarga próxima al cauce del arroyo Pantanoso, donde el espesor medio del acuífero se obtuvo del Pozo 14B (el más cercano).

La permeabilidad se obtuvo del promedio entre los pozos 14B y 15 estudiados en el Capítulo 6.4.1, para las unidades acuíferas involucradas. Además, el gradiente se calculó por la distancia entre los pozos 14B y 15, y la diferencia de nivel freático entre ambos.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Espesor Saturado Medio de Recarga (m)	95,10
Espesor Saturado Medio de Descarga (m)	106,07
Permeabilidad media (m/día)	3,16
Gradiente	0,004
Q Recarga (Hm3/año)	4.989.696,84
Q Descarga (Hm3/año)	0,37
Q Tránsito (Hm/año)	4.989.696,48

Tabla 36. Caudales de recarga, descarga y tránsito del acuífero periserrano de la sierra La Barrosa

Es necesario establecer que los valores de reservas y caudales de descarga obtenidos deben considerarse como magnitudes orientativas de las características del acuífero y no como valores absolutos. Esto se debe a que el área límite establecida para el cálculo está definida superficialmente y no tiene en cuenta la extensión regional de los sedimentos, así como la influencia de estos. En particular, el valor del caudal de descarga se obtuvo por los datos de consumo de agua potable provistos por la empresa Aguas de Balcarce S.A.

Los resultados obtenidos indican que el acuífero Pampeano, en el sector periserrano de la sierra La Barrosa, presenta características óptimas para su explotación tanto para consumo humano como uso agropecuario e industrial.

8.3 Recomendaciones sobre el consumo urbano del recurso

La empresa Aguas de Balcarce es quien controla la producción del recurso, controlando la calidad del mismo mediante análisis químicos que deben cumplir con los parámetros establecidos en por la Ley 11.820 de la Provincia de Buenos Aires.

El agua entregada a la red de distribución urbana de la ciudad de Balcarce es de origen subterráneo, se obtiene a través de 17 perforaciones de aproximadamente entre 60 y 100 metros de profundidad que extraen el agua del acuífero Pampeano. Actualmente se producen alrededor de 1.000 metros cúbicos por hora de agua potable (que se traducen como 655 litros de agua potable por día por habitante en el área urbana-suburbana).

Según la información de la empresa, la explotación del recurso se realiza desde todos los pozos, rotando de forma sistemática para dejar uno de los pozos sin bombeo por una hora e intercalándolos en secuencia. Por lo que se entiende que hay 16 pozos que bombean en conjunto, lo que se traduce como 62,5 m³/h de bombeo promedio en cada pozo.

Otro punto importante es el crecimiento poblacional del Partido de Balcarce donde, durante el período 2001-2010, se registra un aumento del 4,24%. Teniendo en cuenta la población de la zona urbana y suburbana de la ciudad de Balcarce (83,6% del total del partido), esto representaría un aumento poblacional de 0,47% anual. Finalmente, se reconoce que la población urbana-suburbana de la ciudad de Balcarce aumentaría 173 habitantes por año, lo que se traduce como 113m³ por día de aumento del consumo del recurso (ver Anexo 1).

Analizando el crecimiento poblacional urbano de Balcarce de los próximos 30 años (ver figura 85) se reconoció una tendencia lineal que indica que la población urbana, para el año 2040, consumirá aproximadamente 9.828 Hm³ (12,2% más que en 2010, ver figura 86). Según los resultados obtenidos en este trabajo, el acuífero local es capaz de sustentar este aumento de consumo.

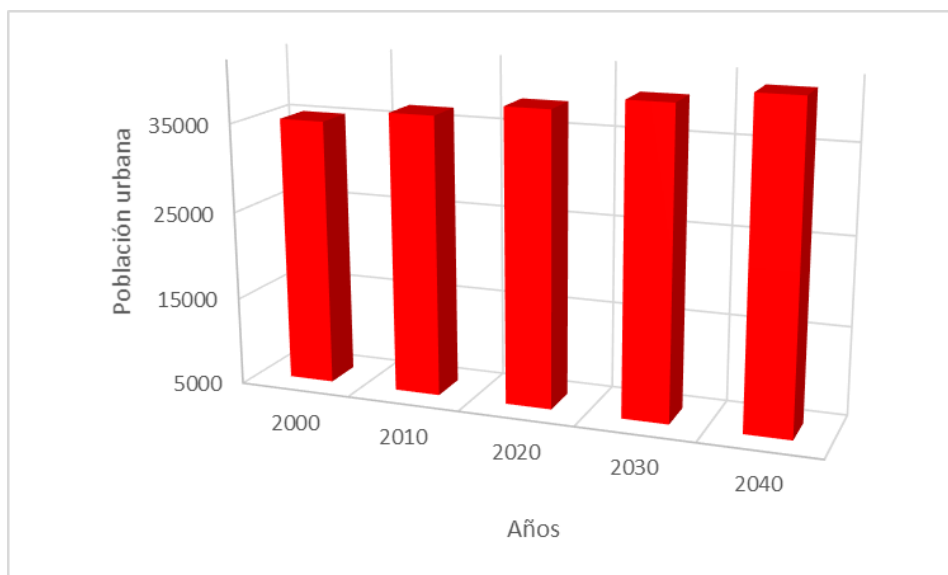


Figura 85. Crecimiento poblacional del sector urbano de Balcarce.

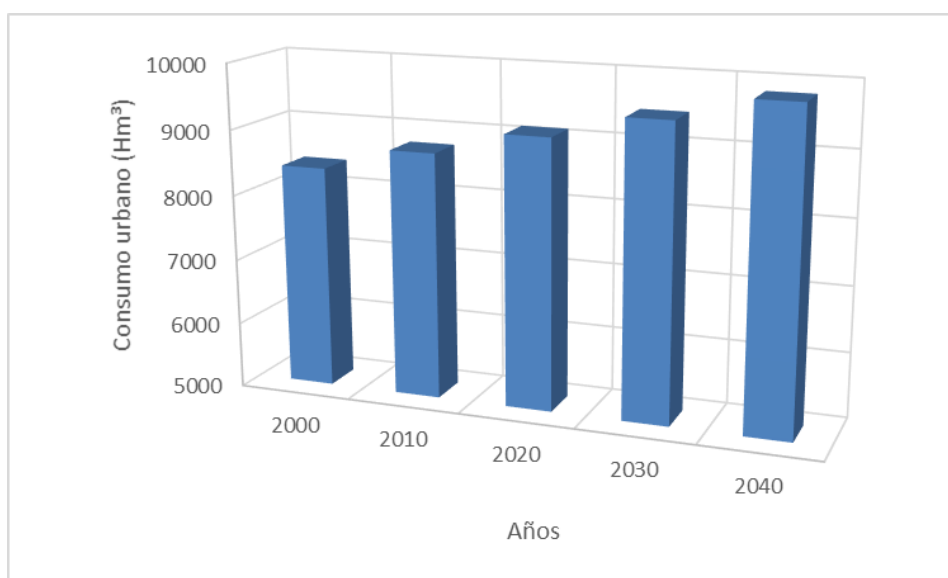


Figura 86. Aumento anual del consumo urbano de Balcarce.

También se reconoce un crecimiento del perímetro urbano que, durante el período 1937-2016, ha crecido de un área de 4,79 km² a 9,39 km² (96,03% de aumento, figura 87) lo que se traduce como un crecimiento promedio anual del límite de amanzanamiento o perímetro urbano de 0,058 km² (1,21%). El mismo crecimiento se registra principalmente hacia el suroeste y sur (hacia el sector periserrano).

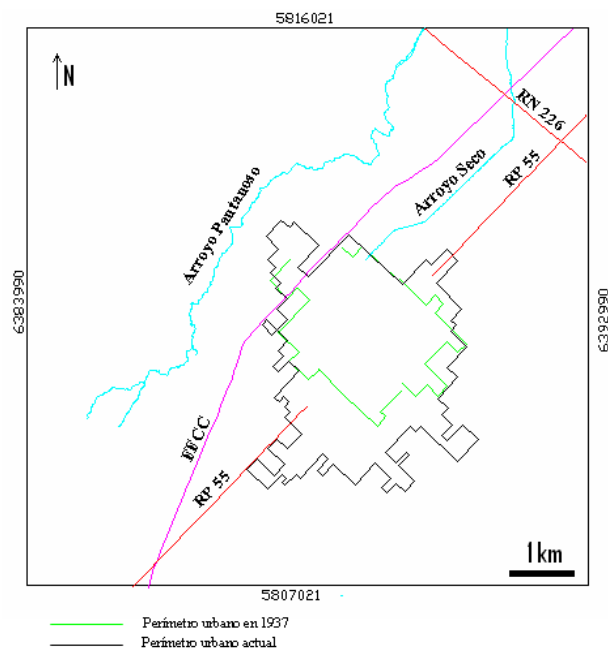


Figura 87. Crecimiento del amanzanamiento o perímetro urbano de la ciudad de Balcarce.

Finalmente, el Partido de San José de Balcarce no es sino una parte de un extenso corredor a lo largo de la Ruta Provincial N°226, denominado Corredor Mar del Plata – Tandil (CMT), el cual vincula los grandes centros urbanos con los principales sectores agrícolas de la región y posibilita el aumento y diversificación de los flujos tanto de personas, como de materias primas y productos de consumo (Tomás et al., 2005). La alta dinámica demográfica y de ocupación territorial, dada por el incremento de población permanente y de la construcción edilicia, supone una demanda creciente del recurso agua, la cual proviene de un acuífero que es la única fuente de provisión regional (Calderón et al., 2014).

Por todo esto, el consumo del recurso es alto debido a las necesidades hídricas de las diversas explotaciones agropecuarias y el consumo de la población. Por lo que es necesario comprender y cuantificar el recurso subterráneo para su uso en el futuro, lo que presenta un escenario favorable para la realización de estudios hidrogeológicos del subsuelo a fin de extender los resultados, del presente trabajo, hacia zonas aledañas.

9 MODELO HIDROGEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio de este trabajo se enfocó en los acuíferos de los *Sedimentos Pampeanos* que contienen los depósitos periserranos e interserranos a lo largo del Sistema de Tandilia en el sudeste bonaerense. Sin embargo, en función de las condiciones hidrogeológicas del área de este trabajo, se estableció como límite sur el frente serrano de la sierra La Barrosa.

Desde el punto de vista estratigráfico el acuífero Pampeano en esta región está contenido en los sedimentos limo arcillosos, con abundantes niveles carbonáticos, de la Formación Barker, la Formación Ensenada y la Formación Buenos Aires (Plio-Pleistoceno hasta la actualidad). Aunque presenten variaciones apreciables, a efectos hidrogeológicos, pueden considerarse prácticamente iguales.

El límite inferior, basamento hidrogeológico del acuífero, corresponde al contacto entre los sedimentos propiamente dichos y las areniscas de la Formación Balcarce o, en su ausencia, las rocas ígneo-metamórficas precámbricas. Por lo que el espesor sedimentario del acuífero pampeano, en el área de estudio, presenta valores promedio de 109,17 m. Aunque es importante tener en cuenta que la estructura local controla el espesor del acuífero, en la Estancia El Volcán mediante perfilajes geoelectrónicos se registró el basamento hidrogeológico a 230 m de profundidad (Elichiry, 2002) con lo que el espesor acuífero será mayor.

Martínez y Bocanegra (2002) definen para el Corredor Mar del Plata – Tandil (CMT) un acuífero de tipo libre y multicapa, cuyo espesor varía desde pocos metros a más de 100 metros, compuesto por diferentes capas acuíferas se separan por niveles discontinuos de permeabilidad relativa menor, representados por niveles limo-arcillosos e intercalaciones de tosca.

Entre las características principales del acuífero Pampeano en Balcarce se tienen permeabilidades con valor medio de 3,16 m/día y transmisividades con valor medio de 125,07 m²/día, teniendo en cuenta tanto la información obtenida en los ensayos de bombeo como la información compartida por la empresa Aguas de Balcarce SA. Mientras que, los caudales máximos que se emplearon en los distintos ensayos de bombeo presentan valores medios de 111,26 m³/h o 30,90 L/seg generando depresiones del nivel dinámico con valores medios de 20,08 mbbp y rendimientos medios de 83,72%.

Distintos autores realizaron estudios en los acuíferos de los *Sedimentos Pampeanos* (Suero et al. 2008, Santa Cruz y Silva Busso 1999, entre otros) y describen condiciones similares a lo largo del Sistema de Tandilia. Hacia el sudeste bonaerense reconocen una geometría regional de la superficie piezométrica que se extiende desde la ciudad de Chillar, al noroeste, con valores de 220 msnm hasta valores cercanos al nivel del mar en la ciudad costera de Mar del Plata, al sudeste. El área de estudio de este trabajo presenta una piezometría promedio de 117,12 msnm en el que se observa un drenaje general SO-NE con escasa recarga en extremo norte de la sierra La Barrosa.

Además, los estudios realizados por Calderón et al. (2014) en la localidad de Sierra de los Padres (50 km al este del área de estudio) describen una recarga regional, para el Corredor Mar del Plata –

Tandil, desde las zonas topográficamente más altas de la región (sector noroeste del Sistema de Tandilia).

Empleando programas tipo CAD se mapeó la piezometría del área de estudio de este trabajo (figura 88). Se observa que predomina un drenaje regional SO-NE que presenta recargas locales en el sector periserrano, a partir de precipitaciones y cuerpos de agua superficiales en la zona (Laguna Los Pinos), y descargas hacia los cursos fluviales permanentes hacia el norte (arroyos Pantanoso y Seco). En el sector sur del mapa piezométrico se destaca una pequeña zona de recarga en la sierra La Barrosa, aunque no se reconoce este comportamiento alrededor de la misma sierra, donde se observa como las líneas equipotenciales se acercan entre si evidenciando un mayor gradiente hidráulico aunque lejos de seguir el comportamiento de las curvas topográficas que se elevan hasta más de 300 msnm (se destaca la divisoria de aguas que marca el límite de mayor piezometría en el sector serrano en 130 msnm). Por esto el sector periserrano no presenta características óptimas para la recarga del acuífero Pampeano (las precipitaciones mayores no se infiltran, sino que escurren ladera abajo mediante flujos laminares).

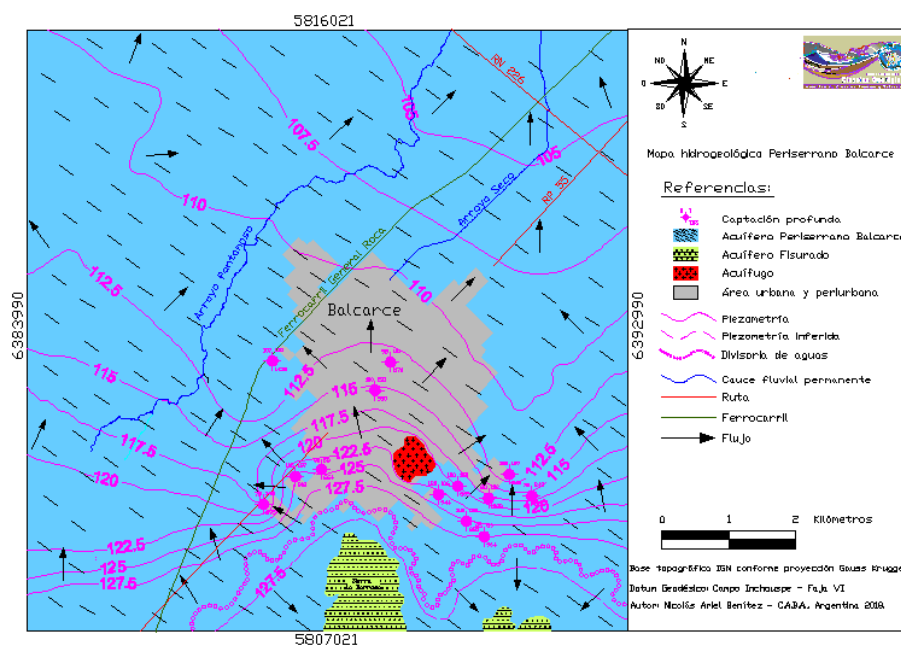


Figura 88. Mapa piezométrico del área de estudio.

Por lo tanto, aunque la piezometría y el flujo presenta un comportamiento similar a la topografía, lo que es común en acuíferos libres, se pueden reconocer sectores donde son distintos e indicaría un comportamiento más independiente (acuífero semilibre). Estos sectores están separados por afloramientos locales por lo que la estructura del subsuelo influye sobre el diseño de las curvas piezométricas en el área de estudio (ver figura 88).

La geometría del acuífero y los parámetros característicos necesarios para calcular las reservas se obtuvieron del análisis de los datos de perforaciones, ensayos de bombeo, perfilajes y muestreos. Esto permitió establecer las secuencias litoestratigráficas y su correlación en la extensión del área

de estudio. Con esto se definió un área delimitada al sur por la curva piezométrica de 130 msnm, al norte por el curso del Arroyo Pantanoso, al oeste por la demarcación superficial de pequeños cauces efímeros que se reconoce desde el sector periserrano hacia Laguna Los Pinos y al este de forma similar por pequeños cauces efímeros que drenan hacia zonas deprimidas formando cuerpos de agua esporádicos limitados por el curso del arroyo Seco (afuente del arroyo Pantanoso). Por lo que se define un acuífero de forma cóncava que se acuña hacia la sierra y aumenta notablemente su espesor hacia el norte, por debajo de la ciudad de Balcarce (ver figura 89).

Es necesario destacar el control hidrodinámico de las estructuras del subsuelo, entre las que se destacan bloques elevados mediante fallas, que limitan el espacio del acuífero y desvían las curvas piezométricas por el efecto de barrera hidráulica que generan.

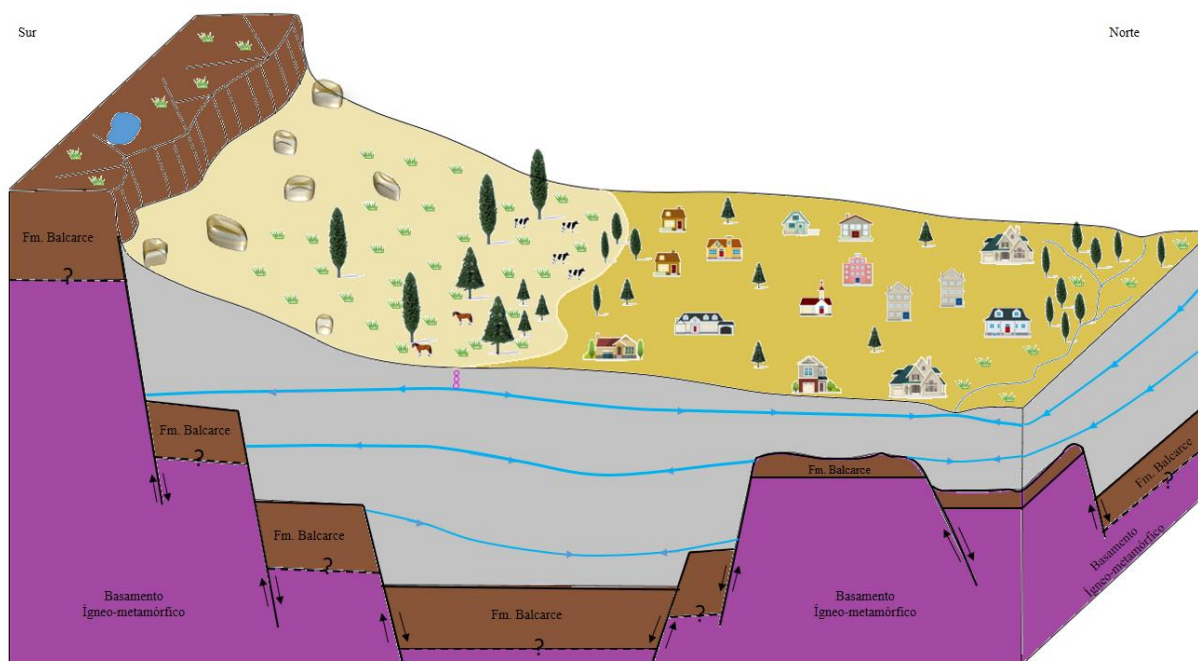


Figura 89. Modelo hidrogeológico del área de estudio.

También es importante comparar la piezometría que se obtiene de los datos de nivel estático en los pozos y la que se obtiene de los datos de nivel dinámico al bombear todos los pozos en su máximo caudal de explotación al mismo tiempo (ver figura 90). Se reconoce la influencia de los pozos que se bombean sobre la piezometría ya que el bombeo tiende a invertir la recarga de los arroyos Pantanoso y Seco, que pasan de ganadores a perdedores, por la depresión del nivel piezométrico. Esto extiende la zona de influencia de los cauces hacia el sector urbano y periurbano de Balcarce, por lo cual los arroyos se comportarán como zonas de recarga al acuífero y conllevan una posible zona de riesgo ante vertidos de contaminantes.

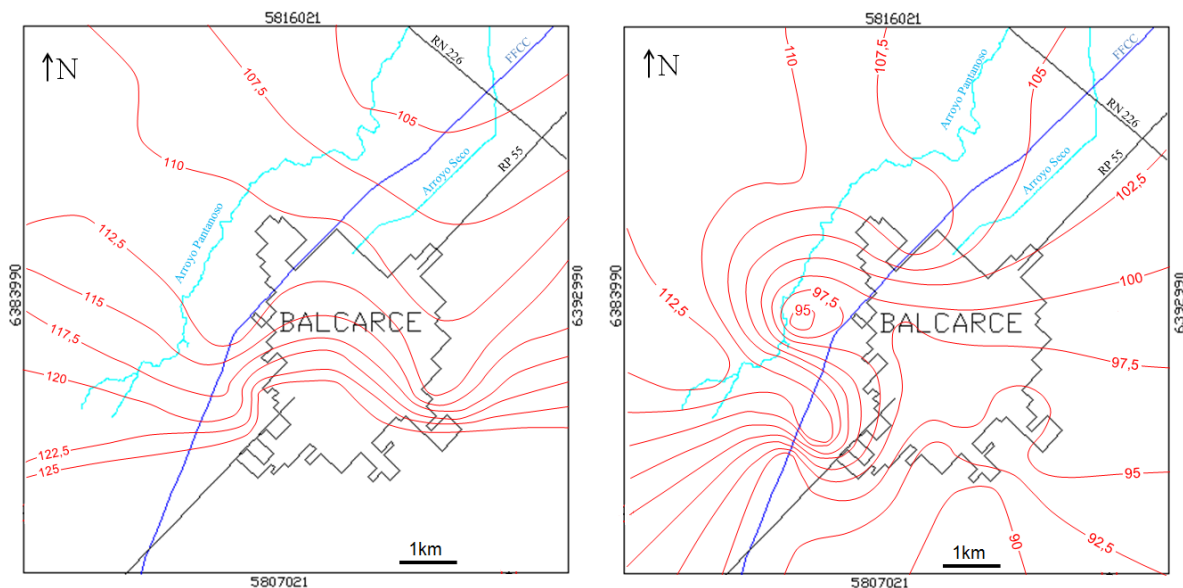


Figura 90. Piezometría del acuífero Pampeano, con pozos sin explotar (izq.) y en explotación a caudal máximo (der.).

En cuanto a la calidad química de las captaciones analizadas se observaron valores que, en general, cumplen con las condiciones para consumo humano. A excepción de algunos casos detallados previamente. Se registraron valores que permiten clasificar a las aguas tipo bicarbonatadas sódicas.

Las principales características hidroquímicas de las aguas de Balcarce registran valores medios de conductividad en 1007,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH alcalino en 7,9 y oxidantes con valores medios de ORP en 117,9. Además, los análisis de laboratorio detallados que se realizaron durante el período 2008-2014 en los distintos pozos en explotación establecen definitivamente la aptitud para consumo humano del recurso subterráneo.

Los cálculos de las reservas hídricas del acuífero Pampeano son solo representativos de la superficie delimitada anteriormente, según los datos hidrodinámicos obtenidos, aunque al compararlos con valores regionales presentan similares condiciones. En el sector periserrano norte de la sierra de Balcarce se obtuvieron valores, para un espesor saturado medio de 100,58 m, de reserva total en 858,84 Hm^3 y de reserva efectiva en 59,51 Hm^3 .

10 CONCLUSIONES

El Partido de San José de Balcarce forma parte de un extenso corredor continental a lo largo de la Ruta Provincial N° 226, que se extiende desde la ciudad de Tandil hasta la ciudad costera de Mar del Plata a lo largo de un conjunto de sierras que componen el Sistema de Tandilia (con orientación NO-SE) y se encuentra en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires. Esta región se caracteriza por diversas actividades agropecuarias y por una densidad poblacional importante, por lo que el uso del recurso es muy variado y su necesidad va en aumento debido a que las aguas subterráneas constituyen el único recurso disponible.

Por esto es necesario promover el conocimiento cuantitativo y cualitativo del recurso, de las demandas y el uso adecuado en las distintas actividades, así como el control de las perforaciones a escala municipal, siendo la actividad agrícola la más requirente de estas regulaciones (el agua disponible es generalmente el principal factor que limita el crecimiento y rendimiento de los cultivos). Además, el grado de sensibilidad al estrés hídrico en el cultivo depende de la etapa de crecimiento en que ocurra.

Se necesita de una gestión integrada de aguas subterráneas que reemplace el uso particular por el uso conjuntivo, con la idea de prevenir los problemas que generan nuevas captaciones hacia los pozos en explotación (descensos de niveles y rendimientos) y utilizar apropiadamente los recursos y la capacidad de regulación de agua del acuífero.

La ciudad de Balcarce se localiza en el sector periserrano de la sierra La Barrosa y su crecimiento demográfico se extiende desde sectores deprimidos hacia la ladera norte de la misma. Esta ubicación se caracteriza por una topografía muy variable que presenta altas pendientes en las laderas de la sierra y sectores donde se desarrollan extensas planicies fluviales, donde se reconocen cuerpos de agua estacionales de variada extensión, así como cursos fluviales efímeros y permanentes (entre estos últimos se destaca el arroyo Pantanoso y su afluente el arroyo Seco). Además, presenta un clima húmedo cuyas precipitaciones medias superan los 900 mm anuales.

Las características geomorfológicas del área de estudio describen un ambiente periserrano en donde se reconocen distintos procesos erosivos actuantes que dieron como resultado una topografía en donde se destacan sectores elevados (sierras) que superan los 300 msnm y se presentan en afloramientos rocosos subhorizontales mayormente desarrollados en sentido NE-SO. Los procesos geomorfológicos son del tipo fluvial, remoción en masa y eólicos (paisaje compuesto), que actúan sobre los afloramientos rocosos y fabrican los depósitos periserranos e interserranos.

Debido al importante desarrollo de vegetación natural y al avance de la actividad agropecuaria, la cobertura de las morfologías es casi total y los procesos erosivos, aunque siguen actuando, no afectan en gran medida al paisaje actual.

Los procesos fluviales se reconocen hacia el sector norte donde se observan los cursos permanentes de los arroyos Pantanoso y Seco los cuales presentan un hábito subparalelo, aunque presentan importantes canalizaciones para evitar la inundación del sector urbano. Estos conforman una red de diseño dendrítico subparalelo extendida en dirección NO-SE con drenaje hacia el Océano Atlántico

al SE. En las zonas de cabecera se reconocen distintos bajos interserranos que concentran el escurrimiento superficial proveniente de los sectores serranos elevados durante las precipitaciones.

Hacia el sector sur del área de estudio se observan pendientes mayores debido a la presencia de la sierra La Barrosa sobre cuyas laderas no es posible reconocer patrones de escurrimiento debido a la cobertura vegetal. Aunque es importante destacar el efecto erosivo que producen sobre las diaclasas de los afloramientos rocosos que cubren las sierras y sobre los cuales se acumulan pequeños cuerpos de agua, de carácter efímero, que drenan a través de las diaclasas.

Sobre el sector periserrano se reconocen bloques de distintas dimensiones, desde 0,5 m a más de 1 m, que son producto de los procesos de remoción en masa que actúan sobre los afloramientos rocosos. Estos desprendimientos se pueden reconocer hasta 200 m de distancia, aunque la forestación enmascara la distancia real que pueden alcanzar.

Además, sobre el sector periserrano, se destacan depósitos sedimentarios de texturas finas (limo-arcillosas) que son producto del transporte eólico y fluvial. Los mismos cubren parcialmente los afloramientos rocosos y los protegen de la erosión fluvial directa.

Finalmente, con la información detallada, es posible interpretar la evolución geomorfológica del área de estudio. La misma comienza desde el desarrollo de movimientos relativos entre los distintos bloques de basamento que generan sectores elevados entre los que se originan depresiones por donde se encauzan los principales cursos fluviales subsecuentes.

A partir de estos cursos se desarrolla erosión retrocedente hacia las cabeceras que afectan a los sectores elevados hasta reducirlos al conjunto de sierras actuales. Los mismos acumulan el producto de la erosión en el sector periserrano inmediato, donde se mezcla con la importante acumulación eólica de sedimentos finos.

No es aconsejable el desarrollo de construcciones sobre las laderas de la sierra La Barrosa, por encima de la cota de 140 msnm, debido a la susceptibilidad por desprendimientos y caídas de bloques desde el frente serrano (aunque es destacable la tarea de reforestación arbórea hacia el sector suroeste de la sierra donde los afloramientos se encuentran poco cubiertos por los depósitos eólicos). Además se está forestando con vegetación herbácea sobre la ladera norte para evitar la remoción eólica de los depósitos limo-arcillosos que cubren los afloramientos rocosos.

La información desarrollada en este estudio contempla una superficie de 50.877 km² donde el acuífero Pampeano presenta características que lo describen como un acuífero semilibre a semiconfinado en sedimentos limo arcillosos con variados niveles carbonáticos que actúan como niveles semipermeables o acuitardos.

La secuencia estratigráfica que contiene al acuífero Pampeano en Balcarce está compuesta por los depósitos de la Formación Barker (Plio-Pleistoceno), la Formación Ensenada (Pleistoceno Inferior) y la Formación Buenos Aires (Holoceno).

La información geológica obtenida por el muestreo de campo y litológica de las distintas captaciones permitió establecer un modelo que esclareció el diseño del acuífero y sus limitaciones tanto en proximidades de la sierra La Barrosa, por acuñaamiento, como por los ascensos de bloques

de basamento. Aunque la extensión del acuífero se desarrolla hacia la planicie aluvial con espesores que superan los 100 m.

Por otro lado, el análisis del rendimiento de los ensayos de bombeo en las captaciones municipales permitió obtener valores de caudales máximos promedio de 111,0 m³/h, caudal específico medio de 6,0 m³/h, depresiones medias de 20,1 m, permeabilidad media de 3,2 m/día y transmisividad media de 125,1 m²/día. El rendimiento promedio de la batería de pozos analizados presenta rendimientos del 84% para los caudales descriptos, por lo que en las futuras captaciones que se realicen deberían esperarse rendimientos similares. Empleando programas de comparación gráfica se concluye que el acuífero Pampeano presenta condiciones de semilibre a semiconfinado en el área de estudio.

Las aguas subterráneas de Balcarce son bicarbonatadas sódicas y presentan características físico-químicas entre las que se destacan una temperatura, medida en verano, entre 17,5 y 20°C, pH básico, conductividad de 800 a 1200 µS/cm y potencial óxido-reductor de tipo oxidante, que describen condiciones óptimas para el consumo humano.

Aunque se han detectado casos en los que los valores de nitratos exceden el límite establecido (45 mg/l) principalmente en sectores urbanos, por lo que se debe tener en cuenta en la ubicación de futuras captaciones. Se correlacionaron los valores de las distintas especies químicas, se realizaron distintos mapeos hidroquímicos en el área de estudio y, debido a que los casos que superan los límites potables se encuentran en el sector urbano, se puede concluir que la presencia de valores elevados de nitratos puede deberse tanto a la contaminación proveniente de depósitos cloacales subterráneos de casas particulares como de la degradación de fertilizantes empleados para los distintos cultivos que se realizan en Balcarce.

Se reconoce una recarga principalmente regional con drenaje SO – NE, aunque también se observa aporte por parte de la infiltración local (10,7 %PPT) producto de las abundantes precipitaciones. Las reservas totales se estimaron en 539,4 Hm³ y las reservas efectivas en 37,4 Hm³ capaces de sustentar el consumo actual, tanto en el sector urbano como rural, y la futura demanda del recurso.

Debido a las necesidades hídricas de las diversas explotaciones agropecuarias y al consumo de la población, la ciudad de Balcarce depende completamente del recurso subterráneo por lo que es necesario comprender y cuantificar el recurso subterráneo para su uso en el futuro. Se necesita de una cuidadosa y actualizada evaluación, atendiendo a la cuantificación de reservas y control de calidad mediante la operación real y efectiva de redes de monitoreo.

La mayor necesidad del recurso hídrico a futuro presenta un escenario favorable para la realización de estudios hidrogeológicos del subsuelo a fin de extender los resultados, del presente trabajo, hacia zonas aledañas.

Agradecimientos

- A mi padre y a mi madre por la colaboración en el mapeo cartográfico y correcciones.
- A mi familia por el acompañamiento durante esta etapa.
- A Adrián por la oportunidad de realizar mi tesis en una temática aplicada a mi estudio y formación.
- A Rita Tófalo por la colaboración en el análisis de los cortes petrográficos.
- A Carlos Ferrari y el equipo de perforistas, por la muy buena labor realizada en los ensayos de bombeo y la predisposición.
- A la empresa Aguas de Balcarce, por aportar tiempo e información valiosa para poder realizar mi tesis.
- A Elvira Suero por colaborar con información.
- A los habitantes de Balcarce por permitirme tomar muestras de distintos pozos.

Bibliografía

Andrade, F. H. y Sadras, V. O., 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En F.H. Andrade y V.O. Andrade. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Editorial Médica Panamericana S.A. Buenos Aires. Argentina. pp. 173-206.

Aguirre, E., 1897. La gruta de Aguas Doradas. Anales del Museo de Buenos Aires II: 303-307

Alonso, S. I., Nuciari, M. C., Guma, I. R. y van Olphen, A., 2009. Flora de un área de la Sierra La Barrosa (Balcarce) y fenología de especies con potencial ornamental. Revista FCA UNCuyo. Tomo XLI. N°2. Año 2009. 23-44. Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Alvarez, R. y Steinbach, H. S., 2006. Manejo agronómico y disponibilidad de nitrógeno en el suelo, Capítulo 11. En: Materia Orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Editor: Roberto Alvarez. Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Pág. 137-164.

Appelo, C. A. J. y Posma, D. 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 563 pp.

Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 146, 54-62.

ACRHSRA, 2010. Atlas digital Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina. Instituto Nacional del Agua. Argentina.

Ameghino, F., 1908. Las formaciones sedimentarias de la región litoral de Mar del Plata y Chapadmalal. Anales del Museo Nacional de Buenos Aires, 10: 343-428.

Ameghino, F., 1909. Une nouvelle Industrie Litique: L'industrie de la pierre fendue dans le Tertiaire de la region Littorale au sud de Mar del Plata. Anales del Museo Nacional de Buenos Aires XX:189-204. También en; Obras Completas XVII I:273-291. La Plata, 1913.

Auge, M., Espinosa Viale, G. y Sierra, L., 2013. Arsénico en el agua subterránea de la provincia de Buenos Aires. Agua Subterránea Recurso Estratégico, Tomo II, Editorial de la Universidad de la La Plata, provincia de Buenos Aires, Argentina.

Bertonatti, C.; Corcuera, J., 2000. Situación ambiental argentina 2000. Buenos Aires. Fundación Vida Silvestre Argentina. 440 p.

Bonarelli, G., 1931. Il Quaternario della Valle di Nora in territorio di Catignano, prov. di Pescara. Bollettino Della Società Geologica Italiana, Italia.

Bonorino F. G., 1965. Mineralogía de las fracciones arcilla y limo del pampeano en el área de la Ciudad de Buenos Aires y su significado estratigráfico y sedimentológico.

Bolsa de Cereales, 2017. Panorama Agrícola Semanal (PAS). <http://www.bolsadecereales.com/>

Borrello, A. V., 1961. El género "Westonoceras" entre los cefalópodos ordovícicos de la precordillera de San Juan. *Notas del Museo de La Plata*, 20 (Geología, 72): 1-11.

Borrello, A. V., 1965. Sobre el desarrollo bioestratigráfico del Cámbrico de la Precordillera. *Acta Geológica Lilloana*, 7, 39-46.

Cabrera, A. 1976. Regiones Fitogeográficas Argentinas. En: *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Editorial ACME (segunda edición). Buenos Aires, Argentina.

Cabria, F. N., Bianchini, M. R. y Mediavilla, M. C., 2005. Óxidos de hierro libres asociados a carbono orgánico en agregados de suelos del partido de Balcarce. *Ciencia del suelo*, v.23 n.1, Buenos Aires, Argentina.

Calderón, G., Massone, H. E. y Sagua, M. C., 2014. Caracterización preliminar del área serrana del sudeste bonaerense en el marco de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos. El caso de Sierra de Los Padres (Municipio de General Pueyrredon).

Cingolani, C. A., Hartmann, L. A., Santos, J. y Mc Naughton, N. J. 2002. U-Pb SHRIMP dating of zircons from the Buenos Aires Complexo Tandilia Belt, Rio de La Plata Craton, Argentina. *XV Congreso Geológico Argentino*, Actas 1: 149-154.

Cingolani, C. A., Rauscher, R. y Bonhomme, M., 1991. Grupo La Tinta (Precámbrico y Paleozoico inferior) provincia de Buenos Aires, República Argentina. Nuevos datos geocronológicos y micropaleontológicos en las sedimentitas de Villa Cacique, partido de Juárez. *Revista Técnica de YPF*, 12 (2), 177-191.

Código Alimentario Argentino, 2012. Law 18284, Chapter XII, Non alcoholic beverages. Hidric beverages, water and sparkling water, arts. 982-1079.

Comité Argentino de Estratigrafía, 1992. Código de Estratigrafía. Asociación Geológica Argentina, Serie B, Didáctica y Complementaria 20: 1-64, Buenos Aires.

Ferreras, L. A., Costa, J. L., Garcia, F. O. y Pecorari, C., 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil and Tillage Research*, Volume 54, Issues 1 – 2, March 2000, Pages 31-39.

Coutagne, A., 1954. Étude de quelques correlations hydrométéorologiques régionales et leur interpretation algebrique: La Houille blanche, 3 journées de l'Hydraulique de la Societé. Hydrotech. de France, Paris, p. 220–226.

Custodio, E. y Llamas M. R., 1983. Hidrología subterránea Tomos I y II. Ediciones Omega. Barcelona, España.

Custodio, E. y Llamas, M. R., 2001. Técnicas de estudio. Hidrología subterránea, 2ed. Ediciones Omega, V. 1-2, Barcelona, España

Damario, E. A. y Pascale, A. J., 1988. Características agroclimáticas de la región pampeana argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía* 9: 41-64.

Dalla Salda, L. y Francese, J., 1985. Los Granitoides de Tandil. Primeras Jornadas de Geología Bonaerense (Tandil), Actas: 845-861, Bahía Blanca.

Dalla Salda, L. & Iñiguez, A.M., 1979. La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires. 7 Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 539-550. Neuquén

Dalla Salda, L., Spalletti, L., Poiré, D., De Barrio, R., Echeveste, H. y Benialgo, A., 2006. Tandilia. Temas de Geología Argentina I. INSUGEO, Serie Correlación Geológica, 21: 17-46. Tucumán.

Darwin, C., 1846. Geological observations on South America. Voyage of HMS Beagle, Smith, Elder and Co., 279 p., London.

De Francesco, F., 1992. Estratigrafía del Cenozoico en el flanco occidental de las sierras de Curamalal. Sierras Australes Bonaerenses. Jornadas Geológicas Bonaerenses, Actas 3: 3-12, La Plata.

Della Maggiora, A. I., Echarte, L., Suero, E. E. y Irigoyen, A. I., 1998. Deficiencia de agua en los cultivos de maíz, girasol, soja y trigo en la localidad de Balcarce. Actas X Congreso Brasileiro de Meteorología y VIII Congreso de la Federación Latinoamericana e Ibérica de Sociedades de Meteorología. Editadas en CD: 5 p. Brasilia, 26 a 30 de octubre de 1998.

Diovisalvi, N. V., Studdert, G. A., Domínguez, G. F. y Eiza, M. J., 2006. Materia orgánica total y particulada en un molisol de Balcarce bajo dos sistemas de labranza. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, Argentina.

Doering, A., 1907. La formation pampéenne de Córdoba. Revista del Museo de La Plata.

Dumovich, O. A. y Moneda, C. P., 1965. Cavernas de la Provincia de Buenos Aires. Anales de la Comisión de Investigaciones Científicas, vol. VI: 111-146. La Plata.

Echarte, L., Della Maggiora, A. I., Irigoyen, A. I. y Dosio, G., 1998. Disminución del rendimiento en el cultivo de maíz debida a los déficits hídricos ocurridos en la localidad de Balcarce. Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP)-Estación Experimental Agropecuaria INTA. Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

Elichiry, P., 2002. Evaluación de la Sustentabilidad del Riego Complementario con la Aplicación de Modelos Numéricos de Flujo y Transporte en la Región Periserrana de Tandilia, Buenos Aires, Argentina. Trabajo Final de Estudios. Ecole Centrale de Lyon, Francia.

Fidalgo, F., De Francesco, F. y Pascual, R. 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense (Argentina). Geología de la Provincia de Buenos Aires. 6º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 103-138.

Fidalgo, F., Riggi, J. C., Gentile, R., Correa, H y Porro, N., 1991. Los sedimentos postpampeanos continentales en el ámbito sur bonaerense. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 1991, XLVI (3-4): 239-256.

Folguera, A. y Zárate, M., 2009. La sedimentación neógena continental en el sector extraandino de Argentina central. Revista de la Asociación Geológica Argentina 64(4): 692-712.

Furque, G., 1973. Descripción Geológica de la Hoja 34 n, Sierra de Pillahuincó, provincia de Buenos Aires. Servicio Nacional de Minería y Geología, Boletín 141, 70 p., Buenos Aires.

Frenguelli, J. 1950. Rasgos Generales de la Morfología y la Geología de la Provincia de Buenos Aires, Revista Lemit, Serie II, N°33, La Plata, Argentina.

Frenguelli, J., 1956. Rasgos Generales de Hidrografía de la Provincia de Buenos Aires. Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas, Ministerio de Obras Públicas, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Gardiol, J. M., Irigoyen, A. I., Della Maggiora, A. I. y Silva, V., 1997. Patrón de extracción de agua de cultivos de maíz y soja en un argiudol típico de Balcarce. Revista Facultad de Agronomía, 17 (1): 137-142. Buenos Aires. Argentina.

Goldschmidt, V. M., 1958. Geochemistry, ed. A. Muir, Clarendon Press, Oxford.

Gómez Samus, M. L., Rico, Y. y Bidegain, J. C., 2016. Magnetoestratigrafía en sucesiones del Cenozoico Tardío del área de sierras de Balcarce, Tandilia. Revista de la Asociación Geológica Argentina 73 (4): 588 - 607 (2016).

González, N., 2005. Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. En: Barrio, R. E., Etcheverry, R. O., Caballé, M. F. y Llambías, E. (Eds.): Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, XXII: 359-374. La Plata.

Grondona, S., Gavilán, S., Massone, H. y Quiroz Londoño, O. M., 2013. Evaluación de peligrosidad de contaminación por pesticidas en la cuenca del río Quequén Grande, provincia de Buenos Aires. Agua Subterránea Recurso Estratégico, Tomo II, Editorial de la Universidad de la La Plata, provincia de Buenos Aires, Argentina.

Hauthal, R., 1896. Contribución al estudio de la geología de la provincia de Buenos Aires, I. Las Sierras entre Cabo Corrientes e Hinojo. Revista del Museo de La Plata, 7, 477-489.

Havlin, J. L., Kissel, D.E., Maddux, L. D., Claasen, M. M. y Long, J. H., 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:448-452.

Heusser, J., Claraz, G., 1863. Ensayo de un conocimiento geognóstico físico de la Provincia de Buenos Aires 1. La cordillera entre Cabo Corrientes y Tapalqué, Buenos Aires.

Holmberg, E., 1972. Tandilia. En: Leanza, A.F. (Ed.), Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, 365-393, Córdoba.

International Chronostratigraphic Chart 2013.

INDEC, 2011. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Total país y provincias. Resultados Definitivos. Variables seleccionadas, Serie B N° 1.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Informe ZAH III – F Balcarce. 2012

- Kostadinoff, J., 1995. Geofísica de las Sierras del Sistema de Tandil. Tesis Doctoral, Departamento de Geología Universidad Nacional del Sur. 1-178.
- Kraglievich, J. L., 1953. La llanura bonaerense a través de un perfil geológico. *Revista Mundo Atómico*, 14:88-89.
- Kraglievich, L., 1960. Un nuevo roedor octodóntido del Eocuatnario de Salinas Chicas (Provincia de Buenos Aires). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 15 (1-2): 15-40.
- Lima, M. L., Massone, H., Romanelli, A., Glok Galli, M., 2013. Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea y superficial del corredor Mar del Plata – Tandil (provincia de Buenos Aires). *Agua Subterránea Recurso Estratégico*, Tomo II, Editorial de la Universidad de la La Plata, provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Linares, E., Llambías, E. J. y Latorre, C. O., 1980. Geología de la provincia de La Pampa y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 35(1): 87-146.
- Llambías, E. J., 1975. Geología de la provincia de La Pampa y su aspecto minero. Dirección de Minas de la provincia de La Pampa, Informe inédito, 38 p. Santa Rosa.
- Logan, J., 1964. Estimating transmissibility from routine production tests of wáter wells. Wiley Online Library.
- Marchese, H. G. y Di Paola, E. C., 1975. Reinterpretación estratigráfica de la Perforación Punta Mogotes N° 1, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 30 (1): 17-44.
- Marshall, L. G., Hoffstetter, R. y Pascual, R. 1983. Mammals and stratigraphy: Geocronology of the continental Mammal-bearing terciary of South America. *Paleovertebrata* 15: 1-93.
- Martínez, G., 2001. Geomorfología y Geología del Cenozoico Superior de las Cuencas de Drenaje de los Arroyos Los Cueros y Seco, Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral. Univ. Nac. Del Sur. Inédito.
- Martínez, G., 2002. El Origen de las Cuevas y Aleros del Sistema Serrano de Tandilia. Actas de las IV Jornadas de Sociedades Indígenas Pampeanas.
- Martínez, G. A. 2007. Procesos de Formación de Sitios en Reparos Arqueológicos de Tandilia. Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.
- Martínez, D. E. y Bocanegra, E. M., 2002. Hydrochemistry and cationic exchange processes in the coastal aquifer of Mar del Plata, Argentina. *Hidrogeology Journal*, 10 (3), 393-408.
- Massone, H., 2003. Geología y Planificación Territorial en la Cuenca Superior del Arroyo Grande, Provincia de Buenos Aires, *Tesis Doctoral, Unlaplata*. Inédita, 257pp.
- Massone, H., Martínez, D.E, Tomás, M., 2005 Caracterización hidroquímica superficial y subterránea en la Cuenca Superior del Arroyo Grande (Provincia de Buenos Aires). II Seminario Hispano Latinoamericano

sobre temas de Hidrología Subterránea: relación aguas superficiales-aguas subterráneas, Actas 47-55. Río Cuarto, Córdoba.

Merino, L. y De La Losa, A., 2009. Utilidad para la Interpretación de Análisis Químicos de Aguas Subterráneas (INAQUAS), Versión 2.0. Instituto Geológico y Minero de España.

Mosciaro, M., 2004. Caracterización de la Producción y Comercialización de Papa en Argentina. Área de Economía y Sociología Rural INTA – Balcarce.

Nágera, J. J., 1919. La Sierra Baya (Prov. de Buenos Aires). Estudio geológico y económico. Anales del Ministerio de Agricultura, Sección Geología, Mineralogía y Minería 14 (1): 1-66.

Nágera, J. J., 1932. Primera carta geológica general de Tandilia. Escala 1:500.000. Litografía Colombatti y Cía. Ltda., Buenos Aires.

Nágera, J. J., 1933. Extremidad mediterránea de Tandilia. Resumen de su constitución geológica. Humanidades 23:203-212, La Plata.

Nágera, J. 1940. Historia física de la Provincia de Buenos Aires. 1-Tandilia. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, Biblioteca Humanidades (24), 272p., La Plata.

Neuman, S. P., 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. Wiley Online Library.

Nicolli, H., Suriano, J., Gómez Peral, M., Ferpozzi, L. y Baleani, O., 1989. Groundwater contamination with arsenic and other trace-elements in an area of the Pampa, Province of Cordoba, Argentina. *Environ. Geol. Water Sci.* 14 (1): 3-16.

Orgeira, M. J. y Valencio, D. A., 1984. Estudio paleomagnético de los sedimentos asignados al cenozoico tardío aflorantes en la Barranca de los lobos, provincia de Buenos Aires. 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 162-173.

Pascual, R. 1961. Un nuevo *Cardiomyinae* (Rodentia, Caviidae) de la Formación Arroyo Chasicó (Plioceno inferior) de la provincia de Buenos Aires. *Ameghiniana* 2(4): 57-71.

Pascual, R., 1965. Los *Toxodontidae* (Toxodonta, Notoungulata) de la Formación Arroyo Chasicó (Plioceno inferior) de la provincia de Buenos Aires. *Características geológicas. Ameghiniana* 4(4): 101-132.

Pascual, R., Ortega Hinojosa, E. J., Gondar, D. y Tonni, E. P., 1965. Las edades del Cenozoico mamífero de la Argentina, con especial atención a aquellas del territorio bonaerense. *Anales de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires* 6: 165-193.

Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Physics Department, Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Herts.

Poiré, D. G. y Spalletti L. A., 2005. La cubierta sedimentaria precámbrica/paleozoica inferior del Sistema de Tandilia. Centro de Investigaciones Geológicas, Conicet-UNLP, La Plata, Argentina.

- Poiré, D. G., Spalletti, L. A., Del Valle, A., 2003. The Cambrian-Ordovician siliciclastic platform of the Balcarce Formation (Tandilia System, Argentina): Facies, trace fossils, palaeoenvironments and sequence stratigraphy. *Geologica Acta*, Vol.1, N°1, 2003, 41-60. Centro de Investigaciones Geológicas. UNLP-CONICET, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Rabassa, J., 1973. Geología Superficial en la hoja “Sierras de Tandil”, provincia de Buenos Aires. LEMIT, La Plata. *Anales*, Serie II 240: 115-160.
- Rapela, C., Dalla Salda, L. y Cingolani, C. A., 1974. Un intrusivo básico ordovícico en la Formación La Tinta (Sierra de los Barrientos, Provincia de Buenos Aires). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 29 (3): 319-331.
- Ramos, V. A., 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Geología Argentina, *Anales* 29 (3): 41-96, Buenos Aires.
- Ramos, V. A., Leguizamón, A., Kay, S. M. y Teruggi, M., 1990. Evolución tectónica de las Sierras de Tandil (Provincia de Buenos Aires). 11° Congreso Geológico Argentino (San Juan), *Actas* 2: 357-360, San Juan.
- Rapela, C. W., Dalla Salda, L. y Cingolani, C., 1974. Un intrusivo básico ordovícico en la Formación La Tinta (Sierra de Barrientos, provincia de Buenos Aires, Argentina). *Asociación Geológica Argentina, Revista* 29(3): 319-331.
- Reig, O., 1957. Diagnósis previas sobre los marsupiales de la Formación Arroyo Chasicó. *Ameghiniana* 1(3): 27-31.
- Righetti, S. y Gassmann, M. I., 2013. Balance de energía sobre una superficie cultivada en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. FCEN. UBA.
- Sala, J. M., Gonzales, N y Kruse, E, 1983. Generalización Hidrológica de la Provincia de Bs. As. Coloquio Internacional Sobre Hidrología de Grandes Llanuras. Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional, Olavarría, Argentina.
- Sanmartino, S., Fernández, H. M. y Gardiol, J.M., 1996. Caracterización de las precipitaciones del sudeste bonaerense. In *Impacto de las variaciones climáticas en el desarrollo regional: Un análisis interdisciplinario*. VII Congreso Argentino de Meteorología. VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Set. 1996, pp 327-328.
- Santa Cruz, J. N. y Silva Busso, A. A., 1996. Relación entre las resistividades eléctricas y conductividades eléctricas del agua subterránea en el acuífero de los sedimentos pampeanos (Formación Buenos Aires y Ensenada) en la región pampeana húmeda de la República Argentina. Instituto Nacional del Agua, P.N.T.S.A.S., Argentina.
- Santa Cruz, J. N. y Silva Busso, A. A., 1999. Escenario hidrogeológico General de los Principales Acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia Septentrional Argentina. II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea, *Actas Tomo I*, pp 461-473, Tucumán, Argentina.

- Selles-Martinez, J., 1993. Lineamientos estructurales y evolución extensional de la plataforma neoproterozoica-eopaleozoica de las Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Brasileira de Geociências*, 23(3):289-295.
- Spalletti, L. A. y del Valle, A., 1984. Las diamictitas del sector oriental de Tandilia: caracteres sedimentológicos y origen. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 39 (3-4): 188-206.
- Suero, E. E., Santa Cruz, J. N. y Silva Busso, A., 2008. Sustentabilidad del riego suplementario en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. Hoja Hidrogeológica N°14 Río Quequén. PROYECTO BID 1201 OC/AR PICT 08-4675 INFORME FINAL - Parte I. INA – INTA.
- Suero, E. E. y Storti, L. M., 2000. Importancia e impacto del riego suplementario en la provincia de Buenos Aires. In *Rol de los organismos públicos. Políticas de adopción de nuevas tecnologías Jornadas Agropecuarias*. Fundación Karacachoff - Fac.de Agronomía de La Plata, Julio 2000.
- Streckeisen, A. L., 1973. Classification and nomenclature of igneous rocks. Recommendation of the IUGS subcommission on the systematic of igneous rocks. *Geologischen Rundschau*, 63: 773-786.
- Studdert, G. A. y Echeverría, H.E., 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503. Wander
- Tapia, A. 1937 Las cavernas de Ojo de Agua y Las Hachas. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 43. 156 pp. Buenos Aires.
- Teixeira, W., Pinese, J.P.P, Iacumin, M., Girardi, V. A. V., Piccirillo, E. M., Echeveste, H., Ribot, A., Fernandez, R., Renne, P. R. y Heaman, L. M., 2002. Calc-alkaline and tholeiitic dyke swarms of Tandilia, Rio de la Plata craton, Argentina: U–Pb, Sm–Nd, and Rb–Sr $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data provide new clues for intraplate rifting shortly after the Trans-Amazonian orogeny. *Precambrian Research* (Ed. Elsevier) Volume 119, Issues 1–4, Pages 329-353.
- Teruggi, M. E. 1957. The nature and origin of the Argentine loess. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 322–332.
- Teruggi, M. E. 1968. Geología y Sedimentología de las Cuevas de La Cuchilla de las Aguilas (Sierras de Tandil, Prov. de Buenos Aires). *Etnia* 7: 13-25. Olavarría.
- Teruggi, M., 1980. Clasificación de las rocas ígneas. Colección Ciencias de la Tierra, Estudios N°1. Ediciones Científicas Libart (ecal), 34 p.
- Teruggi, M. E., Etchichury, M. C. y Remiro, J. R., 1957. Estudio sedimentológico de los terrenos de las Barrancas de la zona de Mar del Plata – Miramar. *Revista Museo de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia* 4(2): 167-250.
- Teruggi, M. E., Mauriño, V., Limousin, T. y Schauer, O., 1958. Geología de las sierras de Tandil. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 13 (3): 185-204.
- Teruggi, M. y Kilmurray. 1975 J. Tandilia. En: *Relatorio Geológico de la Provincia de Buenos Aires*. VI Congreso Geológico Argentino, Actas: 55-57. Buenos Aires.

Teruggi, M. y Kilmurray, J., 1980. Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires. En: Turner, J.C.M. (Ed.), Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, Segundo Simposio II: 919-965, Córdoba.

Thiem, G., 1906. Hidrologic methods. Gebhardt.

Thornwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical review. Vol. 38, No. 1 (January, 1948), pp. 55-94.

Tomás, M., Bernasconi, M.V., Martínez, G., Massone, H., Cabria, F., Calandroni, M., Dillon, G., Mazzanti, D., Pastoriza, E., Pilcic, T., Espinosa, A., Lanari, M. E., López, M.T., López, J., Salgado, P., 2005. Atlas Digital del Partido de Balcarce, Provincia de Buenos Aires, República Argentina. Revista Cartográfica 80-81.

Tosi, J. C., 2015. Principales Cultivos del Sud Este de Buenos Aires: Un análisis retrospectivo de los Resultados Económicos. Área Economía – E.E.A. Balcarce – INTA.

Tricart, J. L. F., 1973. Geomorfología de la Pampa Deprimida. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Buenos Aires. Argentina.

Turc, L., 1951. Nouvelles formale pour le bilan de l'eau en fonction des valeurs moyennes annuelles des précipitations et de la température: Comptes Rendus de l'Academie Sciences Paris, v. 233, p. 633-635.

Usunoff, E., Varni, M., Rivas, R. y Weinzettel, P., 2000. Aspectos hidrogeológicos de relevancia de La Llanura Pampeana en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. In: Acta I Joint World Congress on Groundwater. Brazil: Fortaleza, pp 1-18

Varela, R., Cingolani, C. y Dalla Salda, L., 1988. Geocronología Rb/Sr en granitoides del basamento de Tandil, provincia de Buenos Aires. 2a Jornadas Geológicas bonaerenses: 291-304, Bahía Blanca.

Verzi, D. H. y Montalvo, C. I., 2008. The oldest South American Cricetidae (Rodentia) and Mustelidae (Carnivora): Late Miocene faunal turnover in central Argentina and the Great American Biotic interchange. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 267: 284-291.

Villanueva, M. e Iglesias, A., 1984. Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Talleres gráficos IBERGESA, España.

Windhausen, A., 1931. Geología Argentina. Geología Histórica y Regional del Territorio Argentino. J. Peuser, II: 1-645, Buenos Aires.

Wright, F.E. y Fenner, C. N. 1912. Petrographic study of the specimens of Loess, tierra cocida and scoria collected by the Hrdlicka-Willis expedition. Hrdlicka. Bur. Amer. Ethnol., Smithsonian Inst., Bull. 52.

Zalba, S. M. y Villamil, C. B., 2002. Woody plant invasion in relictual grasslands. Biological Invasions, 4:55-72.

Zambrano, J. J., 1980. Comarca de la cuenca cretácica del Colorado. En Turner, J.C. (eds.) Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, 2° Simposio de Geología Regional Argentina, 2: 1033-1070, Córdoba.

Zárate, M. A., 1989. Estratigrafía y Geología del Cenozoico tardío aflorante en los acantilados marinos comprendidos entre Playa San Carlos y el Arroyo Chapadmalal, partido de General Pueyrredón, Buenos Aires, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, inédita, 220 p., La Plata.

Zárate, M. A., 2005. El Cenozoico tardío continental de la provincia de Buenos Aires. En: de Barrio, R.E., Etcheverry, R.O., Caballé, M.F. y Llambías, E. (eds.), Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires. Asociación Geológica Argentina, Relatorio del 16 Congreso Geológico Argentino: 139-149, Buenos Aires.

Zárate, M. A., Schultz, P., Blasi, A. Heil, C., King, J. y Hames, W., 2007. Geology and geochronology of type Chasicuan (late Miocene) mammal-bearing deposits of Buenos Aires Province (Argentina). *Journal of South American Earth Science* 23(1): 81-90.

Zimmermann, U., Spalletti, L.A., 2009. Provenance of the Lower Paleozoic Balcarce Formation (Tandilia System, Buenos Aires Province, Argentina): Implications for paleogeographic reconstructions of SW Gondwana. *Sedimentary Geology* 219 (7-23).

PÁGINAS WEB:

<http://www.aguasdebalarce.com/?s=informacion>

<http://localidades.cfi.org.ar/Localidad/Noticia/11281/parque-municipal-cerro-el-triunfo>

<http://floresamatxo.blogspot.com.ar/2009/02/mimosa-acacia-dealbata.html>

<https://ar.pinterest.com/lahauteroche/lathyrus-sweet-peas/>

http://www.ufrgs.br/fitoecologia/florars/open_sp.php?img=8808

<http://www.plantasvasculares.uns.edu.ar/herbario/galeria/p.html>

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gomphrena_perennis_var._perennis.jpg

<https://www.flickr.com/photos/mercadanteweb/4829218352>

<http://plantaslujane.blogspot.com.ar/2014/07/eupatoriumsubhastatum.html#!/2014/07/eupatorium-subhastatum.html>

<http://johngrimshawsgardendiary.blogspot.com.ar/2013/09/early-september-in-garden.html>

http://www.ufrgs.br/fitoecologia/florars/open_sp.php?img=2885

<https://florabonaerense.blogspot.com.ar/2014/01/eupatorium-tanacetifolium.html>

Anexos

Aumento Poblacional: $X_1 = (43.823 \times 100 / 42.039) = 4,24367848\%$

Aumento anual: $X_2 = X_1 / 9 \text{ años } (2001-2010) = 0,4715198311\%$

Aumento de habitantes esperado, urbano-suburbano, por año:

$$X_3 = 43.823 \times 83,6 (\% \text{ de población en área urbana-periurbana}) / 100 \times X_2 / 100$$

$$X_3 = 172,74613734 \approx 173 \text{ hab.}$$

Consumo per cápita del recurso potable en zona urbana-suburbana:

$$X_4 = (1000 \text{ m}^3 \times 24 \text{ hs} \times 1000 \text{ l/m}^3) / (43823 \text{ hab} \times 83,6 / 100) = 655,09285013 \text{ l.hab.día} \approx 655 \text{ l.hab.día}$$

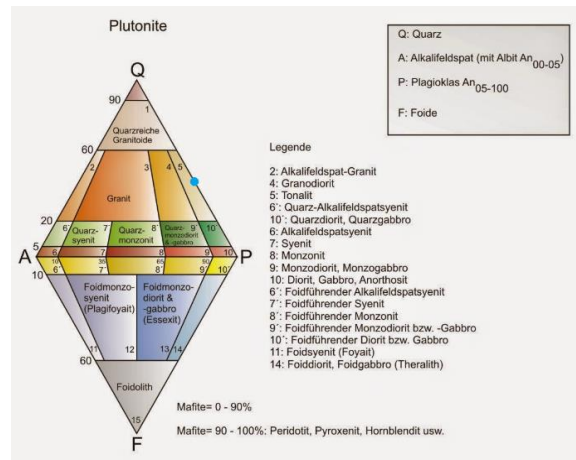
Aumento de consumo según aumento poblacional del área urbana-suburbana:

$$X_5 = X_4 \times X_3 = 113.164,75945 \text{ l} \times \text{día} \approx 113 \text{ m}^3 \times \text{día}.$$

Clasificación de las muestras BAL 1 y BAL 2:

$$Q = (Q \times 100) / (Q + A + P) = 42,85 \quad P = (P \times 100) / (A + P + F) = 100$$

$$A = (A \times 100) / (A + P + F) = 0 \quad F = (F \times 100) / (A + P + F) = 0$$



Clasificación de Plagioclasas:

