

# EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO LIBRE EN LA CUENCA DEL ARROYO EL CURA, GUALEGUAYCHÚ, ENTRE RÍOS

Pamela BOUJON<sup>1</sup> y Romina SANCI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servicio Geológico Minero Argentino - Dirección de Geología Ambiental y Aplicada, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. E-mail: pamela.boujon@segemar.gov.ar

<sup>2</sup> Instituto de Geocronología y Geología Isotópica, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. E-mail: romina@ingeis.uba.ar

## RESUMEN

El trabajo analiza la cuenca del arroyo El Cura, ubicada al sur de la ciudad de Gualeguaychú, Entre Ríos, donde se encuentra el relleno sanitario municipal. Con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero libre, se estudió la geología y la hidrogeología del área. Se identificaron dos niveles loésicos (Formaciones Hernandarias y Tezanos Pinto) de edad pleistocena media y superior respectivamente, que contienen al acuífero freático. A partir de la piezometría, se pudo determinar el carácter efluente del arroyo, con dirección principal del flujo subterráneo de SO a NE y, gradientes hidráulicos regionales del orden de 0,0016. Pudo verificarse que la salinidad del agua subterránea se incrementa en esa dirección. Se observó una relación directa entre las unidades geomorfológicas definidas para la cuenca (PL, PA y TPRG) y la química del agua subterránea, que evoluciona de bicarbonatada cálcica en PL a bicarbonatada sódica en PA y TPRG. La relación entre los niveles piezométricos y la hidroquímica subterránea permitieron inferir zonas de recarga y descarga. Se aplicaron tres metodologías (EKv, GOD y GODS) para establecer áreas vulnerables a la contaminación y el grado de vulnerabilidad de la cuenca. El método más efectivo fue el GODS, obteniéndose tres grados de vulnerabilidad asociadas básicamente a las unidades geomorfológicas (alta para TPRG; moderada para PA y baja para PL), y a las litologías que las componen. Asimismo, pudo observarse que las áreas más vulnerables están asociadas con los niveles piezométricos más bajos.

**Palabras clave:** *Hidrogeología ambiental, hidroquímica, relleno sanitario*

## ABSTRACT

*Vulnerability assessment of the aquifer in the basin of the El Cura stream, Gualeguaychú, Entre Ríos*

The work analyses the basin of the Stream El Cura, south of the city of Gualeguaychú, Entre Ríos, where the town's landfill is located. With the objective of evaluating the vulnerability to pollution of the free aquifer, the geology and hydrogeology of the area were studied. Two loessic levels of the middle and superior pleistocene age, (Hernandarias and Tezanos Pintos Formations) containing the phreatic aquifer were identified. The effluent character of the stream, with a SW to NE main direction of the underground flow and with regional hydraulic gradients on the order of 0,0016 could be determined from the piezometric analysis. The salinity of the underground water shows an increase in accordance to that direction. A direct relationship was found between the geomorphological units defined for the basin (PL, PA and TPRG) and the chemistry of the groundwater that evolves from bicarbonate calcium in PL to bicarbonate sodium in PA and TPRG. The relationship between the piezometric levels and groundwater hydrochemistry allowed inferring recharge and discharging zones. The three methodologies applied to establish the areas vulnerable to pollution and the degree of vulnerability of the basin were: EKv, GOD and GODS. The most effective method was the GODS, obtaining three degrees of vulnerability basically associated with geomorphological units (high for TPRG; moderate for PA and low for PL), and to the lithologies that compose them. Likewise it was observed that the most vulnerable areas are associated with the lowest piezometric levels.

**Keywords:** *Environmental hydrogeology, hydrochemistry, landfill*

## INTRODUCCIÓN

La afectación de la calidad del agua subterránea debida a distintas actividades antrópicas, impulsó en los últimos años el uso y aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos para evaluar la sus-

ceptibilidad que presentan los mismos a la contaminación. Este concepto fue introducido por Margat (1968) y desde entonces se vienen desarrollando distintas metodologías para su estimación, con el fin de dimensionar y delimitar espacialmente áreas con diferentes grados de vul-

nerabilidad. En particular, una de las actividades que afectan la calidad del agua subterránea es la instalación de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU). Por ello, cuando quiere establecerse este tipo de sitios de forma segura, es necesario realizar estudios de

hidrogeología ambiental (Martínez *et al.* 1993, Bocanegra *et al.* 2001) tendientes a proponer medidas que protejan al agua de la contaminación, a prevenirla y a preservar su calidad.

En el caso de la ciudad de Gualeguaychú, Entre Ríos, los RSU se disponen en un predio municipal ubicado en la zona periurbana, en cercanías de la confluencia del arroyo El Cura y el río Gualeguaychú (Fig. 1). Este predio funcionó inicialmente como cantera para la extracción de tierra, lo que permitió utilizar las depresiones del terreno para la acumulación de los residuos. Cuenta actualmente con dos rellenos colmatados y cerrados de distinta edad y tamaño, y un tercero en funcionamiento. Según información proporcionada por la Dirección de Medio Ambiente de la Municipalidad de Gualeguaychú, se reciben diariamente 150 a 200 toneladas de residuos para una población de 109.461 habitantes (INDEC 2010). En particular, los estudios multidisciplinarios que se vienen realizando desde el año 2003, se circunscribieron a los rellenos cerrados, ya que se desconocían las prácticas ambientales desarrolladas al momento de su operación. Si bien existen distintas investigaciones geofísicas, hidroquímicas, isotópicas y de geoquímica de gases (Orgeira *et al.* 2004, Panarello *et al.* 2005, Pomposiello *et al.* 2009, Prezzi *et al.* 2005, Sancí *et al.* 2009 y Valencio *et al.* 2003), al presente no se conocen antecedentes de estudios de vulnerabilidad en el área. Debido a que el basurero municipal antes mencionado se encuentra dentro de la cuenca del arroyo El Cura, el objetivo de este trabajo fue evaluar el grado de vulnerabilidad a la contaminación que posee el acuífero libre en la citada cuenca. Para ello, se utilizaron tres metodologías, EKv (Auge 1995, Auge 2003), GOD (Foster 1987) y GODS (Foster *et al.* 2002), que permiten estimar la vulnerabilidad intrínseca, es decir aquella que deriva exclusivamente de las propiedades y comportamiento del acuífero y de su entorno (profundidad del agua, permeabilidad de la zona subsaturada, cobertura edáfica, recarga efectiva, etc.) y no de las características y el comportamiento de las sustancias contaminantes. En el caso

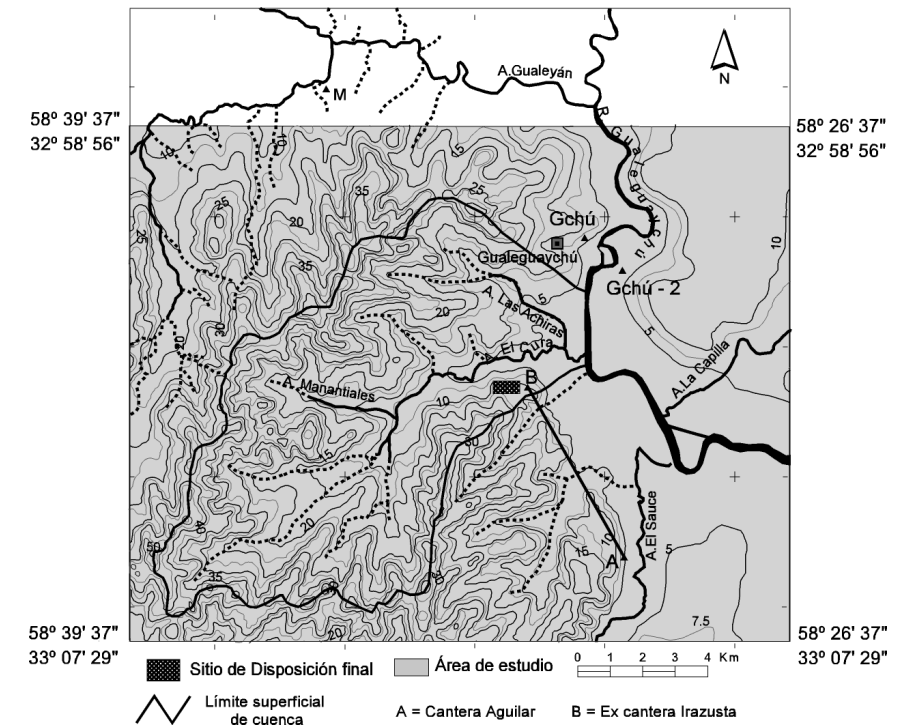


Figura 1: Mapa de ubicación y topográfico del área estudiada.

de ser consideradas esta últimas junto con las propias del acuífero, originan lo que se conoce como vulnerabilidad específica. Por lo tanto, para la definición de áreas de vulnerabilidad del acuífero libre a los contaminantes, se aplicaron las metodologías ya citadas y se estudió la geología del área a partir de antecedentes bibliográficos y levantamiento de perfiles, y la hidrogeología del acuífero libre a partir de relevamiento de campo, mediante mediciones piezométricas y toma de muestras de agua. EKv utiliza para la estimación la profundidad de la superficie freática (E) y la permeabilidad vertical de la zona no saturada (Kv), GOD utiliza los parámetros G (ground water occurrence-tipo de acuífero), O (overall aquifer class-litología de la zona no saturada) y D (depth-profundidad del agua o del acuífero), y GODS incorpora un cuarto, que es el tipo de suelo (S).

## UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El área estudiada se encuentra en el extremo sur de la Mesopotamia Argentina y se circunscribe específicamente a la cuenca del arroyo El Cura y zonas aledañas (Fig. 1). Está localizada al sur de la ciu-

dad de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos y se extiende entre los paralelos de 32°58'56" y 33°07'29" de latitud Sur y meridianos de 58°39'37" y 58°26'37" de longitud Oeste. Ocupa en forma parcial el departamento Gualeguaychú y cubre un área de 320,3 km<sup>2</sup>. El arroyo El Cura constituye una subcuenca del sector inferior de la cuenca del río Gualeguaychú. Esta subcuenca tiene un área de 94,8 km<sup>2</sup> y la longitud del cauce principal hasta su desembocadura en el río Gualeguaychú es de 9 km. Los principales afluentes del arroyo El Cura son los arroyos Manantiales y Las Achiras, que desembocan por su margen izquierda.

El acceso a la provincia de Entre Ríos desde la de Buenos Aires se realiza por el puente ferroviario-Zárate-Brazo Largo y la ruta nacional 12 hasta Ceibas, donde se conecta en dirección norte con la ruta nacional 14 hasta el acceso a la ciudad de Gualeguaychú.

## METODOLOGÍA

La base para los estudios geológicos, hidrodinámicos, hidroquímicos y geomorfológicos, fueron la carta topográfica del

Instituto Geográfico Nacional (IGN) 3360-24-2 a escala 1:50.000, conforme al sistema de proyección Gauss-Krüger, Datum Campo Inchauspe, y las imágenes satelitales LANDSAT y ASTER, con resolución espacial de 15 m a escala 1:100.000. Los mapas se confeccionaron con el programa ARCVIEW GIS 3.3 a escala 1:100.000.

La investigación geológica se realizó en dos etapas: la primera consistió en la búsqueda y recopilación bibliográfica, y la segunda en salidas al campo para el levantamiento de perfiles geológicos. Para acceder a la litología aflorante se visitaron las canteras Irazusta, ubicada en el sitio de disposición final de RSU (33° 3' 5,1" S y 58° 31' 59,0" O), y Aguilar (33° 6' 27" S / 58° 29' 38,3" O) (Fig. 1), y los sectores aledaños a los cursos fluviales. Las tareas de campo consistieron en la observación y descripción de los distintos niveles estratigráficos. Se realizaron análisis químicos *in situ* de los carbonatos exponiéndolos al ácido clorhídrico. Se extrajeron muestras para ensayos granulométricos y análisis mineralógicos. Las muestras para análisis textural se analizaron en el laboratorio de sedimentología del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) y el análisis cualitativo de minerales en fracción pelítica por difracción de rayos X se realizó en el Centro de Investigación de Geología Aplicada (CIGA) correspondiente al Instituto de Tecnología Minera (INTEMIN-SEGEMAR), donde se prepararon muestras de polvo "no orientadas" y "agregados orientados" (natural, calcinado a 550 °C y glicolado). El difractorómetro usado es modelo X'Pert MPD, con radiación K $\alpha$  de Cu. El análisis de datos se realizó utilizando el programa High Score Plus de PANalytical. Se utilizaron los rasgos sobresalientes del relieve para definir las unidades geomorfológicas del área de estudio y así vincularlas con los materiales (litologías) que las componen y los tipos de suelos dominantes.

Para elaborar el balance hídrico a nivel edáfico y poder determinar los períodos climáticamente secos y húmedos, se utilizaron los datos de precipitación y temperatura del período 1969-2009 según la

metodología de Thornthwaite y Mather (1957). Los datos se obtuvieron de la Estación Aero Gualaguaychú provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Los registros faltantes, se completaron a partir de datos oficiales del SMN publicados por *World Meteorological Organization* (WMO).

El censo hidrogeológico de campo consistió en la medición de los niveles hidráulicos y la toma de muestras de agua en 55 molinos de profundidades variables entre 9 y 30 m, distribuidos dentro y fuera de la cuenca del arroyo El Cura, en marzo del 2010 (período húmedo). Las profundidades del agua se midieron con una sonda eléctrica y sensor de fondo, con el fin de definir las divisorias subterráneas. Los niveles estáticos fueron referidos al cero del IGN, a partir de la hoja topográfica 3360-24-2 a escala 1:50.000. Debido a que la equidistancia de la misma es de 2,5 m, las curvas equipotenciales se trazaron con la misma separación. La conductividad, temperatura y pH se midieron *in situ* con un conductivímetro Extech Ex Stik EC400 (estandarizado a 25°) y un peachímetro Hanna-Checker respectivamente. Para el mapa con curvas de salinidad se utilizaron sólo datos de conductividad eléctrica de 32 molinos debido a la imposibilidad de extracción de agua en varios de ellos. Para almacenar el agua y realizar los posteriores análisis físicos - químicos en 16 muestras, se utilizaron frascos de polietileno de alta densidad tipo Nalgene de 1500 ml de capacidad sin conservantes. En todos los casos, se utilizaron guantes libres de polvo y se conservaron en heladeras portátiles. Los análisis químicos se efectuaron en laboratorios del INTEMIN. La determinación de sulfatos y cloruros se realizó por cromatografía iónica, la de bicarbonatos por potenciometría, y la de calcio, magnesio, sodio y potasio mediante espectrometría de emisión atómica por plasma inducido.

Para aplicar el método EKV se determinaron previamente la profundidad de la superficie freática (E) y la permeabilidad vertical de la zona no saturada (Kv). Las áreas con espesores de la zona saturada se establecieron a partir del ma-

pa de profundidad de la superficie freática a escala 1:100.000 y equidistancia 2,5 m, mientras que la permeabilidad vertical (Kv) se determinó en forma cualitativa a partir de comparar los resultados texturales de la litología dominante en cada unidad geomorfológica, con los valores de Kv presentados en el método. Una vez que se obtuvieron ambos valores, a ambos parámetros se les asignaron índices que van de 1 a 5. Estos índices se suman brindando un valor final, con extremos entre 2 y 10. Para índices de E + Kv entre 2 y 4 la vulnerabilidad es baja, entre 5 y 7 media y de 8 a 10 alta.

El método GOD se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a los siguientes parámetros: G (*ground water occurrence*-tipo de acuífero), O (*overall aquifer class*-litología de la zona no saturada) y D (*depth*-profundidad del agua o del acuífero). El valor de la vulnerabilidad final corresponde a la multiplicación de estos 3 parámetros, el cual varía también entre 0 y 1, pasando desde nula a extrema y considerando las categorías intermedias: alta, moderada y baja. Este método fue modificado por Foster *et al.* (2002) para incluir dentro de la estimación de la vulnerabilidad un cuarto parámetro, el tipo de suelo (S), ya que la mayoría de los procesos que causan atenuación de contaminantes se desarrollan en el perfil del suelo, como resultado de su mayor contenido de materia orgánica y arcillas. Este método le asigna a cada tipo de suelo distintos índices que varían de acuerdo a sus características texturales: 0,5 para suelos con alto contenido de arcillas y 1 para los suelos que no contienen. Para la aplicación de este cuarto parámetro se utilizó como base cartográfica los mapas de suelos y de litología confeccionados a escala 1:250.000 en la Hoja Peligrosidad Geológica de Gualaguaychú (Pereyra *et al.* 2009, en prensa) y la carta de suelos del INTA (2006) a escala 1:100.000 del Departamento Gualaguaychú.

## MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

El área mesopotámica abarca el sector austral de la cuenca sedimentaria de Pa-

raná la cual se extiende ampliamente en Brasil, Paraguay y Uruguay (Gentili y Rimoldi 1979). Esta cuenca se diferenció de la denominada Chaco-paranense, desarrollada en Argentina y Uruguay, a partir de la formación de los arcos de Asunción y Río Grande (Chebli *et al.* 1989). Es así que la Mesopotamia Argentina presenta sectores con secuencias litoestratigráficas afines con la cuenca de Paraná y otros con la cuenca Chaco-paranense. Desde el Cenozoico la porción meridional de la Mesopotamia presenta mayores afinidades con la cuenca Chaco-paranense (Chebli *et al.* 1989) y en tal sentido, la región de Gualaguaychú ocuparía el cierre austral de la cuenca mencionada.

En base a los antecedentes previos de la geología de subsuelo y aflorante que involucran la cuenca del arroyo El Cura y zonas aledañas (Fig. 1) y a los datos extraídos de las unidades atravesadas por las perforaciones Gualaguaychú 1 (Dirección General de Minas, Geología e Hidrogeología 1918; cota 6,64 m) y Gualaguaychú 2 (Mársico 2004; cota 2,50 m) que alcanzaron profundidades de 239 m (-232 m) y 825 m (-822 m) respectivamente, se ha integrado la columna estratigráfica que a continuación se detalla, junto con la descripción del comportamiento hidrogeológico de las unidades reconocidas.

#### **Basamento cristalino**

Está constituido por plutonitas de variada composición (granitos y cuerpos básicos de colores rosados, grisáceos y negruzcos) y metamorfitas de diverso grado con edades que oscilan entre el Precámbrico y el Paleozoico inferior (Russo *et al.* 1979). Si bien el basamento no aflora en el área mesopotámica, sí lo hace en zonas muy cercanas como la isla Martín García y Uruguay (Dalla Salda 1999). En el pozo Gualaguaychú 2 se lo encontró a una profundidad de 815 m (-812 m). Este basamento constituye la base impermeable sobre la que se asienta todo sistema hidrogeológico. Sin embargo es frecuente la existencia de agua subterránea cuando está fisurado, lo que da origen a un medio hidráulicamente discontinuo, normalmente en los tramos superiores de la

unidad y especialmente cuando aflora o se emplaza a poca profundidad.

#### **Formación Buena Vista (Padula y Mingramm 1968)**

Son areniscas, de grano fino a mediano, principalmente cuarzoso, de origen continental, que presentan color rojo bermellón y estratificación entrecruzada, e intercalaciones de lutitas rojas oscuras con frecuente estratificación paralela. La edad asignada a estas sedimentitas es triásica media a superior (Chebli *et al.* 1989). Padula y Mingramm (1968) homologan esta formación a las Areniscas de Buena Vista (Falconer 1931) del Uruguay y a la Fm. Piramboia (Wahsburne 1930) de Brasil. Silva Busso y Fernández Garrasino (2004) adoptan el uso del término Formación Piramboia para la región mesopotámica. En el pozo Gualaguaychú 2 se encontró el techo a 635 m de profundidad (-632 m) y el piso a 815 m (-812 m) según Mársico (2004). Respecto al comportamiento hidrogeológico, no existe información hidrogeológica referida a sus características hidráulicas en el área de estudio.

#### **Formación Solari (Herbst 1969, 1971)**

Está formada por una secuencia volcánico-sedimentaria: el Miembro Solari está constituido por areniscas principalmente cuarzosas, de grano mediano, rojas y rosadas, en partes muy silicificadas y depositadas en un ambiente continental desértico, que se encuentran formando el sustrato del basalto toleítico denominado Miembro Serra Geral (nombre utilizado por White (1908) para referirse a las grandes efusiones basálticas) o bien interestratificadas entre las diferentes coladas. Al primer miembro se lo conoce también con el nombre de Formación Curuzú Cuatiá-Miembro Solari (Gentili y Rimoldi 1979), y al segundo como Formación Curuzú Cuatiá - Miembro Posadas (Gentili y Rimoldi 1979). Asimismo, Herbst (1971) correlaciona al Miembro Solari con la Formación San Cristóbal y/o Formación Tacuarembó, definidas por Padula y Mingramm (1968) y Chebli *et al.* (1989) con la Formación Botucatu en Brasil, definida por Sanford y Lange (1960). La edad de

esta formación es jurásica superior-cretácica inferior (Herbst y Santa Cruz 1985). En el pozo Gualaguaychú 2 se la encontró entre los 450 m (-447 m) y 635 m de profundidad (-632 m). En general los basaltos del Miembro Serra Geral actúan como un acuífero en fisuras y/o acuífugo (Filí *et al.* 1996), y los sedimentos fluviales y eólicos infrayacentes de las Formaciones Piramboia y Botucatu alojan a los acuíferos termales profundos (Silva Busso y Garrasino 2004). Sin embargo, se desconoce si estas características hidráulicas son extrapolables a la zona de estudio.

#### **Formación Puerto Yeruá (De Alba y Serra 1959)**

Está compuesta por arenas y areniscas conglomerádicas de coloraciones rojizo-parduzca y rosado, de origen fluvial, que presentan en ocasiones lentes irregulares de arcilitas rojizas (Tófaló 1986; Chebli *et al.* 1989). La edad de esta unidad es cretácica superior (Gentili y Rimoldi 1979). Otros autores se refieren a esta formación como la Formación Yeruá (Herbst 1971), caracterizada hidrogeológicamente como una unidad predominantemente acuífera, integrada por varios horizontes productivos (Tujchneider y Filí 1988; Filí 2001). En el pozo Gualaguaychú 2 el techo de esta formación se encontró a una profundidad de 296 m (-293 m.) con un espesor de 154 m. No se poseen datos sobre parámetros hidráulicos de la unidad en el ámbito de estudio. En carácter general, Filí *et al.* (1996) considera a esta unidad como acuífero por sus características texturales.

#### **Formación Fray Bentos (Herbst 1969 y 1971)**

Esta formación es conocida también como Capas de Fray Bentos (Lambert 1940) está compuesta por areniscas muy finas a limos calcáreos, de colores pardo rosado a rosado y anaranjado, mantiformes, que no suelen presentar estratificación. Se destacan niveles paleoedáficos, lentes de conglomerados y bancos de carbonatos entre 2 m y 5 m (calcretes) (Tófaló 1987). Estas sedimentitas fueron asignadas al Oligoceno inferior a medio (Herbst 1980). Según Chebli *et al.* (1989) esta formación corres-



ponde a sedimentos continentales, predominantemente loésicos y fluviales subordinados. El comportamiento hidráulico de este paquete sedimentario es variable, desde predominantemente acuitado, con intercalaciones de algunas capas acuíferas de poco espesor, hasta francamente acuícludo (Tujchneider y Filí, 1988; Filí, 2001). En el pozo Gualeguaychú 2 el techo se encontró a una profundidad de 165 m (-162 m).

#### **Formación Salto Chico (Rimoldi 1962)**

Corresponden a depósitos fluviales de composición heterogénea constituidos por intercalaciones de algunas capas acuíferas de poco espesor, hasta francamente acuícludo (Tujchneider y Filí, 1988, Filí 2001). En el pozo Gualeguaychú 2 el techo se encontró a una profundidad de 165 m (-162 m) por arenas de grano fino a grueso, blanco amarillentas, sueltas a medianamente friables y pobremente seleccionadas. Presentan escasa matriz arcillosa y en su base es común encontrar niveles conglomerádicos imbricados. La estratificación es irregular y muy poco manifiesta presentando en ocasiones estratificación entrecruzada. La edad de esta unidad litoestratigráfica es pliocena o plio-pleistocena (Bossi 1969) y es concomitante a la depositación de la Formación Ituzaingó (De Alba 1953) en el Oeste de Entre Ríos y a la Formación Puelches (Santa Cruz 1972) en el NE de Buenos Aires. Cabe aclarar que Gentili y Rimoldi (1979) e Iriondo (1980) citan a las sedimentitas de la Formación Salto Chico para referirse a las localizadas a ambos márgenes del río Uruguay y a las de la Formación Ituzaingó para las que se encuentran en las barrancas del río Paraná. De los datos provenientes de la perforación Gualeguaychú pudo observarse que sedimentitas similares a las descriptas se encuentran en subsuelo a profundidades que oscilan entre 77 (-70 m) y 198 m de profundidad (-191 m) y en la perforación Gualeguaychú 2 se ubican entre los 90 m (-87 m) y 165 m (-162 m) de profundidad. La unidad se comporta como un acuífero de alto rendimiento, denominado Acuífero Ituzaingó (Auge *et al.* 2005), del cual se extrae agua para rie-

go y consumo humano, industrial y ganadero, con caudales entre 100 y 500 m<sup>3</sup>/h por pozo y un promedio de 200 m<sup>3</sup>/h (56 L/s); con este último caudal se pueden regar unas 200 hectáreas para el cultivo de arroz (Auge *et al.* 2005). En el ámbito de la cuenca del río Gualeguaychú, este acuífero es explotado con perforaciones de entre 80 y 120 m de profundidad que extraen caudales que oscilan entre 200 y 450 m<sup>3</sup>/h (Díaz y Duarte 2000).

#### **Formación Hernandarias (Reig 1956)**

Esta unidad está constituida principalmente por limos y arcillas limosas con proporción variable de arena fina a muy fina. Pueden distinguirse dos niveles: uno inferior, más arcilloso, de color gris plomizo a verdoso que contiene acumulaciones de yeso, formadas por concreciones de cristales y drusas, y otro superior, de coloración castaño rojizo, constituido principalmente por limos, que contienen en la cúspide concreciones calcáreas o niveles de tosca discontinuos (Iriondo 1980). Son sedimentos loésicos que muestran un aspecto compacto y rasgos pedológicos marcados. El interior de la formación presenta numerosas intercalaciones fluviales y lacustres que le confieren una marcada heterogeneidad (Iriondo 1996; Pereyra *et al.* 2002). El espesor de esta formación, según los registros de la perforación Gualeguaychú 1 es 73 m y se le asigna una edad pleistocena media (Chebli *et al.* 1989; Iriondo 1996). Esta formación contiene al acuífero libre y se emplea para consumo humano y ganadero en la zona rural; por su composición pélica es de muy baja productividad y actúa como semiconfinante del acuífero subyacente (Auge *et al.* 2005).

#### **Formación El Palmar (Iriondo 1980)**

Esta unidad está formada por arenas cuarzosas medianas y gruesas de color rojizo y ocre amarillento en las cuales se intercalan lentes de cantos rodados y gravas de calcedonia y ópalo de decenas de metros de largo y uno a dos metros de espesor. Esta unidad es de origen fluvial y presenta un espesor que varía entre 3 y 12 m. Iriondo (1996) le asigna una edad Pleisto-

cena superior. Iriondo y Kröhling (2007) y Santi *et al.* (2010) definen a esta unidad como un acuífero libre de baja productividad, cuyo uso es destinado a consumo humano, animal, industrial y riego, con una transmisividad media de 1000 m<sup>2</sup>/d y con caudales que no superan los 45 o 50 m<sup>3</sup>/h (Santi *et al.* 2010).

#### **Formación Tezas Pinto (Iriondo 1980)**

Son limos eólicos friables, sin estructuras sedimentarias, de color castaño rojizo, que presentan frecuentemente evidencias paleoedáficas y grietas de desecación. Asimismo, se presentan diseminadas en el depósito concreciones de carbonato de calcio redondeadas, duras y bien definidas de hasta 2 cm de largo, y en forma esporádica lentes de grava. Tiene espesores máximos del orden de los 4 m. Se trata de sedimentos loésicos, depositados bajo un clima semiárido, con un probable régimen pluvial marcadamente estacional (Chebli *et al.* 1989). Se le asigna una edad pleistocena superior (Pereyra *et al.* 2002). No existe información de las características hidráulicas en la zona de estudio.

#### **Formación La Picada (Iriondo 1980)**

Son limos y arenas fluviales, con laminación y estratificación entrecruzada correspondientes a depósitos sedimentarios que constituyen el relleno aluvial de los ríos y arroyos de la región, formando terrazas bajas y bien desarrolladas. Su composición varía de un valle a otro, dependiendo de la naturaleza de las cuencas respectivas (litología y pendientes locales). La Formación La Picada puede correlacionarse con los depósitos de la Formación Luján (Pereyra *et al.* 2002) a la que varios autores le asignan edad pleistocena superior a holocena inferior. Hidrogeológicamente, constituyen los sitios de descarga natural más importantes para el agua subterránea.

## **GEOLOGÍA LOCAL**

Se levantaron dos perfiles estratigráficos en las canteras Aguilar e Irazusta (Fig. 1) con el objeto de identificar en el campo

las unidades formales descriptas anteriormente. De techo a base se reconocieron los siguientes niveles:

### **Predio Irazusta (cota 10 m, Fig. 2)**

*Nivel B1:* 1,40 m de limos castaños rojizos y masivos con una relación arena-limo-arcillas de 21:70:9. La mineralogía de la fracción pelítica, según análisis de difracción de rayos X, contiene mayoritariamente cuarzo, en forma minoritaria filosilicatos, plagioclasa y amorfos, y como mineral accesorio feldespato potásico. Entre los minerales de arcillas predominan las esmectitas y en forma subordinada micas/illitas. Los minerales que componen la fracción arenosa son plagioclasa zonada principalmente, cuarzo monocristalino y microclino; también se encuentran líticos.

*Nivel B2:* En contacto neto aparece 1,20 m de limos castaños verdosos y masivos conteniendo bioclastos con distinto grado de empaquetamiento. En general éste es escaso a disperso aunque en ciertos sectores pudo observarse hacia el techo bancos discontinuos de 5 cm de espesor con conchillas que muestran empaquetamiento denso. Los bioclastos corresponden a valvas de bivalvos (*Erodona mactroides*) con distinto grado de preservación (desarticulada, articulada, fragmentada y entera) y diferentes tamaños; no presentan orientación preferencial ni posición de vida. En el paquete de limos, con una relación arena-limo-arcillas de 33:57:10, se encontraron clastos de tosca y sílice de aproximadamente 3 cm de tamaño medio. La mineralogía de la fracción pelítica, según análisis de difracción de rayos X, contiene mayoritariamente cuarzo, en forma minoritaria filosilicatos, plagioclasa y amorfos y como mineral accesorio feldespato potásico. Los minerales de arcillas identificados son esmectitas. Estos depósitos marinos son de reducida extensión areal y discontinuos dentro del predio. Esto se evidencia a partir de observaciones de campo, donde aparecen notoriamente en el frente de cantera de Irazusta a cota 8,6 m y desaparecen a 220 m al NE a cota de 7,5 m.

*Nivel B3:* Banco de "tosca" color gris blan-

quecino con variación lateral de su espesor de 0,30 a 0,60 m cuya reacción con HCl fue del 100%.

*Nivel B4:* En contacto neto aparece un banco de arena de 0,90 m de espesor en el cual se reconocen dos niveles diferenciados en el campo por su color: a) nivel superior de 0,40 m de espesor, color castaño claro a blanquecino, laminación difusa, semifrías, constituido por arena muy gruesa (2%), arena gruesa (12%), arena mediana (37%), arena fina (20%), arena muy fina (3%) y pelita (26%). Se observaron clastos de sílice aislados de 0,5 y 1 cm aproximadamente, angulosos, subangulosos y redondeados. Las arenas presentan esfericidad alta y morfología subredondeada a redondeada, con pátinas de material arcilloso cubriendo cada uno de ellos. La naturaleza de estas arenas es de cuarzo (85,5%), alteritas (6%), feldespatos (3,5%), vitroclastos (2,5%), líticos (2,5%) y minerales opacos. En la fracción pelítica, por medio de difracción de rayos X, se identificó cuarzo como mineral mayoritario y filosilicatos, plagioclasa y amorfos como minoritarios. Los minerales de arcillas son esmectitas y subordinadamente mica/illita. b) nivel inferior de 0,5 m de espesor, color castaño amarillento u ocre, friable, constituido por arena gruesa (20%), arena mediana (60%), arena fina (7%), pelita (12%) y escasos clastos angulosos de 1 a 2 centímetros. Las arenas presentan esfericidad media a baja y morfología subangulosa a subredondeada; algunos de ellas están cubiertos por una pátina de material arcilloso. Se identificaron clastos de cuarzo (85%), feldespatos (8%), vitroclastos (5%), líticos (2%), biotita y minerales opacos. Los dos últimos minerales se encuentran en clastos pequeños (<0,25 mm) y son relativamente abundantes. En la fracción pelítica, a través de difracción de rayos X, se identificaron cuarzo y filosilicatos como minerales mayoritarios y plagioclasa y amorfos como minoritarios. Los minerales de arcillas son esmectitas y accesoriamente mica/illita.

### **Predio Aguilar (Fig. 3)**

*Nivel A1:* 1,90 m de limos castaños roji-

zos y masivos con una relación arena-limo-arcillas de 25:70:5. La mineralogía de la fracción pelítica contiene mayoritariamente cuarzo, en forma minoritaria filosilicatos, plagioclasa y amorfos, y como mineral accesorio feldespato potásico; en la fracción arcilla se encuentran mayoritariamente esmectitas. Los minerales que componen la fracción arenosa son plagioclasa zonada principalmente, cuarzo monocristalino y microclino; también hay líticos.

*Nivel A2:* En contacto neto aparece un banco de 1,10 m de limos color castaño claro a verdoso con una relación arena-limo-arcillas de 30:61:9. Aparecen bioclastos diseminados en todo el depósito formando en ocasiones bancos discontinuos de 3-4 cm aproximadamente. Las conchillas presentan distinto grado de preservación y un tamaño promedio de 2 cm, aunque se observaron otros de 1 y 3 cm. La mineralogía de la fracción pelítica contiene mayoritariamente cuarzo, en forma minoritaria filosilicatos, plagioclasa y amorfos, y como mineral accesorio feldespato potásico; en la fracción arcilla predominan las esmectitas.

*Nivel A3:* En contacto neto aparece un paquete sedimentario de 2,30 metros de espesor constituido en su base por areniscas cuarzosas finas a muy finas de color castaño amarillento y hacia el techo constituido por conglomerados friables de color castaño oscuro en una matriz psamo-pelítica. Los clastos se presentan levemente imbricados y tienen un tamaño que varía entre 1 cm y 3,5 cm. La composición de los mismos es principalmente de sílice.

*Nivel A4:* Banco de "tosca" de 0,7 m de potencia, color castaño blanquecino, cuya reacción con HCl fue del 100%.

*Nivel A5:* En contacto aparecen limos potentes de color castaño rojizos y masivos con una relación arena - pelita de 29:71. La mineralogía de la fracción pelítica, según análisis de difracción de rayos X, contiene mayoritariamente cuarzo y plagioclasa, en forma minoritaria filosilicatos y amorfos, y como minerales accesorios feldespato potásico y hematita. Entre los minerales de arcillas predominan las esmectitas y en forma subordinada micas/illitas. La mi-



**Figura 2:** Ilustración de depósitos ubicados en el perfil del predio Irazusta. a) Niveles limosos con contenido fósil (B2). b) Nivel de tosca por encima (B3) de niveles arenosos (B4).

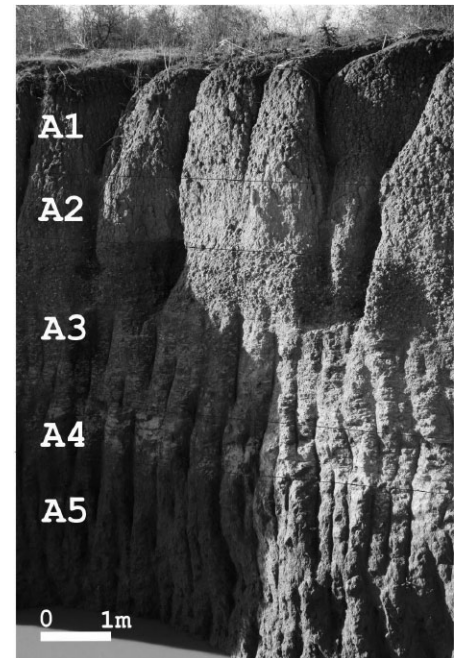
neralología de la fracción arenosa contiene principalmente plagioclasa zonada, luego vidrio, cuarzo monocristalino y microclino; también líticos.

## GEOMORFOLOGÍA

La zona de estudio posee un relieve ondulado y pendientes suaves. En la figura 4 puede apreciarse que las mayores alturas se encuentran hacia el cuadrante SO con cotas máximas de 50 m y que las cotas mínimas, inferiores a 5 m, se hallan hacia el E, en la desembocadura del río Gualeguaychú. La cuenca del arroyo El Cura presenta forma alargada; con una longitud del curso principal, hasta su desembocadura en el río Gualeguaychú es de 9 km con pendiente media de 2,9 ‰.

La configuración y evolución del paisaje, han sido determinadas principalmente por la acción eólica y fluvial desde principios del Neógeno hasta el presente; la intensidad y modo en que operaron estos procesos geomórficos estuvieron vinculados a las oscilaciones climáticas acaecidas en ese período y a su interacción con el mar. En este sentido, para el ambiente eólico se definió como unidad geomorfológica una planicie loésica (PL) predomi-

nantemente limosa a limo arenosa localizada entre las cotas 50 m. y ~10 m. (Fig. 4), la cual muestra un relieve suavemente ondulado a plano disectado parcialmente por la red fluvial, de diseño dendrítico. El ambiente fluvial presenta una mayor heterogeneidad ya que en él ha tenido mayor impacto la interacción con las variaciones del nivel del mar; por ello, en este trabajo se define al ambiente como fluvial con influencia marina, ya que en él se reconocen las siguientes unidades geomorfológicas: terrazas y planicie aluvial del río Gualeguaychú, planicie aluvial de cursos tributarios y cordones litorales marinos. Las terrazas y planicie aluvial del río Gualeguaychú (TPRG), que se encuentran orientadas N-S, conforme al curso de este río de hábito meandriforme, están compuestas por materiales predominantemente arenosos a limosos y se hallan a cotas inferiores a 10 m. Bajo el nombre de cordones litorales marinos (CLM) se agrupó a un conjunto de cordones paralelos a la costa ubicados en el mapa a cotas inferiores a los 7,5 m. cuyo origen se vincula a la fase regresiva de la ingresión marina holocena; presentan formas longilíneas con orientación NO-SE en el tramo N y hacia el S tienen dirección dominante



**Figura 3:** Perfil relevado en el predio Aguilar. Secuencia integrada por limos castaños rojizos (A1) que sobreyacen al nivel limoso verdoso conteniendo material fosilífero (A2); intercalación de gravas y areniscas (A3) por encima del nivel de tosca (A4); por debajo el nivel limoso castaño rojizo (A5) del cual se extraen materiales en la cantera.

N-S. Frecuentemente contienen cursos superficiales que drenan principalmente por las depresiones intercordoniales.



La planicie aluvial de cursos tributarios (PA) incluye a aquellas planicies de cursos que desembocan en este último tramo del río Gualeguaychú y que son los arroyos El Cura, El Sauce y La Capilla, como así también otros de menor jerarquía, de carácter transitorio. Estos cursos son de hábito sinuosos con una energía morfogenética en general baja. Los materiales que componen la planicie de estos ríos son predominantemente limosos a limo arcillosos, carecen de estructura y poseen una edad reciente a actual. En particular, la cuenca de drenaje del arroyo El Cura se desarrolla sobre la planicie loésica y presenta un diseño dendrítico con una planicie aluvial poco desarrollada de 1400 m de ancho promedio y su curso principal es de carácter permanente.

## HIDROMETEOROLOGÍA

El clima en la zona es de tipo subhúmedo-húmedo (Boujon *et al.* 2006). La precipitación media anual para una serie de 41 años (1969-2009) fue 1083 mm. Las estaciones más lluviosas son otoño y primavera-verano; con menores precipitaciones en invierno. El año con mayor precipitación fue en 1993 con 1772 mm y el de menor fue en 2008 con 598 mm. La temperatura media anual para el período 1969-2009 fue de 17,6 °C, con temperaturas máximas y mínimas anuales de 28,1 y 7,9 °C. Para elaborar el balance hídrico a nivel edáfico del cuadro 1 se adoptó una altura de lámina de 110 mm, a partir del dato de la humedad equivalente determinado mediante el método de Richards (Richards 1965) para estimar la capacidad de campo (29%) realizado en el laboratorio agroambiental del INGEIS. En la figura 5 se graficaron los valores medios mensuales de precipitación (P) y evapotranspiración potencial ajustada (E<sub>vtp</sub>), a los efectos de situar la ubicación interanual de períodos húmedos y secos. El período húmedo corresponde a los meses donde P superó a E<sub>vtp</sub> (marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre) y el período seco a los meses donde E<sub>vtp</sub> superó a P (diciembre, enero y febrero). De acuerdo al balance hídrico mensual de la

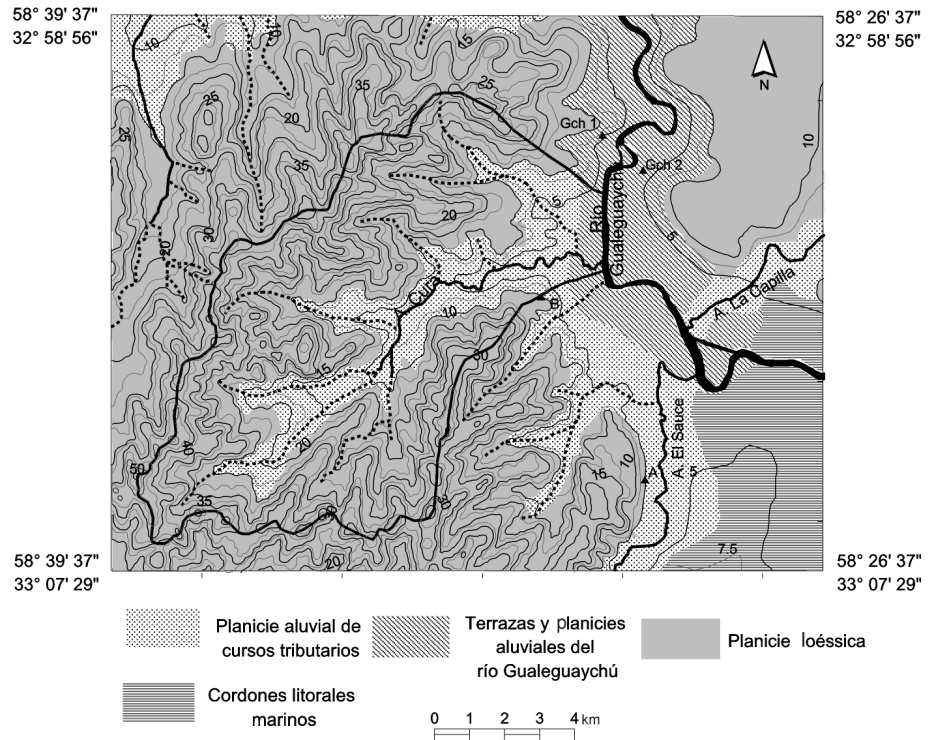


Figura 4: Mapa geomorfológico de la zona estudiada.

serie se desprende:  $P = 1083$  mm (100%) y evapotranspiración real ( $E_{vtr} = 860$  mm (79%). La mayor trascendencia hidrogeológica del balance hídrico a nivel edáfico radica en que permite el cálculo de  $E_{vtr}$  y a partir de su cotejo con  $P$ , establecer la existencia o no de excesos hídricos que se transformarán en escurrimiento superficial ( $E_s$ ) e infiltración ( $I$ ). En este caso la diferencia  $P - E_{vtr}$  indica un exceso hídrico  $E_h = 223$  mm (21%). Adoptando como índice de escorrentía el 15% de la lluvia, valor tomado por Auge *et al.* (2005) para una región con características climáticas, geomorfológicas y geológicas similares a la estudiada, se tiene para la cuenca del arroyo El Cura un  $E_s$  medio anual del orden de 160 mm y una  $I$  de unos 65 mm/año.

## HIDRODINÁMICA E HIDROQUÍMICA

En la figura 6 se indica la red de flujo, elaborada a partir de los niveles medidos en el acuífero libre. Se observa que la dirección dominante del flujo subterráneo es del SO al NE, en coincidencia con la pen-

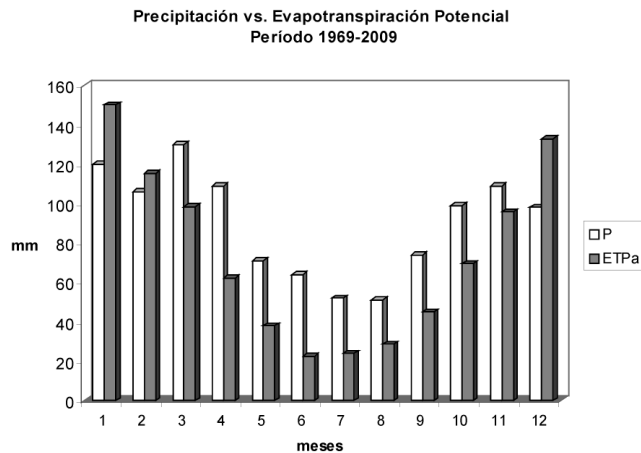
diente topográfica regional de la cuenca del arroyo El Cura. En los sectores medio e inferior de la cuenca, entre las equipotenciales de 10 y 2,5 m, por la margen izquierda del arroyo, la dirección del flujo es de NO al SE, por lo que la relación agua superficial - subterránea es de tipo efluente. Los gradientes hidráulicos medios calculados para toda la cuenca se encuentran en el orden de 0,0016. El agua del acuífero libre es empleada para consumo humano, bebida para animales y riego. El caudal de extracción varía de acuerdo a la estación del año y a las actividades empleadas en cada chacra: en verano para riego, consumo humano y animal, es de unos 120 m<sup>3</sup>/d y sólo para riego y consumo humano es de 3 a 20 m<sup>3</sup>/d; en invierno decrece aproximadamente un 50%.

El rango de salinidad en la cuenca varía entre 90 a 859 ppm (Fig. 7). La evolución de la salinidad del agua subterránea muestra un incremento de sales conforme a la dirección general del flujo. Los cuerpos superficiales (arroyos Manantiales, El Cura y el río Gualeguaychú) también presentan valores bajos de salinidad, en general menores a 300 ppm.



**CUADRO 1:** Balance hídrico edáfico para el período 1969-2009 (Thornthwaite y Mather 1957).

Balance Hídrico Edáfico. Aero Gualeguaychú (1969-2009). C.C.= 110 mm													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Año
T°	25,1	23,6	21,5	17,7	14,1	11,2	10,9	12,1	14,6	17,6	20,1	23,2	
i	11,50	10,48	9,10	6,78	4,81	3,39	3,25	3,81	5,07	6,72	8,22	10,21	83,34
ETPs/a	4,1	3,7	3,1	2,2	1,4	0,9	0,9	1,0	1,5	2,1	2,8	3,6	
FC	36,6	31,2	31,8	28,2	27,0	24,9	26,4	28,5	30,0	33,9	34,8	36,9	
ETPa	150,1	115,4	98,6	62,0	37,8	22,4	23,8	28,5	45,0	69,5	95,7	132,8	
P	120	106	130	109	71	64	52	51	74	99	109	98	1083
P-ETPa	-30,1	-9,4	31,4	47,0	33,2	41,6	28,2	22,5	29,0	29,5	13,3	-34,8	201,4
Ppaa	-65,0	-74,0											-34,8
Alm	51,0	47,0	78,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	70,0	
V alm	-19,0	-4,0	31,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-30,0	
ETR	139,0	110,0	98,6	62,0	37,8	22,4	23,8	28,5	45,0	69,5	95,7	128,0	860,3
Def_hum	11,0	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	21,3
Exc_hum	0,0	0,0	93,3	47,0	33,2	41,6	28,2	22,5	29,0	29,5	13,3	0,0	337,6
Exceso (15%)	18,0	15,9	19,50	16,35	10,65	9,60	7,80	7,65	11,10	14,85	16,35	14,70	162,5



**Figura 5:** Precipitación vs. evapotranspiración potencial ajustada (1969-2009).

Con respecto a los diagramas de Stiff (1951) presentados en la Figura 8, puede establecerse una relación entre el comportamiento hidroquímico y los ambientes geomorfológicos de planicie loésica (PL) y planicie aluvial de cursos tributarios (PA). La PL es la unidad geomorfológica más extensa y en este ámbito todas las muestras tienen al  $\text{HCO}_3^-$  y al  $\text{Ca}^{2+}$  como iones netamente dominantes. El contenido en sólidos disueltos totales (SDT) es bajo, promediando 377 mg/L. Asimismo la conductividad eléctrica (CE) es baja, promediando 616  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El  $\text{HCO}_3^-$  se presenta con valores medios de 290 mg/L (4,75 meq/L) y representa el 79% del total de aniones. Respecto a los cationes, domina notoriamente el  $\text{Ca}^{2+}$  con promedios de 50 mg/L (2,5 meq/L) y representa el 45% del total de cationes. La PA

presenta mayor contenido de SDT y CE: 579 mg/L y 964  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente. El anión total dominante continúa siendo el  $\text{HCO}_3^-$  constituyendo el 76% con 504 mg/L (8,3 meq/L) y el catión dominante es el  $\text{Na}^+$  con 146 mg/L (6,3 meq/L) y 56,5% del total de los cationes. El pozo 14 ubicado en TPRG tiene una CE 1718  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , salinidad 859 ppm, SDT 1031 mg/L. La salinidad en PL presenta concentraciones medias de 308 ppm (P1, P4, P6, P21, P25, P29, P30, P37, P38, P40, P44, P45, P54 y P57), aumentando a un 56 % en PA con 482 ppm (P2, P3, P15, P9E, P22, P26 y P55) y a un 179% en TPG con 859 ppm (P14). También se aprecia que en coincidencia con los flujos locales (NO-SE) y con el regional dominante, el agua subterránea evoluciona de bicarbonatada cálcica a sódica.

## VULNERABILIDAD

Un parámetro común a todos los métodos es la profundidad de la superficie freática, la cual se reproduce en la figura 9. La profundidad mínima y máxima hallada en la cuenca es 0,8 m (P26) y 22,5 m (P44). Los valores menores a 2,5 m se hallan principalmente en el sector E de la cuenca, específicamente en la planicie aluvial de cursos tributarios (P15, P22, P23, P26, P46, P53 y P55). Valores similares se observan en las terrazas y planicie aluvial del río Gualeguaychú (P14) y en un caso en la planicie loésica (P1). Otras áreas con escasas profundidades, pero menores a 5 m, se ubican en el sector S (P25 y P37) y O (P4), todas en planicie loésica. La superficie freática manifiesta su máxima profundización hacia el SO, en coincidencia con las mayores altitudes topográficas, con valores superiores a 20 m (P5, P6, P18 y P44). Otro sector con profundidades significativas, mayores a 15 m, es el O (P13 y P52). Las áreas de vulnerabilidad según el método Ekv (Auge 1995, Auge 2003), se definieron a partir del mapa con líneas de isoprofundidad del acuífero freático o espesor de la zona subsaturada (E) y de los valores de permeabilidad vertical ( $K_v$ ), obtenidos a partir de la litología dominante en cada una de las unidades geomorfológicas definidas en la figura 4. A E se le asignaron distintos índices según los espesores hallados en la Figura 9: E=5 (< 2 m de profundidad), E=4 (> 2 a 5 m), E=3 (>5 a 10 m) y E=2 (>10 a 30 m de profundidad). Las  $K_v$  utilizadas para la PL, PA y TPRG fueron:  $K_v=3$  (0,01 a 1 m/d - limo y limo arenoso);  $K_v=2$  (0,001 a 0,01 m/d - limo y limo arcilloso) y  $K_v=4$  (1 a 50 m/d - arena muy fina a limosa, arena fina y arena mediana a gruesa) respectivamente. Como resultado de la suma de ambos índices, se obtuvieron distintos grados de vulnerabilidad dentro de la cuenca: 5, 6, 7 y 8 para la PL correspondiente a una vulnerabilidad media y alta; 4, 5, 6 y 7 para la PA indicando bajo y medio grado de vulnerabilidad y 9 para la TPRG correspondiente a una vulnerabilidad alta (Cuadro 2 y Fig. 10).

Para la aplicación del método GOD (Foster 1987), al parámetro G se le asignó un

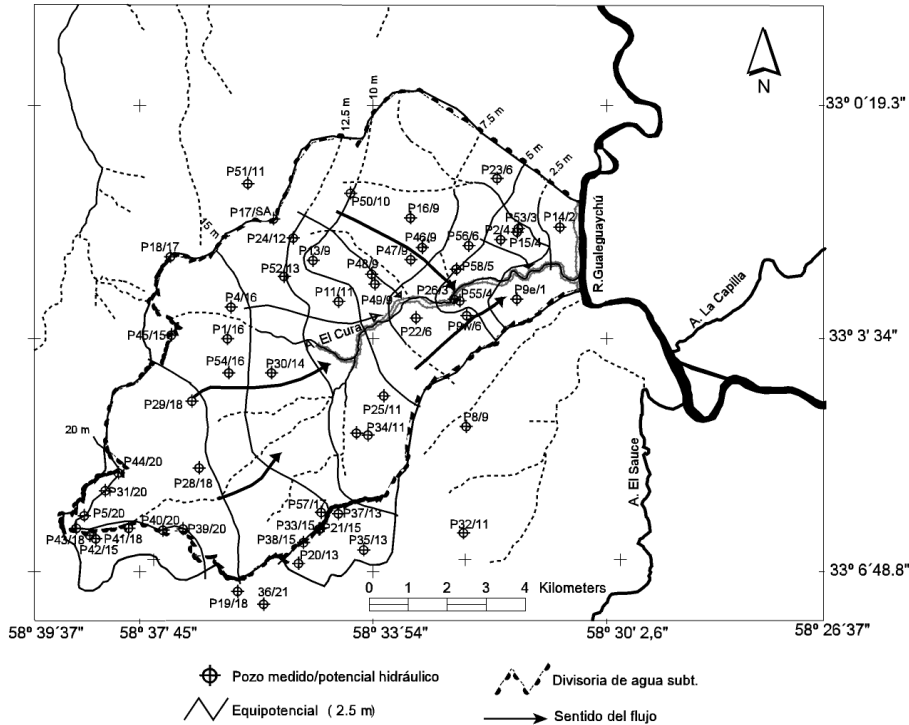


Figura 6: Red de flujo subterráneo para el acuífero libre según datos de 55 pozos en el período húmedo.

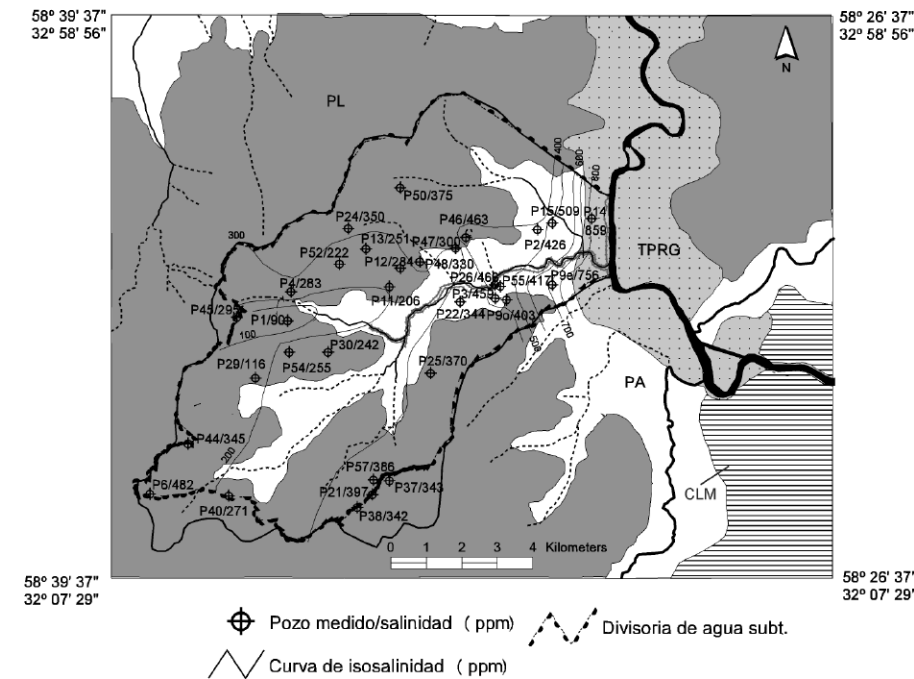


Figura 7: Mapa de salinidad del acuífero freático. PL: planicie loésica; PA: planicie aluvial de cursos tributarios; TPRG: terrazas y planicies aluviales del río Gualaguaychú y CLM: cordones litorales marinos.

le asignó:  $D=1$  (<2 m),  $D=0,9$  (2-5 m de profundidad),  $D=0,8$  (5-10 m de profundidad),  $D=0,7$  (10-20 m de profundidad) y  $D=0,6$  (20-50 m de profundidad). Como resultado de la multiplicación de los 3 índices se obtuvo un rango de valores entre 0,3 a 0,5 para PL, 0,35 a 0,5 para PA, y 0,7 para TPRG correspondientes a vulnerabilidades moderadas (PA y PL) y extrema (TPRG).

Para el método GODS (Foster *et al.* 2002) se utilizaron los mismos valores de índices obtenidos para los parámetros G, O y D asignados en el método anterior. El parámetro S se definió de acuerdo al tipo de suelo dominante en cada unidad geomorfológica. En la planicie loésica los suelos son generalmente bien drenados, profundos, y con buen desarrollo pedogenético. Dominan los Argiudoles vérticos con un potente epipedón mólico y un grueso horizonte argílico bien estructurado por debajo. Los perfiles típicos son: A1 A2 BA Bt1 Bt2 Bck Ck. El índice asignado para este tipo de suelo es 0,6. Por el contrario, en la Planicie aluvial de cursos tributarios se hallan suelos de poco desarrollo, con amplio predominio de suelos de régimen ácuico, perfiles simples y evidencias de repetido y continuo “rejuvenecimiento”. Dominan los Endoacuales típicos (perfiles A-AC-C). El valor del índice es 0,8. Los suelos de las terrazas y planicie aluvial del río Gualaguaychú se identifican también por el bajo grado de desarrollo pedogenético y por presentar características énticas. Dominan los Udifluventes típicos desarrollados sobre materiales más gruesos, arenosos o francos arenosos, con un horizonte superficial delgado, con escaso contenido de materia orgánica. Su secuencia típica es A-AC-C. El valor del índice es 0,9. El mapa litológico final se obtuvo a partir de la superposición de los mapas de litología y suelos y la combinación de los índices O y S indicados para ambos. En éste resultaron 3 zonas con índices diferentes: 0,3 para la PL; 0,4 para PA y 0,63 para TPRG donde el valor más alto indica menor resistencia al paso de los contaminantes hacia el acuífero (Cuadro 4). La superposición de los mapas de litología final y el de líneas de isoprofundidad

valor de 1 correspondiente a un acuífero libre. Al parámetro O se le asignó un valor correspondiente al tipo litológico dominante en cada uno de los ambientes

geomorfológicos definidos en la Figura 4: 0,5 para los limos aluviales de PA y el loess de PL, y 0,7 para las arenas aluviales de TPRG (Cuadro 3). Al parámetro D se

y la combinación de sus índices resultó en tres áreas con distinta vulnerabilidad: baja (0,18 a 0,3), moderada (0,32 a 0,4) y alta (0,63). El mapa de la Figura 11 refleja la distribución espacial de los diferentes grados de vulnerabilidad hallados aplicando los índices de este método.

**DISCUSIÓN**

Si bien los métodos presentados en este trabajo permitieron definir zonas vulnerables a la contaminación, se consideró necesario para un estudio integral de la cuenca vincular geográficamente estas zonas a la geología, hidrogeología e hidrodinámica subterránea de la misma. Es así que la investigación geológica reflejó heterogeneidades litológicas de campo, y discrepancias bibliográficas que ameritaron ser discutidas puntualmente. Particularmente, en lo que atañe a las unidades hidrogeológicas que alojan al acuífero libre y semiconfinado.

**Geología e hidrogeología**

Los datos litológicos y mineralógicos obtenidos de los perfiles de las canteras Aguilar e Irazusta (puntos A y B de la Fig. 1) permitieron correlacionar las unidades de la cuenca del arroyo El Cura con las definidas en la columna estratigráfica de la región (Filí *et al.* 1994, Silva 1999, Pereyra *et al.* 2002, Favetto *et al.* 2005). Se identificaron dos niveles loésicos castaños rojizos, denominados según el esquema clásico “sedimentos pampeanos”; uno en la base del perfil, correlacionable con la Formación Hernandarias (A5) y otro superior asignable a la Formación Tezanos Pinto (A1 y B1). Ambos niveles loésicos se encuentran ampliamente distribuidos en toda la cuenca del arroyo El Cura. El primer nivel de loess (Formación Hernandarias) que en muchos trabajos se cita como Grupo Punta Gorda (Orgeira *et al.* 2004, Pomposiello *et al.* 2009, Sanci *et al.* 2009), es la principal unidad que contiene al acuífero libre. Sin embargo, en zonas vecinas al cauce del arroyo El Cura y en la confluencia de éste con el río Gualeguaychú, el agua subterránea se encuentra a profundidades inferiores al metro

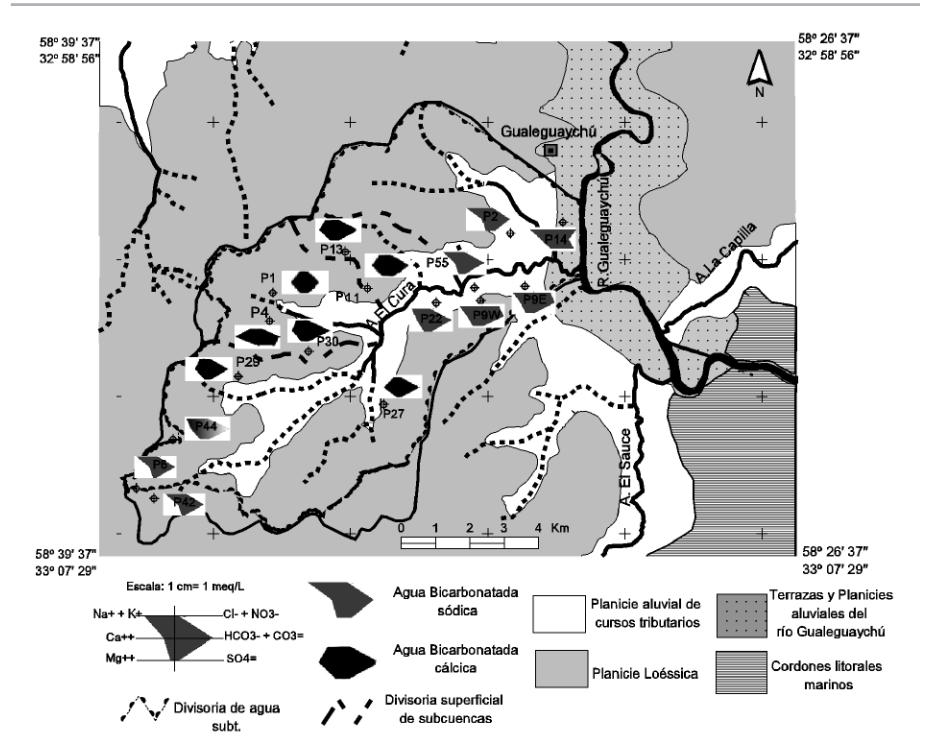


Figura 8: Diagramas de Stiff.

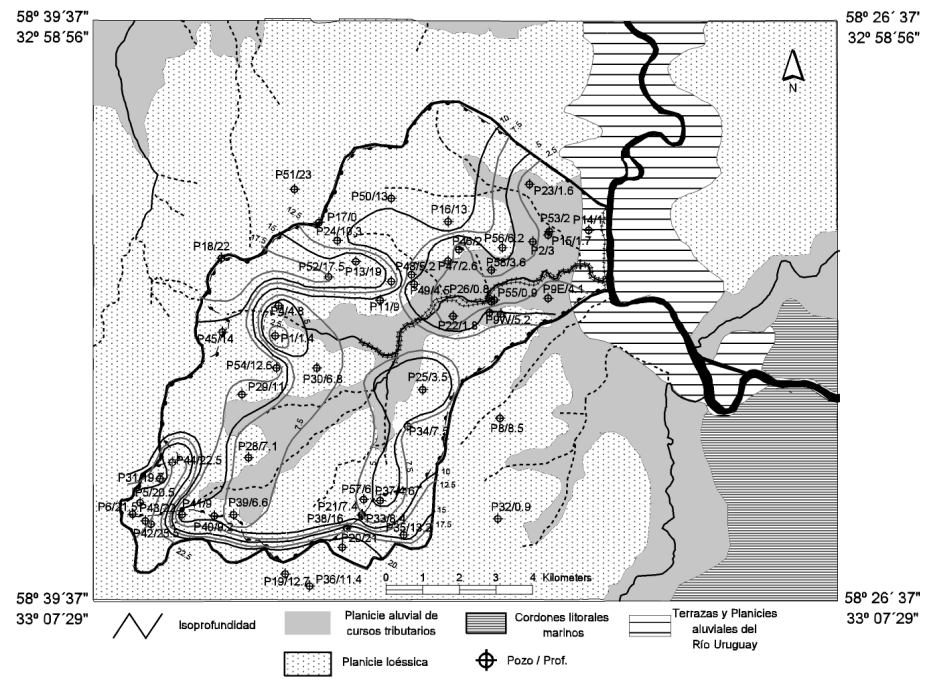


Figura 9: Mapa de profundidad de la superficie freática.

(0,8 m), quedando contenida también en la Formación Tezanos Pinto. Entre ambos se reconocieron depósitos de limos verdosos con abundante contenido de fósiles marinos (A2 y B2) coincidentes con los niveles descritos por Guida y Gonzá-

lez (1984) para referirse a la ingresión marina “belgranense” del Pleistoceno tardío (Martínez y Del Río 2005) (Fig. 12). En la Cantera Aguilar se observaron depósitos fluviales (A3) que según las características litológicas, su posición estratigráfica



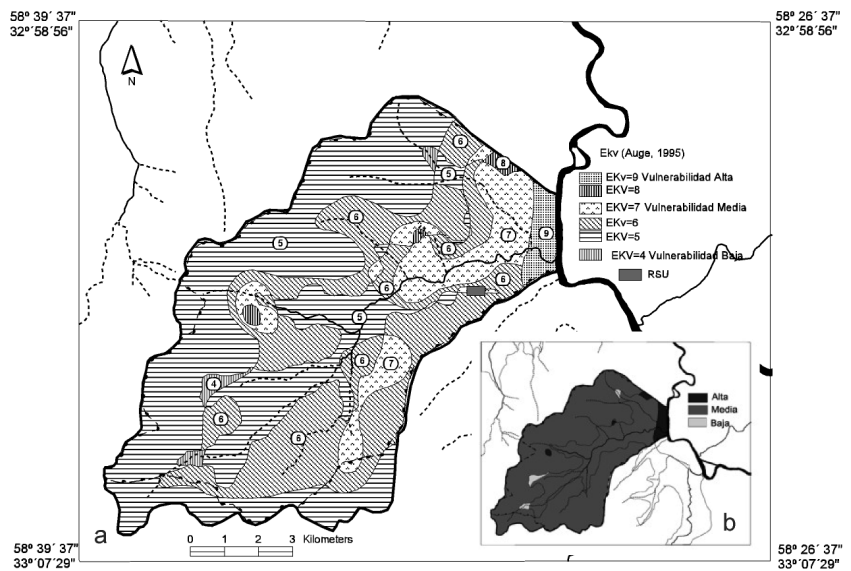
en el perfil, es decir, por encima del nivel de tosca que corona a la Formación Hernandarias (A4), y su carácter lenticular (no aparecen en la cantera Irazusta) podrían coincidir con los niveles descritos por Iriondo (1980, 1996) para la Formación El Palmar. Igualmente, cabe aclarar al respecto que Iriondo y Kröhling (2007) definen a esta unidad como una faja que se extiende hasta el S de Concepción del Uruguay en Entre Ríos y, que Santi *et al.* (2010) la marcan como indefinida a partir del S de Concepción del Uruguay, motivos por los cuales se necesitan estudios regionales posteriores que definan su existencia y posición estratigráfica al sur de esta ciudad.

En lo que respecta a la correlación que hacen Pereyra *et al.* (2002) de las arenas de la base de la cantera Irazusta (B4) con la Formación Ituzaingó o Formación Salto Chico, aquí se reinterpretan como parte de la Formación Hernandarias. Sustentan dicha interpretación la posición estratigráfica de los bancos arenosos, infrayacentes al nivel de tosca (B3), su litología y la información extraída de los datos de las perforaciones Gchú 1 (1918) y Gchú 2 que indican que el techo de la Formación Salto Chico se halla a más de 77 m de profundidad (Cuadro 5). Esta información coincide con los perforistas locales, que por comunicación verbal a la autora, la ubican entre 40 y 42 m de profundidad y también coincide con el primer nivel productivo en los pozos de Obras Sanitarias (Boujon *et al.* 2006) que sitúan el primer filtro a los 36 m de profundidad. Si bien Silva (1999) y Benítez y Mársico (2002) ubican el techo de la Formación Salto Chico a 6 m de profundidad (Cuadro 5), según la interpretación que realizaron en la perforación Gchú 1 (punto M de la Fig. 1), y que durante el Terciario existieron movimientos neógenos que reactivaron un sistema de lineamiento principal de rumbo N-S coincidente con la dirección del río Uruguay (Iriondo 1996 y Pereyra *et al.* 2002), no se han encontrado evidencias en el área estudiada de algún movimiento tectónico posterior a la depositación de la Formación Salto Chico, que justifique un rechazo vertical de 70 m aproximadamente.

**CUADRO 2:** Resultados del método EKv.

Unidad geomorfológica	Espesor zona no saturada (E)	Permeabilidad vertical (Kv)	Rango de vulnerabilidad (EKv)
Planicie loésica (PL)	2 3 4 5	3	5 6 7 8
Planicie aluvial de cursos tributarios (PA)	2 3 4 5	2	4 5 6 7
Terrazas y planicie aluvial del Río Gualeguaychú (TPRG)	5	4	9

\* Valores de EKv = 4: vulnerabilidad baja; EKv = 5, 6 y 7 vulnerabilidad media; EKv = 8 y 9 vulnerabilidad alta.



**Figura 10:** Mapas de vulnerabilidad del acuífero libre según el método EKv. a) Áreas definidas según los índices obtenidos por el método. b) Áreas con distintos grados de vulnerabilidad.

**CUADRO 3:** Resultados del método GOD.

Unidad geomorfológica	Tipo de acuífero (G=groundwater occurrence)	Litología (0= overall aquifer class)	Profundidad del agua (D=deep to groundwater)	Vulnerabilidad
Planicie loésica (PL)	1	0,5	0,6	0,30
			0,7	0,35
			0,8	0,40
			0,9	0,45
			1	0,5
Planicie aluvial de cursos tributarios (PA)	1	0,5	0,7	0,35
			0,8	0,40
			0,9	0,45
			1	0,5
Terrazas y planicie aluvial del Río Gualeguaychú (TPRG)	1	0,7	1	0,7

\* Valores entre 0,3 a 0,5 corresponden a vulnerabilidad moderada; entre 0,7 a 1 extrema.

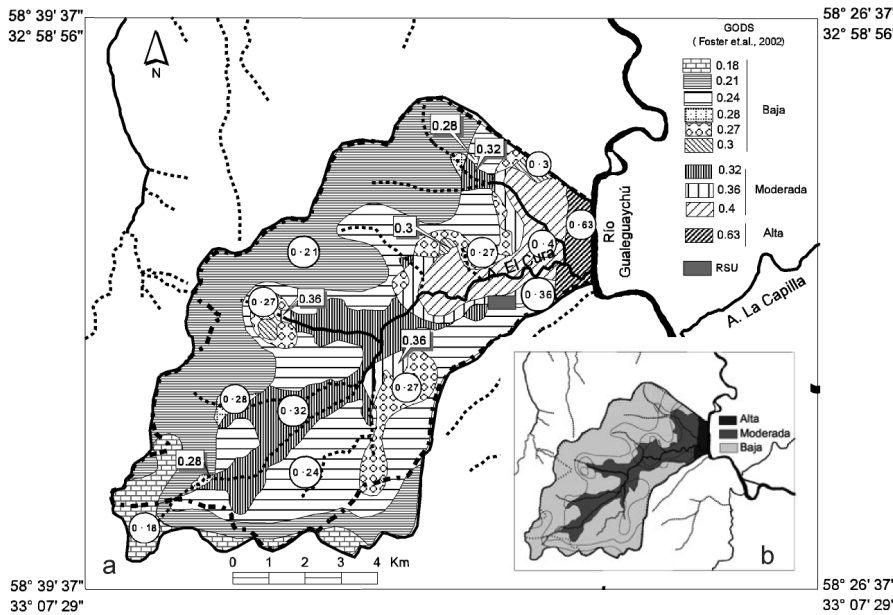
Por lo tanto, en lo que respecta a los bancos de arenas aflorantes en la base de la cantera Irazusta, se reinterpretan aquí como una intercalación fluvial en la Formación Hernandarias. Y no como las arenas

aflorantes y alojantes del acuífero semi-confinado de la Formación Salto Chico. Dato relevante a la hora de interpretar la vulnerabilidad de la cuenca.

**CUADRO 4:** Resultados del método GODS.

Unidad geomorfológica	Tipo de acuífero (G)	Litología (O)	Tipo de Suelo	Índice litológico final	Profundidad del agua (D)	Vulnerabilidad
Planicie loésica (PL)	1	0,5	0,6	0,3	0,6	0,18
		0,5	0,8	0,4	0,7	0,21
		0,7	0,9	0,63	0,8	0,24
					0,9	0,27
					1	0,3
Planicie aluvial de cursos tributarios (PA)	1				0,7	0,28
					0,8	0,32
					0,9	0,36
Terrazas y planicie aluvial del Río Gualeguaychú (TPRG)	1				1	0,4
					1	0,63

\* Valores entre 0,1 a 0,3 corresponden a vulnerabilidad baja; 0,3 a 0,5 moderada; 0,5 a 0,7 alta; 0,7 a 1 extrema



**Figura 11:** Mapas de vulnerabilidad del acuífero libre según el método GODS. a) Áreas definidas según los índices obtenidos con el método. b) Áreas con distintos grados de vulnerabilidad.

**Hidrodinámica, hidroquímica y vulnerabilidad**

A partir del mapa con curvas equipotenciales (Fig. 6) se pudo determinar el carácter efluente del arroyo El Cura, con un flujo subterráneo dominante de SO al NE y otros locales orientados hacia el arroyo y un gradiente hidráulico medio regional del orden de 0,0016. Este comportamiento es característico en ámbitos de llanuras y con excesos hídricos, similar a lo que presenta el área de estudio, siendo éste del orden de 225 mm. En líneas generales, en las zonas llanas existe un notorio control

de los principales cursos de agua sobre el comportamiento hidrodinámico subterráneo, debido a que los cauces de los arroyos y sus planicies aluviales asociadas, constituyen los ámbitos de descarga preferencial, tanto para el acuífero freático como para el semiconfinado subyacente (Auge *et al.* 2005).

En relación a la composición química, en general, se aprecia un predominio de aguas bicarbonatadas cálcicas en áreas coincidentes con los niveles piezométricos más altos y en las divisorias de los afluentes del arroyo El Cura (particular-

mente al NO), quedando así definidas las zonas de recarga dentro de la cuenca. Por debajo de la cota piezométrica de 7,5 m, predominan aguas bicarbonatadas sódicas (Figs. 6 y 8). Se observó asimismo una relación directa entre las unidades geomorfológicas definidas para la cuenca y la hidroquímica: la composición del agua subterránea resultó bicarbonatada cálcica principalmente para la PL y bicarbonatada sódica para la PA y TPRG, con un contenido más bajo de SDT y menor conductividad eléctrica para PL (promedio 377 mg/L y 616 uS/cm) que para PA (579 mg/L y 964 uS/cm). La presencia del anión HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> como ión dominante en las aguas subterráneas en la PL y su composición química bicarbonatada cálcica, apunta a que el acuífero freático se recarga por infiltración de la lluvia, ya que el CO<sub>2</sub> disuelto en el agua, producto de la actividad biológica en el suelo, favorece la disolución del material calcáreo presente en los sedimentos. La composición bicarbonatada sódica de las aguas subterráneas asociadas a la PA y TPRG puede vincularse a distintas causas: 1) las planicies aluviales constituyen zonas de descarga del agua subterránea; 2) predominio de sedimentos de granulometría muy fina, que favorecen los procesos de intercambios catiónicos entre el agua y las arcillas; 3) presencia de la ingresión marina “belgranense” en algunos sectores en cotas inferiores a 10 m. Asimismo, se pueden señalar correspondencias entre la salinidad y la composición química del agua.

En cuanto a los resultados obtenidos con la aplicación de los métodos Ekv y GOD (Fig. 10), no reflejan diferencias significativas, debido a que ambos presentaron una gran zona de vulnerabilidad moderada asociada a PL y PA, y otra alta o extrema, asociada a las TPRG. La diferencia en la definición de zonas vulnerables la presenta el método GODS, que considera la incidencia del suelo debido al rol que desempeña como filtro natural de contaminantes. El mismo permitió determinar tres zonas vulnerables asociadas básicamente a las unidades geomorfológicas descritas en la Figura 4. Si bien en la cualificación de la vulnerabilidad in-

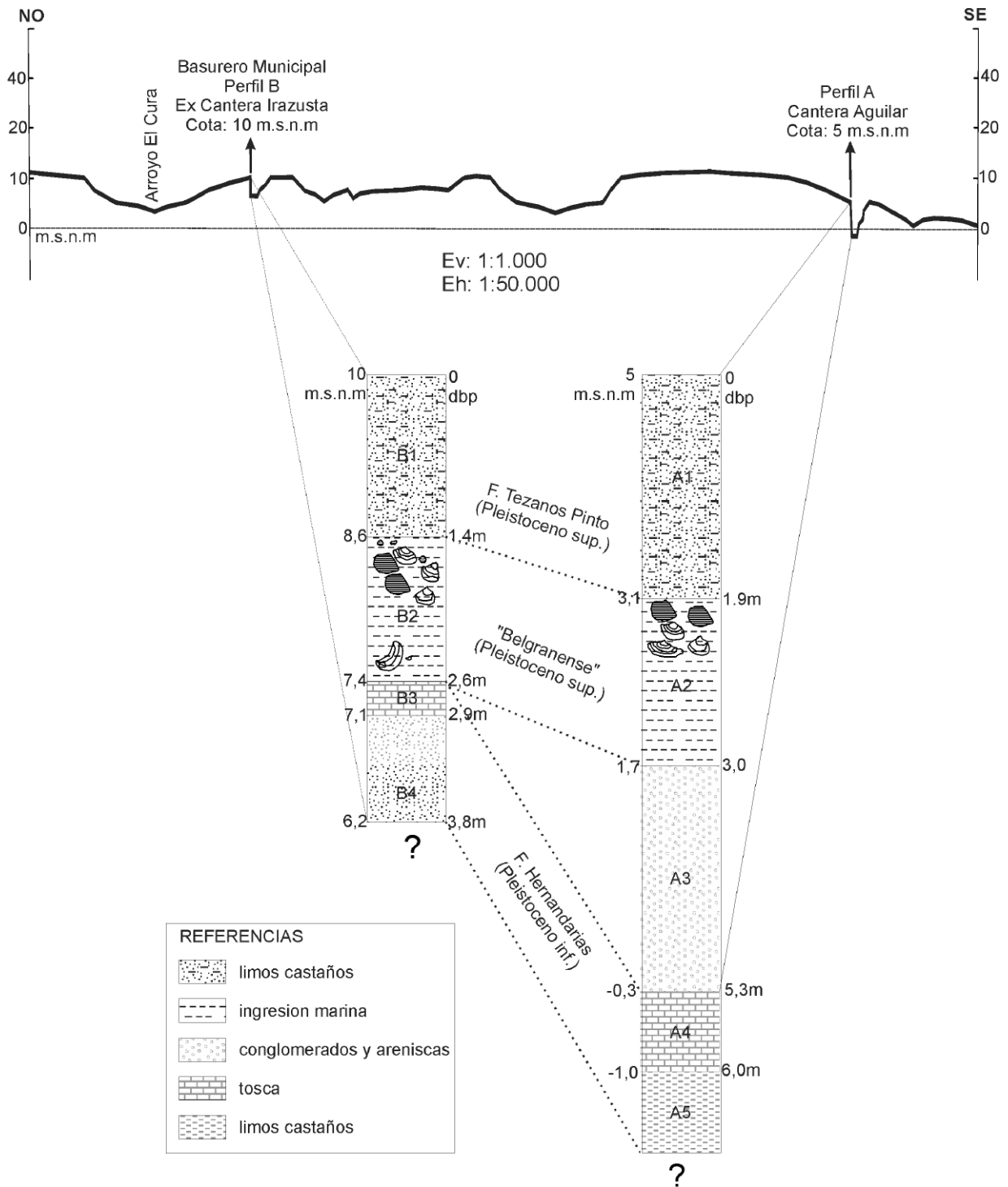


Figura 12: Correlación de los perfiles geológicos relevados en los predios de Irazusta y Aguilar.

trínseca es ampliamente utilizada la profundidad de la superficie freática o espesor de la zona no saturada, el tipo de suelo parece cumplir un rol importante. Por ello, el método GODS que incorpora esta última variable, deriva en un mapa donde el basurero municipal (RSU) se

ubica en un ámbito de vulnerabilidad media (Fig.11).

### CONCLUSIONES

El comportamiento hidroquímico se corresponde con la hidrodinámica subterrá-

nea, pues en las zonas de recarga preferencial (niveles piezométricos más altos) predomina el ión  $Ca^{2+}$  y en la zonas de descarga (niveles piezométricos más bajos) predomina el  $Na^+$ . La evolución de la salinidad del agua subterránea también muestra un vínculo con la hidrodi-



**CUADRO 5:** Datos de perforaciones.

Formación	Perf. (Gchú. 1 1918) Margen oeste del río Uruguay (m.b.b.p.)	Perf. Gchú 2 (Mársico 2004) Margen este del río Uruguay (m.b.b.p.)	Perf M. o Gchú-1 (Silva 1999) Margen oeste del río Uruguay (m.b.b.p.)	Perf. M o Gchú-1 (Benítez y Mársico 2002) Margen oeste del río Uruguay (m.b.b.p.)
La Picada	-----	0 a 8	-----	-----
Tezano Pinto	0 a 4	-----	-----	-----
Hernandarias	4 a 77	8 a 90 (Grupo Punta Gorda)	0 a 6	0 a 6 m (Grupo Punta Gorda)
Salto Chico	77 a 198	90 a 165	6 a 145	6 a 12
Fray Bentos	198 a ?	165 a 296	145 a 380	12 a 80
Puerto Yerúa	No llega	296 a 450	380 a 473	80 a 473
Solari	No llega	450 a 635	473 a 727	473 a 728
Buena Vista (Piramboiá)	No llega	635 a 815	727 a 980	728 a 978
Basamento	No llega	815 a 825	980 a 988	978 a 1000

námica subterránea ya que muestra un aumento de sales conforme a la dirección de flujo regional. Asimismo, cuando se analizan los datos de conductividad eléctrica, SDT y salinidad en relación a las unidades geomorfológicas se observa que los valores más bajos de estos parámetros se vinculan con la unidad PL en la cabecera de la cuenca y divisorias de afluentes (zonas de recarga), y los valores más altos en PA y TPRG (zonas de descarga).

Con respecto a las metodologías aplicadas para establecer la vulnerabilidad de la cuenca, la que considera a los suelos (GODS) parece derivar en una mejor definición de la misma (Fig. 11), obteniéndose tres grados de vulnerabilidad asociados básicamente a las unidades geomorfológicas (alta para TPRG; moderada para PA y baja para PL) y a las litologías que las componen (PL con las Formaciones Hernandarias y Tezanos Pinto, y PA con Fm La Picada y planicie aluvial actual). Asimismo, pudo observarse que las áreas más vulnerables están asociadas a los niveles piezométricos más bajos.

Los resultados obtenidos con los métodos EKv y GOD no reflejan diferencias significativas. Ambos brindaron dos grados: una gran zona de vulnerabilidad media/moderada asociada a PL y PA, y otra alta o extrema, asociada a las TPRG. En virtud de lo expuesto, el método GODS parece en principio como el más adecuado para el ámbito estudiado. Resulta importante señalar que la incidencia de basurero mu-

nicipal en la calidad del agua subterránea, además de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero libre, dependerá fundamentalmente de su vulnerabilidad específica, o sea aquella que considera también el comportamiento de las sustancias contaminantes presentes en los lixiviados, en relación a su toxicidad, solubilidad, movilidad y persistencia en el agua.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de la especialista en Gestión Ambiental-Arquitecta Irma Rivas y al Dr. Miguel Auge por la revisión del trabajo. Asimismo, a los técnicos Eduardo Llambías y Gabriel Giordano por su apoyo logístico en el campo.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Auge, M. 1995. Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. Universidad de Buenos Aires, (inédito): 1-65, Buenos Aires.
- Auge, M. 2003. Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos. Ebook: 1-38. RedIRIS Red Académica y Científica de España, <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/indexm.html>.
- Auge, M., Sánchez, C. y Santi, M. 2005. Hidrogeología de la región arroceras de Entre Ríos. 4º Congreso Hidrogeológico Argentino, Actas CGO 01: 1-9, Río Cuarto.
- Benítez, J. y Mársico, D.P. 2002. Contribución al conocimiento del subsuelo de Entre Ríos. La perforación Gualaguaychú-1. En Cabaleri N.,

- Cingolani, C.A., Linares, E., López de Luchi, M.G., Ostera, H.A. y Panarello, H.O. (eds.) 15º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 581-587, El Calafate.
- Bocanegra, E., Massone, H., Martínez, D., Civit, E. y Farenga, M. 2001. Groundwater contamination: risk management and assessment for landfills in Mar del Plata, Argentina. *Environmental Geology* 40: 732-741.
- Bossi, J. 1969. Geología del Uruguay. Universidad de la República, Colección Ciencias 2, 464 p., Montevideo.
- Boujon, P., Sanci, R., Stöckli, F. y Dapeña, C. 2006. Caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas de la ciudad de Gualaguaychú, Entre Ríos, Argentina. 8º Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, Memorias Anais: 32, Asunción.
- Chebli, G., Tófaló, O.R. y Turazzini, G. 1989. Mesopotamia. En Chebli, G. y L. Spalletti (eds.) Cuencas Sedimentarias Argentinas. Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica 6: 79-100, Tucumán.
- Dalla Salda, L. 1999. Cratón del Río de la Plata. Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29: 97-106, Buenos Aires.
- De Alba, E. y Serra, N. 1959. Aprovechamiento del Río Uruguay en la zona de Salto Grande. Informe sobre las condiciones y características geológicas. Dirección Nacional de Geología y Minería, Anales 11: 35 p., Buenos Aires.
- De Alba, E. 1953. Geología del Alto Paraná en relación con los trabajos de derrocamiento entre Ituzzaingó y Posadas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 8: 129-161.
- Díaz, E. L. y Duarte, O.C. 2000. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Río Gualaguaychú con fines de riego de arroz. República Argentina. En Olmo Alarcón, M. y López Geta, J.A. (eds.) Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología, Instituto Geológico y Minero de España, 145-149.
- Dirección General de Minas, Geología e Hidrogeología 1918. Perforación N° 1 en Gualaguaychú. Perfil N° 367, (inédito). Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires.
- Falconer, J.D. 1931. Terrenos Gondwánicos del Departamento Tacuarembó. Memoria explicativa del mapa geológico. Instituto Geológico del Uruguay, Boletín 15: 1-17, Montevideo.
- Favetto, A., Pomposiello, C., Sainato, C., Dape-

- ña, C. y Guida, N. 2005. Estudio geofísico aplicado a la evaluación del recurso geotermal en el sudeste de Entre Ríos. *Revista de la Asociación Geológica* 60: 197-206.
- Filí, M., Tujchneider, O., Perez, M. y Paris, M., 1994. Investigaciones geohidrológicas en la provincia de Entre Ríos. En: Bocanegra y Rappacini (eds.) *Temas actuales de la Hidrología subterránea*. Consejo Federal de Inversiones y Universidad Nacional de Mar del Plata: 299-313, Mar del Plata.
- Filí, M. F. 2001. Síntesis Geológica e Hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Ríos - República Argentina. *Boletín Geológico y Minero* 112: 25-36.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. y Paris, M. 2002. Groundwater Quality Protection. A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies, Groundwater Management Advisory Team (GW•MATE) of The World Bank, 26 p. Washington, D.C.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information 38: 69-86.
- Gentili, C. y Rimoldi, H. 1979. Mesopotamia. Segundo Simposio Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, Actas 1: 185-223, Córdoba.
- Guida, N. y González, M. 1984. Evidencias paleoestuarías en el sudoeste de Entre Ríos, su evolución con niveles marinos relativamente elevados del Pleistoceno Superior y Holoceno. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 577-594, Bariloche.
- Herbst, R. 1969. Nota sobre la geología de Corrientes. 4° Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 3: 87-95, Mendoza.
- Herbst, R. 1971. Esquema estratigráfico de la provincia de Corrientes, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 26: 221-243.
- Herbst, R. 1980. Consideraciones estratigráficas y litológicas sobre la Formación Fray Bentos (Oligoceno inferior-medio) de Argentina y Uruguay. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 35: 308-317.
- Herbst, R. y Santa Cruz, J.N. 1985. Mapa Geológico de la Provincia de Corrientes, 1: 500.000. Secretaría de Minería. Dirección Nacional del Servicio Geológico. Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos, Buenos Aires.
- INDEC 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. [www.censo2010.indec.gov.ar/CuadrosDefinitivos/P2-D\\_30\\_56.pdf](http://www.censo2010.indec.gov.ar/CuadrosDefinitivos/P2-D_30_56.pdf)
- INTA 2006. Carta de Suelos de la República Argentina, Departamento Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos. Serie de Relevamiento de Recursos Naturales 23, INTA Paraná, Entre Ríos.
- Iriondo, M. 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral* 11: 125-141.
- Iriondo, M. 1996. Estratigrafía del Cuaternario de la cuenca del Río Uruguay. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 4: 15-25, Buenos Aires.
- Iriondo, M. y Kröhling D. 2007. La Formación El Palmar (Informalmente Fm. Salto Chico) y el Acuífero San Salvador, Entre Ríos. 5° Congreso Argentino de Hidrogeología, Actas: 433-441, Paraná.
- Lambert, R. 1940. Memoria explicativa de la carta geológica de reconocimiento del departamento de Paysandú y alrededores de Salto. Instituto Geológico del Uruguay, Boletín 27b: 1-41, Montevideo
- Margat, J. 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution. Bases de la cartographie. BRGM # 68. SLG 198 HYD. Orléans, France.
- Mársico, D. 2004. Informe Técnico, Geológico y Ambiental de la perforación Gualeguaychú 2, Entre Ríos (A.ER.Xpgychu-2), (inédito). Ente Regulador de los Recursos Termales de la Provincia de Entre Ríos.
- Martinez, D., Bocanegra, E., Massone, H., Fajardo, D., Del Rio, L. y Cionchi, J. 1993. Los Residuos Sólidos Domiciliarios del Partido de General Pueyrredón (Provincia de Buenos Aires) desde una Perspectiva Geológico-Ambiental. Parte II: Deterioro en la Calidad de las Aguas Subterráneas debido al lixiviado de los Sitios de Disposición Final. 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 6: 311-317, Mendoza.
- Martínez, S. y Del Río, C.J. 2005. Las ingresiones marinas del Neógeno en el sur de Entre Ríos (Argentina) y litoral oeste de Uruguay y su contenido malacológico. En: Aceñolaza (ed.) *Temas de la Biodiversidad del litoral fluvial argentino II*. INSUGEO, Miscelánea 14: 13-26.
- Orgeira, M., Vásquez, C. y Ostera H. 2004. Relevamiento magnetométrico terrestre de los rellenos sanitarios: estudio piloto en Gualeguaychú, Entre Ríos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 501-505.
- Padula, E. y Mingramm, A. 1968. Estratigrafía, distribución y cuadro geotectónico-sedimentario del "Triásico" en el subsuelo de la llanura Chacoparanense. 3° Jornadas Geológicas Argentina, Actas 1: 291-331, Buenos Aires.
- Panarello, H., Dapeña, C., Ostera, H., Stöckli, F. 2005. Caracterización química e isotópica preliminar del basurero municipal de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos, Republica Argentina. 4° Congreso Hidrogeológico Argentino, Actas 2: 17-26. Río Cuarto.
- Pereyra, F.X., Tchilinguirian, P., Baumann, V., Boujon, P., Elissondo, M. y Palma, Y. 2009. Hoja de Peligrosidad Geológica, Gualeguaychú. Escala 1:250.000. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada-Servicio Geológico Minero Argentino, 67 p., Buenos Aires.
- Pereyra, X. F., Tchilinguirian, P. y Baumann, V. 2002. Hoja Geológica Gualeguaychú 3360-IV Provincias de Buenos Aires y Entre Ríos. Instituto de Geología de Recursos Mineros-Servicio Geológico Minero Argentino, 70 p., Buenos Aires.
- Pomposiello, C., Dapeña, C., Boujon, P., Favetto, A. 2009. Tomografías eléctricas en el Basurero Municipal Ciudad de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos. Evidencias de contaminación. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64: 603-614.
- Prezzi, C., Orgeira, M.J., Ostera, H.A. y Vazquez, C.A. 2005. Ground magnetic survey of a municipal solid waste landfill: pilot study in Argentina. *Environmental Geology* 47: 889-897.
- Reig, O. 1956. Sobre la posición sistemática de "Zygoletes paranensis" Amegh. y de "Zygoletes entrerrianus" Amegh. Centro de estudiantes del doctorado en ciencias naturales de Buenos Aires. *Revista Holmbergia* 5: 209-226.
- Richards, L.A. 1965. Physical condition of water in soil. En Black, C.A. (ed.) *Analysis, Part. 1. Agronomy* 9. American Society of Agronomy. Publ. Madison, 770 p., Wisconsin.
- Russo, A., Ferello, R.E. y Chebli, G. 1979. Cuenca Chacopampena. En *Geología Regional Argentina*. 2° Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias

- cias: 139-183, Córdoba.
- Sanci, R., Panarello, O., Ostera, H.A. y Panarello, H.O. 2009. Determinación del flujo de CO<sub>2</sub> fuentes antrópicas: sitio de disposición final municipal, Gualaguaychú, Entre Ríos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 533-544.
- Santa Cruz, J. N. 1972. Estudio Sedimentológico de la Formación Puelches en la Provincia de Buenos Aires. *Revista Asociación Geológica Argentina* 27: 5-62.
- Silva Busso, A. 1999. Contribución al conocimiento geológico e hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, (inédita), Buenos Aires.
- Silva Busso A. y Fernández Garrasino C.A. 2004. Presencia de las Formaciones Piramboia y Botucatu (Triásico-Jurásico) en el subsuelo oriental de la provincia de Entre Ríos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 141-151.
- Stiff, H.A., Jr. 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology* 10: 15-17.
- World Meteorological Organization (WMO). Monthly Climatic Data for the World-Select Publication.url. <https://explore.data.gov/d/va3j-cabu-Thornthwaite>. C.W. y Matter. J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Drexel Institute of Technology Publications in Climatology* 10: 185-311.
- Sanford, R. y Lange, F. 1960. Basin study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline, South Brazil. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 44: 1361-1370.
- Santi, M., Bianchi, G. y Rezzónico, G. 2009. Agua Subterránea en el Noreste de Entre Ríos. 6º Congreso Argentino de Hidrogeología. Planificación y Gestión de Aguas Subterráneas, Actas: 63-72.
- Tofalo, O.R. 1986. Depósitos clásticos y carbonáticos del Cretácico Superior, Formación Puerto Yerúa, Entre Ríos. 1º Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 201-204, La Plata.
- Tófalo, O.R. 1987. Facies de loess y calcretes pedogénicos de la Formación Arroyo Ávalos (Oligoceno), Entre Ríos y Corrientes, Argentina. 10º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 275-278, Tucumán.
- Tujchneider, O y Filí, M. 1988. Hidrogeología de la cuenca del arroyo Feliciano (provincia de Entre Ríos, Argentina) *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 43: 163-174.
- Valencio, S. Ostera, H. y Panarello, H. 2003. Monitoring <sup>13</sup>C in CO<sub>2</sub> soil gas from a landfill: first results from a case study. 4º South American Symposium on isotope Geology, Actas 1: 128-130, Salvador, Brasil.
- Wahsburne, C. 1930. Petroleum Geology of the State of São Paulo. *Boletim Comissão Geográfica e Geológica do Estado de São Paulo*, 22 p., São Paulo.
- White, I.C. 1908. Relatorio sobre as "Coal measures" e rochas asociadas do sul do Brasil. *Relatório Final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil*. Imprensa Nacional 1: 2-300, Río de Janeiro.

Recibido: 12 de noviembre, 2012  
Aceptado: 26 de junio, 2013