

Caracterización hidrodinámica e hidroquímica de una cuenca rural utilizando una red monitorea con perspectiva ambiental

Bruno DIPARDO^{1,2,4}, Rosario Soledad BARRANQUERO^{2,4,7}, Silvina Graciela ETCHEVERRIA^{3,4}, Roberto LANDA^{4,5}, Bethania NICORA^{3,4}, Marcelo Raúl VARNI^{4,6} & Víctor Alejandro RUIZ de GALARRETA²

¹Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. ² Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales -CIC-, ³Facultad de Ciencias Humanas, ⁴Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Pinto 339, CP 7000, Tandil, Argentina; ⁵Facultad de Ciencias Veterinarias. ⁶ Instituto de Hidrología de Llanuras. ⁷Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Bruno Dipardo: brunodipardo@gmail.com; Rosario Soledad Barranquero: rosario0405@gmail.com; Silvina Graciela Etcheverria: silvinaetcheverria@gmail.com; Roberto Landa: rlanda@vet.unicen.edu.ar; Bethania Nicora: nicorabethania@gmail.com; Marcelo Raúl Varni: marcelovarni@gmail.com; Víctor Alejandro Ruiz de Galarreta: agala.fch@gmail.com

Abstract: Hydrodynamic and hydrochemical characterization of a rural basin using a monitoring network with an environmental perspective. This work was developed in a rural basin of the Tandil district, Province of Buenos Aires, Argentina. Its objective was to design an environmental network for monitoring the groundwater resource in the Chapaleofú stream basin, which integrates, beyond the classical hydrological view that evaluates the hydrodynamic and hydrochemistry, physicochemical and resource management variables in each sampling site, in a basin located in a rural area. 104 perforations were recorded and 36 were selected by applying a mesh over the basin in a GIS. In each cell, a perforation was selected comparing the variables: accessibility, jacketing, maintenance, electrical conductivity, distance to the nearest perforation, distance to the center of the cell, direct sample from the aquifer, and sampling and water depth in the same drilling. Hydrochemistry and hydrodynamic were evaluated in a campaign in which samples were taken for physicochemical analysis and the depths of the water level were measured. The variables of resource management surveyed (maintenance, condition, use of soil in the drilling lot and use of soil in the establishment) were related to water potability. A second reduction of the perforations was made, removing four that presented poor quality. Twenty boreholes were selected in the hills sector, seven in the piedmont sector and five in the plain. The hydrochemistry ranged from calcium and / or magnesium bicarbonate in the hills sector to sodium bicarbonate in the plain. No relationship was found between resource management and water quality. This shows the effectiveness in the selection of uncontaminated sites.

Key words: drainage basin, water table, water chemistry, land use, environmental monitoring

Resumen: El presente trabajo se desarrolló en una cuenca rural del partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Su objetivo fue diseñar una red ambiental de monitoreo del recurso hídrico subterráneo en la cuenca del arroyo Chapaleofú, que integre, más allá de la mirada hidrológica clásica (hidrodinámica e hidroquímica), variables fisicoquímicas y de manejo del recurso en cada sitio de muestreo. De 104 perforaciones censadas se seleccionaron 36 aplicando en un SIG un mallado sobre la cuenca. En cada celda se seleccionó una perforación comparando las siguientes variables: accesibilidad, encamisado, mantenimiento, conductividad eléctrica, distancia a la perforación más cercana, distancia al baricentro de la celda, muestra directa del acuífero y toma de muestra y profundidad del nivel del agua en la misma perforación. La hidroquímica y la hidrodinámica se evaluaron en una campaña donde se tomaron muestras para análisis fisicoquímico y se midieron las profundidades del nivel del agua. Se relevaron variables de manejo del recurso (mantenimiento, estado, uso de suelo en el lote de la perforación y uso de suelo en el establecimiento) y se relacionaron con la potabilidad del agua. Se eliminaron otras 4 perforaciones que presentaron agua no potable. Se seleccionaron 20 perforaciones en el sector de serranías, 7 en el piedemonte y 5 en la llanura. La hidroquímica varió de bicarbonatada cálcica y/o magnésica en la serranía a bicarbonatada sódica en la llanura. No se encontró relación entre el manejo del recurso y su calidad, esto muestra la efectividad en la selección de sitios no contaminados.

Palabras clave: cuenca de drenaje, nivel freático, química del agua, uso de la tierra, vigilancia ambiental

INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud -OMS- (2017) el acceso al agua potable segura es esencial para la salud, un derecho humano básico y una política efectiva para la protección sanitaria de la población. El agotamiento de los recursos hídricos subterráneos no renovables y la degradación de su calidad es un problema creciente en muchas regiones. Las fuentes de contaminación del agua subterránea dependen principalmente de la actividad humana que se realice sobre el suelo (Reyes Gomez *et al.*, 2017; Tirkey *et al.*, 2017).

En la llanura pampeana argentina desde la década de 1990 y comienzos del nuevo siglo una intensificación agrícola estuvo acompañada por una intensificación de los planteos ganaderos. Este nuevo escenario impuso una alta densidad de animales sometidos a un engorde a corral (conocido como *feed-lot*) con granos y forrajes procesados. La agricultura comenzó a aportar la mayor parte de los insumos que requiere la ganadería, y ambas actividades, que antes se articulaban en esquemas extensivos de rotación de cultivos, ahora aparecen desacopladas y altamente especializadas, inclusive con administraciones independientes (Vigglizo, 2007). Tal cambio introdujo una modificación adicional en la funcionalidad de estos ecosistemas que, para sostener una mayor productividad, reciben más insumos (fertilizantes y pesticidas) y generan más residuos y desechos que afectan al ambiente en general y a los recursos hídricos en particular (Vigglizo, 2008).

La agricultura es la base de la alimentación mundial (FAO, 2018) pero produce impactos negativos de diversas maneras y en distintos niveles sobre los recursos naturales (Goudie, 2013). Sus principales impactos son: degradación de suelos; afectación de ecosistemas terrestres y acuáticos; contaminación de aguas superficiales y subterráneas; presión sobre la oferta hídrica natural; y, en algunas situaciones, disminución de la calidad del aire (Freeman *et al.*, 2005). La contaminación de recursos hídricos subterráneos y superficiales, está asociada a la aplicación de agroquímicos, principalmente fertilizantes y pesticidas, que son transportados de diferentes maneras hasta los cuerpos hídricos. A este tipo de contaminación se la denomina contaminación difusa por agroquímicos (Custodio *et al.*, 2012), y se refiere a los contaminantes que afectan los cuerpos hídricos y que provienen de fuentes no puntuales bien sea de origen urbano o rural (Ferrier *et al.*, 2005).

En este contexto la elaboración de un diag-

nóstico de la situación ambiental del recurso hídrico subterráneo realizado a través de la información recolectada en redes de monitoreo es la base para la elaboración de planes, programas y proyectos para realizar una gestión ambientalmente sustentable.

En el enfoque de los recursos hídricos como sistemas complejos y dinámicos, en el cual las actividades humanas son inherentes a los mismos, cobra importancia integrar los aspectos naturales y sociales para mejorar su comprensión; sobre todo al advertir el dominio en la investigación por parte de hidrólogos, con una contribución limitada y posiblemente insuficiente de científicos sociales (Krueger *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2018).

En los trabajos antecedentes analizados es preponderante la mirada hidrológica por sobre la social, aunque comienza a identificarse la necesidad de considerar al hombre como actor importante en las evaluaciones de calidad de agua. Estos estudios analizaron parámetros físico-químicos y/o microbiológicos de los sitios de muestreo y: evaluaron qué cantidad de población consume agua potable y qué cantidad consume agua no potable (Singhal *et al.*, 2020); analizaron relaciones entre calidad del agua y efectos a la salud (Tirkey *et al.*, 2017); relacionaron calidad del agua con usos de suelo para conocer la respuesta de los acuíferos a las influencias del hombre (Reyes Gomes *et al.*, 2017); analizaron la calidad de agua para consumo humano y su variación espacial y temporal (Masoud *et al.*, 2018); y evaluaron zonas contaminadas explicando sus posibles fuentes de contaminación (Bodrud-Doza *et al.*, 2018 y Rezaei *et al.*, 2019).

En este marco el objetivo del presente trabajo fue diseñar una red de monitoreo del recurso hídrico subterráneo con una perspectiva ambiental, que integre, más allá de la mirada hidrológica clásica que evalúa la hidrodinámica e hidroquímica, variables físico-químicas y de manejo del recurso en cada sitio de muestreo dentro de una cuenca emplazada en una zona rural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

El área de estudio se ubica en el partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Este partido cuenta con una superficie de 4836 km², dentro de la cual se identifican ocho cuencas hidrográficas (Fig. 1 y Tabla 1) cuyos arroyos tienen sus nacientes en los ambientes serranos del sistema de Tandilia (Ruiz de Galarreta & Banda Noriega, 2005). Estas cuencas presentan una ex-

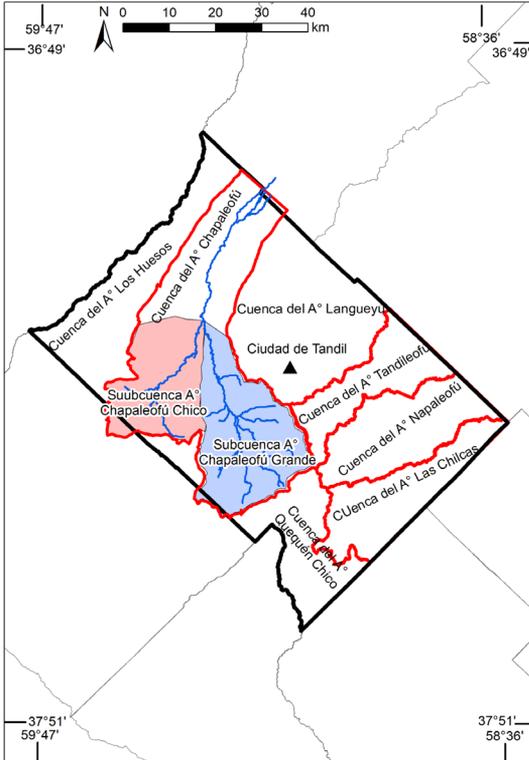


Fig. 1. Ubicación de las cuencas del partido de Tandil.

tensión regional, es decir que sus límites están por fuera de los límites del partido, y se encuentran dentro de la región hidrogeológica serrana que se corresponde con los dos sistemas serranos de la provincia, Tandilia y Ventania (González, 2005). La cuenca que se estudió en este trabajo fue la del arroyo Chapaleofú. La misma se desarrolla predominantemente en el espacio rural y cuenta con los asentamientos de Azucena, María Ignacia (Estación Vela), Gardey y La Pastora que poseen las características típicas de concentraciones de población rural, como el desarrollo económico vinculado a actividades agropecuarias. Esta cuenca presenta dos subcuencas: la del arroyo Chapaleofú Chico y la del arroyo Chapaleofú Grande. La cuenca del arroyo Chapaleofú es la de mayor extensión del partido.

Los sectores geomorfológicos definidos para el partido de Tandil (serranías, piedemonte y llanura) encuentran su correspondencia en el área de estudio. El sector de serranías se caracteriza por la presencia de sierras, cerros aislados y valles, relacionados con la presencia de bloques elevados por fallas directas. En este sector se encuentran las más altas pendientes y los valles de los cursos de aguas se hallan bien definidos, y dentro de

Tabla 1. Superficie de cuencas del partido de Tandil

Cuenca	Superficie (km ²)
A° de Los Huevos	628
A° Chapaleofú	1484
A° Langueyú	687
A° El Perdido	193
A° Tandileofú	314
A° Las Chilcas	461
A° Napaleofú	723
A° Quequén Chico	346

ella se ubican casi la totalidad de las subcuencas de los arroyos Chapaleofú Chico y Chapaleofú Grande. El piedemonte se ubica en forma continua a las serranías, se caracteriza por tener un ángulo de pendiente más suave que el sector anterior; se observa la presencia de bloques de gran tamaño y conos aluviales, y el drenaje presenta un diseño distributivo. En este sector se ubica una pequeña porción de las subcuencas antes mencionadas. La última unidad morfológica es la llanura, reconocida hacia el Noreste (NE) por la presencia de pendientes muy suaves. Es una zona de acumulación y transporte de materiales más finos, con fuerte predominio de sedimentos de origen eólico. El drenaje es poco definido y pobremente integrado, con cauces estrechos y cursos temporarios que en ciertos casos desaparecen en suaves depresiones (Ruiz de Galarreta & Banda Noriega, 2005). Siguiendo los criterios utilizados en la delimitación de los sectores geomorfológicos de la cuenca del arroyo Langueyú (Ruiz de Galarreta *et al.*, 2011) se ubicó en el presente trabajo al sector de serranías por encima de los 170 msnm, al sector de piedemonte entre los 170 y 140 msnm y al de llanura por debajo de los 140 msnm.

A pesar de contar con varios cursos superficiales, la mayoría de éstos son temporarios y prácticamente no hay en el partido de Tandil cuerpos de agua lénticos. En términos de aprovechamiento, el agua subterránea cobra una gran relevancia ya que tanto el suministro para actividades rurales como urbanas provienen de esta fuente.

Respecto al recurso hídrico subterráneo, la secuencia hidrológica que aloja al sistema geohidrológico consta de tres unidades geológicas: 1) Postpampeano-pampeano: cuya litología se corresponde con arenas eólicas, fluviales, limos y limos loessoides; 2) Pampeano: su litología

integra limos loessoides y limos arenosos; y 3) Basamento Hidrogeológico: formado por cuarcitas, lutitas, arcilitas, dolomitas, granitos, gneises y milonitas.

Los sedimentos pampeanos y postpampeanos mencionados conforman la cubierta sedimentaria Cenozoica sobrepuesta al basamento cristalino, la cual corresponde al medio poroso en el que se emplaza el sistema acuífero estudiado en este trabajo. El límite en profundidad del sistema está determinado precisamente por el basamento cristalino que funciona como hidroapoyo regional. Por ende, el espesor de la capa acuífera varía desde un mínimo en los sectores de afloramiento del basamento, incrementándose en dirección Noreste (Ruiz de Galarreta & Banda Noriega, 2005). En el límite Norte de la subcuenca del arroyo Chapaleofú Chico (Fig. 1) la profundidad del basamento cristalino es de 27 metros (Pessolano, 2010). Si bien aún no se ha realizado la determinación de la profundidad del basamento en el límite de la cuenca del arroyo Chapaleofú propiamente dicha (producto de la unión de los arroyos Chapaleofú Grande y Chico) se infiere que la profundización tiene características similares a la que ocurre en la cuenca del arroyo Languetú; allí con una extensión aproximada en el sentido del flujo de 32 km el basamento se profundiza hasta los 200 m en el límite Noreste de la cuenca y de manera irregular, escalonada (Barranquero *et al.*, 2016). En la cuenca del Chapaleofú, con una extensión lineal en el sentido del flujo superficial y subterráneo de 74 km, se esperaría una profundidad de basamento mayor en el límite Noreste.

Si bien el acuífero freático, que forma parte del gran acuífero pampeano, ha sido definido como multiunitario por sus discontinuidades en profundidad, éstas son de carácter local, pudiendo definirse el medio que aloja el agua como una capa acuífera integrada por sedimentos pampeanos y postpampeanos (Sala *et al.*, 1981; Sala *et al.*, 1987).

El área de recarga se corresponde principalmente con el sector de serranías. En tanto la descarga, que se produce hacia el Norte de la cuenca, en el sector de llanura, representa un volumen pequeño. Resulta de mayor importancia la descarga regional hacia la cuenca del río Salado, mucho más al NE del área incluida en este estudio.

Enfoque metodológico

Diseño de la red de monitoreo. En primer lugar se delimitó la cuenca del arroyo Chapaleofú mediante la unificación de 11 cartas topográficas

de escala 1:50.000. Los límites de la cuenca fueron definidos siguiendo el diseño de las curvas de nivel, excepto en el límite Noreste que fue determinado mediante un cierre arbitrario en el límite del partido de Tandil con el de Rauch; el límite natural de la cuenca es hacia el NE en la cuenca del río Salado. El resultado de esta delimitación fue digitalizado en el *software* ArcMap 10.2 mediante la previa digitalización de las cartas topográficas.

Una vez definida el área de estudio se procedió a realizar un registro de las perforaciones existentes en la misma. El registro constó de 104 perforaciones de las cuales se seleccionaron 36. Cada sitio se ubicó con GPS en campo y luego en el *software* ArcMap 10.2.

La principal limitación de este estudio es la escasez de recursos económicos para la investigación. Además, no existe una red de monitoreo *ad hoc*, en la que se pueda elegir la profundidad y las condiciones de la perforación, y la frecuencia de muestreo y el tipo de determinaciones son limitadas. La imposibilidad de realizar perforaciones *ad hoc* para el estudio limita además el contar con perfiles hidrogeológicos detallados y ensayos hidráulicos para definir los parámetros del acuífero; no obstante, se está gestionando frente al ente Obras Sanitarias Tandil, que provee agua potable a algunos de los asentamientos rurales de la cuenca, que faciliten la información de las perforaciones que poseen. A pesar de esto, considerando la falta de estudios antecedentes en la cuenca, esta investigación contribuirá al establecimiento de las concentraciones de línea base y distribución geográfica de oligoelementos en la cuenca del arroyo Chapaleofú. Estos avances serán útiles para la toma de decisiones, contribuyendo a la priorización de las situaciones más riesgosas, en cuanto a la potencialidad de contaminación de los recursos hídricos, y las limitaciones existentes en cuanto a disponibilidad de agua adecuada para los diferentes usos que se requieran.

Para la selección de las perforaciones se realizó un muestreo por juicio o subjetivo. En este tipo de muestreo se emplea el conocimiento del experto y la opinión personal para identificar a los elementos de la población que deben incluirse en la muestra (Anderson *et al.*, 2008). Se aplicó una técnica de ArcMap 10.2 que generó un mallado sobre la cuenca. En cada celda del mallado (que presenta una superficie de 36 km²) se compararon las perforaciones para seleccionar una perforación por celda, con el fin de asegurar una distribución geográficamente homogénea de las

mismas, teniendo en cuenta criterios hidrológicos y geohidrológicos. Ante la falta de antecedentes hidrogeológicos específicos en la cuenca, que definen los parámetros hidráulicos, y al no contar con fondos para realizar perforaciones *ad hoc*, se contemplaron las características hidrogeológicas a nivel regional definiendo la necesidad de representar en la red monitorea los tres sectores geomorfológicos presentes en la cuenca (serranías, piedemonte y llanura) que tienen a su vez claras diferencias de funcionamiento hidrogeológico entre ellos.

La selección de perforaciones fue realizada mediante la sumatoria de valores de las variables analizadas que compusieron un índice, con valores entre 12 y 18, siendo aquellos más altos los óptimos y por ende los seleccionados. El objetivo de la red monitorea fue reflejar las características del recurso hídrico subterráneo lo más natural posible y evitar incluir sitios que presenten una contaminación puntual. Las variables que se compararon y se consideraron en forma conjunta para la selección fueron: accesibilidad, presencia de encamisado en la perforación, mantenimiento sanitario de la misma, valores de conductividad eléctrica acordes a datos antecedentes, distancia a otras perforaciones seleccionadas, distancia al baricentro de la celda, posibilidad de toma de muestra directa del acuífero, y posibilidad de toma de muestra de agua y medición de nivel en la misma perforación.

Cada una de las variables presentó dos valores posibles (0 y 2), excepto accesibilidad que constó de tres valores probables (0, 2 y 4), con el fin de ponderar esta variable sobre el resto. Cada una de las perforaciones correspondientes a la misma celda sumó un valor total mediante la aplicación del índice. La perforación que mayor cantidad de puntos obtuvo en cada celda fue la que resultó elegida. En la Tabla 2 podemos ver la condición que se priorizó para cada variable.

La selección de los sitios incluyó perforaciones que se encuentran fuera de los límites de la cuenca con el fin de verificar los mismos, especialmente aguas abajo de las divisorias serranas. Los puntos que se encuentran fuera de la cuenca fueron comparados únicamente con otros de la misma condición. La definición de las variables de los medios físicoquímico y socioeconómico a relevar se realizó recopilando antecedentes en general y dentro de otras cuencas del partido de Tandil en particular.

Evaluación hidroquímica e hidrodinámica. Con las 36 perforaciones seleccionadas se realizó

Tabla 2. Variables tenidas en cuenta en la selección de perforaciones.

Variable	Condición	Valor
Accesibilidad (camino, contacto)	Buena	4
	Regular	2
	Mala	0
Presencia de encamisado	Si	2
	No	0
Mantenimiento sanitario de la perforación	Bueno	2
	Malo	0
Conductividad eléctrica acorde a la zona	Si	2
	No	0
Distancia a la perforación seleccionada más cercana	Menor cercanía	2
	Mayor cercanía	0
Distancia al baricentro de la celda	Mayor cercanía	2
	Menor cercanía	0
Muestra directa del acuífero	Si	2
	No	0
Toma de muestra y medición de nivel en el mismo pozo	Si	2
	No	0

un muestreo en noviembre de 2019. El mismo consistió en medir la profundidad del nivel de agua en cada una de las perforaciones para luego calcular su nivel freático, y tomar una muestra para analizar parámetros fisicoquímicos. Dicho muestreo se realizó en cuatro días consecutivos. Se trabajó con el Software ArcMap 10.2 para realizar el mapa equipotencial. A partir de éste se calcularon los gradientes hidráulicos y las velocidades efectivas en los distintos sectores geomorfológicos de la cuenca. Para el cálculo de la velocidad efectiva se tomó una permeabilidad de 5 m/día y una porosidad efectiva para el material limo arcilloso y arenoso de 10%; estos parámetros utilizados fueron estimados por Ruiz de Galarreta & Banda Noriega (2005) para el partido de Tandil.

Los pozos muestreados fueron de tipo somero, es decir que sus profundidades se hallan entre 2 y 3 metros por debajo del nivel freático del acuífero. Todos ellos presentaron algún sistema de extracción como molinos, bombas eléctricas sumergibles, o bombas superficiales. En todos los casos se dejó correr agua, al menos 4 minutos, antes de tomar la muestra para asegurarse de no tomar agua que haya estado estancada en la cañería. Las muestras fueron colectadas en botellas de medio litro de PET (Polietileno Tereftalato) que, a diferencia de otros plásticos como el polie-

tileno, no permite la difusión de gases (Castany, 1975). Los recipientes fueron enjuagados con el agua a colector y cerrados sin dejar cámara de aire. Las determinaciones fisicoquímicas realizadas incluyeron: conductividad eléctrica, pH, temperatura, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio. No se analizaron nitritos debido a la presunción de características aeróbicas del acuífero, ya que en un medio oxidante se espera encontrar todo el nitrógeno en forma de nitrato. La conductividad eléctrica, el pH y la temperatura del agua fueron medidas *in situ*, considerando la susceptibilidad que presentan con respecto a los cambios ambientales (Appelo & Postma, 1993), utilizando el medidor multiparamétrico AQUACOMBO HM3070. Las sales disueltas totales se calcularon multiplicando el valor de conductividad eléctrica por 0.7. El bicarbonato también fue medido *in situ* a través del método de titulación (APHA, 2005). Las restantes determinaciones fueron realizadas en laboratorio con métodos analíticos normalizados (Eaton *et al.*, 2005). El comportamiento espacial de los datos obtenidos fue evaluado en el *Software* ArcMap 10.2. Se construyeron mapas de isoconductividad eléctrica y de distribución espacial de nitratos y cloruros. Se realizó la tipificación de las aguas y diagramas hidroquímicos.

Para el análisis de los datos se calcularon los estadísticos descriptivos para el conjunto de datos utilizando el *software* Rstudio. Utilizando este mismo *software* se realizó una matriz de correlaciones entre los datos fisicoquímicos analizados con el fin de evaluar la asociación entre las diferentes variables.

Relación entre el manejo del recurso y su calidad. En cada sitio de muestreo se relevaron, a través de la observación directa, las siguientes variables relativas al manejo del recurso: mantenimiento, encamisado, uso de suelo en el lote de la perforación y uso de suelo en el establecimiento. Se dividieron las muestras en dos grupos según su calidad fisicoquímica: potable y no potable. Esta clasificación se realizó teniendo en cuenta los valores establecidos en el Código Alimentario Argentino (CAA). El único parámetro que superó el máximo permitido en algunas muestras fue el de nitratos, cuyo valor límite es de 45 mg/l, y su fuente se vincula a la degradación de la materia orgánica producida por actividades agropecuarias o por un deficiente tratamiento de efluentes domiciliarios. Dicho valor de referencia se basa en el riesgo de que se produzca metahemoglobinemia (transformación de la hemoglobi-

na en metahemoglobina que puede dificultar o incluso impedir el transporte de oxígeno en sangre), o síndrome del recién nacido cianótico, que afecta a lactantes alimentados con biberón. Por su parte la OMS estableció el valor de referencia de 50 mg/l, pero en valores entre 50 y 100 mg/l se puede suministrar agua a lactantes alimentados por biberón siempre y cuando esté confirmado que no presente contaminación microbiológica (OMS, 2006). Se realizó el análisis de varianza (ANAVA), utilizando el *software* Infostat, entre la variable nitrato y las variables de manejo para analizar qué relación existe entre el manejo del recurso y la concentración del ión.

RESULTADOS

Diseño de la red monitorea

De las 36 perforaciones seleccionadas, 10 (28%) se encuentran dentro de la subcuenca del arroyo Chapaleofú Grande, 7 (19%) dentro de la subcuenca del Chapaleofú Chico, 9 (25%) dentro de la cuenca del arroyo Chapaleofú propiamente dicha, y las 10 (28%) restantes se ubican por fuera del límite definido a priori para la cuenca con el fin de verificarlo, especialmente en el sector de llanura. Los 36 puntos se dividen en los diferentes sectores geomorfológicos de la siguiente manera: 23 (64%) en el sector de serranías, 8 (22%) en la zona de piedemonte y 5 (14%) en el sector de llanura (Fig. 2). La mayor representatividad en cuanto a cantidad de perforaciones está en el sector de serranías y piedemonte debido a la extensión espacial de estos sectores en la cuenca. Las variables definidas del medio fisicoquímico a ser relevadas fueron las siguientes: conductividad eléctrica, pH, temperatura, cationes y aniones mayoritarios y nitratos. Las variables de manejo definidas a relevar fueron: mantenimiento, encamisado, uso de suelo en el lote de la perforación y uso de suelo en el establecimiento.

Evaluación hidrodinámica

En la campaña de noviembre de 2019 los niveles estáticos presentaron valores entre un máximo de 288 msnm en el sector de serranía, y un mínimo de 119 msnm en el sector de llanura.

El mapa equipotencial (Fig. 3) muestra un sentido de flujo hacia el NE en concordancia con las características morfológicas superficiales. La morfología de la superficie freática es de tipo radial con tendencia a plana hacia el N-NE.

En el sector de llanura las líneas de flujo muestran una dirección de circulación prácticamente paralela al arroyo Chapaleofú. En el pie-

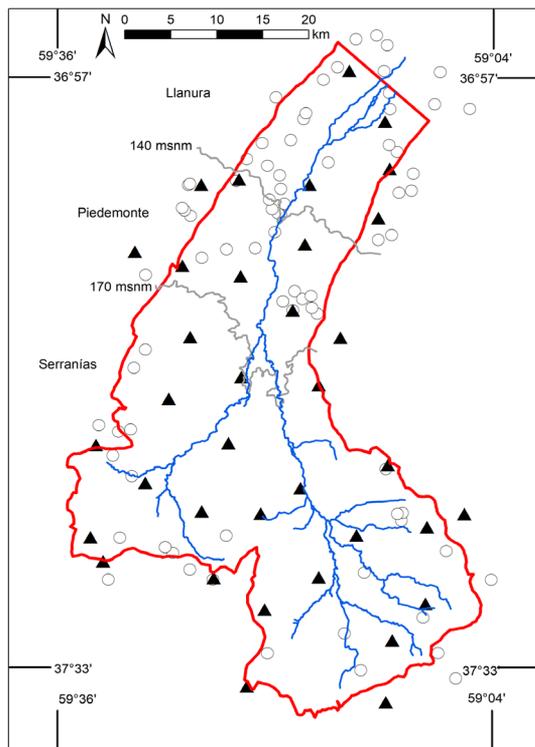


Fig. 2. Perforaciones seleccionadas a partir del muestreo preliminar de 104 sitios.

demonte las líneas de flujo también se muestran paralelas al arroyo. En el sector de serranías más cercano al piedemonte las líneas de flujo son casi perpendiculares a los cursos de aguas. En esta zona las curvas isofreáticas presentan una forma en V hacia aguas arriba, lo que demuestra el aporte de agua subterránea al arroyo. En las zonas de serranías con mayores alturas se detectan cursos superficiales influentes y efímeros.

En el sector de llanura el gradiente hidráulico promedio fue de 0.0013. En el piedemonte el mismo fue de 0.0022. Y en el sector de serranías fue de 0.0092. Estos tres valores dan un promedio de 0.0042 para la totalidad de la cuenca. Este valor es menor al gradiente hidráulico medio para el Partido de Tandil que es de 0.01 (Ruiz de Galarreta & Banda Noriega, 2005).

El valor de velocidad efectiva obtenido para la llanura fue de 0.042 m/día. Para el sector de piedemonte fue de 0.1125 m/día. Y para el sector de serranías fue de 0.385 m/día. La velocidad de escurrimiento fue mayor en las serranías, disminuyó hacia el piedemonte, y más aún hacia la llanura. La velocidad efectiva media calculada fue de 0.18; este valor fue menor al calculado como media regional de 0.5 por Ruiz de Galarreta &

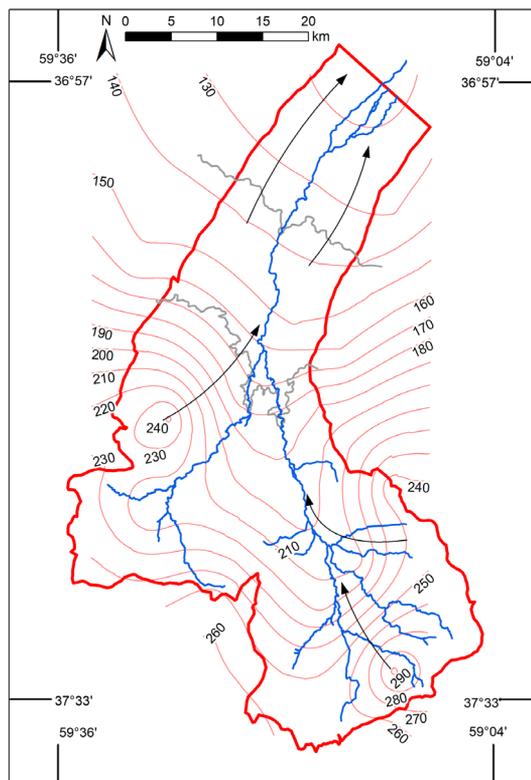


Fig. 3. Mapa equipotencial de la cuenca del arroyo Chapaleofú para noviembre de 2019.

Banda Noriega (2005).

Evaluación hidroquímica

En la Tabla 3 se muestran los estadísticos descriptivos de las variables del medio físico-químico para el conjunto de datos del muestreo de noviembre de 2019. Las variables que presentan una mayor desviación estándar son la conductividad eléctrica (CE), los bicarbonatos, la dureza, los nitratos y los sulfatos. Estos parámetros tienen mayor dispersión de los datos y para ellos la media no es tan representativa como para aquellos que muestran una desviación estándar menor.

Las aguas poseen bajo contenido salino con una CE promedio de $783 \mu\text{S cm}^{-1}$, es decir 548 mg/l de sales disueltas totales. El contenido de sales disueltas aumenta, como es lógico, hacia el NE, es decir en el sentido de flujo por el mayor tiempo de contacto agua-sedimento. Mientras que en el sector serrano se presenta un valor promedio de $720 \mu\text{S cm}^{-1}$, es decir de 504 mg/l de sales totales disueltas; hacia la descarga local de la cuenca, el promedio de la conductividad eléctrica es de

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para el conjunto de datos fisicoquímicos (campana de noviembre de 2019). N=36.

Parámetros	N	Media	Mediana	Desvío estándar	Primer cuartil	Tercer cuartil	Mínimo	Máximo
Calcio	36	67.7	65.8	32.8	50.6	67.7	18.4	184.5
Magnesio	36	24.2	21.9	12.7	14.9	31.9	23.7	56.6
Sodio	36	90.3	68.8	75.5	25.7	126.5	7.6	268.0
Potasio	36	16.4	10.8	15.0	8.3	21.5	0.1	81.6
Dureza	36	443.1	435.0	93.1	380.0	500.0	250.0	640.0
Cloruros	36	53.2	47.9	26.6	37.5	58.9	16.0	142.0
Nitratos	36	45.9	33.0	44.0	23.3	51.8	1.9	246.5
Sulfatos	36	34.0	23.9	34.2	16.8	33.6	5.9	145.9
Bicarbonatos	36	540.5	305.0	113.7	463.6	610	305.0	780.8
CE	36	783.4	686.0	221.6	675.0	883.2	428.0	1543.0
pH	36	7.7	7.7	0.3	7.6	7.9	7.0	8.3

1006 $\mu\text{S cm}^{-1}$. En la Figura 4 se presenta la variación espacial de la CE. Se visualiza el aumento en sentido NE y que en la subcuenca del arroyo Chapaleofú Chico se presentan valores más altos que en la del Grande. En este caso, la expresión del parámetro es la manifestación de las características hidrodinámicas de la cuenca en estudio, tratándose de aguas jóvenes que en general no han estado durante largos períodos de tiempo en contacto con los materiales del subsuelo por lo que la incorporación de sales no es elevada.

El pH es en todos los casos igual o superior a la neutralidad, con un promedio de la totalidad de las determinaciones de 7.8.

El bicarbonato constituye el anión predominante con contenidos entre 305 y 779 mg/l. Este elemento aumenta también en el sentido del flujo, siendo las muestras 27 y 30 (ubicadas en la zona de llanura) las que presentaron valores superiores a 750 mg/l.

El cloruro presenta un promedio de 53 mg/l. Los mayores valores, por encima de 70 mg/l, se restringen a las perforaciones ubicadas en el sector de llanura. En la Figura 5 se observa la distribución espacial de los cloruros; en dicha representación no se tuvieron en cuenta los tres sitios con mayor concentración, ya que se corroboró su correspondencia con contaminaciones puntuales. Se observa cómo aumenta la concentración de cloruros a medida que el agua recorre mayor distancia en la cuenca, presentándose los mayores valores en el sector de llanura.

Las concentraciones de sulfato halladas en la cuenca son bajas, siendo su media de 34 mg/l. Considerados en meq l^{-1} representan entre un 2 y 16% del contenido aniónico total.

El análisis de la dureza da un promedio de

268 mg/l, lo que se encuentra dentro del límite máximo permitido por el CAA que es de 400 mg/l. 32 muestras (89%) se encuentran dentro del máximo aceptado mientras que las 4 restantes (11%) se encuentran por encima de éste. Cabe destacar que las concentraciones elevadas de este parámetro se asocian a inconvenientes de incrustación en cañerías y dificultades técnicas en el funcionamiento de maquinarias como pasteurizadoras, más que con consecuencias a la salud humana por el consumo como agua de bebida.

A continuación se presenta la tipificación de las aguas mediante la utilización de los diagramas de Piper, con el fin de analizar las características químicas del agua de la cuenca en los diferentes sectores de la misma.

En el sector de serranías de las 23 muestras analizadas 22 presentan una composición bicarbonatada cálcica y/o magnésica, con proporciones muy bajas de cloruros y sulfatos en la composición iónica (Fig. 6).

En la Figura 7 se observa la composición química de las muestras correspondientes a la zona de piedemonte; en ellas se puede ver que de las ocho muestras analizadas, seis (75%) presentan una composición bicarbonatada cálcica, y las dos restantes (25%) presentan una composición bicarbonatada sódica.

En la Figura 8 se observa la composición química de las muestras correspondientes a la zona de llanura, las cuales presentan en su totalidad una composición bicarbonatada sódica. La variación de la composición del agua de bicarbonatada cálcica/magnésica en el sector de serranías a bicarbonatada sódica en el sector de llanura se debe al intercambio catiónico que se produce entre el calcio y el magnesio por el sodio a medida

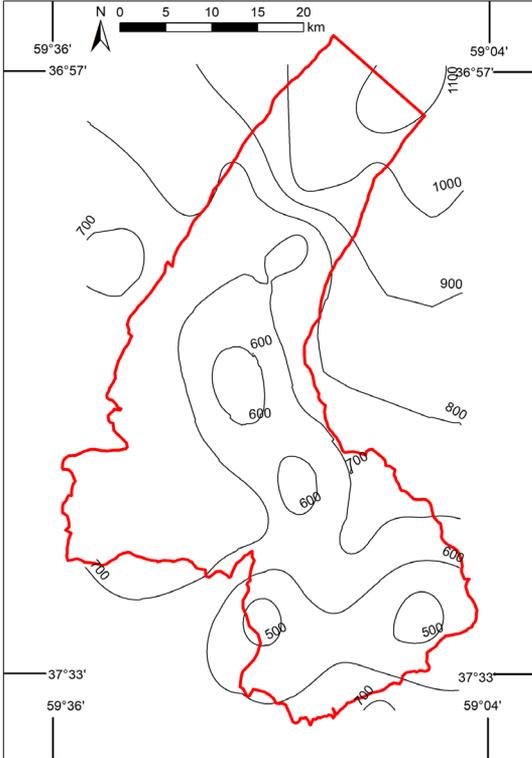


Fig. 4. Mapa de isoconductividad eléctrica de la cuenca del arroyo Chapaleofú para noviembre de 2019.

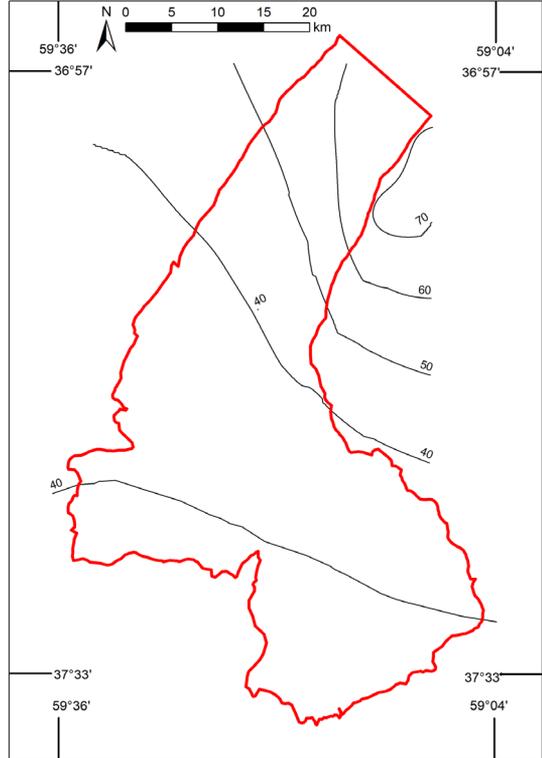


Fig. 5. Distribución espacial de los cloruros en la cuenca del arroyo Chapaleofú para noviembre de 2019.

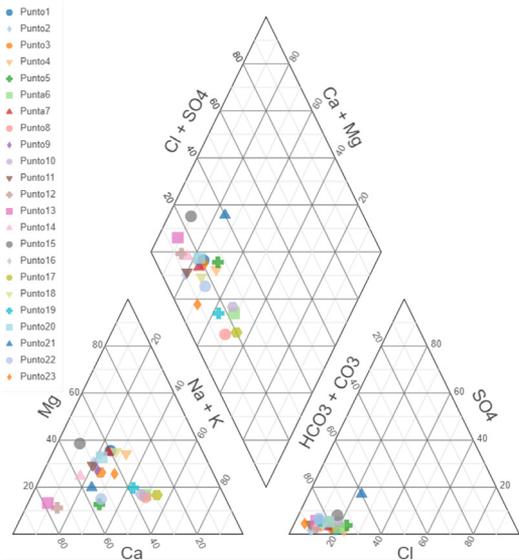


Fig. 6. Diagrama de Piper para la zona de serranías de la cuenca (según datos de noviembre de 2019)

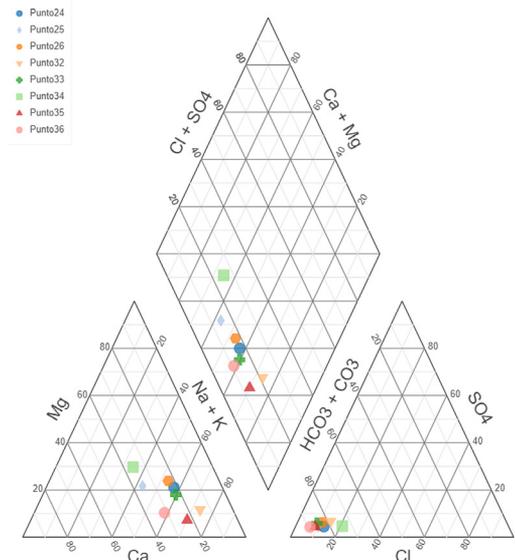


Fig. 7. Diagrama de Piper para la zona de piedemonte de la cuenca (según datos de noviembre de 2019)

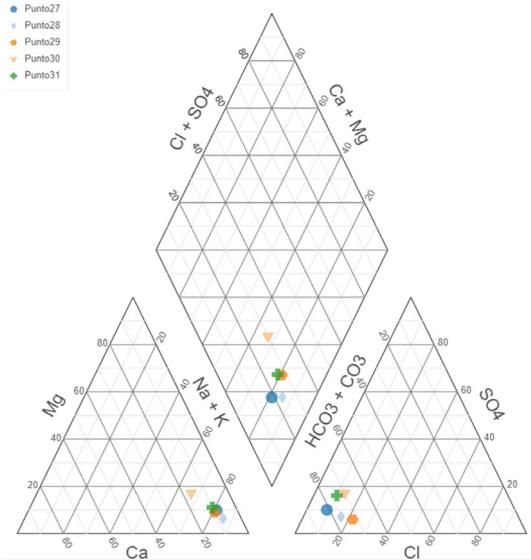


Fig. 8. Diagrama de Piper para la zona de llanura de la cuenca (según datos de noviembre de 2019).

que el agua circula por la cuenca.

Para analizar la asociación entre las diferentes variables se realizó una matriz de correlaciones entre los datos fisicoquímicos analizados, utilizando el *software* Rstudio (Tabla 4).

Se consideraron correlaciones significativas aquellas que fueron mayores a 0.5. Las variables calcio y sodio muestran una correlación negativa (-0.51). Esto quiere decir que a medida que aumenta la concentración de sodio disminuye la de calcio, confirmando el intercambio catiónico entre estos dos iones.

La CE presenta correlación positiva con los cloruros, los bicarbonatos, la dureza, los sulfatos y el sodio. Esta correlación se debe a que el agua en su circulación hacia el NE incorpora cloruros, que son conservativos, y sodio, por lo que la concentración de estos dos iones aumenta a medida que aumenta la CE. La correspondencia también con bicarbonatos y sulfatos está mostrando que no se ha llegado a la zona de descarga propiamente dicha, regional, sino que el sector NE correspondería a la descarga local.

La Figura 9 muestra la distribución espacial del nitrato. Los valores de la concentración de nitratos en la cuenca varían entre 2 y 246 mg/l. En este caso, no puede analizarse el comportamiento espacial en el conjunto de la cuenca en relación al flujo, porque los nitratos son mayoritariamente aportados por actividades antrópicas y por lo tanto su comportamiento es puntual, asociado a la carga contaminante que sea su fuente. Es por

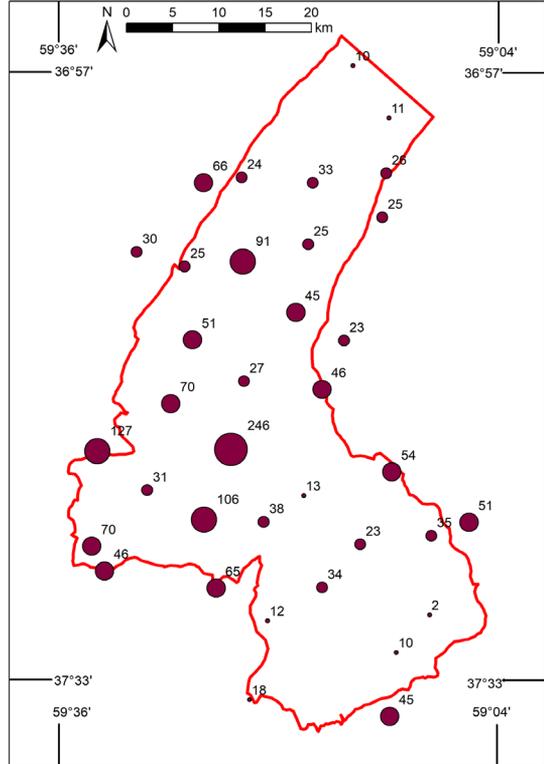


Fig. 9. Distribución espacial de los nitratos en la cuenca del arroyo Chapaleofú para noviembre de 2019.

esto que en la Figura 9 se muestran los valores puntuales estableciendo una correspondencia directa entre el tamaño de los círculos que los representan y la concentración, para que se visualice la situación en el conjunto de la cuenca.

Como puede observarse son 13 los sitios con concentraciones superiores a 45 mg/l. El valor medio de la campaña (45.9 mg/l) fue apenas superior al máximo establecido por el CAA.

Relación entre variables de manejo y calidad del agua

Se realizó un dendograma (Fig. 10) para conocer cómo se agrupan los distintos sitios en cuanto a la concentración de nitratos y se encontró que hay cuatro sitios que divergen del resto de los puntos; éstos son los que presentan una mayor concentración de nitratos.

Las muestras según su concentración de nitratos se clasificaron en potable y no potable (Tablas 5 y 6). Fueron clasificadas como potables aquellas que presentaron concentraciones de nitratos de hasta 45 mg/l y como no potables aquellas muestras que presentaron valores mayores a 45 mg/l. De acuerdo a la clasificación detallada,

Tabla 4. Matriz de correlaciones entre variables.

	CE	Bicarbonatos	Calcio	Cloruros	Dureza	Potasio
CE	1.00	0.76	0.32	0.73	0.76	0.00
Bicarbonatos	0.76	1.00	0.08	0.36	1.00	0.00
Calcio	0.32	0.08	1.00	0.35	0.08	0.07
Cloruros	0.73	0.36	0.35	1.00	0.36	0.36
Dureza	0.76	1.00	0.08	0.36	1.00	0.00
Potasio	0.00	0.00	0.07	0.36	0.00	1.00
Magnesio	0.44	0.41	0.52	0.48	0.41	0.33
Sodio	0.52	0.58	-0.51	0.23	0.58	-0.20
Nitratos	0.57	0.14	0.70	0.49	0.14	-0.04
pH	0.07	0.21	-0.60	-0.17	0.21	-0.47
Sulfatos	0.77	0.60	0.11	0.49	0.60	-0.14

	Magnesio	Sodio	Nitratos	pH	Sulfatos
CE	0.44	0.52	0.57	0.07	0.77
Bicarbonatos	0.41	0.58	0.14	0.21	0.60
Calcio	0.52	-0.51	0.70	-0.60	0.11
Cloruros	0.48	0.23	0.49	-0.17	0.49
Dureza	0.41	0.58	0.14	0.21	0.60
Potasio	0.33	-0.20	-0.04	-0.47	0.14
Magnesio	1.00	-0.20	0.42	-0.36	0.13
Sodio	-0.20	1.00	-0.10	0.64	0.13
Nitratos	-0.04	-0.10	1.00	-0.28	0.35
pH	-0.47	-0.64	-0.28	1.00	0.29
Sulfatos	-0.14	0.53	0.35	0.29	1.00

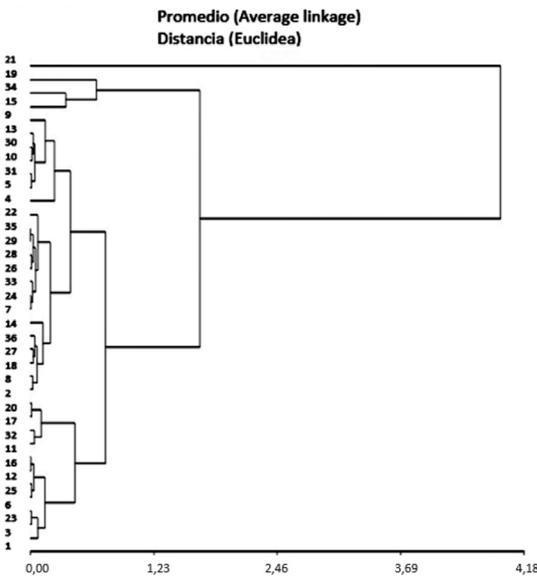


Fig. 10. Dendrograma de nitratos.

23 (64%) presentaron agua potable y 13 (36%) sitios presentaron agua no potable.

Como se explicó en el apartado 2 en cada uno de los 36 sitios de muestreo se relevaron varia-

Tabla 5. Criterio de clasificación de muestras de agua

Concentración de nitratos (mg/l)	Calidad
Hasta 45	Potable
Mayor a 45	No potable

bles relativas al manejo del recurso: mantenimiento, encamisado, uso de suelo en el lote de la perforación y uso de suelo en el establecimiento. En cada una de las mencionadas variables se obtuvieron los resultados que se observan a continuación (Tablas 7–10).

Se realizó el ANAVA del ion nitrato para analizar si hay diferencias significativas en el comportamiento del mismo dentro de cada variable de manejo. La hipótesis nula es que las medias de nitratos dentro de cada variable son iguales, es decir que las diferencias que se observan son producto del azar. En los casos en que los p-valor es se encuentran por encima de 0.05 no hay evidencia estadística para descartar la hipótesis nula. No se tuvieron en cuenta los cuatro sitios que presentaron concentraciones de nitratos mayores a 90 mg/l, por considerar que no representan

Tabla 6. Clasificación de las muestras de acuerdo a datos de noviembre de 2019.

Establecimiento	Nitratos	Calidad	Establecimiento	Nitratos	Calidad
1	54	No potable	19	128	No potable
2	35	Potable	20	70	No potable
3	51	No potable	21	247	No potable
4	2	Potable	22	27	Potable
5	10	Potable	23	51	No potable
6	45	Potable	24	23	Potable
7	23	Potable	25	45	Potable
8	34	Potable	26	25	Potable
9	18	Potable	27	33	Potable
10	12	Potable	28	26	Potable
11	65	No potable	29	25	Potable
12	47	No potable	30	11	Potable
13	13	Potable	31	10	Potable
14	38	Potable	32	66	No potable
15	106	No potable	33	24	Potable
16	46	No potable	34	91	No potable
17	70	No potable	35	25	Potable
18	31	Potable	36	30	Potable

Tabla 7. Mantenimiento.

Mantenimiento	Cantidad de establecimientos	Porcentaje
Muy bueno	8	22%
Bueno	20	56%
Regular	8	22%
Total	36	100%

Tabla 8. Encamisado.

Encamisado	Cantidad de establecimientos	Porcentaje
Si	31	86%
No	5	14%
Total	36	100%

las condiciones naturales del mismo, y además formaron un grupo diferenciado en el dendograma. En todos los casos analizados los p-valores fueron mayores a 0.05, es decir, no se encontró una relación estadísticamente significativa entre la concentración de nitratos y las variables de manejo (Tabla 11).

Red ambiental de monitoreo definitiva

Finalmente, con la eliminación de los 4 sitios que presentaron una concentración de nitratos

Tabla 9. Uso de suelo en el establecimiento.

Uso de suelo establecimiento	Cantidad de establecimientos	Porcentaje
Residencial	4	11%
Agricultura	4	11%
Ganadería	8	22%
Mixto	20	56%
Total	36	100%

Tabla 10. Uso de suelo en el lote de la perforación.

Uso de suelo lote perforación	Cantidad de establecimientos	Porcentaje
Residencial	22	61%
Ganadería	10	28%
Agricultura	4	11%
Total	36	100%

mayor a 90 mg/l, la red monitorea definitiva consta de 32 perforaciones, de las cuales 20 se ubican en el sector de serranías, 7 en el de piedemonte y las 5 restantes en el sector de llanura (Fig. 11).

DISCUSIÓN

El flujo del agua subterránea es en sentido NE, acompañando la morfología superficial, y presenta su descarga regional por fuera de los límites del partido, en la cuenca del río Salado, al

Tabla 11. Análisis de varianza del ion nitrato y variables de manejo.

ANAVA entre nitrato y variables de manejo	p-valor
Mantenimiento	0.3238
Encamisado	0.6064
Uso de suelo en lote perforación	0.4450
Uso de suelo en establecimiento	0.4449

igual que la cuenca lintera del arroyo Langueyú (Barranquero *et al.*, 2013).

En la mayor parte del sector de serranías los cursos de agua presentan características efímeras e influentes con un drenaje de tipo dendrítico. En la zona de transición entre las serranías y el piedemonte los cursos de agua comienzan a ser efluentes y perennes, recibiendo aportes del agua subterránea. En el sector de piedemonte, y principalmente en el de llanura, las líneas de flujo muestran una dirección de circulación prácticamente paralela al arroyo Chapaleofú, lo cual es coherente con la definición de drenaje poco definido, en esta zona, según antecedentes regionales (Ruiz de Galarreta & Banda Noriega, 2005).

En el análisis hidroquímico general se observa que los valores promedio de CE y cloruros ($783 \mu\text{S cm}^{-1}$ y 53 mg/l respectivamente) son coherentes con la dinámica de flujo y los resultados hallados en estudios antecedentes en el partido de Tandil (Ruiz de Galarreta, 2004; Ruiz de Galarreta & Banda Noriega, 2005). Se trata de aguas de poco recorrido lo cual se refleja en su bajo contenido total de sales disueltas y en que el cloruro no es el anión predominante. También Pessolano *et al.* (2012) concluyeron que las aguas de la cuenca del arroyo Chapaleofú Chico evidencian poco recorrido; así como, Barranquero *et al.* (2012) en su estudio de la cuenca del arroyo Langueyú obtuvieron un promedio de $793 \mu\text{S cm}^{-1}$ de CE a partir de un universo de 26 muestras. La evolución hidroquímica presentó el mismo patrón que en los trabajos antecedentes en el partido, de bicarbonatada cálcica y/o magnésica en la serranía a bicarbonatada sódica en la llanura.

El dendograma de nitratos permitió agrupar los cuatro sitios que presentaron una mayor concentración de este ion y excluirlos del posterior análisis por mostrar claramente un indicador de contaminación antrópica. De esta forma se llevó a cabo una segunda reducción de la red monitorea de 36 a 32 sitios de muestreo.

El promedio de nitratos para el muestreo de noviembre de 2019 fue de 35 mg/l , exceptuando

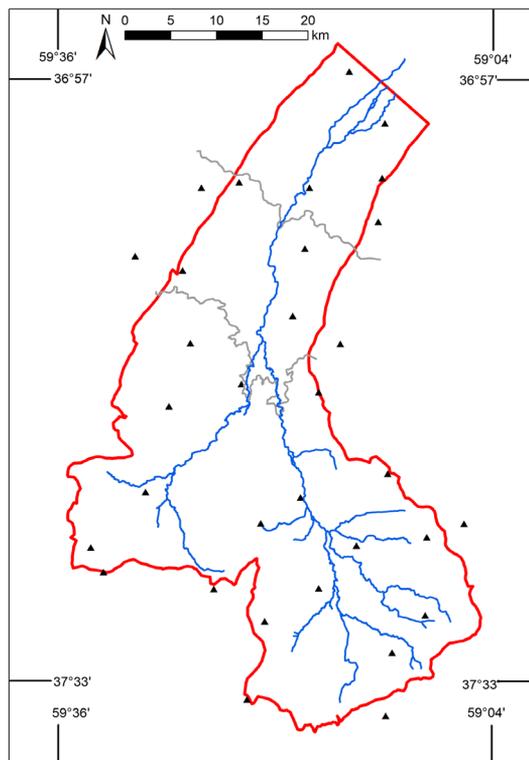


Fig. 11. Red monitorea final.

los cuatro sitios que presentaron una contaminación mayor a 90 mg/l . En trabajos antecedentes se determinaron para el partido de Tandil promedios de nitratos de 33 mg/l (Ruiz de Galarreta & Banda Noriega, 2005), que se estableció como fondo geoquímico para la concentración de este ion en el partido, y 42 mg/l (Barranquero *et al.*, 2019). En otras cuencas del partido se obtuvieron los siguientes valores promedios: 29 mg/l para la cuenca del arroyo Langueyú (Barranquero *et al.*, 2016) y 32 mg/l para la cuenca del arroyo Chapaleofú Chico (Pessolano *et al.*, 2012). En todos los casos los promedios de nitratos fueron menores a lo establecido por el CAA y sólo en un caso superaron el promedio del presente estudio (Barranquero *et al.*, 2019). Se evitó incorporar sitios donde se desarrolle actividad tambera que, como se demostró en estudios antecedentes en el partido de Tandil (Pessolano *et al.*, 2012; Cisneros Basualdo *et al.*, 2016), produce una importante afectación a la calidad del agua subterránea.

En cuanto al diseño de la red monitorea se llevaron en cada sitio de muestreo variables relativas al manejo del recurso, otorgándole una perspectiva ambiental al estudio, a diferencia de

trabajos antecedentes en los que en cada sitio de muestreo se relevaron únicamente características de calidad del recurso hídrico subterráneo (Reyes Gómez *et al.*, 2017; Tirkey, 2017; Bodrud-Doza *et al.*, 2018; Masoud *et al.*, 2018; Rezaei *et al.*, 2019; Singhal *et al.*, 2020). Estas variables de manejo relevadas fueron analizadas estadísticamente con los datos fisicoquímicos.

La realización del ANAVA entre el ion nitrato y las variables de manejo fue útil para confirmar que no existe influencia de las variables de manejo analizadas (mantenimiento, encamisado, uso de suelo en el lote de la perforación y uso de suelo en el establecimiento) sobre la concentración de nitratos en los sitios de muestreo con concentraciones menores a 90 mg/l. Esto muestra la efectividad en la selección de sitios que presentan un recurso hídrico subterráneo lo más natural posible. Se caracterizó el recurso hídrico priorizando sitios que no presentaran contaminación puntual para establecer una línea de base que sea útil para posteriores investigaciones, ya que no había trabajos antecedentes que analicen la cuenca del arroyo Chapaleofú en su totalidad.

Cabe destacar la importancia de establecer redes monitoras de recursos hídricos eficientes y representativas del objetivo de muestreo, principalmente en países latinoamericanos donde los recursos son escasos para el monitoreo. Además cobra importancia incorporar en cada sitio de muestreo variables relacionadas al manejo del recurso, ya que ha habido una gran intensificación en las actividades agropecuarias con su consecuente impacto sobre los recursos hídricos (Viglizzo, 2007).

CONCLUSIONES

Los aspectos esenciales del diseño de la red monitorea de recursos hídricos subterráneos incluyeron, al igual que en trabajos antecedentes, el uso de herramientas de georreferenciación, el uso de sistemas de información geográfica para superposición de variables, y la evaluación estadística de criterios utilizados, con el fin de cumplir los objetivos de la red.

En ciertas zonas resultó dificultoso el registro de perforaciones debido a que no se obtuvo el permiso de los propietarios de los establecimientos o las perforaciones se encontraron selladas por lo que no se pudo medir el nivel freático. El conocimiento de las características de diseño y construcción por parte de los propietarios de las perforaciones es escaso.

El análisis hidrodinámico e hidroquímico se

realizó en función del acuífero freático ya que no hay evidencias de que se presente en el área otro sistema subterráneo por debajo de éste.

En relación a la hidrodinámica, la dirección del escurrimiento regional de la cuenca es hacia el Noreste, manifestando la influencia que la morfología superficial ejerce sobre el sistema subterráneo. La relación arroyo-acuífero presenta características similares a estudios antecedentes en el partido de Tandil.

La hidroquímica presenta características similares a otras cuencas del partido; entre ellas, se determinó que la concentración total de sales disueltas es baja. Esto obedece a las características hidrodinámicas del sistema hídrico subterráneo, especialmente al relativamente escaso recorrido del agua subterránea por el medio en el que circula dadas las dimensiones de la cuenca. La evolución hidroquímica presentó el mismo patrón que en trabajos antecedentes en el partido.

En cuanto a las concentraciones de nitratos, en los casos en que sobrepasaron los 45 mg/l se identificaron como probables causas las prácticas agropecuarias desarrolladas en el entorno cercano de los pozos de muestreo.

No se encontró relación entre las variables de manejo analizadas y la concentración de nitratos en los diferentes sitios. Esto refleja que la selección de perforaciones cumplió su objetivo de identificar y elegir sitios con bajos impactos antrópicos. No obstante, es imprescindible que el productor agropecuario y los actores involucrados en la actividad rural tomen conocimiento y conciencia sobre el uso y manejo integral del recurso hídrico dentro de la actividad productiva; esto involucra no sólo la forma como se efectúa la apropiación del agua, sino también las medidas de protección al recurso hídrico evitando la disposición inadecuada de cargas contaminantes.

El estudio realizado puede considerarse como preliminar, ya que es necesario realizar nuevas campañas de muestreo en la red monitorea que permitan identificar una evolución temporal de los parámetros fisicoquímicos en distintas estaciones climáticas y al menos en el transcurso de un año.

La metodología empleada en el diseño de la red monitorea fue de utilidad para reducir los puntos de muestreo de 104 a 36, con el objetivo de disminuir los tiempos y costos de monitoreo. La selección de los sitios priorizó aquellos cuyas características se correspondieron mejor con el objetivo de la red monitorea y permitió realizar una distribución de las perforaciones geográficamente homogénea, dentro de las posibilidades.

Dicha metodología es transferible a estudios geohidrológicos de otras cuencas del faldeo Norte del sistema serrano de Tandilia como así también a regiones con diferentes características geohidrológicas, teniendo la precaución de definir las variables de análisis y sus condiciones a priorizar de acuerdo al conocimiento del investigador de dichas características geohidrológicas.

El estudio partió de la hipótesis de la necesidad de consideración de variables socioeconómicas para la definición de una red monitorea de agua subterránea, y corroboró dicha hipótesis.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan agradecimiento al Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales (CINEA), a la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y al Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud (DCAAS) por el soporte económico de los recursos humanos e institucional para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D.R., D.J. Sweeney & T.A. Willians. 2008. Muestreo y distribuciones muestrales. En: Sergio R. Cervantes González (ed.), Estadística para administración y economía, pp. 257–298, Cengage Learning Editores, S.A.
- Appelo, C.A.J. & D. Postma. 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. CRC Press, 649 pp.
- Barranquero, R., M. Varni, A. Ruiz de Galarreta & R. Banda Noriega. 2012. Aporte de la hidroquímica al modelo conceptual del sistema hídrico subterráneo. Tandil, Argentina. *GEOACTA* 37 (2): 130–146.
- Barranquero, R., M. Varni, A. Ruiz de Galarreta, M. Quiroga & R. Landa. 2013. Assessment of the hydrochemical characteristics of the Langueyú creek basin applying *multivariate statistical analysis*. *The Journal of the Argentine Chemical Society* 100: 9–24.
- Barranquero, R.S., M.R. Varni, R. Pardo, M. Vega, M.E. Zabala, M.E. & V.A. Ruiz de Galarreta. 2016. Propuesta para el estudio comparativo del recurso hídrico subterráneo. Ejemplo de caso: cuencas de los arroyos Langueyú y Del Azul. *Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 37: 45–56.
- Barranquero, R.S., D. Saraceno, M.F. Galecio, N.E. Cisneros Basualdo, M.A. Quiroga, R. Landa, A. Ruiz de Galarreta & R. Banda Noriega. 2019. Prácticas agropecuarias y efectos ambientales en el recurso hídrico subterráneo en el partido de Tandil. *Revista de Ciencias Ambientales* 7 (1): 5–32.
- Bodrud-Doza, M.A., S.M. Hossain Bhuiyan, I. Dardar-Ul, M. Safiur Rahman, A. Morshedul Haque, K.J. Fatema, N. Ahmed, M.A. Rakib & A. Rahman. 2018. Hydrogeochemical investigation of groundwater in Dhaka City of Bangladesh using GIS and multivariate statistical techniques. *Groundwater for Sustainable Development* 8: 226–244.
- Castany, G. 1975. Prospección y explotación de las aguas subterráneas. Ed. Omega. Barcelona, 738 pp.
- Cisneros Basualdo, N.E., R.E. Miguel, A. Ruiz de Galarreta & R. Banda Noriega. 2016. Hidrodinámica e hidroquímica de agua subterránea en áreas sometidas a diferentes usos agropecuarios. *Acta de congreso IV Jornadas Interdisciplinarias Ciclo del Agua en Agroecosistemas* 4: 23–24.
- Custodio, E., A. Garrido, C. Coletto & G. Salmoral. 2012. The challenges of agricultural diffuse pollution. En: L. De Stefano & R. Llamas (eds.), *Water, Agriculture and the Environment in Spain: can we square the circle?* pp. 153–164, Madrid.
- Eaton, A.D., L.S. Clesceri, E.W. Rice, A.E. Greenberg & M.A.H. Franson. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater* (21st Edition). APHA: Washington, D.C., 1365 pp.
- FAO. 2018. *El estado mundial de la agricultura y alimentación*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, Roma, 187 pp.
- Ferrier, R.C., B.J. D'Arcy, J. MacDonald & M. Aitken. 2005. Diffuse pollution - what is the nature of the problem? *Water and Environment Journal* 19(4): 361–366.
- Freeman, H. A., B. Shiferaw & S.M. Swinton. 2005. Assessing the Impacts of Natural Resource Management Interventions in Agriculture: Concepts, Issues and Challenges. En: B. Shiferaw, H.A. Freeman & S.M. Swinton (eds.), *Natural resource management in agriculture: methods for assessing economic and environmental impacts*, pp. 3–19, CABI Publishing.
- Goudie, A. 2013. *The human impact on the natural environment: past, present, and future*. A John Wiley & Sons, Ltd., 7: 424 pp.
- Krueger, T., C. Maynard, G. Carr, A. Bruns, E.N. Mueller & S. Lane. 2016. A transdisciplinary account of water research. *WIREs Water* 3 (3): 369–389.
- Masoud, A.A., E.A. Meswara, M.M. El Bouraie & S.Z. Kamh. 2018. Monitoring and assesment of the groundwater quality in Wadi Al-Arish downstream área, North Sinai (Egypt). *Journal of African Earth Sciences* 140: 225–240.
- OMS. 2006. Las Guías: un marco para la seguridad del agua de consumo. En: Biblioteca de la OMS (ed.), *Guías para la calidad del agua potable*, pp. 27–37, Organización Mundial de la Salud.
- Pessolano, B. 2010. Diagnóstico preliminar del recurso hídrico subterráneo y su relación con las actividades agropecuarias en la cuenca del arroyo Chapaleofú Chico, Tandil, Buenos Aires, Argentina. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 398 pp.
- Pessolano, B., A. Ruiz de Galarreta, M. Varni, R. Ba-

- rranquero & A. Larsen. 2012. Análisis geohidrológico de la cuenca del A° Chapaleofú Chico-Tandil y su relación con las prácticas agropecuarias. *Actas Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos* 1: 49. Instituto Nacional del Agua.
- Reyes Gómez, V. M., M. Gutiérrez, B. Nájera Haro, D. Nuñez Lopez & M.T. Alarcón Herrera. 2017. Groundwater quality impacted by land use/land cover change in a semiarid región of Mexico. *Groundwater for Sustainable Development* 5: 160–167.
- Rezaei, A., H. Hassania, S. Hassani, N. Jabbaric, S.B. Fard Mousavid & S. Rezaei. 2019. Evaluation of groundwater quality and heavy metal pollution indices in Bazman basin, southeastern Iran. *Groundwater for sustainable development* 9: 101–114.
- Ruiz de Galarreta, A. 2004. Evaluación del riesgo de contaminación hídrica en el Partido de Tandil. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Informes Anuales inéditos.
- Ruiz de Galarreta, V.A. & R. Banda Noriega. 2005. Geohidrología y evaluación de nitratos del partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina. *Actas IV Congreso Argentino de Hidrogeología. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea* 4: 99–108.
- González, N. 2005. Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires. *Relatorio Congreso Geológico Argentino* 16: 359–374.
- Ruiz de Galarreta, V.A., R. Barranquero, M. Varni & C.I. Rodríguez. 2011. Geología e hidrolitología de la cuenca del Arroyo Langueyú, Provincia de Buenos Aires (Argentina). *Ciencia, Docencia y Tecnología* 43: 157–176.
- Sala, J.M., E. Kruse & R. Aguglino. 1987. Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires, 235 pp.
- Sala, J.M., A. Rojo, E. Martín & J. Ulibarrena. 1981. Investigaciones geohidrológicas de la cuenca de Tandil y su zona de influencia. *Informe Anual para la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires* 1: 1–16
- Singhal, A., R. Gupta, A.N. Singh & A. Shrinivas. 2020. Assessment and monitoring of groundwater quality in semi –arid región. *Groundwater for Sustainable Development* 11: 135–170.
- Tirkey, P., T. Bhattacharya, S. Chakraborty & S. Baraik. 2017. Assessment of Groundwater Quality and Associated Health Risks: A case study of Ranchi city, Jharkhand, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 5:85–100.
- Viglizzo, E.F. 2007. Desafíos y oportunidades de la expansión agrícola en Argentina. En: U. Martínez Ortiz (ed.), *Producción Agropecuaria y Medio Ambiente. Propuestas compartidas para su Sustentabilidad*, pp. 12–42, Fundación Vida Silvestre.
- Viglizzo, E.F. 2008. Agro y ambiente: una agenda compartida para el desarrollo sustentable. Foro de la cadena agroindustrial Argentina, Buenos Aires, 32 pp.
- Xu, L., P. Gober, H.S. Wheatler & Y. Kajikawa. 2018. Reframing socio-hydrological research to include a social science perspective. *Journal of hydrology* 563: 76–83.

Doi: 10.22179/REVMACN.23.711

Recibido: 30-XI-2020
Aceptado: 23-VII-2021