

Caracterización hidrogeológica del sistema acuífero ubicado en las comunidades Isla Chica y La Trocha, cantón de Los Chiles, Alajuela

Hydrogeological characterization of the aquifer system located in the communities of Isla Chica and La Trocha, Los Chiles, Alajuela

Rigoberto Vargas^{1,2*}, Randall Alpízar², Luz Chacón Jiménez³, Paola Fuentes-Schweizer^{4,5} y Marco Barahona¹

¹Universidad de Costa Rica (UCR), Escuela Centroamericana de Geología (ECG), San José, Costa Rica

²Hidroambiente Consultores S.R.L, San José, Goicoechea, Costa Rica

³Universidad de Costa Rica (UCR), Instituto de Investigaciones en Salud, San José, Costa Rica

⁴Universidad de Costa Rica (UCR), Escuela de Química, San José, Costa Rica

⁵Universidad de Costa Rica (UCR), Centro de Electroquímica y Energía Química (Celeg), San José, Costa Rica

*Autor para contacto: rigovm03@gmail.com

(Recibido: 16/06/2024; aceptado: 25/03/2025)

RESUMEN: Esta investigación se enfoca en la caracterización hidrogeológica del sistema acuífero ubicado en las comunidades de Isla Chica y la Trocha, este sistema corresponde con un acuífero transfronterizo ubicado en la cuenca del río San Juan (Costa Rica-Nicaragua). Es importante señalar que el recurso hídrico subterráneo es utilizado por los pobladores de la zona y por personas migrantes que viven de manera itinerante en estos lugares, además, existen muy pocos estudios de este tipo en la zona. Este trabajo identifica la presencia de dos acuíferos; un primer acuífero somero, libre cubierto, de baja transmisividad, formado por capas intercaladas de arena y arcilla, el cual es aprovechado por medio de pozos artesanales y un segundo acuífero más profundo, semi-confinado a confinado, con espesor promedio de 40 m, conformado por arenas volcánicas, este acuífero es aprovechado mediante pozos perforados. El nivel estático registrado para los pozos perforados en este acuífero puede corresponder a un nivel en equilibrio entre ambos acuíferos, y se encuentra entre 10 y 30 m de profundidad. El acuífero más profundo es sobreyacido por una capa de arcilla rojiza poco permeable con un promedio de 30 m de espesor. El flujo del agua subterránea tiene una dirección de sur a norte, hacia el río San Juan. Hidrogeoquímicamente, el agua de mezcla, se clasifica como bicarbonatada cálcica. Según el modelo GOD, la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero somero es de baja a media. La recarga potencial calculada a partir del método propuesto por Schosinsky (2006), se estimó entre 357,82 mm y 491,70 mm al año.

Palabras clave: acuífero transfronterizo; hidrogeología; balance hídrico de suelo; hidrogeoquímica; Zona Norte.



ABSTRACT: This research focuses on the hydrogeological characterization of the aquifer system in the Isla Chica and La Trocha communities. This system corresponds to a transboundary aquifer within the San Juan River basin (Costa Rica-Nicaragua). It is important to note that the groundwater is used by the local residents and migrants who live itinerantly in these areas. In addition, there are very few studies of this nature conducted in the region. This work identifies the presence of two aquifers: the first is a shallow, unconfined aquifer covered by a clay layer, with low transmissivity, consisting of intercalated layers of sand and clay that are captured through hand-dug wells. The second is a deeper, semi-confined aquifer, with an average thickness of 40 m, composed of volcanoclastic sands. This aquifer is exploited through drilled wells. The static level recorded for the drilled wells may reflect an equilibrium level between aquifers, typically ranging from 10 to 30 m deep. The deeper aquifer is overlain by a poorly permeable reddish clay layer with an average thickness of 30 m. The groundwater flow direction is from South to North, toward the San Juan River. Hydrogeochemically, the mixed water is classified as calcium bicarbonate. According to the GOD model, the vulnerability of the shallow aquifer to contamination is low to medium. The potential recharge, calculated using the method proposed by Schosinsky (2006), is estimated to be between 357.82 mm and 491.70 mm per year.

Keywords: transboundary aquifer; hydrogeology; soil-hydric balance; hydro-geochemistry; Zona Norte.

Introducción

En el año 2015 la “Estrategia regional para la evaluación y gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos de las Américas” desarrollada por el Programa Hidrológico de La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco, 2015), mencionó como un sitio de riesgo alto, en cuanto gobernanza, al sistema acuífero ubicado en la Cuenca del río San Juan situado entre Costa Rica y Nicaragua. En esta cuenca se ubica la zona de estudio.

La protección de las fuentes de agua tanto superficiales como subterráneas, es de particular interés en las cuencas transfronterizas, ya que un manejo inadecuado del recurso hídrico en estas zonas puede llevar a tensiones entre los países que lo comparten. Según el INEC (INEC, 2021, 2023) en 2010, había 1 234 059 habitantes en zona rural y para 2023 a 1 451 578, lo que implica un aumento del 18% de población. Para este mismo periodo, en la Zona Huetar Norte, zona donde se desarrolla el estudio, la población aumentó de 348 067 a 444 644 (INEC, 2021, 2023), lo que implica un aumento del 28%. Se estima que este crecimiento poblacional y el desarrollo de nuevos asentamientos en zonas rurales generan una mayor demanda de agua para consumo humano,

La zona de estudio se ubica en la región Huetar Norte, en el Cantón de Los Chiles, Costa Rica, en un sector de la cuenca del río San Juan. Los Chiles cuenta con uno de los índices de desarrollo cantonal más bajos del país, considerándose una zona rural con un uso del suelo principalmente agrícola. Los cultivos principales son piña, naranja y yuca, con algunas zonas dedicadas a ganadería o al desarrollo urbano (Barrantes y Sandoval, 2016).

En esta zona se han realizado pocos estudios geológicos e hidrogeológicos y la información base sobre la hidrogeología local, características básicas del acuífero o acuíferos de la zona, como propiedades hidráulicas, extensión, recarga y otras, es escasa.

La microcuenca del río Isla Chica, afluente del río San Juan, administrativamente se localiza en el distrito fronterizo de Los Chiles, cantón de Los Chiles, provincia de Alajuela, entre las coordenadas 1198000 – 1226000 Norte y 416000 – 450000 Este de Transversal Mercator para Costa Rica (CRTM05), en las hojas topográficas de Medio Queso (3248-I) y Los Chiles (3249-II) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), escala 1:50 000. En la figura 1 se muestra esta subcuenca. El área de estudio abarca aproximadamente 93 km² y se circunscribe a la parte baja de la subcuenca del río Isla Chica, cuyos límites son: al norte con Nicaragua, al sur con el poblado de Medio Queso, al este con el sector conocido como Las Delicias y al oeste con las comunidades de Cachito, Primavera y Finca Berlín.

El objetivo de este trabajo es generar la información técnica que permita conocer el comportamiento del flujo del agua subterránea y determinar características hidráulicas de la zona vadosa y el acuífero captado, así como identificar las fuentes potenciales de contaminación y evaluar el riesgo asociado a estas.

Metodología

Se realizó la recopilación de información existente en 23 pozos registrados en las bases de datos de las siguientes instituciones públicas: Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados (AyA), Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (Senara), Dirección de Agua (DA) del Ministerio Nacional de Ambiente y Energía (Minae), además de la información que se recopiló mediante giras de reconocimiento de campo. Esta información incluye ubicación geográfica y la altura de los pozos, así como el nivel estático, la profundidad de la perforación y el caudal extraído. Además se cuenta con cuatro descripciones litológicas de pozos. La información climática se obtuvo del Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

Para la generación de mapas se utilizó la información de las bases de datos e imágenes satelitales de Google Earth, de ESRI (*ESRI 2011. ArcGIS Spatial Analyst Desktop: Release 10*), del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), y los software ArcGIS 10.5 y QGIS 3.22.

El trabajo de campo se realizó entre los años 2019-2021 y consistió en reconocimiento de la geología local, medición de niveles, inspecciones con cámara sumergible a pozos de la zona, recolección de muestras de suelo y pruebas de infiltración, toma de muestras de agua de pozos y de red de consumo de agua potable.

Se realizaron 14 pruebas de infiltración con la metodología del doble anillo, se calculó la infiltración en metros por día según la ecuación de Kostiaikov y se recolectaron 14 muestras de suelo para realizar análisis de textura, retención de humedad, capacidad de campo y punto de marchitez, densidad y porosidad, estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Recursos Naturales del CIA.

Se muestreó la red de consumo de agua potable para análisis de nivel 1 del Reglamento de Agua Potable que incluye los parámetros: color aparente, conductividad eléctrica, coliformes fecales, *Escherichia coli*, cloro residual libre, turbiedad, olor, temperatura, pH (Procaduría General de la República, 2015) los cuales fueron analizados de acuerdo a las metodologías descritas en el Standard Methods of Examination Water and Wastewater (APHA, 2017). Además, en los pozos de las comunidades de Isla Chica y La Trocha se realizó un análisis que contempla los parámetros indicados en los niveles 1, 2, 3 y 4 del Reglamento de Agua Potable, que incluye tanto iones mayores, menores y hasta tres grupos diferentes de compuestos plaguicidas.

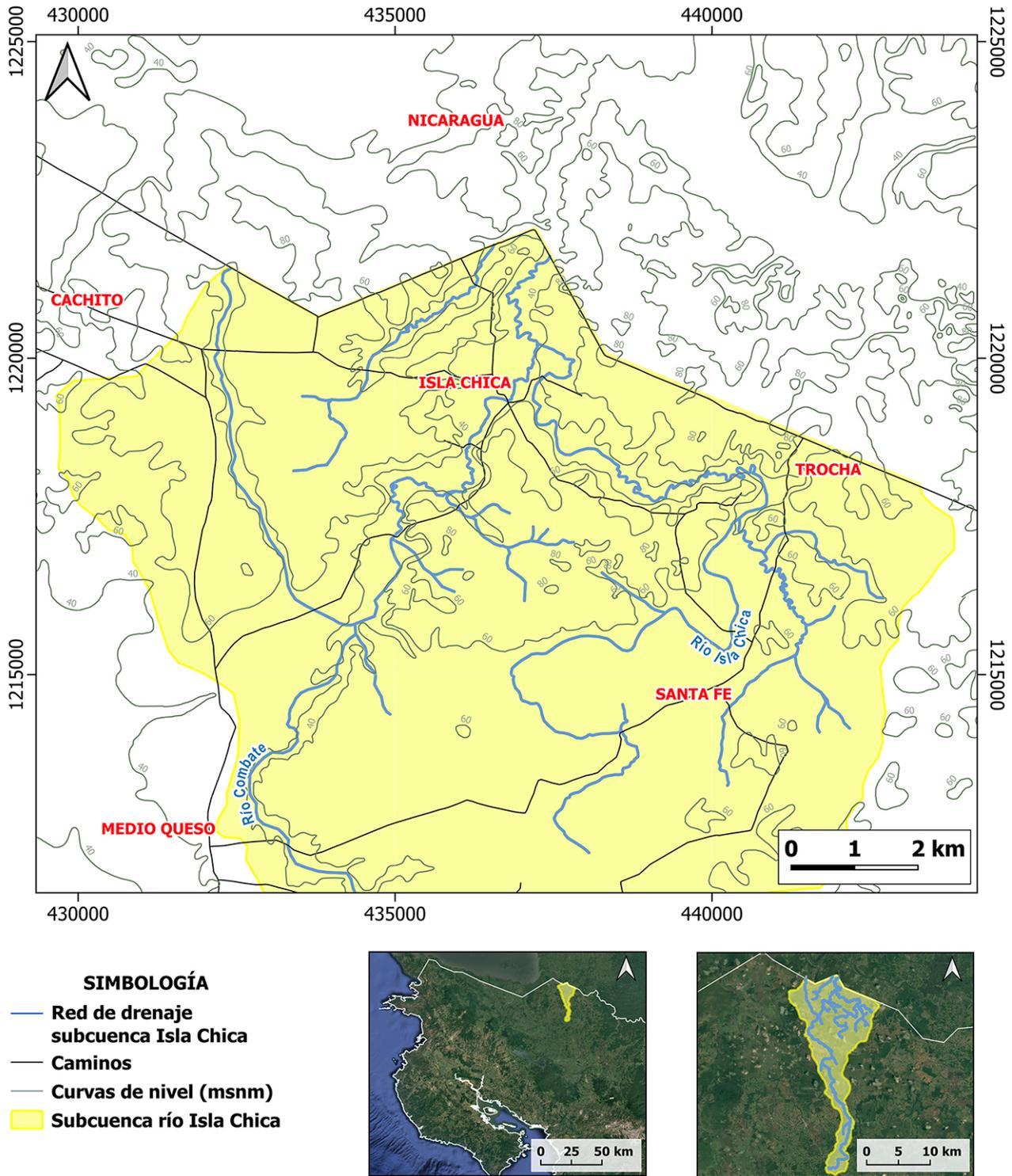


Fig. 1: Mapa de ubicación de la parte baja de la subcuenca del río isla Chica que incluye las comunidades de Isla Chica y La Trocha. Base topográfica del IGN: Hoja Los Chiles (3249-II) y Hoja Medio Queso (3248-I). SRC: CRTM05.

Se realizó el balance hídrico de suelos según la metodología propuesta por Schosinsky (2006). Además, con toda la información recopilada (descripciones litológicas de pozos, mapeo geológico, estimación de recarga potencial, niveles estáticos de pozos), se construyó un modelo hidrogeológico conceptual para el sistema acuífero de la zona. Posteriormente se realizó un análisis GOD (Foster et al., 2002) para determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero superficial.

Rasgos geológicos e hidrogeológicos

Rasgos geológicos e hidrológicos

En cuanto a la geología regional, la formación Buena Vista fue propuesta por Malavassi y Madrigal (1970), quienes realizaron las primeras descripciones litológicas de la zona Norte. Esta formación se compone de lahares finos y gruesos muy meteorizados sin estratificación visible, con una matriz arenarcillosa con presencia de óxidos de hierro y una composición tobácea con predominio de material fino. Se exhibe en áreas de topografía plana, en terrazas amplias. Esto se ajusta a las afirmaciones de Denyer y Alvarado (2007), que relacionan los depósitos continentales recientes con las extensas llanuras aluviales de la cuenca San Carlos en la región norte del país.

En la zona Caribe y Norte del país, Denyer y Alvarado (2007) indican la existencia de materiales volcánicos, estos materiales son originados por el magmatismo calco-alcalino del neógeno, e incluyen litologías como tefras, lavas, avalanchas de detritos y flujo de detritos. En el prospecto aurífero de Crucitas, ubicado en el norte del país, cerca de la frontera con Nicaragua, se observa la presencia de peperitas asociadas con intrusiones magmáticas de composición ácida e intermedia en sedimentos saturados en agua, según (Soto y Alvarado, 2012). La figura 1 muestra la ubicación del área de estudio, que incluye las comunidades de La Trocha e Isla Chica.

Debido a que no se encontraron afloramientos rocosos en el área de estudio, para interpretar la geología local en la zona, se visitaron algunas secciones de ríos o cortes de caminos. La figura 2 muestra dos de los afloramientos de la zona de estudio.

En general, se observa una fuerte meteorización, lo que resulta en suelos residuales lateritizados que presentan una matriz de textura limoarcillosa café a rojiza, de plasticidad media y permeabilidad baja, según lo observado en el campo. Los clastos poliméricos en esta matriz están muy alterados, tienen tonalidades claras que van desde el café claro hasta el blanco, y sus tamaños varían de milimétricos a centimétricos.

A partir de la limitada información sobre la litología y el trabajo de campo, se interpreta que existen espesores de suelo mayormente arcillosos con baja conductividad hidráulica que sobre yacen intercalaciones de arena y arcilla.

Geomorfológicamente se identifican dos geoformas de origen aluvial. Llanuras aluviales que abarcan más del 50 % de los terrenos y terrazas aluviales que se localizan mayoritariamente al norte y centro de la zona de estudio, con una topografía plana con ondulaciones menores en la superficie.

El patrón de drenaje de los ríos en el área de estudio es del tipo meándrico, los procesos de erosión y sedimentación continuos han generado cauces que presentan curvas pronunciadas. Tanto el cauce del río Isla Chica como de sus afluentes poseen una dirección de flujo de sur a norte. Es importante señalar que

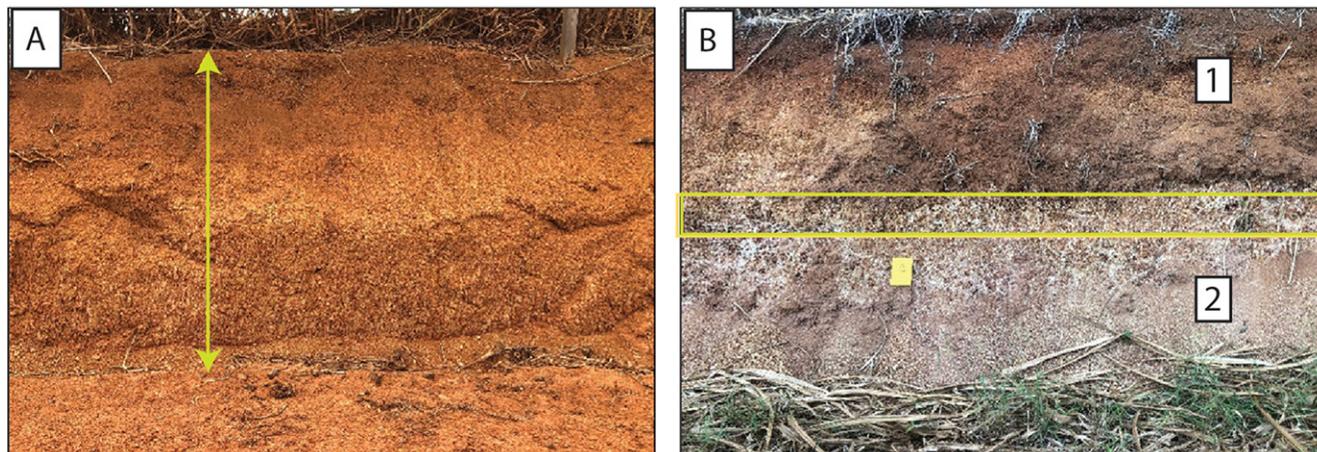


Fig. 2: Afloramientos de suelo encontrados en el área en estudio. Elaboración propia. A) Suelo arcilloso lateritizado de coloración anaranjada a rojiza (437102 E / 121870 N). La flecha amarilla indica una altura de 1,5 m. B) Afloramiento de suelo en corte de camino, altura de 1,80 m (441242 / 121870 N). Capa 1: depósitos arcillosos con presencia de materia orgánica. Capa 2: menor contenido de materia orgánica y una textura tipo “cebra”.

muchos de los cauces tributarios a este río son intermitentes, la época lluviosa propicia que estos aparezcan. Además, las modificaciones en el terreno realizadas por la actividad agrícola que busca mejorar el drenaje de agua superficial generan un cambio en el patrón de drenaje, esto se evidencia en la revisión de imágenes satelitales (Vargas, 2022).

Resultados

Pozos

Para el contexto regional, se revisó información de pozos de las distintas bases de datos del país, en las comunidades de Isla Chica, La Trocha y regiones aledañas como Santa Fe, Medio Queso, El Triunfo, entre otros. Los datos recopilados se resumen en el cuadro 1. La información en este cuadro se organizó para separar los pozos artesanales y perforados.

Se encontró que la profundidad de los pozos perforados varía entre 32 m y 140 m, el caudal documentado para estos pozos se encuentra entre 1 L/s y 4 L/s, sólo el pozo 20-09 de 140 m muestra un caudal de 20 L/s. El nivel estático está reportado entre 1 m y 23 m de profundidad. En algunas perforaciones, es posible que el nivel estático reportado para los pozos perforados corresponda a un nivel en equilibrio entre los dos acuíferos descritos.

Se visitaron 8 pozos, en Cachito, Punta Cortés, La Trocha e Isla Chica, de los cuales, cuatro eran perforados y cuatro artesanales. De estos, los pozos artesanales tienen su nivel estático entre 1 y 8 m de profundidad y los pozos perforados, muestran el nivel estático entre 8 y 30 m. La dirección de flujo del acuífero es de sur a norte.

Cuadro 1

Listado de información disponible sobre los pozos en el área de estudio.

Código	Nombre	Tipo	Latitud	Longitud	NE (m)	Caudal (l/s)	Profundidad (m)	Fuente
PCH-03	Ernesto	Artesanal	1218901	428860	1.8	N/A	N/I	Visita
PCH-04	Don Serapio	Artesanal	1219564	429334	5	N/A	N/I	Visita
PCH-06	Doña Fátima	Artesanal	1218287	437134	5.84	N/A	N/I	Visita
PCH-07	Casa Trocha	Artesanal	1219026	440721	7.8	N/A	N/I	Visita
PCH-09	El Combate	Artesanal	1212269	434187	13.6	N/A	50	AVS
PCH-10	Medio Queso (El Triunfo)	Artesanal	1212675	432026	12	N/A	57	AVS
P 08-03	Cuatro esquinas #1	Perforado	1220059	431886	12.08	1.3	50	AyA
P 08-06 (MQ-26)	Medio Queso	Perforado	1212311	432290	18.49	4.07	53	AyA
P 08-16	4 Esquinas #2	Perforado	1219926	432152	1.7	4.34	48	AyA
P 14-03	Santa fe #2 (sust)	Perforado	1214812	440116	11.07	7	32	AyA
P 15-27	Santa Fe #3	Perforado	1214804	439564	22.92	2.4	48	AyA
P 18-10	Santa Fe	Perforado	1217535	435753	7.48	1	85	AyA
P 20-09	Santa Fe #3	Perforado	1214469	439416	16.17	20	140	AyA
CH-15	CH-15	Perforado	1216693	431856	11.4	1	50	DA
CH-22	CH-22	Perforado	1217982	432990	24	1	84	Senara
Inv-142 (09-30)	Isla Chica #1	Perforado	1219578	436569	8.4	N/A	61	AyA
Inv-152 (10-17)	Isla Chica #2	Perforado	1218778	436439	7.5	N/A	63	AyA
Inv-161 (12-06)	Isla Chica #3	Perforado	1218771	437021	15.18	2	91	AyA
MQ-28 (08-10)	Santa Fe #1	Perforado	1214798	440120	10	7	33	AyA
MQ-32	MQ-32	Perforado	1215899	433847	11	1	72	Senara
PCH-05	Isla Chica 1	Perforado	1218632	436387	14.32	2	56.8	AVS
PCH-08	La Trocha	Perforado	1218695	441360	30	2.5	78	AVS
PCH-11	Isla Chica 2	Perforado	1218357	437406	15	4	60	AVS

Suelo

La figura 3 muestra la localización de los pozos visitados y de los lugares donde se realizaron las pruebas de infiltración y se tomaron las muestras de suelo. Diez de las muestras de suelo tomadas en el área de estudio para el análisis de textura por el método Bouyoucos, muestran una textura arcillosa, dos muestras se clasificaron como arcillo-arenosas, solamente una presentó textura franco-arcillosa y otra, una textura de suelo franco, por lo que la mayoría de suelo de la zona es de textura arcillosa. Los resultados se resumen en el cuadro 2.

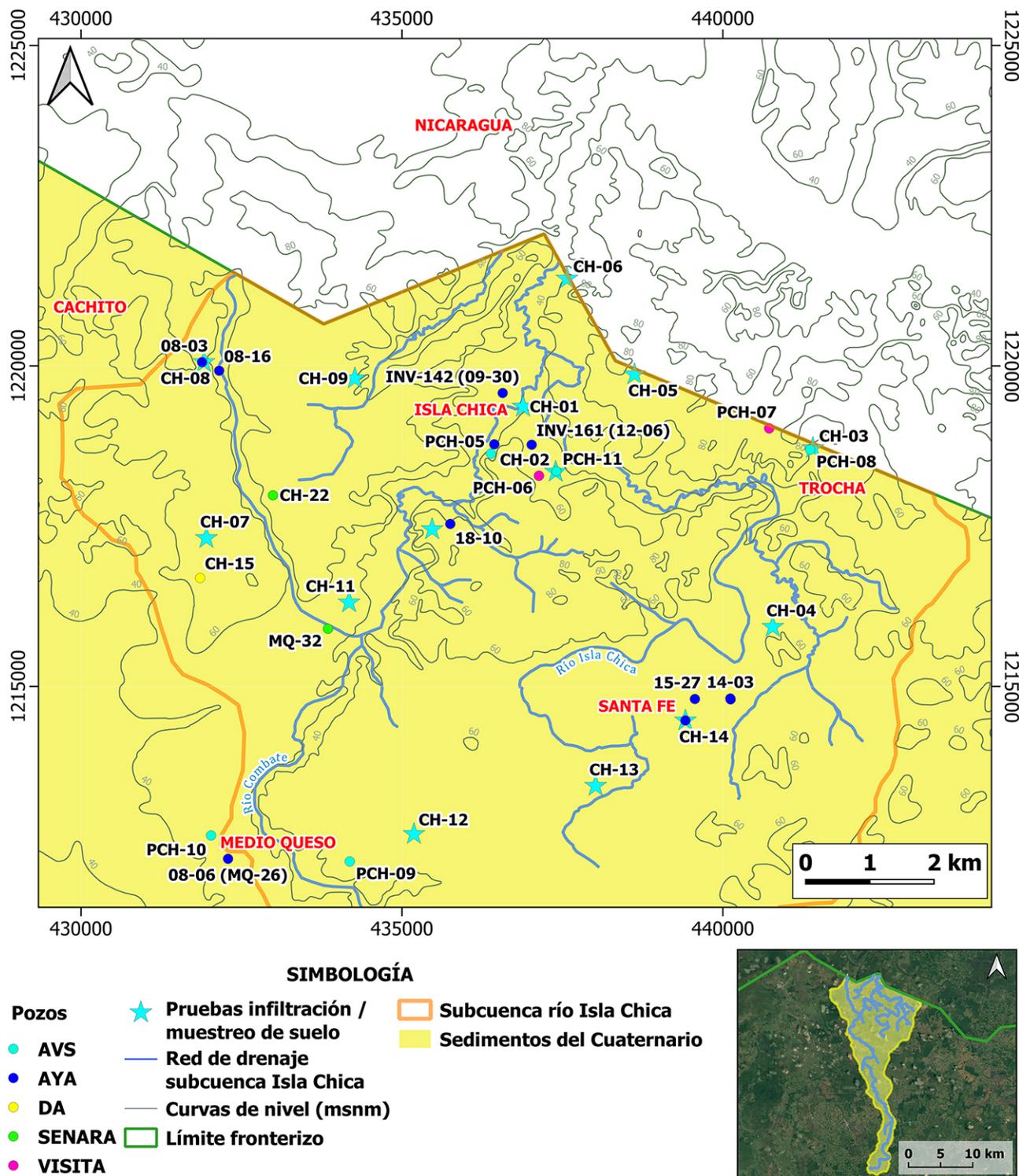


Fig. 3: Mapa de ubicación de los pozos visitados (PCH), de las pruebas de infiltración y los sitios de toma de muestras de suelo (CH). Base topográfica del IGN: Hoja Los Chiles (3249-II) y Hoja Medio Queso (3248-I). SRC: CRTM05.

Pruebas de infiltración

Las 14 pruebas de infiltración realizadas se distribuyeron según se observa en la figura 3, a partir de las características morfológicas y pedológicas de la zona. Las pruebas ejecutadas muestran valores de infiltración básica del suelo (f_c) para la zona no saturada entre 0,014 y 0,22 m/día, lo que se relaciona con un suelo arcillo-arenoso, lo que concuerda con los resultados de los análisis de textura.

Características hidrogeoquímicas

Las campañas de recolección de muestras de agua se realizaron tanto en época seca como en época lluviosa en distintos puntos alrededor del área en estudio. Se tomaron muestras a la salida de cada pozo y dos muestras en la red de distribución. Para los pozos se realizaron análisis hasta nivel 4 del Reglamento para la Calidad de Agua Potable (Procaduría General de la República, 2015). (no se muestran los datos). Según Fuentes-Schweizer et al. (2023), los valores de los análisis realizados en el agua de los pozos cumplen con los parámetros físicoquímicos del Reglamento para la calidad del agua potable. Además, señala este estudio que los valores de concentración para los iones mayores (calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, sulfato) son más altos para el pozo de La Trocha que para el pozo en Isla Chica, lo que podría indicar un mayor tiempo de contacto entre la formación acuífera y el agua según Liu et al. (2022), Adimalla y Venkatayogi (2018); Mukonazwothe et al. (2022), sin embargo, se necesita una investigación más exhaustiva para corroborar esta hipótesis.

El agua de los pozos de Isla Chica y la Trocha es de tipo bicarbonatado-cálcico. El diagrama de Stiff de la figura 4 muestra la distribución de iones mayores para estos dos pozos.

En cuanto a la calidad de agua en la red de distribución, tanto en época seca como lluviosa, se cumplen los parámetros de Nivel 1 (Cuadro 3), exceptuando el valor obtenido para el parámetro de turbidez en época lluviosa en la Red de Isla Chica. Este dato podría ser un resultado de ese muestreo particular, se recomienda realizar muestreos periódicos para observar si los análisis de turbidez generan resultados similares. El pH de dos muestras de la red de distribución en Isla Chica, durante la época lluviosa, presentan un valor de 5,8, lo que se considera ácido, sin embargo, no es posible con tan pocos datos, ofrecer una explicación adecuada a este valor.

Balance hídrico de suelos

Para el balance hídrico de suelos y la estimación de la recarga potencial del acuífero superior, se utilizó la metodología propuesta por Schosinsky (2006), que utiliza los parámetros de precipitación pluvial, retención pluvial, capacidad de infiltración de los suelos y sus características, cobertura vegetal, profundidad de las raíces extractoras de agua, evapotranspiración real, uso del suelo y pendiente del terreno.

Los datos de precipitación provienen de la estación meteorológica del IMN, Comando Los Chiles, se muestran en el cuadro 4, se muestra que los meses de enero a abril corresponden a la época seca y los meses de mayo a diciembre corresponden a datos de época lluviosa.

Cuadro 2

Coordenadas de la ubicación de las pruebas de infiltración, valores de permeabilidad del suelo saturado (fc), textura de suelo y densidad aparente.

Prueba	Longitud E	Latitud N	Infiltración (m/día)	Textura del suelo	Densidad aparente (g/cm ³)
CH-01	436899	1219458	0,044	Arcilloso	1,4
CH-02	437395	1218348	0,113	Arcilloso	1,2
CH-03	441356	1218807	0,025	Arcilloso	1,3
CH-04	440777	1215929	0,046	Arcilloso	1,3
CH-05	438623	1219869	0,090	Arcilloso	1,1
CH-06	437571	1221362	0,113	Arcilloso	1,2
CH-07	431953	1217314	0,213	Arcilloso	1,3
CH-08	431915	1220060	0,108	Arcillo arenoso	1,1
CH-09	434266	1219805	0,140	Franco arcilloso	1,2
CH-10	435470	1217451	0,073	Arcillo arenoso	1,1
CH-11	434176	1216310	0,222	Franco	1,5
CH-12	435186	1212697	0,074	Arcilloso	1,7
CH-13	438017	1213448	0,014	Arcilloso	1,4
CH-14	439416	1214469	0,115	Arcilloso	1,1

Para los datos de infiltración por precipitación, se utilizaron los calculados a partir de las pruebas de doble anillo (Shosinsky y Losilla, 2000), que corresponden con suelos de textura arenosa-arcillosa, los análisis de suelos asignan una textura arcillosa para la mayoría de las muestras.

El mapa utilizado para clasificar el uso del suelo se construyó a partir de ortofotos 2017 escala 1:5 000 tomadas del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), así como de las imágenes satelitales del servidor web de Bing del año 2020. La mayor parte del terreno presenta uso asociado a cultivo o pasto. Las zonas asociadas a bosque se encuentran cercanas a quebradas o a ríos. La huella urbana es reducida y hay poca impermeabilización antrópica por infraestructura.

Con el modelo de elevación generado, se clasificó el área en dos zonas de pendientes diferentes. La zona más al norte del área de estudio presenta una pendiente plana y la zona al sur, una pendiente muy plana. Se asignó un Ci de 1 para toda el área de estudio.

Los valores promedio para capacidad de campo superan el 35 %, lo que se asocia a suelos de textura arcillosa, esto concuerda con los resultados obtenidos para el análisis de textura, sin embargo, dentro de los ensayos de textura de suelos, también hay muestras que corresponden a textura areno-arcillosa y franco-arcillosa. En la zona 1, este valor es de 42,13 % y en la zona 2 el valor es de 45,33 %; con estos datos se estiman los valores de humedad inicial y final necesarios para el cálculo del balance hídrico de suelos. En cuanto a los valores del punto de marchitez, los valores obtenidos fueron 38,50 % para la zona 1 y 39,50 % para la zona 2. Los análisis de densidad aparente muestran valores promedio de 1,20 g/cm³ para la zona 1 y de 1,38 g/cm³ para la zona 2.

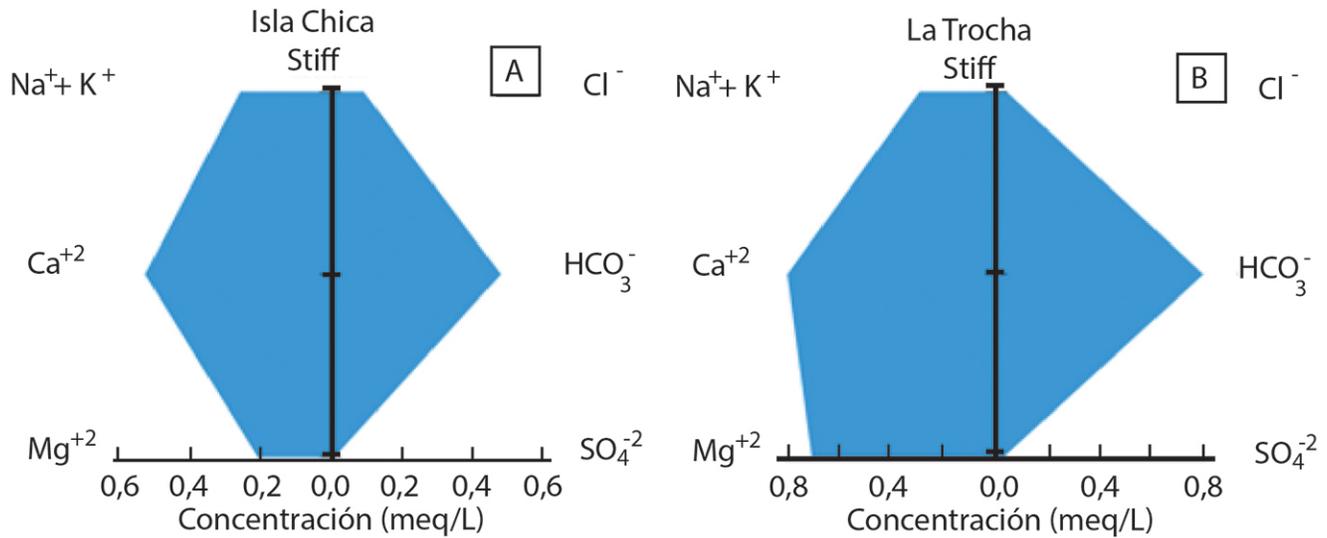


Fig. 4: Diagrama de Stiff para los pozos de A. Isla chica y B. La Trocha.

El cálculo de evapotranspiración potencial se realizó utilizando el método de Blaney y Criddle, (OMM, 1972), los valores obtenidos oscilan entre 75 y 195 mm/mes.

La recarga potencial del acuífero superior, con el modelo propuesto por Schosinsky (2006), se estimó entre 357,82 mm y 491,70 mm al año.

Vulnerabilidad del acuífero

Se utilizó el método GOD (Foster et al., 2002), modificada para su uso en nuestro país por Ramírez (2013), que utiliza como parámetros base el grado de confinamiento hidráulico del acuífero (G), el tipo de litología que cubre el acuífero (O) y la profundidad en que se ubica el nivel de saturación de agua (D). El análisis se realiza para el acuífero superficial, que se interpretó como un acuífero somero, libre, cubierto. En el cuadro 5 se resumen los parámetros asignados al modelo de vulnerabilidad (GOD).

El valor obtenido corresponde con un valor de vulnerabilidad baja-media a la contaminación para el acuífero superior. Los factores que más pesan en esta clasificación son el tipo de acuífero, y el nivel estático. Se debe aclarar que muchos de los pozos excavados de poca profundidad, que captaban este acuífero, se encuentran actualmente en desuso, según se comprobó en las visitas realizadas.

Modelo conceptual

Para el modelo se propone la existencia de un acuífero somero, libre, cubierto, de baja transmisividad, formado por capas intercaladas de arena y arcilla el cual es aprovechado por medio de pozos artesanales.

Debajo de esta unidad se encuentra un acuífero semiconfinado a confinado, formado por depósitos de origen volcánico; se propone el nombre "Acuífero Isla Chica" para esta unidad. Este acuífero está

Cuadro 3

Calidad de agua (Nivel I del Reglamento de Calidad de Agua Potable [Procaduría General de la República, 2015]) para la red de distribución en Isla Chica y la Trocha. El agua proviene de pozos perforados en la zona de estudio.

Muestra	Época	C. eléct (± 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$)	Turbidez ($\pm 0,2$ UNT)	Color (Upt-Co)	Cloro residual ($\pm 0,1$ mg/L)	Temp (± 2 °C)	Olor/ Sabor	pH ($\pm 0,2$)	Colif. fecales (NMP/100 mL)	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)
Red 1	Seca	54	< 0,2	0	NA	27,0	Acep	6,6	ND	ND
La Trocha	Lluv	114	< 0,2	0	NA	26,7	Acep	6,5	ND	ND
Red 2	Seca	225	0,3	0	NA	28,0	Acep	7,3	ND	ND
La Trocha	Lluv	129	1,1	0	NA	27,8	Acep	7,3	ND	ND
Red 1	Seca	69	0,3	0	NA	25,5	Acep	6,5	ND	ND
Isla Chica	Lluv	34	9,0	0	NA	27,1	Acep	5,8	ND	ND
Red 2	Seca	69	0,3	0	NA	25,5	Acep	6,5	ND	ND
Isla Chica	Lluv	34	9,0	0	NA	27,1	Acep	5,8	ND	ND
Valor de alerta	-	400	1,0	< 5	0,3	-	Acep	-	ND	ND
Valor máximo admisible o valor recomendado	-	-	5	15	1	18 a 30	Acep	6 a 8	ND	ND

C. eléct: conductividad eléctrica; Temp: temperatura; Colif. fecales: coliformes fecales; Lluv: lluviosa; NA: no aplica; ND: no determinado.

conformado por arenas volcanoclásticas levemente alteradas que se extienden de los 30 m hasta los 70 m de profundidad, con un espesor promedio de 40 m. Las arenas volcanoclásticas sobreyacen lavas ligeramente fracturadas y meteorizadas, que contienen óxidos de hierro.

Según lo revisado por Vargas (2022) en los informes de los pozos 20-09 y 10-17 muestran que las rejillas se colocaron en el acuífero Isla Chica, sin embargo, los niveles estáticos están varios metros por encima de las rejillas, lo que evidencia el confinamiento del acuífero. (ver Fig. 5B). La dirección de flujo del agua subterránea es de sur a norte (ver Fig. 5A); los ríos y quebradas también escurren de sur a norte y desembocan en el río San Juan en territorio nicaragüense.

La vulnerabilidad del acuífero superior se clasifica como baja-media según las variables utilizadas por el modelo GOD: grado de confinamiento hidráulico del acuífero, tipo de litología que cubre el acuífero y la profundidad en que se ubica el nivel de saturación de agua. En cuanto al riesgo a la contaminación, se subdividió la zona de estudio según las fuentes de contaminación difusa y se asignó la categoría de riesgo según el mapa de uso de suelo. Se asignó un riesgo reducido al uso de pastizales y bosques y un riesgo moderado a la zona cultivada, ya que en esta zona el uso de plaguicidas y fertilizantes puede representar un mayor riesgo (Vargas, 2022).

Cuadro 4

Precipitación y temperatura promedio mensual, para el periodo 1995 a 2021, estación meteorológica Comando Los Chiles del IMN.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
mm	89,5	42	28,3	41,4	175,2	236,7	276,7	219,9	202,9	206,5	157,6	131,8	150,7
T med C°)	25,4	25,7	26,5	27,6	27,7	27,3	26,7	27,2	27,2	27,2	26,4	25,7	-

En la figura 5A se ilustra la ubicación de los pozos y las isofreáticas calculadas para el acuífero, así como la ubicación espacial del perfil hidrogeológico esquemático (Fig. 5B) generado a partir de las descripciones litológicas de los pozos: 08-16 (Cuatro Esquinas #2 - AyA), 10-17 (Isla Chica #2 - AyA), PCH-11 (Isla Chica 2 - AVS) y 20-09 (Santa Fe #3 - AyA).

Los pozos perforados son la principal fuente de agua para consumo humano en los poblados de Isla Chica y La Trocha. Se ha trabajado con las comunidades para que manejen y protejan adecuadamente los pozos que han perforado en la zona, además los análisis de agua realizados en las muestras de la red de distribución muestran que la calidad de agua es adecuada para consumo humano, con un tratamiento adecuado en caso de presentar valores de turbidez fuera de especificación.

Cuadro 5

Resumen de los valores asignados para el modelo de vulnerabilidad según el método GOD.

Parámetro	Dato	Valor
Confinamiento (G)	Libre cubierto	0,7
Capa suprayacente (O)	Limos-arcillas aluviales	0,5
Profundidad del NE (D)	< 5 m	0,9
Resultado		0,31

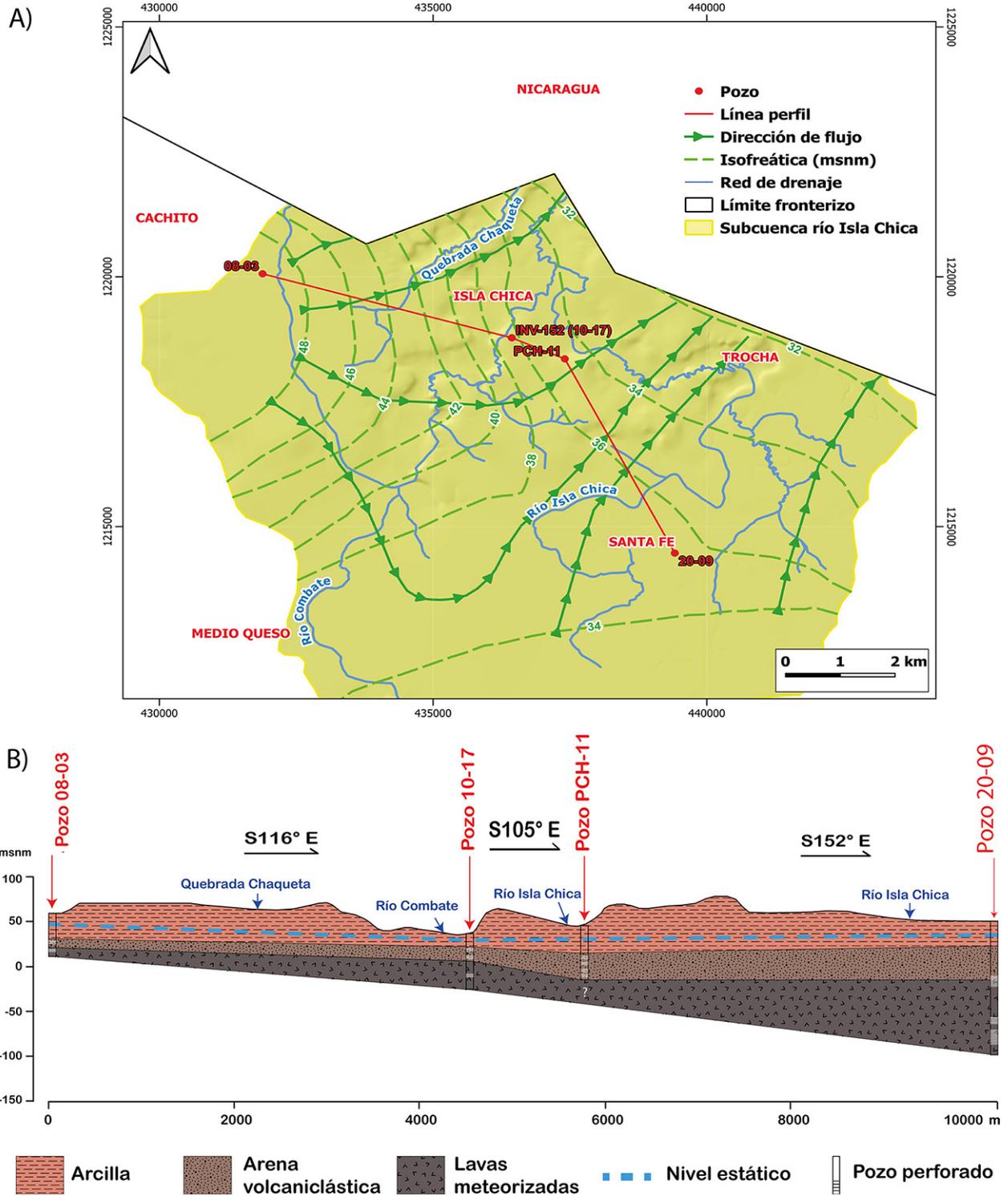


Fig. 5: A. Líneas de flujo estimadas para el acuífero inferior en la zona de estudio, B. Perfil hidrogeológico para la zona de estudio.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de los fondos FEES-Conare que hicieron posible esta investigación. Se agradece a los investigadores de la Universidad Nacional que participaron en el proyecto, a la empresa Hidroambiente Consultores S.R.L., a la Escuela de Geología y a la ONG Agua Viva Serves S.A. en Los Chiles, Costa Rica y a las comunidades por su colaboración. También a Mariann Guillén Osorno por su colaboración. Al revisor anónimo por sus útiles comentarios.

Referencias

- Adimalla, N., y Venkatayogi, S. (2018). Geochemical characterization and evaluation of groundwater suitability for domestic and agricultural utility in semi-arid region of Basara, Telangana State, South India. *Applied Water Science*, 8(1), 44. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0682-1>
- American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23th ed.). American Public Health Association.
- Barrantes, O., y Sandoval, L. (2016). Uso/cobertura de la tierra en los cantones de Upala, Guatuso y Los Chiles en el año 2011. *Revista Geográfica de América Central*, 56, 59–91. <https://doi.org/10.15359/rgac.1-56.3>
- Procuraduría General de la República. (01 de setiembre de 2015). *Reglamento para la calidad del agua potable No 38924-S*. https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC
- Denyer, P., y Alvarado, G. (2007). *Mapa geológico de Costa Rica*. [Escala 1:40 0000]. Librería Francesa.
- 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*. The World Bank.
- Fuentes-Schweizer, P., Morales-Mora, E., Vargas-Muñoz, R., Barrantes-Jiménez, K., y Chacón-Jiménez, L. (2023). Physical, chemical, and microbiological characteristics of groundwater in Los Chiles, Costa Rica, and its association with land use. *UNED Research Journal*, 15(2), e4656. <https://doi.org/10.22458/urj.v15i2.4656>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2021). *Anuario Estadístico 2019-2020*. https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-11/reanuario2019-2020_0_2.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2010). *Anuario Estadístico 2010*. https://inec.cr/wwwisis/documentos/INEC/Anuario_Estadistico/Anuario_Estadistico_2010.pdf
- Liu, F., Zou, J., Liu, J., Zhang, J., y Zhen, P. (2022). Factors controlling groundwater chemical evolution with the impact of reduced exploitation. *Catena*, 214, 0341-8162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106261>
- Malavassi, E., y Madrigal, R. (1970). Estudio geológico regional de la zona Atlántico norte de Costa Rica. *Informe Técnico y notas geológicas*, 9(32), 1-12.
- Mukonazwothe, M., Munyai, L. F., y Mutoti, M. I. (2022). Groundwater quality evaluation for domestic and irrigation purposes for the Nwanedi Agricultural Community, Limpopo Province, South Africa. *Heliyon*, 8(4), e09203. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09203>

- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (1972). *Manual de instrucciones, estudios hidrológicos*. OMM. https://library.wmo.int/viewer/32688/download?file=wmo-z_1972_man.pdf&type=pdf&navigator=1
- Programa Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco). (2015). *Estrategia regional para la evaluación y gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en las Américas*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000235394>
- Ramírez, R. (2013). *Incorporación de la zona no saturada en la metodología de vulnerabilidad hidrogeológica del método GOD*. Senara.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34–35, 13–30. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>
- Schosinsky, G., y Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43–55. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i23.8579>
- Soto, D., y Alvarado, G. (2012). Peperitas en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 47, 55–68. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i47.6486>
- Vargas, R. (2022). *Caracterización hidrogeológica de las comunidades Isla Chica y La Trocha, cantón de Los Chiles, Alajuela*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/01d191dd-d6c8-45c2-8bf8-1c5aab0bbd71/full>