



Identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, República de Panamá


Identification and characterization of potential aquifer systems in the middle and lower part of the La Villa River basin, Republic of Panama.

Valentina Opolenko de Arjona¹

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), Panamá

Resumen

La cuenca hidrográfica del río La Villa es considerada como cuenca prioritaria del país, por ser una de las más importantes en el ámbito nacional debido a su gran valor socioeconómico y, en contraste, la más degradada ambientalmente al enfrentar los mayores periodos de déficit hídrico y sequías. El objetivo de esta investigación fue determinar las condiciones geológicas en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, con el fin de identificar nuevas reservas explotables de aguas subterráneas, revelando zonas perspectivas donde existen acuíferos cuya geometría y características hidráulicas no se conocen en forma precisa. Para esto, se realizó el levantamiento geológico complementado con la exploración geofísica, que comprendió un conjunto de trabajos de campo y la generación de los respectivos mapas y perfiles litológicos. Como resultado, en el área investigada fueron delimitadas y caracterizadas las zonas acuíferas Borrola-La Colorada y Pesé, ambas perspectivas para potenciar las futuras explotaciones de agua subterránea. Con la ejecución de este proyecto piloto, se han sentado por primera vez en el país las bases metodológicas para adquirir los conocimientos necesarios encaminados a la detección de sitios óptimos para la ubicación de futuras perforaciones con la aplicación de criterios técnicos apoyados en la ciencia hidrogeológica. Estos criterios están orientados hacia los tomadores de decisiones y gestores de los recursos hídricos

1 Doctora en Tecnología Ambiental y Gestión del Agua. Investigadora en Gestión del Agua del Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe, CATHALAC, Edificio 111, Ciudad del Saber, Clayton, Panamá, República de Panamá. Correo electrónico: valentina.opolenko@cathalac.int
 <https://orcid.org/0000-0002-8734-9349>

para que puedan aprovecharlos de manera sostenible, abandonando el esquema existente de simple extracción no sólo en la cuenca del río La Villa, sino a nivel nacional.

Palabras clave: Cuenca hidrográfica, agua subterránea, acuífero, geofísica, sostenibilidad.

Abstract

The La Villa River hydrographic basin is considered a priority basin in Panama due to its great socioeconomic value, however, its environmental degradation is notorious as consequence of having suffered from the greatest number of water deficiency periods and droughts. The objective of the present investigation was to determine the geological conditions in the middle and lower part of the La Villa River basin, in order to identify new exploitable groundwater reserves and to reveal prospective zones housing aquifers whose geometry and hydraulic characteristics are not known precisely. Thus, a geological survey was carried out and complemented with geophysical exploration which included field work and the creation of maps and lithological profiles. As a consequence of our research, the *Borrola-La Colorada* and *Pesé* aquifers zones were delimited and characterized in the investigated area and both deemed prospective for future groundwater exploitation. With the execution of this pilot project the methodological foundations have been established, for the first time in Panama, for obtaining the necessary knowledge involved in the detection of optimal future drilling sites based on technical criteria leveraged on hydrogeological science. These criteria are made available to decision makers and water resource managers for the sustainable exploitation of water resources thus promoting the departure from the existing irrational scheme of simple extraction applied not only in La Villa River basin but other basins throughout the nation.

Keywords: Watershed; Groundwater; Aquifer; Geophysics; Sustainability.

Introducción

El cambio climático, que ya está en marcha con efectos adversos sobre los recursos hídricos que estamos obligados a mitigar, nos ocasionará en un futuro cercano una mayor dependencia de las aguas subterráneas como mecanismo de protección contra las sequías, dada la creciente incertidumbre respecto de la disponibilidad del agua superficial. Cada vez que nuestra sociedad enfrenta una situación de crisis como el fenómeno El Niño, surgen soluciones de emergencia, que obligan a tomar decisiones en busca de paliativos temporales. Sin embargo, los recursos hídricos como el agua subterránea para su exploración y explotación requieren métodos sistemáticos con base científica.

El agua subterránea permite cubrir las necesidades hídricas de gran parte de la población de Panamá en áreas rurales, en pequeñas y grandes aglomeraciones urbanas, aún en aquellas regiones con aguas superficiales en abundancia.

Actualmente, el conocimiento que se tiene a nivel nacional sobre el potencial de los acuíferos y la calidad de las aguas subterráneas es muy pobre, y no se cuenta administrativamente con los instrumentos de gestión necesarios

para ejercer un control sobre la explotación de los acuíferos, debido a que en el país todavía no existen los programas de regulación de extracción y protección de la calidad de las aguas subterráneas, dirigidos a los acuíferos, donde se definan restricciones de volúmenes de la demanda y de uso de la tierra frente a la vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos.

En consecuencia, las políticas vigentes de concesión de recursos hídricos subterráneos pueden llevar a situaciones de sobreexplotación, con el enorme riesgo de dejar a la población sin esta fuente de abastecimiento de agua, más aún en aquellas zonas donde el agua subterránea es la única fuente de suministro para todos los usos.

Con el fin de identificar nuevas reservas de aguas subterráneas susceptibles de explotación en la cuenca hidrográfica del río La Villa de Panamá en el marco del proyecto *“Fortalecimiento de la Resiliencia de los Recursos Hídricos Frente al Cambio Climático en dos Ciudades de la Cuenca del Río La Villa en el Arco Seco de Panamá”* ejecutado por el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), con fondos del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC, Canadá) y del Ministerio de Ambiente de Panamá (MIAMBIENTE), se realizó un estudio denominado *“Identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, República de Panamá”*.

Su objetivo principal fue determinar las condiciones geológicas en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, con el fin de identificar nuevas reservas explotables de aguas subterráneas, revelando zonas perspectivas donde existen acuíferos cuya geometría y características hidráulicas no se conocen en forma precisa.

Es importante señalar que los alcances de los componentes del estudio, están estrechamente relacionados con las Metas del Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos (Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016). Este documento representa una hoja de ruta con cinco metas y retos específicos, alcanzables en un horizonte de 35 años, que son: acceso universal al agua de calidad y saneamiento básico; agua para crecimiento económico inclusivo; mantenimiento de 52 cuencas hidrográficas saludables; asegurar el funcionamiento de la infraestructura nacional de agua y saneamiento y finalmente garantizar la sostenibilidad hídrica.

Asimismo, hay vínculo directo con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas (ONU, 2015), ya que la metodología aplicada en la realización de este estudio está plasmada en la Evaluación de los Recursos Hídricos (ERH), que forman parte de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), cuyo enfoque se basa en cuatro “principios guía” que cubren aspectos ambientales, sociales, políticos y económicos (WWAP, 2016).

De esta manera, el modelo de gestión aplicado permitió durante la ejecución de la investigación la fusión de los aspectos científicos, técnicos con los sociales, integrando la gestión del agua superficial y subterránea en un sentido cualitativo, cuantitativo y ecológico desde una perspectiva multidisciplinaria y centrada en las necesidades y requerimientos de la sociedad en materia de agua.

Además, al finalizar este estudio los resultados alcanzados ofrecen herramientas tecnológicas que permiten a los usuarios de la cuenca minimizar la dependencia de las aguas superficiales mediante el uso racional del agua subterránea, creando así la resiliencia hídrica. Por otra parte, la investigación realizada logra sentar las bases para que los tomadores de decisiones y gestores de los recursos hídricos subterráneos puedan aprovecharlos de manera sostenible, abandonando el esquema existente de simple extracción.

Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río La Villa se localiza en la vertiente del Pacífico de la República de Panamá, en la península de Azuero, en la cual, según el último Censo Nacional de Población, habitan aproximadamente 95 mil personas (INEC, 2010). Es una extensa zona de 1,296 km² (IGNTG, 2007), donde el 59 % de la cuenca pertenece al llamado *Arco Seco* (Opolenko, 2016), una región que comprende las llanuras y colinas costeras orientales de las provincias de Los Santos y Herrera, así como el litoral Sur de la provincia de Coclé.

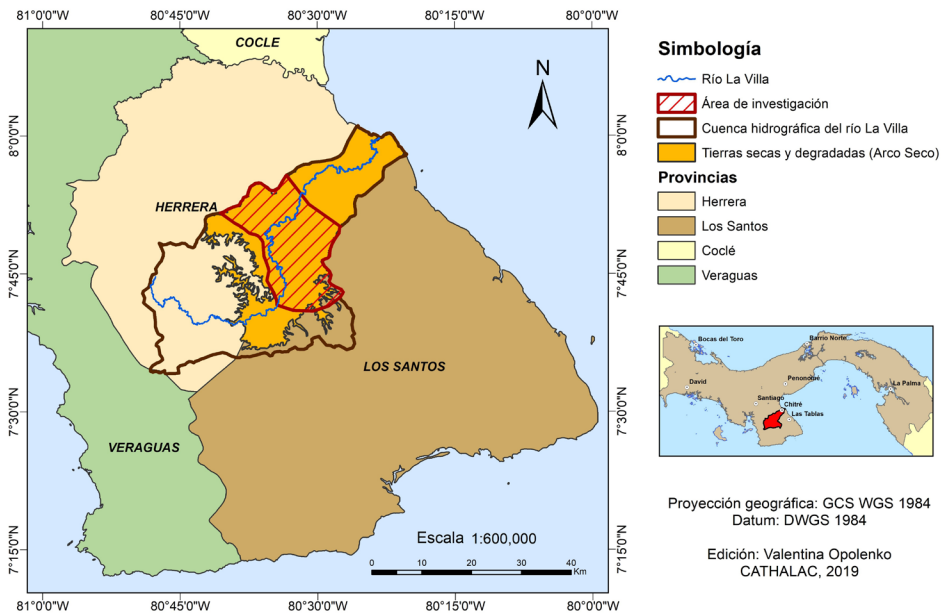
El área mencionada enfrenta los mayores periodos de déficit hídrico y sequías a consecuencia de la variabilidad climática natural de la zona y los eventos meteorológicos extremos (ANAM, 2009). También, según la Zonación de Regímenes Hídricos en América Latina y el Caribe, incluyendo a Panamá, la superficie de Arco Seco se clasifica como un territorio subhúmedo, con 5-6 meses secos (UNESCO, 2007), tiene clima tropical

seco con precipitaciones anuales inferiores a los 1500 mm (las menores del país, variando entre los 1000 y 1500 mm/año), y escasez de agua en comparación con el resto del territorio.

La cuenca del río La Villa es considerada como una de las más importantes en el ámbito nacional debido a su gran valor socioeconómico y, en contraste, la más degradada ambientalmente, lo que reflejan los Indicadores Ambientales para las tierras secas y degradadas de Panamá (ANAM, 2007).

Mientras tanto, el área de estudio, que comprende zonas parciales de la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, es un extenso territorio de 349 km², en la cual habitan unas 13 mil personas. Es un importante polo de desarrollo agroindustrial, a pesar que se ubica justamente en la región de Arco Seco (Figura 1).

Figura 1. Localización de la cuenca del río La Villa y el área de investigación.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

La delimitación del área de estudio se realizó con un criterio geológico y geomorfológico, a fin de revelar nuevas zonas donde existen acuíferos perspectivas para su futura explotación, es decir, de manera independiente

de la división política provincial. Cabe destacar que esta área, como ya se mencionó, se ubica en la parte media y baja de la cuenca, razón por la cual algunos distritos y corregimientos solo están contemplados de manera parcial con respecto a su división territorial administrativa.

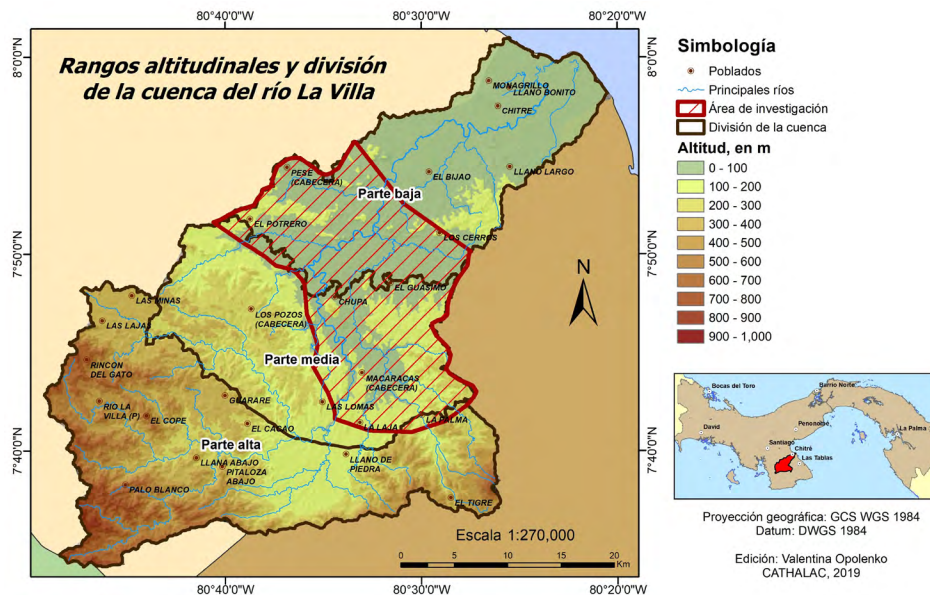
El relieve del área de estudio se caracteriza por la presencia de un amplio sector de llanuras y por tierras con colinas suaves, cuyos alineamientos muestran signos de avanzados procesos de erosión y efecto degradante de las actividades agropecuarias. La elevación media en esta zona es de unos 100 msnm. A nivel general, tomando en consideración los rangos altitudinales, la cuenca del río La Villa se divide en partes alta, media y baja.

Esta división se basa en rangos de elevación calculados a partir del modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca y se estableció durante la ejecución del proyecto “Plan de Ordenamiento Territorial Ambiental de la Cuenca del Río La Villa”, realizado por la Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM) en el año 2008. Los límites altitudinales quedaron establecidos de la siguiente manera: la parte baja de la cuenca se extiende desde los 0 m hasta una elevación de 80 metros. La parte media se inicia en los 80 m hasta los 300 m y la parte alta desde los 300 m hasta la altura máxima de la cuenca, que sería el cerro Cacarañado con 957 m (Figura 2).

Geomorfológicamente la parte de la cuenca del río La Villa que constituye la zona de estudio, está representada por la unidad denominada como Regiones Bajas y Planicies Litorales en el área de Pesé, y la parte suroeste por la Región de Cerros Bajos y Colinas en sectores como Esqui-guita, Borrola y Quebrada El Potrero (IGNTG, 2007).

Con respecto a la cobertura y usos actuales del suelo, predomina el uso agropecuario con 63 % de la superficie total del área de estudio y 31.1 % del territorio está cubierto por rastrojos y matorrales. Sólo un 3.1 % de la superficie está ocupado por bosques primarios y secundarios o intervenidos. Prácticamente, las áreas de bosques están rodeadas por matorrales que parecen formar una zona de amortiguamiento o transición de cobertura boscosa a la actividad agropecuaria. El resto de la superficie de las partes media y baja de la cuenca está formado por otro tipo de cobertura como uso urbano y agua (Cuadro 1 y Figura 3).

Figura 2. Rangos altitudinales y división de la cuenca del río La Villa.



Fuente: Elaboración propia a partir de ANAM, 2008.

Cuadro 1. Cobertura y usos actuales del suelo en el área de estudio.

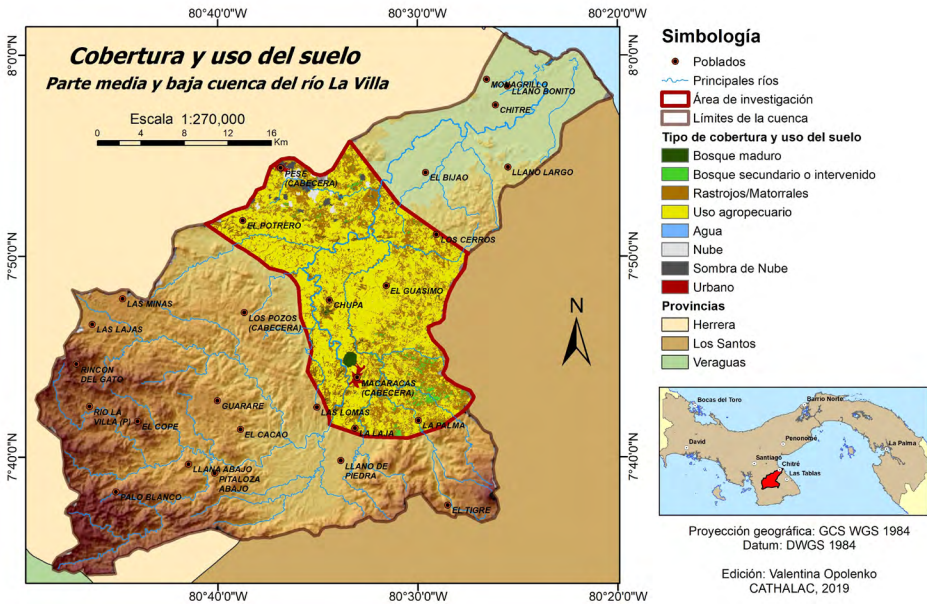
Tipo de cobertura	Superficie (km ²)	% de ocupación
Bosque maduro	3.43	1.0
Bosque secundario o intervenido	7.49	2.1
Rastrojos/ Matorrales	108.32	31.1
Uso agropecuario	219.72	63.0
Agua	0.33	0.1
Urbano	2.24	0.6
Otros (nube y sombra de nube)	7.04	2.0
Total	348.57	100.0

Fuente: Elaboración propia a partir de ANAM, 2008

Los sistemas de producción que predominan en la zona investigada son la agricultura de subsistencia y la agricultura comercial. Bajo el sistema de agricultura de subsistencia se producen cultivos de granos básicos como arroz, maíz, frijoles y guandú; también se cultivan algunas hortalizas como tomates, pimentones, pepinos, cebollas; además se siembran raíces y tubérculos como ñame, yuca y oteo; frutales como piña, café y plátanos;

y otros como la caña de azúcar y el achiote. Mientras tanto, las principales especies que se cultivan bajo el sistema de la agricultura comercial son el maíz, la caña de azúcar, las cucurbitáceas (melón, sandía y zapallo), el tomate y pimentón (INEC, 2011).

Figura 3. Cobertura y uso del suelo en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa.



Fuente: Elaboración propia a partir de ANAM, 2008.

Caracterización geológica

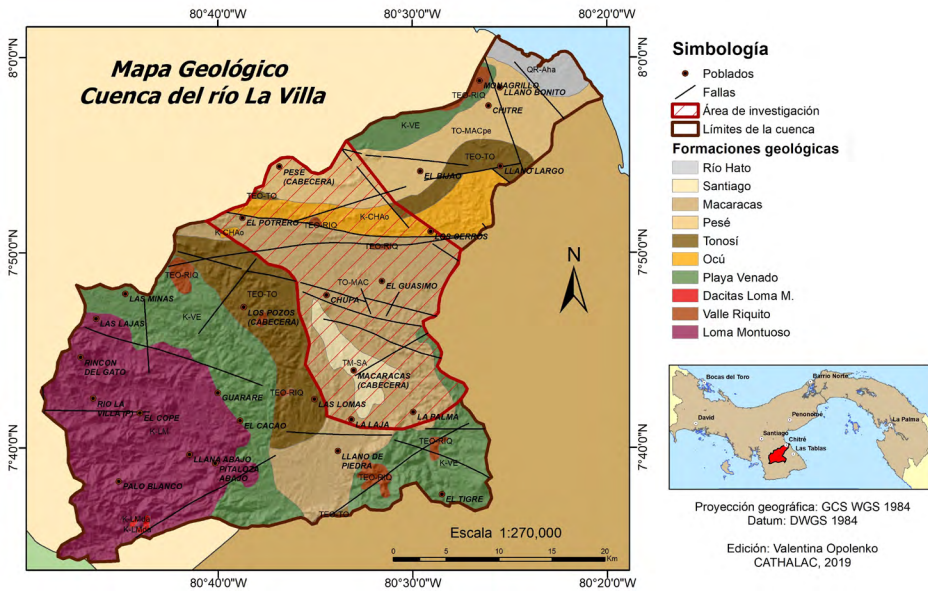
El marco geológico de la cuenca del río La Villa, así como de la zona de investigación, se desarrolla en un ambiente complejo por su evolución histórica de pequeño arco de islas y mares poco profundos a un istmo afectado por intensa actividad volcánica acompañada de emersiones, regresiones y movimientos tectónicos con vectores multidireccionales, erosión y sedimentación en el plano horizontal.

El conjunto litológico que constituye el área de estudio presenta rocas asociadas a la actividad volcánica de la península de Azuero, un elemento fundamental para entender cómo se formó el relieve, debido a que

muchos de los cambios que se dieron en esta parte de la cuenca dependen de la naturaleza de las rocas, ya que el comportamiento de estos relieves se producirá de una manera concreta ante los empujes tectónicos, los agentes de erosión y transporte, así como la variación del clima.

Según el Mapa Geológico de Panamá (DGRM, 1991), en la zona investigada afloran rocas de origen ígneo y sedimentario, cuyas edades de formación comprenden un amplio intervalo de tiempo (83.6 a 13.8 Ma) desde el período Secundario al Terciario (Figura 4 y Cuadro 2).

Figura 4. Mapa geológico de la cuenca del río La Villa y del área de investigación.



Fuente: Elaboración propia a partir de DGRM, 1991.

Cuadro 2. Formaciones geológicas y la litología del área de estudio.

Periodo	Formación	Símbolo	Descripción
<i>Formaciones Sedimentarias</i>			
Terciario	Santiago	TM-SA	Arenisca, conglomerado
	Macaracas	TO-MAC	Tobas y areniscas tobáceas
	Pesé	TO-MACpe	Tobas continentales, areniscas, calizas
	Tonosí	TEO-TO	Lutitas, areniscas
Secundario	Ocú	K-CHAO	Calizas y tobas
<i>Formaciones Volcánicas (Extrusivas)</i>			
Secundario	Playa Venado	K-VE	Basaltos, pillow lavas
<i>Formaciones Plutónicas (Intrusivas)</i>			
Terciario	Valle Riquito	TEO-RIQ	Cuarzodioritas, noritas y gabros

Fuente: DGRM, 1991.

Caracterización del sistema de fallamientos y principales estructuras geológicas

La evolución de la geología histórica de la zona investigada muestra un cuadro de intercalamientos de formaciones sedimentarias, ígneas efusivas e intrusivas, que posteriormente fueron afectadas por levantamientos y movimientos tectónicos que han moldeado con importantes fallas regionales su configuración actual.

Por ejemplo, a pesar de que se encuentran fuera del área de investigación, en las exploraciones con recuperación de núcleos como el del pozo en “Punta Búcaro” realizado por el proyecto “Catastro Rural de Tierras y Aguas” de la Comisión de Reforma Agraria, Geología (CARTAP, 1968) en Tonosí, provincia de Los Santos, se revelaron rocas sedimentarias con un espesor de unos 700 metros desde la superficie, con capas interstratificadas de calizas, calizas arenosas, lutitas, arenisca tobácea, hasta tocar el techo de una brecha volcánica que contenía una matriz limosa con fragmentos de fósiles.

Es notable que en el área de Macaracas se recuperaran también brecha y aglomerado fracturado con relleno de calcita, pero casi aflorando en un pozo de 310 m de profundidad (Pozo N° IDAAN MP2), perforado en 2017 con recuperación de núcleos, lo cual indica el amplio espectro del espesor de las capas sedimentarias y volcánicas en Azuero.

En lo que respecta a tectónica, la península de Azuero, donde se localiza la cuenca del río La Villa, tiene un marcado sistema de fallamientos asociados a los eventos tectónicos regionales emanados por la presión de

las placas tectónicas desde el sur, que tienen vectores de acción de oeste a este (Nazca y Cocos), relevantes durante el desarrollo del istmo de Panamá y actualmente activos con subducción a lo largo de Suramérica, que de manera diferencial se reflejan en el ascenso del istmo y sectores puntuales como la península de Azuero, lo que permitió movimientos progresivos del basamento oceánico en contraposición con la placa del Caribe.

Concretamente, en el área de la cuenca en el plano horizontal, la mayoría de tectolineales tienen la dirección este-oeste, pero también están interceptadas por una zona de fallas con dirección noroeste-sureste. Además de estos fracturamientos regionales, existen otros de menor dimensión, relacionados con el sistema de diaclasas o juntas más pequeñas, lo que refleja la topografía y composición de la red hidrográfica dentro de la cuenca, incluida la zona de investigación.

En el plano vertical son notorios los levantamientos por colisión de bloques o desplazamientos, a lo largo de una falla regional que va de este a oeste, denominada falla *Ocú-Parita* en el mapa Geológico Nacional escala 1:250,000. Los bloques desplazados luego fueron erosionados y pueden observarse al sur de Pesé en la zona investigada.

El evento tectónico indicado es relevante porque deja expuesta la formación más antigua de una secuencia de tres formaciones: la formación Ocú, Tonosí y Pesé. En la parte inferior se tiene la formación Ocú, del grupo Changuinola (K-CHAo) del Cretácico superior, siendo visibles afloramientos de calizas y tobas; sobre esta se superpone la formación Tonosí (TEO-TO) del Eoceno, con lutitas y areniscas. En la parte superior se presenta la formación Pesé (TO-MACpe) del Oligoceno con tobas continentales, areniscas y calizas.

La amplitud del levantamiento de las formaciones sedimentarias mencionadas, que tienen en su parte superior a la formación Pesé (TO-MACpe), concuerda con los buzamientos con dirección noreste con ángulos de 11 a 25° de inclinación. No obstante, hay dislocaciones donde afloran capas hasta 45°, como en el caso en la entrada de la ciudad de Pesé (Figura 5).

Figura 5. Corte de talud en la entrada a Pesé, con buzamiento de capas por el orden de 45°.



Fuente: Autora

Con respecto al desplazamiento de bloques, relacionado con esta falla regional, el proyecto de la Comisión de Reforma Agraria que generó mapas de *Geología y Geomorfología* escala 1:50,000 para el área de Pesé (CARTAP, 1968), indica que el bloque norte se desplaza en forma relativa hacia el oeste y el sector sur de la falla se ha desplazado hacia el este, siendo una información relevante, pues el mapa tiene referencia de rasgos geológicos a nivel de semidetalle. Por otra parte, esto coincide con la orientación noroeste de la propia península de Azuero que pudiera reflejar cierta rotación del bloque peninsular ante las fuerzas descritas.

La información de los mapas geológicos de la Comisión de Reforma Agraria (CARTAP, 1968) pone a disposición del usuario valiosa información sobre fallas secundarias que permiten delinear zonas productivas para la explotación de aguas subterráneas. Además, se registran intrusiones y diques que definen barreras de los eventuales acuíferos.

Se reflejan también en este material gráfico con buen detalle, estructuras como anticlinales y sinclinales. Por otra parte, también se definen con bastante claridad los detalles de capas geológicas inclinadas con buzamiento y dirección de los estratos, lo cual facilitó en el marco del estudio realizado la confección de un bloque modelo litológico de las zonas perspectivas para la explotación acuífera.

Aguas subterráneas

En lo que se refiere a la *hidrogeología*, actualmente el país cuenta con el Mapa Hidrogeológico de Panamá escala 1:1 000,000, Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A (ETESA, 1999), que ofrece una visión general y resumida de los recursos hídricos subterráneos en Panamá. Este mapa ha podido inferir a nivel nacional a la presencia de tres principales grupos de acuíferos, subdivididos luego en diez unidades hidrogeológicas de aguas subterráneas, descritos a continuación:

- Grupo A: Acuíferos predominantemente intergranulares, continuos, generalmente no consolidados, con una producción estimada entre 3 y 50 m³/h, (representados gráficamente por un color azul con distintas tonalidades).
- Grupo B: Acuíferos predominantemente fisurados, discontinuos, con una producción estimada de 3 a 10 m³/h, (representados gráficamente por un color verde con distintas tonalidades).
- Grupo C: Áreas con acuíferos locales, intergranulares o fisurados, de productividad limitada o poco significativa, con una producción estimada menor a 5 m³/h, (representados gráficamente por un color chocolate con distintas tonalidades).

De estos tres grupos de acuíferos descritos, en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa están presentes solamente Grupos B y C, constituidos por tres tipos de acuíferos (B-1, C-1 y C-3), la determinación y localización de los cuales se basa en las características físicas de las rocas de diferentes formaciones geológicas existentes en la zona del estudio (Figura 6)

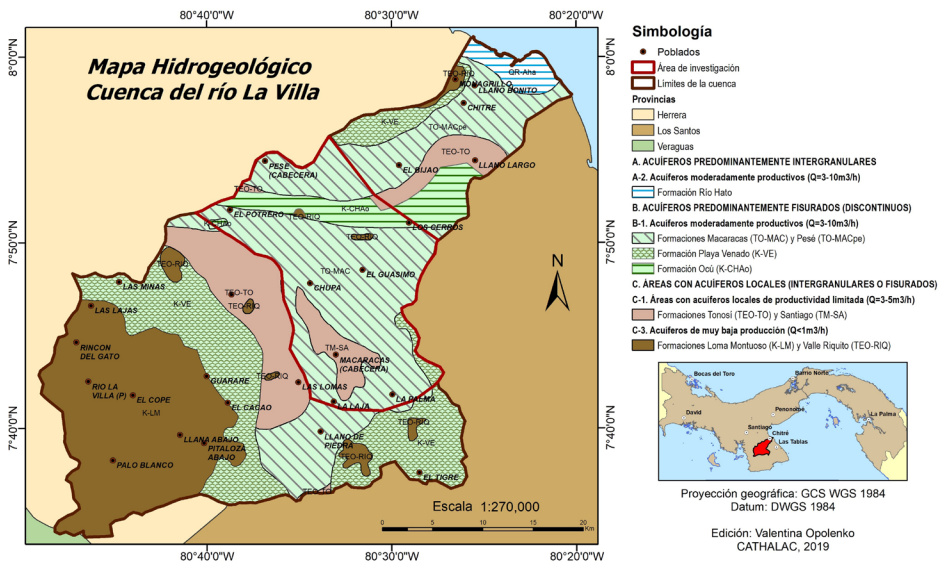
Grupo B. Acuíferos predominantemente fisurados (discontinuos)

B-1. Permeabilidad variable y moderadamente productivos (Q=3-10 m³/h=13-44 gpm).

- **Grupo geológico Macaracas (TO-MAC)**, constituido por tobas y areniscas tobáceas. Son acuíferos locales, restringidos a zonas fracturadas, conformados por una mezcla de rocas volcánicas fragmentarias, consolidadas y poco consolidadas, sobrepuestas a rocas ígneas consolidadas.

- **Grupo geológico Playa Venado (K-VE)**, constituido por basaltos y *pillow* lavas. Son acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas, comprenden un conjunto de rocas efusivas, en su mayoría básicas, cuyas fisuras han sido en muchos casos selladas por la deposición de minerales secundarios.
- **Grupo geológico Changuinola (K-CHA)**, Formación Ocu, constituido por calizas y tobas. Acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas, ampliados en ciertos tramos debido a la presencia de grietas, ensanchadas por efecto secundario de disolución por el agua a lo largo de los planos de estratificación.

Figura 6. Mapa hidrogeológico de la cuenca del río La Villa y del área de investigación.



Fuente: Elaboración propia a partir de ETESA, 1999.

Grupo C. Áreas con acuíferos locales (intergranulares o fisurados) de productividad limitada o poco significativa.

C-1. Áreas con acuíferos locales continuos o discontinuos. Permeabilidad baja y productividad limitada ($Q=3-5 \text{ m}^3/\text{h}=13-22 \text{ gpm}$)

- **Grupo geológico Tonosí (TEO-TO)**, formación Santiago (TM-SA), constituidos por lutitas, areniscas y conglomerados. Son acuíferos constituidos por depósitos marinos, generalmente de naturaleza clásica. La granulometría predominante de estos materiales es del orden de limos y arcillas. En esta formación se encuentran intercalaciones de basaltos. Se puede obtener cierta producción en pozos individuales. La calidad química de las aguas es variable.

C-3. Acuíferos de muy baja producción ($Q < 1 \text{ m}^3/\text{h} < 4 \text{ gpm}$). Permeabilidad baja a muy baja.

- **Grupo geológico Loma Montuoso (K-LM)**, constituido por cuarzo-dioritas, cuarzo, gabros, noritas, granodioritas y cuarzomonzonitas. Son cuerpos geológicos prácticamente con ausencia de acuíferos, con una estructura masiva, afectada por una serie fallas y una fisuración poco desarrollada. La ocurrencia de aguas subterráneas está limitada a la zona de meteorización o fracturación de rocas adyacentes.
- **Grupo geológico Valle Riquito (TEO-RIQ)**, constituido por cuarzo-dioritas, noritas y gabros. Son cuerpos geológicos prácticamente con ausencia de acuíferos, con una estructura masiva, afectada por una serie fallas y una fisuración poco desarrollada. La ocurrencia de aguas subterráneas está limitada a la zona de meteorización o fracturación de rocas adyacentes.

Marco teórico

Disponer de la información confiable sobre los recursos hídricos seguros en cantidad y calidad, implica contar con una caracterización del sistema hídrico subterráneo. Para ello, es necesario poseer la información base o línea base de numerosas variables y procesos que permitan cuantificar la disponibilidad del agua subterránea, así como evaluar los potenciales efectos de actividades antrópicas sobre los acuíferos y sus ecosistemas asociados.

Las medidas de emergencia que deben tomarse para protección de la población en casos de falta de recurso hídrico a causa de la incidencia de eventos climáticos adversos como sequías, por lo general obligan a tomar decisiones sin el tiempo necesario para mitigar estos eventos, porque el caso así lo amerita. En contraparte, se debe planificar estas acciones preventivas con la debida anticipación a la hora de esbozar los planes de desarrollo en el uso del agua subterránea, con los siguientes principios metodológicos (Klimentov y Kononov, 1982):

- a) El *principio de la integralidad de la investigación* garantiza que todos los sectores de la cuenca hidrográfica deben ser cubiertos, independientemente si sus perspectivas de aprovechamiento de recurso hídrico son o no relevantes. Desde el punto de vista hidrogeológico, la integralidad también se refiere a la totalidad del acuífero en su plano horizontal y vertical, y a la interacción con obras civiles de desarrollo tales como obras hidráulicas, urbanizaciones, viales, etc.
- b) Otro pilar de las investigaciones de aguas subterráneas es el *principio de las aproximaciones sucesivas*. La esencia de tal método consiste en el incremento gradual de los conocimientos acerca de un acuífero a medida que este se estudia de un modo sucesivo, puesto que prácticamente es imposible estudiar en un tiempo perentorio todos los datos necesarios para concluir con el conocimiento del potencial de dichos acuíferos. Su aplicación sugiere mallas de investigación por etapas, siguiendo un patrón que va “*de lo general a lo particular*”, aumentando progresivamente los datos totales y la certeza de las propiedades de este recurso hídrico.
- c) El *principio de la uniformidad* de estudio de cada acuífero prevé investigaciones detalladas de las partes complejas, productivas y no productivas del acuífero, reveladas con la aplicación de otras técnicas. Se refiere a que sea uniforme la aplicación de métodos geofísicos, de perforaciones exploratorias, muestreos de calidad de agua, ensayos de bombeo, etc.
- d) El *principio de la eficiencia económica* de la investigación hidrogeológica es el que justifica la inversión para conocer lo que se tiene realmente en materia de recurso hídrico subterráneo. Se refiere de manera sintetizada a la necesidad de crear programas de

investigación hidrogeológica con la mayor cobertura, con tiempos y costos razonables.

También se considera de manera general, que para cumplir con todos los principios metodológicos descritos, es necesario desarrollar numerosas actividades tales como la recopilación e inventario de la información existente, su sistematización y normalización, evaluación e interpretación de la misma y síntesis final de datos.

Además de estos principios hidrogeológicos, los procedimientos que se utilizan para la realización de un estudio sobre los recursos hídricos en una cuenca, están fundamentados en la metodología desarrollada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la UNESCO (OMM; UNESCO, 1997), la cual está plasmada en Documentos Técnicos relacionados con la Evaluación de los Recursos Hídricos (ERH).

Para poder aspirar al aprovechamiento sustentable de las aguas subterráneas y la protección del medioambiente, de tal forma que este modelo de gestión permita preservar esos recursos para futuras generaciones, es importante la fusión de los aspectos científicos y técnicos con sociales, integrando la gestión del agua superficial y subterránea en un sentido cualitativo, cuantitativo y ecológico, desde la perspectiva multidisciplinaria y centrada en las necesidades y requerimientos de la sociedad en materia de agua.

Metodología

Para efectos del desarrollo de la presente investigación sobre los recursos hídricos subterráneos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, los trabajos propuestos estuvieron divididos en dos etapas: recopilación, organización, clasificación y estandarización de la información existente en la primera etapa, y generación de la información faltante con los respectivos trabajos de campo, que se desarrollan en la segunda etapa.

Específicamente, el desarrollo metodológico que se aplicó en la Etapa I, ha sido compuesto por las actividades que comprendieron la recopilación y revisión preliminar de toda la información relevante existente de la cuenca del río La Villa y del área de estudio, tal como mapas topográficos, mapas geológicos, registros de pozos, informes y documentos hidrogeológicos, cartográficos, geológicos, de hidrología superficial y de suelos.

Además, con la colaboración de entidades gubernamentales, rectores de los recursos hídricos subterráneos, se realizó la sistematización y normalización de la información recabada. Entretanto, en la Etapa II, a pesar que en el área de estudio ya se contaba con una cantidad considerable de información técnica, fue necesario ejecutar distintos trabajos de campo enfocados a generar información geológica e hidrogeológica complementaria, así como verificar y validar la información existente, producto de las actividades desarrolladas en la Etapa I.

Con el fin de ejecutar las múltiples tareas enumeradas en la metodología, se realizó un estudio geológico complementado con la geología de superficie y exploración geofísica, que comprendió un conjunto de trabajos de campo e investigaciones.

Concretamente, se aplicaron las *observaciones visuales terrestres* tales como las observaciones geomorfológicas y observaciones geológicas y litológicas. La información que se obtuvo como resultado de estas observaciones en las zonas con mayores perspectivas para la existencia de acuíferos productivos, fue ampliada y corroborada luego con la exploración geoelectrica.

Durante las observaciones geomorfológicas se estudió la localización y las particularidades de diversas formas del relieve y sus relaciones con las aguas subterráneas y se logró revelar el carácter, la tendencia y la intensidad de los fenómenos físico-geológicos relacionados con la formación del relieve y su posible relación con la formación de eventuales reservorios subterráneos.

Para tal fin se observaron los trazados geomorfológicos principales que se disponen transversalmente a la dirección de los estratos de rocas y en dirección de los tipos básicos del relieve, describiendo las particularidades de este último no sólo en los puntos geomorfológicos espaciales, sino también en los afloramientos y taludes de los cursos de agua superficial.

Mientras tanto, durante el *levantamiento geológico* fueron estudiadas las particularidades litológicas y las propiedades físicas de las rocas, con el fin de establecer las condiciones de su saturación. Se realizó el análisis comparativo de la base geológica antes trazada, con el corte estratigráfico observado en la región estudiada, análisis que permitió conocer el carácter de los límites estratigráficos y estructurales, sus contactos asociados, así como correlacionar los horizontes y complejos acuíferos relacionados

o vinculados a determinadas series litólogo-estratigráficas, dando como resultado final la delimitación de zonas acuíferas perspectivas en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa.

La definición de acuífero es la de *una capa geológica con las características que le dan la capacidad de recibir, almacenar y entregar agua*. El acuífero propiamente dicho es la zona del reservorio, pero para que el mismo sea perspectivo, debe tener buena permeabilidad. La permeabilidad se define como la capacidad que tiene una roca de permitir el flujo de fluidos a través de sus poros o grietas interconectados.

La misma puede ser de tipo primaria si se trata de poros, y secundaria, si la roca es impermeable pero esta fracturada con grietas interconectadas. Por otra parte, también se necesita un gradiente hidráulico para mantener este flujo. Estos son los criterios básicos para la búsqueda de fuentes subterráneas.

Ante la necesidad de formar una imagen tridimensional del bloque modelo litológico que conforma el área de investigación, se realizó la *exploración geofísica*, apoyada por el análisis de los mapas geológicos e hidrogeológicos de la zona, así como por las observaciones de campo ejecutadas durante el levantamiento geológico.

La metodología de ejecución de los trabajos de exploración geofísica considera los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) como una herramienta pivote y vigente a la fecha, que permite correlacionar e integrar a su alrededor las mismas condiciones geológicas, definiendo de esta manera la unidad hidrogeológica de la cual forma parte. Para detectar con mayor detalle las condiciones de disposición espacial de las capas geológicas, se implementó el método geofísico electroresistivo, con el arreglo de electrodos tipo Schlumberger (Custodio y Llamas M, 1976).

En este método las resistividades aparentes de las capas litológicas se calculan a través de coeficientes propios de cada arreglo de electrodos interviniendo, además, los principios de cálculo de la conocida Ley de Ohm. La amplia gama de combinaciones de capas geológicas y sus propiedades electroresistivas responden a un patrón de comportamiento que puede expresarse en curvas con modelos matemáticos.

Finalmente, al analizar los datos de campo de los SEV, se genera la secuencia de capas geoeléctricas de cada sondeo realizado, las cuales proporcionan como resultado la respectiva interpretación geológica de dichas capas, consolidándolas en un bloque modelo litológico en tres dimensiones.

A pesar que existen diversas técnicas geofísicas eléctricas o electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales y algunas de estas técnicas, son más modernas y mucho más precisas, se utilizó este método geoelectrico debido a que previamente en 2010 la empresa consultora Nómadas de Centroamérica Panamá ejecutó para la Autoridad Nacional del Ambiente un proyecto denominado “*Delimitación de Acuíferos y establecimiento de zonas de recarga, para identificar su vulnerabilidad y el desarrollo de una estrategia para su protección y conservación en el Arco Seco del país*” (ANAM, 2010).

Esta consultoría desarrollada a escala regional, que comprendía también a la Península de Azuero, permitió estudiar la posibilidad de la explotación de acuíferos profundos mediante la prospección geofísica apoyada en la realización de 100 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), con el despliegue de electrodos tipo Schlumberger, de los cuales 5 SEV se localizan en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa.

Contando con esta valiosa información, el presente estudio, tuvo la oportunidad de ampliar la escala de investigación de conformidad con los recursos económicos asignados para tal fin, complementando los datos pre-existentes a través de la realización de nuevos Sondeos Eléctricos Verticales, integrando y correlacionando los resultados obtenidos con la información previa. Los 12 SEV fueron distribuidos en tres zonas acuíferas delimitadas en la fase de levantamiento geológico, aplicando los criterios técnicos, así como socioeconómicos de la población usuaria del agua subterránea.

Resultados

Delimitación de áreas perspectivas con un potencial acuífero

La amplia gama de factores que permiten delinear una zona perspectiva como potencial acuífero, tienen su fuente en la metodología aplicada en esta investigación. En el caso concreto de la investigación geológica, que fue realizada en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, se puede decir que se trata de rocas sedimentarias y las ígneas extrusivas, las que conforman acuíferos por porosidad y por fracturamiento.

De esta manera, adquiere relevancia las características hidrogeológicas (acuíferas) de las formaciones que están presente en la zona investigada. Además, en el área de investigación fueron inventariados 180 pozos existentes activos o sin uso, administrados por el sector público y privado, los cuales fueron clasificados por su rango de producción (Cuadro 3).

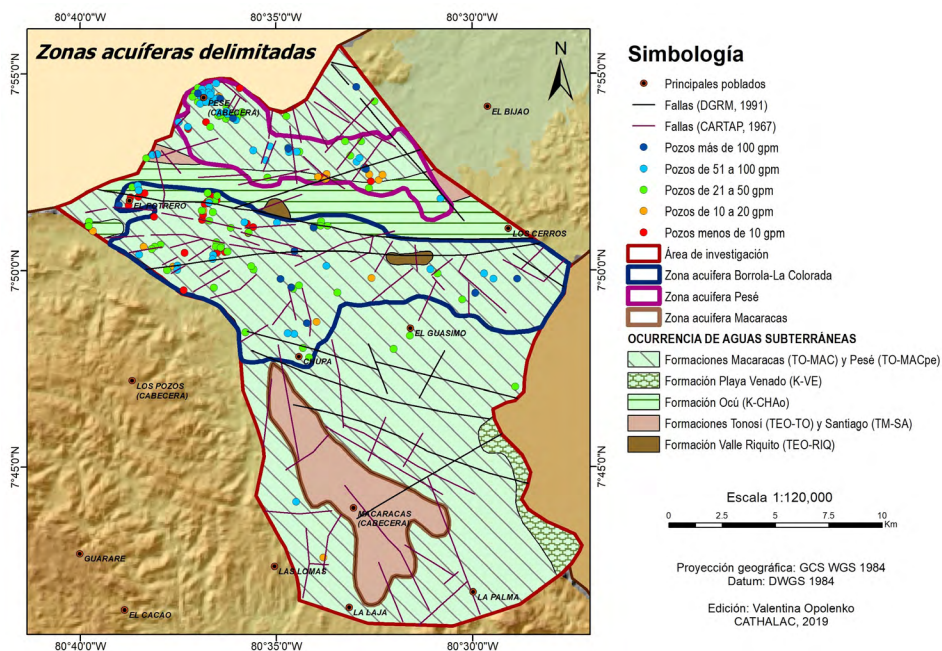
Cuadro 3. Clasificación de los pozos en el área de investigación (en galones por minuto)

Producción del pozo, gpm	Cantidad de pozos	%	Clasificación de pozos
Más de 100	14	8	Rendimiento muy bueno
51 a 100	52	29	Rendimiento bueno
21 a 50	66	37	Rendimiento medio
10 a 20	23	13	Rendimiento de bajo a moderado
Menos de 10	25	14	Pozos fallidos o de muy bajo rendimiento

Fuente: elaboración propia

En base al análisis geológico respectivo, se delimitaron tres zonas acuíferas: zona acuífera Borrola-La Colorada, zona acuífera Pesé y zona acuífera Macaracas (Figura 7).

Figura 7. Localización de pozos y zonas acuíferas en la parte media y baja de la cuenca.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Integración de la información geológica en el bloque modelo litológico

Luego de delimitar las tres zonas acuíferas perspectivas que puedan utilizarse en futuro como nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, en zonas seleccionadas se realizó la exploración geofísica con el fin de perfilar la morfología de cada embalse subterráneo descrito, así como cuantificar de manera estimada su capacidad de reserva de aguas subterráneas, determinando su espesor a través de sondeos geofísicos aplicados, así como definir los complejos procesos de alteración de la capa de suelo, las deposiciones sedimentarias, capas de material ígneo, coladas de lava y diferentes graduaciones de deposiciones piroclásticas que se dan en la zona evaluada.

Esto permitió un enfoque más amplio en el plano vertical y horizontal. Para procesar y plasmar los datos geofísicos obtenidos durante la presente investigación, se utilizaron software *WinSev 6.4* de W-GeoSoft y *RockWorks17*.

Con la aplicación de estas herramientas fue posible generar cuatro perfiles litológicos de los polígonos evaluados en el plano horizontal y vertical, así como el bloque modelo litológico, que sirvió como material de apoyo a la comprensión espacial del medio acuífero investigado, facilitando de esta manera la identificación de nuevas áreas con sitios óptimos para las futuras perforaciones profundas (Figura 8).

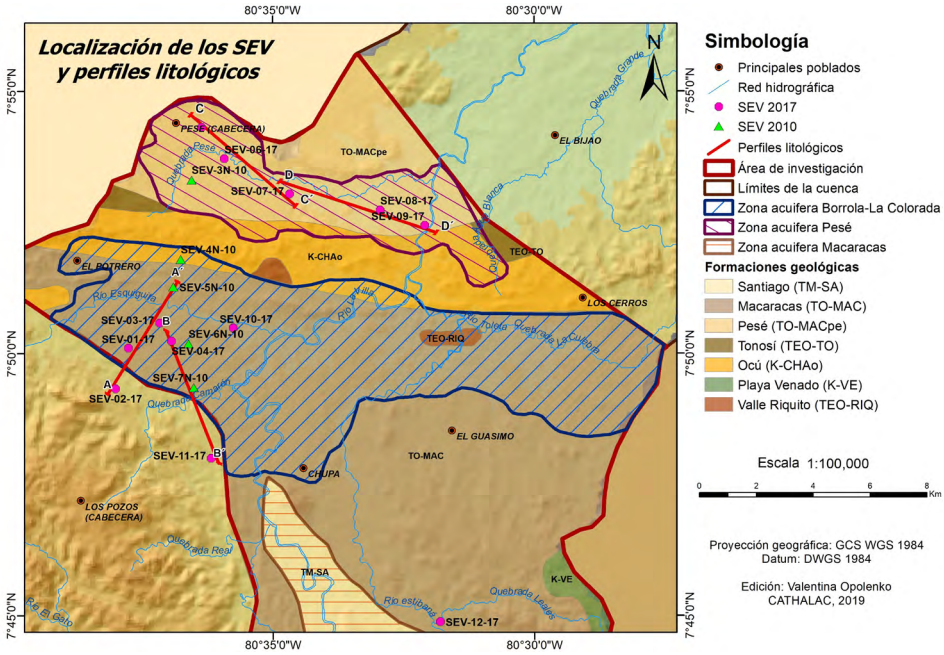
Cabe destacar que, con toda la información obtenida durante el desarrollo de la presente investigación, se brinda un panorama completo de la secuencia de las capas litológicas en tres dimensiones. Esta disposición de las principales capas geológicas en el área investigada mediante la aplicación de los respectivos SEV, puede ser observada en cuatro perfiles litológicos obtenidos a través del bloque modelo de las zonas acuíferas.

Detalle de interpretación de capas litológicas de zonas acuíferas delimitadas

a) Zona acuífera Borrola-La Colorada

Esta zona acuífera es bastante extensa y cuenta con amplias regiones de planicies en ambos márgenes del río La Villa. Tiene una longitud estimada de 20 km entre las comunidades de Esquiguita y Borrola al oeste, y El Ñopo al este de la zona investigada, en el nacimiento de la quebrada La Culebra. El ancho máximo de la zona acuífera fue estimado en unos 6 km en una configuración en forma triangular en el lado oeste, cuya base la

Figura 8. Localización de los SEV y perfiles litológicos de la zona de investigación.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

conforma el río La Villa. Mientras tanto, desde la margen derecha del río La Villa hasta el lado este (con dirección al El Ñopo) tiene una forma de ovalo. Tal orientación condiciona en cierta medida el flujo subterráneo que se mantiene con la orientación general de este importante drenaje natural.

Tanto en el sector oeste, como en la parte este de la zona acuífera, se encuentran asentados diferentes poblados rurales de relativa actividad económica en rubros como la ganadería y agricultura, los que se abastecen con 83 pozos.

En el oeste se distinguen Esquiguita, Borrola, El Cruce y Rincón Hondo. En la parte este son de importancia los poblados de La Colorada, La Colorada Abajo y Las Guabas. A lo largo de la parte norte de esta unidad acuífera corre una importante falla regional denominada *Ocú-Parita* que coincide con levantamientos de la formación Ocú (K-CHAO) al interactuar con la formación Macaracas (TO-MAC).

La formación Macaracas conforma casi en su totalidad el área de este acuífero de 81 km², con amplias planicies que también son interrumpidas por colinas y cerros menores intercalados. En la parte central de la zona acuífera (Borrola y Rincón Hondo) y en la parte sur (quebrada El Potrero) están desplegadas fallas tectónicas regionales, que despiertan interés en calidad de zonas posibles de captación de agua subterránea.

Es importante resaltar que la zona acuífera Borrola-La Colorada tiene características geológicas diferentes de la zona acuífera de Pesé, independientemente a que sólo las separa la falla regional *Ocú-Parita*. Por ejemplo, sobre las elevaciones del área del poblado El Cocuyo se observan secuencias deposicionales diferentes de cada lado de esta falla geológica, con deslizamiento de grandes bloques de la corteza terrestre y también compresión entre ellos, lo que produjo un fracturamiento general de las capas litológicas y como consecuencia, la mayor incidencia en el área de pozos con rendimientos positivos.

b) Zona acuífera Pesé

La zona acuífera Pesé con un área de 30.4 km², abastece por medio de 83 pozos profundos a la ciudad de Pesé, que cuenta con 2,565 habitantes (INEC, 2010) y otros lugares poblados. Además, a un importante sector industrial de la cuenca del río La Villa, siendo el factor clave en el bienestar económico y social para toda la región que comprende su influencia directa.

La morfología plana de la zona acuífera Pesé está rodeada de puntos elevados de colinas y cerros circundantes y tiene un largo de 13.5 km desde el límite oeste de la cuenca en Pesé a la altura del cerro de La Cruz, prolongándose al cerro Cebolla al sureste y con un ancho máximo de 4.0 km entre el sector de cerro Pelado al oeste y el límite noreste de la zona de investigación (cerro Cigualito). La configuración de la zona acuífera se torna estrecha, atravesando sectores como Cascajalillo y abre en forma de abanico o área triangular en el sector de Las Cabras, descargando en parte su caudal en el cauce del río La Villa, teniendo un pequeño sector en la margen derecha del mismo entre las comunidades de Atalayita y Llano del Guásimo.

Para una mejor comprensión de las características litológicas de la zona acuífera Pesé, se puede indicar que los dos perfiles litológicos trazados C-C' y D-D', presentados más adelante (Figura 12), están orientados de manera longitudinal en virtud de que esta zona acuífera tiene una forma

alargada como se ha descrito. En estos perfiles se puede apreciar que las capas litológicas tienen continuidad, manteniendo en esta extensión los espesores de capas, incluido su buzamiento.

c) Zona acuífera Macaracas

Esta zona acuífera está conformada por las rocas de la formación sedimentaria Santiago (TM-SA), enmarcada por la formación Macaracas (TO-MAC) que conforma un relieve alto y que debiera actuar como amplia zona de recarga. La configuración de la zona acuífera es de forma triangular desplegada desde el sur de la comunidad de Chupá con orientación de noroeste a sureste (Los Higos). Tiene una longitud aproximada de 11.5 km. La parte más ancha de este triángulo, que sería su base, es de 5.7 km con orientación suroeste – noroeste, entre las quebradas El Faldar y Los Cortijos. El área estimada de esta zona acuífera es de unos 30 km² (Figura 7).

Esta zona acuífera, a pesar de que tiene características morfológicas de ser perspectiva como reservorio subterráneo, en la práctica no ha dado resultados significativos en materia de rendimiento de captadores, aceptable para el abastecimiento de acueductos rurales. De conformidad con el Mapa Hidrogeológico de Panamá (ETESA, 1999), la zona acuífera de Macaracas se clasifica como “Áreas con acuíferos locales continuos o discontinuos” de permeabilidad baja y productividad limitada ($Q=3-5 \text{ m}^3/\text{h}$).

A pesar de que en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa los recursos hídricos están en la actualidad bajo mucha presión por distintos usos y sin importar que se trata de una zona acuífera con escasas perspectivas de aprovechamiento, de acuerdo a los resultados no alentadores obtenidos durante la presente investigación, no se descarta que en el futuro con la aplicación de otras técnicas no convencionales para la extracción de agua subterránea, será posible aumentar parcialmente la oferta de este recurso hídrico en la zona de interés.

Discusión de los Resultados

Situación actual de uso de agua subterránea en Panamá

Para gestionar recursos hídricos en forma sostenible ninguna solución tendrá éxito si no se reconoce que las aguas subterráneas forman parte del ciclo hidrológico. Este enfoque permitirá superar ciertos límites

frecuentemente impuestos en los esquemas de manejo del agua, que derivan de condicionamientos administrativos, políticos y sociales.

El proverbio popular “*Ojos que no ven, corazón que no siente*”, puede describir la real situación del agua subterránea en la República de Panamá al igual que en muchos países en desarrollo de la región, producto de su aprovechamiento fragmentado, poca planificación y control sobre el uso de este recurso hídrico.

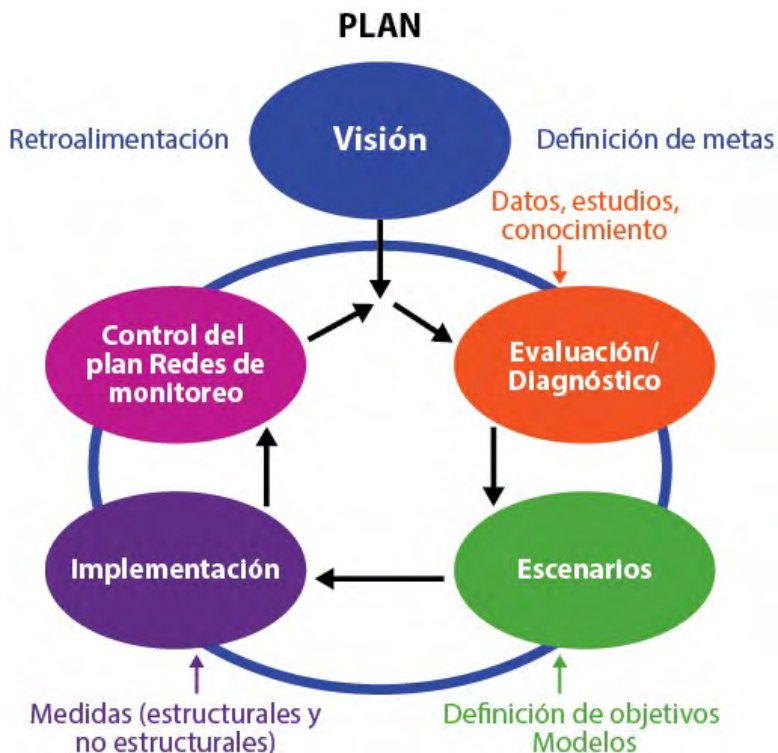
La situación descrita se debe a la falta de conocimiento apropiado de las características de los reservorios o acuíferos de agua subterránea tales como geología, hidrología, hidrogeología, hidrodinámica, calidad, capacidad, tasa de renovación, vulnerabilidad, sobredimensionamiento de la capacidad depuradora del suelo y zona no saturada, etc., además de un marco legal e institucional adecuado, así como la definición de lineamientos estratégicos de acción a distintos horizontes de tiempo.

Por lo tanto, para reducir la brecha hídrica existente en el manejo de agua subterránea y superficial en el país, se recomienda la implementación de un *Plan de Gestión Integrada de las Aguas Subterráneas*, que no debe ser solamente un conjunto de actividades cronológicamente ordenado (European Union, 2015).

Es una herramienta que articule y organice en forma evolutiva un conjunto de estrategias, decisiones, acciones y resultados. Luego de realizado el diagnóstico, se podrá ejecutar el planteo de escenarios en aquellas localidades más comprometidas, que permitan sumar criterios para definir cuáles son las prioridades de acción.

También es imprescindible que se definan indicadores para cada una de las acciones acordadas en el plan. Estos indicadores permitirán evaluar los resultados logrados por cada una de las estrategias y el plan en su conjunto, así como dan elementos para su retroalimentación, ajustes e identificación de nuevos problemas (Figura 9).

Figura 9. Plan de gestión integrada de las aguas subterráneas.



Fuente: European Union (EU), 2015.

Tomando en consideración los lineamientos expuestos, si se integrara el presente estudio a este *Plan de Gestión Integrada de las Aguas Subterráneas*, estaríamos ubicados solamente en la etapa de Evaluación/ Diagnóstico, como un paso inicial. Por otro lado, si se analiza la situación actual del uso de las aguas subterráneas en el área evaluada, así como a nivel nacional, en términos generales se pueden puntualizar las interrogantes siguientes, imprescindibles para cumplir las tareas de dicho Plan:

- Cuantos acuíferos hay (nacionales y transfronterizos), su extensión, potencial y reservas de agua subterránea.
- El número de pozos que existen, su profundidad, los niveles de acuíferos que interceptan, su calidad de agua, el caudal de agua que aportan, etc.

- La cantidad y ubicación de zonas de recarga de acuíferos para su protección.
- Los lugares que se deben proteger para garantizar agua no contaminada a futuro.

Por otra parte, es escaso el conocimiento que tiene la población sobre este recurso hídrico:

- Que las aguas subterráneas son fundamentales para el desarrollo económico y bienestar social.
- Tienen valor económico, social, cultural y monetario.
- Se están deteriorando en cantidad y calidad.
- Están escaseando en algunos sectores e incluso pueden desaparecer.
- Se deben proteger y aprovechar racionalmente.

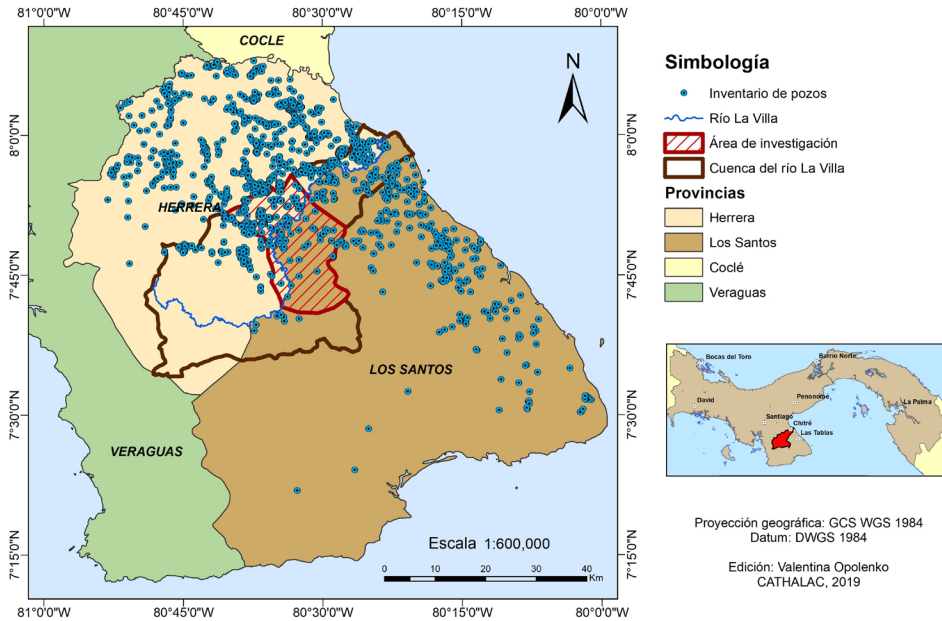
Concretamente y como una referencia, si se observa el mapa de las provincias de Herrera y Los Santos, donde aparecen los 1,587 pozos perforados por las distintas instituciones y el sector privado, será notoria la gran cobertura de las poblaciones abastecidas por esta importante fuente hídrica que pareciera pasar desapercibida (Figura 10).

A pesar de tener esta gran cantidad de pozos georreferenciados en ambas provincias, es muy escasa la información técnica que pueden aportar los mismos, tales como profundidad, diámetro de perforación, diseño del pozo, formaciones geológicas atravesadas y producción, entre otros.

Crterios para la seleccin de los sitios ptimos para pozos profundos

La base para revelar las zonas perspectivas de explotacin de aguas subterráneas ha sido la definicin del comportamiento de la geología regional y estructural del área, influenciada por la falla regional *Ocú-Parita*, con direccin preferencial de oeste a este, con vectores de incidencia en el sector norte de la falla, orientados al oeste y los del bloque sur en sentido contrario. Esta situacin puede verificarse en algunos puntos indicados por el mapa geológico de la Reforma Agraria 1:50,000 (CARTAP, 1968), donde los fracturamientos secundarios en las capas geológicas tienen una definicin de tectolineales paralelas con ángulo agudo en las llanuras (noroeste-sureste) a cada lado de dicha falla en las zonas acuíferas Borrola-La Colorada y Pesé.

Figura 10. Localización de pozos profundos en las provincias de Herrera y Los Santos.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Estos fallamientos generan bloques rectangulares con fallas alineadas sistemáticamente, en un movimiento que ocasionó compresión de estos bloques y una zona de colinas y cerros que denota efectos de la colisión entre los mismos, como lo demuestran los inéditos cortes o perfiles litológicos generados por la presente investigación en la zona acuífera Borrola-La Colorada.

Cabe destacar, que como parte de los resultados de esta investigación fueron confeccionados mapas georreferenciados de las zonas acuíferas que ayudaron a definir los criterios a tomar en cuenta y su orden de prioridad para ubicación de nuevas fuentes de extracción de agua subterránea en estas perspectivas zonas acuíferas:

- En la ubicación de nuevos sitios para perforación de futuros pozos, se debe poner atención primaria al drenaje natural, las quebradas y ríos de estas áreas evaluadas, ya que los mismos tienen el patrón de

comportamiento influenciado por los fallamientos, siendo favorable el criterio de interceptar estas fallas cercanas a fuentes superficiales en la ubicación de los pozos a perforar. Esto ayuda a que el agua transportada de zonas aguas arriba, pueda recargar el área de influencia de eventuales nuevos pozos, dándoles mayores expectativas de sostener su producción durante la estación seca.

- El otro criterio que debe privar en la búsqueda de nuevos sitios para perforar, es el de poner atención a la estadística de pozos positivos del área debidamente identificados, y asociar a estos la vecindad del nuevo pozo, aunque no es recomendable sobresaturar estas zonas dedicadas a la extracción de aguas subterráneas. Lo recomendable es que debe guardarse una distancia radial no menor de 100 m entre cada pozo para evitar que los respectivos radios de influencia de ambos no se traslapen, bajando de este modo su capacidad real de producción.
- El agua que se busca en cada nuevo sitio de perforación está destinada a consumo humano, por lo tanto, las fuentes superficiales que sirven de recarga de las zonas acuíferas, no deben sufrir descargas, producto de actividades contaminantes como porcicultura, ganadería, botaderos de materia orgánica agroindustrial u otros.
- El factor económico también es importante a la hora de ubicar un nuevo pozo. La distancia de la fuente de energía eléctrica debe ser tomada en cuenta, la profundidad del pozo igualmente, pues si se trata de un pozo de más de 122 m (400 pies) de profundidad, requerirá herramientas especiales para instalar el equipo de bombeo y darle mantenimiento, lo que resulta poco práctico para un agricultor o ganadero. Además, las cargas hidráulicas de los respectivos equipos de bombeo equivalentes en distancia y elevación, si son muy grandes pueden generar un consumo de energía no financiable para comunidades (Juntas Administradoras de Acueductos Rurales, JAAR). El acceso del equipo de perforación en algunos casos también limita la efectividad de las perforaciones, al no poder situarlos sobre el sitio óptimo, lo que implica crear un camino de acceso cuando el caso amerite.

Particularidades de búsqueda de sitios óptimos para perforación en cada zona acuífera

- **Zona acuífera Borrola-La Colorada**

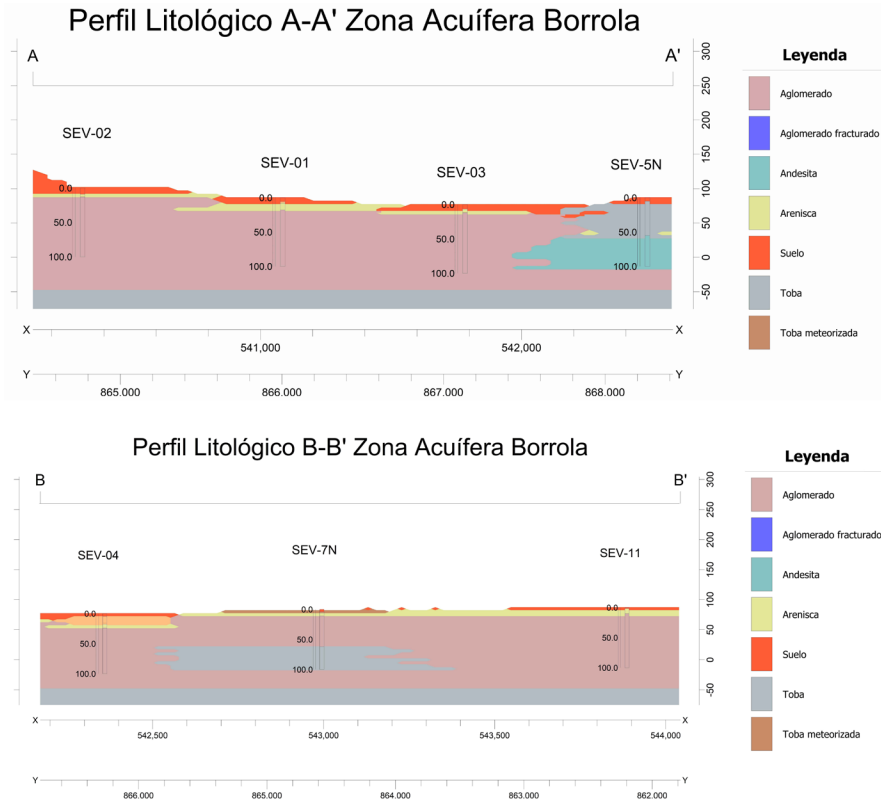
Con respecto a los sitios prospectivos de búsqueda, esta zona acuífera cuenta en el plano horizontal con varios sectores con fallamientos favorables al almacenamiento de agua subterránea. Existen fallas secundarias paralelas a la falla *Ocú-Parita*, como la que está asociada a la trayectoria del río Esquiguita y sus quebradas tributarias con características de alineamiento paralelo en forma diagonal (El Barrero, Camaroncito y Lombo), que es típico de bloques fracturados bajo compresión por el movimiento de la falla principal.

Durante un evento explosivo volcánico inicialmente se da expulsión de ceniza volcánica, que al depositarse genera una roca piroclástica de granulación fina (toba), que forma grandes extensiones con un comportamiento volcánico-sedimentario. Seguido, se pasa a expulsión de fragmentos piroclásticos mayores, generando capas de aglomerado.

Luego, el proceso de liberación de energía de este evento hace fluir lavas (basálticas o andesíticas), que al producirse un rápido enfriamiento, crean sistemas de diaclasas o grietas por el fenómeno de tracción diferencial dentro de las capas de lava. Esta última condición genera la permeabilidad de tipo secundaria en la masa rocosa, lo que hace a las mismas perspectivas como posible horizonte acuífero.

Mientras tanto, durante el período de reposo entre las actividades volcánicas, se dan las condiciones para la formación de rocas sedimentarias tales como areniscas en el ambiente de pobre circulación de agua superficial, las que se observan en las secciones litológicas o perfiles, A-A' y B-B' (Figura 11).

Figura 11. Secciones litológicas interpretadas de los perfiles geoelectrónicos A-A' y B-B'



Fuente: Elaboración propia

En ambos casos se trata de una capa de poca potencia y ubicada prácticamente en la superficie del área evaluada. Debido a esta condición, la mencionada capa de arenisca no representa mayor interés desde el punto de vista de explotación acuifera.

Las tobas en general, al tener granulometría fina no son perspectivas como depósitos de agua subterránea. Esta granulometría dificulta el flujo debido al número plural de granos, que hidráulicamente le hacen perder energía, dificultando así la entrega del agua ante un eventual bombeo.

Con respecto al aglomerado, al ser depositado y consolidado, por lo general es susceptible de fracturamiento como consecuencia de la actividad sísmica y/o tectónica. Este material sólo es perspectivo para obtener

agua subterránea en zonas de fallamientos. Esta aseveración es evidente en el Mapa de zonas acuíferas delimitadas (Figura 7), elaborado durante la presente investigación, donde aparecen las perforaciones con distintos rangos de rendimientos desde positivos hasta fallidos. Es importante resaltar que los pozos fallidos por lo general están asociados a las zonas fuera de la influencia de las fallas, es decir, se localizan en bloques solidos aislados del sistema de fallamiento.

- **Zona acuífera Pesé**

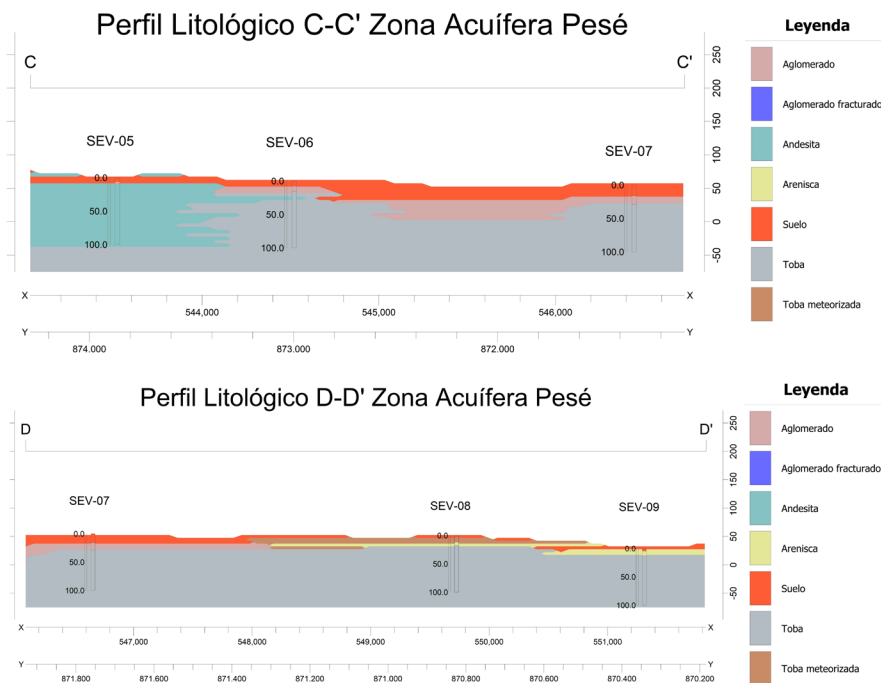
Esta zona acuífera está vinculada a un importante polo de desarrollo agroindustrial como lo es el Distrito de Pesé y Corregimiento de Las Cabras, con una población aproximada de 4,000 habitantes. El curso hídrico superficial más importante del área es la quebrada Pesé con su red de tributarios que cubren gran parte de esta zona acuífera. Su alineamiento corresponde a bloques deslizados de la falla *Ocú-Parita*.

Uno de los sectores más importantes dentro de esta zona acuífera es la ciudad de Pesé, que tiene una alta densidad de pozos perforados (aproximadamente 50) por distintas instituciones y el sector privado, que en su mayoría abastecen la demanda de la comunidad para el consumo humano, así como para actividades agroindustriales de relevancia nacional.

Se puede observar en el mapa de acuíferos delimitados y perfiles litológicos respectivos, dos zonas con el dominio de diferentes materiales. Al noroeste en Pesé se tienen capas dominantes de lava, y en el sector sureste hacia Cascajalillo, así como en Las Cabras, se presentan potentes capas de toba compacta.

En la segunda zona con características litológicas diferentes, relacionada a las capas de toba que se localiza en el área del poblado de Cascajalillo, existe una falla geológica con dirección norte-sur, asociada a pozos de alto rendimiento con escasa incidencia de pozos fallidos. Esto significa que la toba se presenta compacta o bien soldada, y es susceptible de fracturamiento para inducir al acuífero la permeabilidad de tipo secundaria. La condición favorable descrita convierte a esta zona en perspectiva para pozos de moderado rendimiento, pues tendría características similares al del aglomerado de la zona acuífera de Borrola-La Colorada (Figura 12).

Figura 12. Secciones litológicas interpretadas de los perfiles geoelectrónicos C-C' y D-D'



Fuente: Elaboración propia

Mientras tanto, para el sector comprendido entre la comunidad de Las Cabras hasta las riberas del río La Villa, los pozos existentes presentan rendimientos aceptables (de 20 a 50 gpm) y sólo algunos fallidos, ubicados en los sectores montañosos, fuera de la zona acuífera propiamente dicha.

Conclusiones

Luego de cumplida la fase de investigación geológica de la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, encaminada a la detección de sitios óptimos para la ubicación de futuras perforaciones con la aplicación de criterios técnicos basados en la ciencia hidrogeológica, se puede indicar que se trata de sentar por primera vez en el país las bases metodológicas para iniciar un nuevo enfoque de exploración y explotación de aguas subterráneas. Estos criterios están orientados a conocer las reservas de agua subterránea para ampliar su uso potencial en la cuenca investigada.

Como un aspecto relevante del Estudio Geológico realizado, se delimitaron las tres zonas acuíferas siguientes: zona acuífera Borrola-La Colorada, zona acuífera Pesé y zona acuífera Macaracas. Para poder delimitarlas estas zonas acuíferas, además del estudio geomorfológico y referencias estadísticas de pozos productivos y no productivos, también se estudiaron los procesos que ha sufrido la región en materia de tectonismo.

Las distintas referencias consultadas y analizadas por esta investigación, indican que los pozos más productivos de la región (más de 50 gpm), están distribuidos sobre zonas donde la corteza terrestre ha sufrido fracturamientos, compresión, tracción o levantamientos parciales.

En base a los resultados de la investigación geológica realizada, se decidió enfocar los esfuerzos solamente en las zonas acuíferas con mayores perspectivas, como la de Borrola-La Colorada y la de Pesé. No obstante, la zona acuífera de Macaracas también fue evaluada a pesar de los resultados obtenidos poco alentadores, que arrojaron una baja capacidad de producción de agua subterránea.

La misma fue calificada como zona con poca perspectiva para satisfacer las necesidades de las poblaciones aledañas. Sin embargo, se consideró que, con la aplicación en futuro de otras técnicas no convencionales de explotación de agua, será posible resolver situaciones puntuales de esta zona.

Con la ejecución de este trabajo investigativo como un proyecto piloto en la cuenca del río La Villa, que comprendió la prospección geológica y geofísica, se entra en una nueva fase de la explotación y gestión responsable del recurso hídrico subterráneo en la República de Panamá.

Con la aplicación de estas dos importantes herramientas mencionadas, las cuales se ponen a disposición de los sectores interesados, se han sentado las bases para adquirir los conocimientos necesarios no sólo para ubicar mejores sitios de perforaciones, sino también cuantificar las reservas acuíferas en las futuras subsiguientes etapas exploratorias, que comprenderán la determinación de un modelo hidrogeológico para la gestión de los recursos hídricos subterráneos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa.

Agradecimientos

Este estudio fue ejecutado por el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC) con el aporte de

subvención del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC, Canadá) y del Ministerio de Ambiente de Panamá (MIAMBIENTE).

La autora agradece a las siguientes personas, instituciones y organizaciones que nos acompañaron y brindaron su apoyo a lo largo de esta investigación:

Al equipo de CATHALAC que de alguna manera apoyó a la exitosa ejecución de este trabajo.

A los consultores Arturo Ramírez y Roneldo Arjona por la valiosa participación en el desarrollo de esta investigación.

Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), Sección Fuentes Subterráneas, en especial a los geólogos Iván Cedeño, Aladino Naranjo y Edgardo Vergara por participar en giras de inspección de campo y aporte de datos del inventario de pozos.

A los miembros de las distintas comunidades beneficiarias por su actitud positiva y aporte de conocimientos locales.

Referencias

- Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). (2007). *Indicadores Ambientales para las Tierras Secas y Degradadas de Panamá*. Comité Nacional de Lucha contra Sequía y la Degradación (CONALSED). Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM), República de Panamá.
- Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). (2008). *Plan de Ordenamiento Territorial Ambiental de la cuenca del río La Villa* (POTA). Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM), República de Panamá.
- Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). (2009). *Atlas de las Tierras Secas y Degradadas de Panamá*. Proyectos Editoriales -Panamá. República de Panamá. ISBN: 978-9962-609-50-6
- Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). (2010). *Delimitación de Acuíferos y establecimiento de zonas de recarga, para identificar su vulnerabilidad y el desarrollo de una estrategia para su protección y conservación en el Arco Seco del país*. Nómadas de Centroamérica Panamá/ANAM. República de Panamá.
- Comisión de Reforma Agraria (CARTAP). (1968). *Catastro Rural de Tierras y Aguas*. Volumen III Geología y compendio de mapas de Geología y Geomorfología, escala 1:50,000, Comisión de Reforma Agraria, República de Panamá.

- Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica. (2016). *Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos*. República de Panamá. ISBN: 978-9962-5581-0-1
- Custodio, E. y Llamas M. R. (1976). *Hidrología Subterránea. Tomo I y II*. Ediciones Omega, S.A. Barcelona. ISBN: 84-282-0446-2
- Dirección General de Recursos Minerales (DGRM). (1991). *Mapa Geológico de la República de Panamá*; Escala 1:250.000. Dirección General de Recursos Minerales (DGRM), Ministerio de Comercio e Industrias, República de Panamá.
- Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA). (1999). *Mapa Hidrogeológico de Panamá*. Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. Gerencia de Hidrometeorología. República de Panamá.
- European Union (EU). (2015). *Herramientas para Contribuir a la Gestión Sustentable del Agua en Latinoamérica*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg: Publications Office of the EU. ISBN 978-92-79-45052-5
- Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia” (IGNTG). (2007). *Atlas Nacional de la República de Panamá*. Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia” (IGNTG). Cuarta edición. Panamá. ISBN: 978-9962-8865-2-5
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2010). *XI Censo de Población y VII de Vivienda, 2010*. Resultados Finales. Instituto Nacional de Estadística y Censo, República de Panamá.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2011). *VII Censo Nacional Agropecuario*. Instituto Nacional de Estadística y Censo, República de Panamá.
- Klimentov, P.P. y Kononov, V.M. (1982). *Metodología de las Investigaciones Hidrogeológicas*. Traducción al español por Editorial Mir, Moscú. Impreso en la URSS.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (1997). *Evaluación de los Recursos Hídricos: manual para la estimación de las capacidades nacionales*. Organización Meteorológica Mundial (OMM); Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Resolución A/RES/70/1. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Asamblea General, Septuagésimo período de sesiones. Naciones Unidas. Nueva York.
- Opolenko, V. (2016). *Sensibilidad Medioambiental a la desertificación en la cuenca del río La Villa, República de Panamá* (Tesis doctoral). Universidad Internacional de Andalucía, España. ISBN: 978-84-7993-751-5
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2007). *Zonación de los Regímenes Hídricos de América Latina y el Caribe desde una Perspectiva Climática*. Dentro del marco del proyecto “Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe”. CAZALAC. Documento Técnico del PHI-LAC, N°6. Montevideo, Uruguay. ISBN 92-9089-098-3
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP). (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo*. París, UNESCO. ePub ISBN 978-92-3-300045-2
- Unión Europea. (EU) (2015). *Herramientas para Contribuir a la Gestión Sustentable del Agua en Latinoamérica*. Luxembourg: Publications Office of the EU. ISBN978-92-79-45052-5