



Uniciencia
ISSN: 2215-3470
Universidad Nacional, Costa Rica

Madrigal-Solís, Helga; Fonseca-Sánchez, Alicia; Calderón-Sánchez, Hazel; Gómez-Cruz, Alicia; Núñez-Solís, Christian
Design of a monitoring network as a participative management tool: physical and chemical quality of groundwater in three sub-basins in the Central Valley of Costa Rica
Uniciencia, vol. 33, no. 1, 2019, January-June, pp. 43-60
Universidad Nacional, Costa Rica

DOI: <https://doi.org/10.15359/ru.33-1.4>

Available in: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=475959241004>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's webpage in redalyc.org

UNAM  redalyc.org

Scientific Information System Redalyc
Network of Scientific Journals from Latin America and the Caribbean, Spain and Portugal

Project academic non-profit, developed under the open access initiative

Archivo complementario

Traducción en español

Este artículo debe ser referenciado de la siguiente manera:

Madrigal-Solís, H.; Fonseca-Sánchez, A.; Calderón-Sánchez, H.; Gómez-Cruz, A. & Núñez-Solís, C. (2019). Design of a monitoring network as a participative management tool: physical and chemical quality of groundwater in three sub-basins in the Central Valley of Costa Rica. *Revista Uniciencia*. 33(1), 43-60. Doi: <http://dx.doi.org/10.15359/ru.33-1.4>



Diseño de una red de monitoreo como herramienta de gestión participativa: calidad física y química del agua subterránea en tres subcuencas del Valle Central, Costa Rica

Helga Madrigal-Solís

helga.madrigal.solis@una.cr

Universidad Nacional,
Heredia, Costa Rica.

Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-4423-5592>

Hazel Calderón-Sánchez

hazelcalderon@gmail.com

Universidad Nacional,
Heredia, Costa Rica.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9915-627X>

Christian Núñez-Solís

christian.nunez.solis@una.cr

Universidad Nacional,
Heredia, Costa Rica.

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-1221-8758>

Alicia Fonseca-Sánchez

alicia.fonseca.sanchez@una.cr

Universidad Nacional,
Heredia, Costa Rica.

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-1275-2301>

Alicia Gómez-Cruz

agomezcruz@gmail.com

Universidad Nacional,
Heredia, Costa Rica.

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-8175-8344>

Resumen

El agua de los acuíferos Barva, Colima Superior y Colima Inferior, ubicados en el sector oeste del Valle Central de Costa Rica, representa la principal fuente de abastecimiento de agua potable en esta región. El propósito de este estudio fue diseñar una red de monitoreo o vigilancia para la calidad del agua de estos acuíferos en las subcuencas de los ríos Bermúdez, Ciruelas y río Segundo, así como fomentar la partici-



pación de actores sociales para el funcionamiento de cada red de vigilancia. De los sitios propuestos, cinco sobrepasaron, de dos a cuatro ocasiones, el Valor Alerta de 25 mg/l de nitratos como NO_3^- . Estos sitios, los cuales captaron agua del acuífero Barva, se encontraban en zonas donde predominaba el uso urbano y cultivos de café. Los lugares que captaron agua de este acuífero con las menores concentraciones, por debajo de los 2 mg/l, se encontraban en las zonas altas de las subcuencas, en donde predomina el bosque y los pastos, mientras que los que captaron agua de los Colima mostraron concentraciones por debajo de los 20 mg/l. Se recomienda la vigilancia semestral de al menos conductividad eléctrica, pH, temperatura, nitratos y cloruros. El funcionamiento de estas redes ofrece una oportunidad para la vigilancia de la calidad del agua subterránea por parte de actores clave en el nivel de cuenca, como uno de los primeros pasos en el desarrollo de un manejo sostenible de este recurso.

Palabras clave: red de monitoreo; calidad de agua subterránea; acuífero Barva; Colima; nitratos; uso de suelo.

En el noroeste del Valle Central de Costa Rica, la mayor parte de la población depende de las aguas de los acuíferos Barva, Los Ángeles, Bambinos, Colima Superior y Colima Inferior. Además, estos recursos son la fuente principal para el desarrollo de las actividades comerciales e industriales. Del territorio nacional, la región geográfica donde se reporta el mayor número de pozos registrados es el Valle Central, debido a que el 60 % de la población costarricense y el 85 % de la actividad industrial se asientan en dicha región (Programa Estado de la Nación, 2005).

Sin embargo, la presencia de zonas agrícolas y el rápido crecimiento urbanístico e industrial que ha experimentado la zona en los últimos años han provocado el desarrollo de actividades con potencial de generación de sustancias contaminantes que va desde reducido hasta elevado. Tal es el caso de los cantones Barva, San Rafael y Santa Bárbara (Madrigal-Solís *et al.*, 2014) y otras zonas sobre el acuífero Barva (Ureña *et al.*, 2006).

Dependiendo de la profundidad del nivel freático y del tipo de materiales que cubren este acuífero en una zona determinada, el acuífero Barva posee una vulnerabilidad a la contaminación que va de baja a elevada, tal como lo evidencia una investigación en la zona norte del acuífero (Gómez-Cruz *et al.*, 2014). Por tanto, sustancias químicas como plaguicidas, fertilizantes, derivados de hidrocarburos, nitratos y metales pesados, entre otros, podrían lixiviarse a través del suelo e ingresar en las aguas subterráneas (Foster *et al.*, 2013; Foster *et al.*, 2007).

Adicionalmente, cerca de un 70 % de la población utiliza el tanque séptico como sistema de saneamiento en el Valle Central (AyA/MINAE/MS, 2016), lo que representa una carga potencialmente contaminante debido a la lixiviación de sustancias como los nitratos, cuando no hay adecuado mantenimiento en dichos sistemas de tratamiento. En un programa de vigilancia de las concentraciones de nitratos en el acuí-



fero Barva durante el periodo 1988-2004, Reynolds-Vargas *et al.* (2006) encontraron un aumento significativo en algunos sitios que extraen agua de este acuífero, lo que demuestra la su vulnerabilidad a la contaminación por sustancias provenientes de tanques sépticos y fertilizantes, por lo que recalcan la importancia de la implementación de programas de vigilancia de la calidad del agua subterránea en cuanto a este y otros indicadores de contaminación. Por su parte, Madrigal-Solís *et al.* (2017) hallaron un aumento en las concentraciones de nitratos en el agua del acuífero Barva, desde las partes altas hasta las de menor elevación, en lo que podría ser un proceso incipiente de contaminación.

En la actualidad, es ampliamente reconocido que el empoderamiento en procesos de gestión de las aguas subterráneas debe ser prioritario (Kulkarni *et al.*, 2004), tomando en cuenta que estos acuíferos permiten el progreso y la prosperidad de las comunidades, al suministrar de agua potable a hogares y abastecer de agua al sector agrícola e industrial. Sin embargo, muchas comunidades no cuentan con herramientas adecuadas para realizar acciones de protección necesarias, tales como programas de vigilancia de la calidad del agua subterránea.

La implementación de un programa de vigilancia de la calidad del agua de un acuífero es una herramienta esencial para lograr una adecuada gestión (Van den Brink *et al.*, 2007; Baran y Gourcy, 2013) y forma parte de los programas de protección del agua subterránea (Foster *et al.*, 2002), cuyo fin es controlar los impactos de las cargas de contaminantes. Además, representa una oportunidad para la parti-

cipación ciudadana, en el enfoque de gestión integrada del recurso hídrico (GWP, 2013). Dicha vigilancia puede ser entendida como un programa técnicamente estandarizado de observaciones, mediciones y análisis de variables físicas, químicas y biológicas seleccionadas. Entre los tipos de programas de vigilancia existen: a) *vigilancia de la calidad del abastecimiento de agua potable* y b) *monitoreo defensivo*. En el primer tipo, se analizan únicamente muestras de agua tomadas en las fuentes de abastecimiento, por lo que, según Cepis (1989) y Tuinhof *et al.* (2006), no se aporta información acerca de cómo se encuentra el agua del acuífero, es decir, sobre las tendencias espaciales, ni de si existen tendencias de las concentraciones que puedan presentar las sustancias químicas a lo largo de varios años. Por el contrario, el *monitoreo defensivo*, tal como lo establece el Banco Mundial (Cepis 1989), tiene como objetivo vigilar la calidad del agua en sitios aguas arriba, en torno a las fuentes de abastecimiento, con el fin de proporcionar aviso oportuno de una frente de contaminación, antes de que esta sea distribuida a la población.

Las subcuencas de los ríos Bermúdez, Ciruelas y Segundo, sobre el acuífero Barva, albergan cantones con alto desarrollo urbano, agrícola e industrial. A pesar de que la mayoría de sus habitantes se abastecen de agua subterránea, el único control que se realiza en algunos pozos de abastecimiento, de manera sistemática, es el análisis de la presencia de contaminantes microbiológicos y de algunos parámetros fisicoquímicos generales, lo que cumple con los objetivos del tipo de vigilancia para la calidad del abastecimiento de agua



potable, pero no necesariamente con los del monitoreo defensivo.

Dada la importancia de los acuíferos del Valle Central, el objetivo principal de esta investigación fue diseñar una red de monitoreo para evaluar la calidad física y química del agua subterránea en las subcuencas de los ríos Segundo, Ciruelas y Bermúdez, tomando en cuenta el uso del suelo en estas subcuencas. Además, motivar a representantes de instituciones, gobiernos locales, asociaciones de desarrollo, acueductos comunales y empresa privada a participar en su funcionamiento.

Marco referencial

Algunos factores como el cambio climático, el aumento poblacional, la degradación ambiental y la investigación científica han puesto en evidencia lo urgente de implementar la gestión integral de los recursos hídricos para encausar los países en la vía del desarrollo sostenible. En la Región de América Latina y el Caribe (LAC) el crecimiento de la población y el desarrollo económico constituyen factores que ejercen una fuerte presión sobre estos recursos (Andrade-Pérez y Navarrete, 2004). Por lo tanto, la gestión del recurso hídrico en los niveles local y nacional es una de las acciones básicas indispensables para satisfacer las necesidades primarias de los seres vivos y garantizar su disponibilidad en cuanto a cantidad y a calidad, para las presentes y futuras generaciones. En Costa Rica, el Estado se encarga de tutelar el manejo del agua como un bien de dominio público, pero, además, se debe procurar tener espacios donde diversos actores sociales participen y ejecuten acciones concretas que garanticen la sostenibilidad del recurso (Castro *et. al.*, 2004).

Debido a la importancia de la participación ciudadana en procesos de gestión del recurso hídrico, la ejecución de un programa de vigilancia de aguas subterráneas no solo constituye una herramienta básica de protección, sino que ofrece una oportunidad para que las comunidades se involucren activamente en dicho proceso. Una estrategia de vigilancia de aguas subterráneas tiene como objetivos principales (Foster *et al.*, 2002): a) suministrar datos sobre el estado natural y las tendencias del sistema hidrogeológico con fines de planeación, manejo y toma de decisiones sobre la protección y conservación de las aguas subterráneas en los niveles locales, regionales y nacionales; b) disponer de datos precisos y confiables para contribuir a identificar la existencia de fuentes puntuales y difusas de contaminación, y c) producir datos para estudiar los cambios espacio-temporales en la calidad del agua. El tipo y la cantidad de datos necesarios dependen de los objetivos de dicha red, de la clase de contaminantes potenciales que se ubican en la cuenca y del financiamiento disponible.

Para su funcionamiento, el Banco Mundial recomienda, en zonas con vulnerabilidad hidrogeológica alta o extrema a la contaminación, muestrear cada tres meses o con una frecuencia aún mayor (Foster *et al.*, 2007), mientras que para zonas con vulnerabilidad baja o media es recomendable una frecuencia menor, por ejemplo, cada cuatro o seis meses.

Sitio de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte noroeste del Valle Central, en los sectores altos de la cuenca del río Virilla (Figura 1), específicamente entre las



coordenadas geográficas -84.24 y -84.06 longitud oeste y 9.96 y 10.13 latitud norte, según el sistema de coordenadas WGS84. La precipitación va de 830 mm/año, en las elevaciones más bajas y con menor precipitación, hasta 1700 mm/año en las zonas más lluviosas, a mayores elevaciones. Consta de tres subcuencas, Bermúdez, Ciruelas y río Segundo, ubicadas sobre el Sistema Multiacuífero Barva

El Sistema Multiacuífero del acuífero Barva, también conocido como acuífero Barva, cuenta con un área de 189 km² y consta de tres formaciones que alojan subacuíferos en lavas fracturadas (BGS/SENARA, 1985; Rodríguez, 2002; Ramírez y Alfaro, 2002): el Bermúdez (acuífero Barva Inferior, el más extenso), Bambinos y Los Ángeles (acuíferos Barva Superior) (Figura 1). Cada subacuífero se encuentra separado por tobas y piroclastos meteorizados. El acuífero Barva cuenta con un espesor saturado que va desde los 4 a los 66 m, aproximadamente. Bajo la Formación Bermúdez se ubica la Formación Tiribí y el Complejo Zurquí, siendo la primera el basamento del acuífero Barva en el sector centro y oeste y la segunda en el sector este. Los acuíferos Colima Superior e Inferior se localizan bajo estas últimas formaciones (Figura 2). La recarga de los subacuíferos Bambinos y Los Ángeles, en la parte alta, ocurre por infiltración directa de la precipitación. La recarga al subacuífero Barva Inferior en estos sectores se da por drenaje desde estos dos subacuíferos, a través de material tobáceo. En el resto del territorio, la recarga al acuífero se da por infiltración directa. Se estima que la recarga del Sistema Multiacuífero Barva varía entre un 30 y un 55 % de la precipitación, dependiendo de la permeabilidad, la conductividad hidráulica de las tobas y la

cantidad de lluvia en cada sector del acuífero (Gómez, 1987; Reynolds-Vargas, 1997; Ramos, 2001). La subcuenca del río Bermúdez posee un área de 73.72 km², la subcuenca del río Ciruelas tiene un área aproximada de 90.41 Km², mientras que la subcuenca del río Segundo, de 85.58 km².

Metodología

Uso del suelo. Se tomó como referencia el uso del suelo de 2005, con comprobación de campo en el 2008, elaborado ese año por el Programa de Planificación Regional y Urbana de la GAM (PRUGAM, 2008). Específicamente, se utilizó el mapa de uso del suelo de la Gran Área Metropolitana, incluido en los Índices de Fragilidad Ambiental (IFA), según los criterios de clasificación creados por el PRUGAM, el cual consta de 21 categorías. Estas se reclasificaron en cinco coberturas: bosque, pastos, cultivos mixtos, café y asentamientos humanos.

Redes de monitoreo. Se diseñaron tres redes para la vigilancia de la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas en las subcuencas Bermúdez, Ciruelas y río Segundo. Para esto, se obtuvieron los reportes de perforación de los pozos registrados en el Departamento de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía y en el SENARA. En cada subcuenca, se obtuvo información litológica de al menos 200 pozos. De estos, se identificó el acuífero captado con base en el registro litológico, perfiles hidrogeológicos, en el diseño de pozo. Además, se utilizó el Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica (BGS/SENARA, 1985) y la descripción geológica de la zona según BGS/SENARA (1988). En total, se identificaron los acuíferos captados en al menos 45 pozos en cada subcuenca. Luego de identificar cuáles

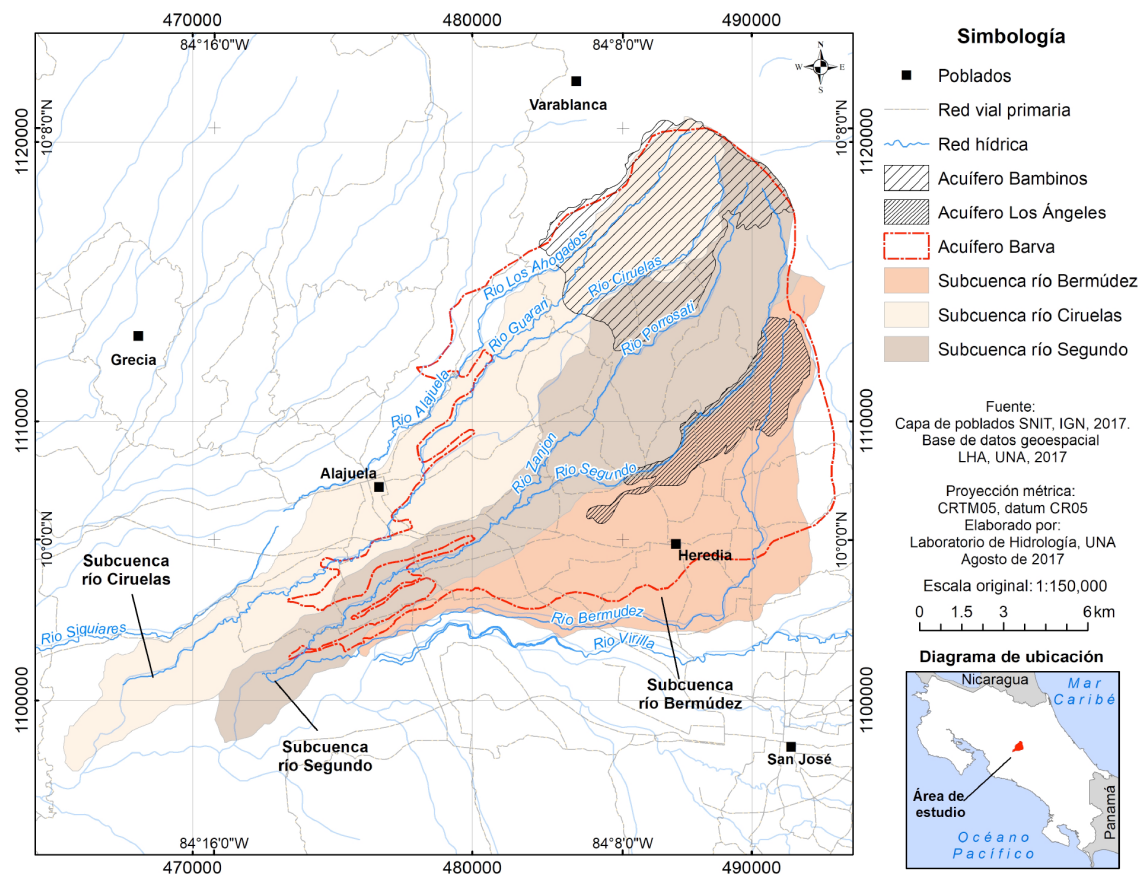


Figura 1. Área de estudio para el diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea de los acuíferos Barva y Colima. Elaboración propia.

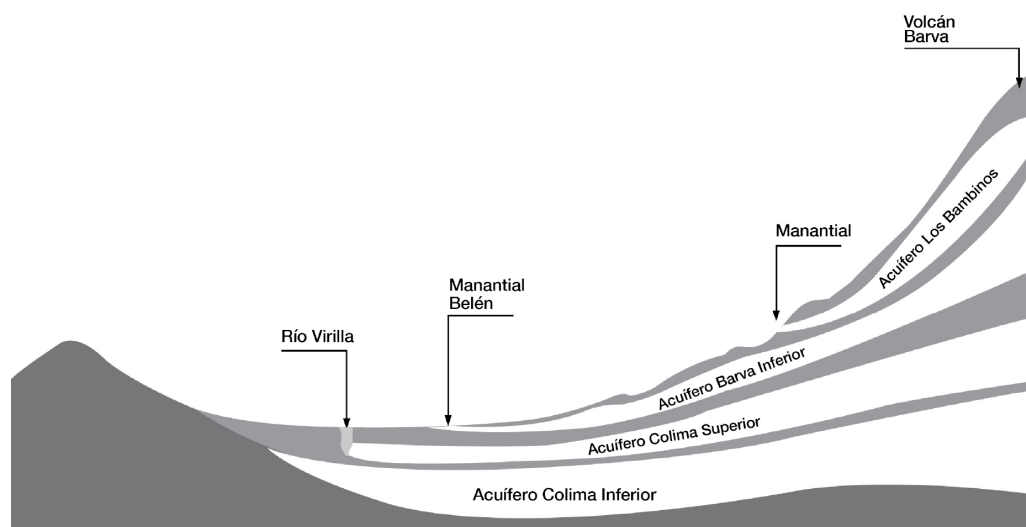


Figura 2. Corte transversal simplificado de los acuíferos en el sector noroeste del Valle Central. Elaboración propia.



pozos extraen agua únicamente del acuífero Barva y cuáles de los acuíferos Colima Superior e Inferior, se hizo una búsqueda de estos en el campo. Se localizaron y muestrearon al menos 25 pozos, mientras que del resto no se obtuvo muestra, debido a que se encontraban abandonados o no se consiguió permiso para muestrear.

En cada cuenca, se llevaron a cabo dos premuestreos en pozos y manantiales, para obtener información física y química básica del agua. Del total de sitios muestreados, se hizo una selección final, con base en los siguientes criterios: a) definición clara de la unidad acuífera que se estaba captando (Barva o Colima), b) captación de un solo acuífero por sitio, c) distribución espacial de los sitios en cada subcuenca, teniendo en cuenta direcciones preferenciales de las líneas de flujo de agua subterránea, c) facilidad de acceso a los sitios para la toma de muestras de agua subterráneas y d) resultados físicos y químicos preliminares. Una vez que fueron seleccionados los sitios para conformar la red de monitoreo por subcuenca, se efectuaron dos campañas de muestreo adicionales, para un total de cuatro campañas por subcuenca. Las cuatro campañas se efectuaron en la subcuenca del río Bermúdez, en diciembre del 2006 y febrero, abril y setiembre del 2007; en la subcuenca del río Segundo, las campañas se realizaron en mayo, agosto, setiembre y noviembre del 2009, mientras, en la subcuenca del río Segundo, las campañas se llevaron a cabo en diciembre del 2010 y junio, agosto y octubre del 2011.

Cada red de monitoreo fue presentada a organizaciones comunales, gobiernos locales y organizaciones administradoras del recurso hídrico, a través de, al menos, tres

talleres participativos en cada subcuenca. Durante estos, se brindaron charlas sobre la problemática que afronta la calidad del agua subterránea en el Valle Central, principios básicos relacionados con las redes de monitoreo del agua subterránea y la importancia del funcionamiento sistemático y permanente de una red en los acuíferos Barva y Colimas. Además, se desarrolló un plan de trabajo, un análisis de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) y se conformó una comisión de monitoreo de seis personas por cada subcuenca, a la cual se le brindó una capacitación en el funcionamiento de la red de monitoreo a través de varias giras y de un manual sobre la metodología para la gestión de cada red.

Finalmente, mediante un taller participativo con representantes de ASADAS e integrantes de las comisiones de monitoreo de las tres subcuencas, se definió la integración de las tres redes en una sola red definitiva para el acuífero Barva y algunos sitios de Colima.

Toma de muestra y análisis físicos y químicos. Antes de la toma de las muestras en los pozos, se verificó que los estos estuvieran bombeando agua al menos durante las últimas dos horas antes del muestreo. Si un pozo no estaba en funcionamiento, se encendió la bomba y se dejó correr el agua por unos 20 minutos antes del muestreo. Para verificar que el agua estancada en el pozo y las tuberías hubiese sido purgada, se midieron los parámetros de campo varias veces hasta que se estabilizaron los valores. A cada muestra de agua se le determinó *in situ* la conductividad eléctrica, utilizando un conductímetro de campo WTW LF 197, la temperatura y el pH, utilizando para los dos últimos un medidor Thermo Orion 261S. Las muestras se tomaron por duplicado en



botellas Nalgene de 500 ml, las cuales se enjuagaron con agua del sitio tres veces antes de recolectar tales muestras. Luego, se transportaron el mismo día, en una cámara fría, al Laboratorio de Hidrología Ambiental (LHA) de la Universidad Nacional, en donde se mantuvieron en refrigeración, a 4 °C, hasta su análisis el día siguiente. El análisis de nitratos se realizó con el método de espectrofotometría de luz ultravioleta (protocolo 4500 NO₃-B; Eaton, Clesceri, Greenberg y Franson, 1995). Los bicarbonatos se determinaron por el método de titulación con ácido sulfúrico (método 2320-B), los cloruros con la metodología de nitrato de mercurio (4500 - Cl- - C) y los sulfatos con la metodología 4500-SO₄-2-E (Eaton *et al.*, 1995).

Resultados

Para el 2008, sobre el acuífero Barva, el uso de suelo dedicado a bosques y pastos correspondía a un 24 % y un 15 % del área, respectivamente, entre los 1400 y los 2800 msnm, principalmente. En las partes medias de las subcuencas, de los 1000 a 1400 msnm, predominan los cultivos de café y otros agrícolas, los cuales cubrían un 26 % y un 12 % del área sobre el acuífero, respectivamente. Los usos urbano e industrial abarcaban un 23 %, principalmente en las partes bajas del acuífero, de los 800 a los 1000 msnm (Figura 3).

La red de monitoreo diseñada para la calidad del agua del Sistema Multiacuífero Barva en las subcuencas estudiadas quedó conformada por 15 sitios: uno capta el acuífero Los Ángeles, dos que captan Bambinos y 12 que extraen agua del acuífero Barva

Inferior. Además, el programa propuesto incluye el monitoreo de dos sitios que extraen agua exclusivamente del Colima Superior y uno del Colima Inferior (Tabla 1 y Figura 4). Únicamente estos tres sitios cumplieron con el requisito de extraer agua exclusivamente de dichos acuíferos, previniéndose la toma de agua de mezcla con el agua del acuífero Barva.

Durante las campañas de muestreo, los valores de pH y conductividad eléctrica, así como las concentraciones de cloruros, bicarbonatos y sulfatos se encontraron en las normas nacionales, según el Reglamento para la calidad del Agua Potable de Costa Rica 38924-S (Tablas 2 y 3).

En cuanto a los nitratos, en los sitios que extraen agua del Sistema Acuífero Barva, ubicados en la subcuenca del río Bermúdez, las concentraciones oscilaron entre los 0,04 mg/l, en el manantial La Gruta, subacuífero Los Ángeles, y 34,09 mg/l, en el manantial Belén, subacuífero Barva Inferior. En la subcuenca del río Segundo, se observaron concentraciones entre 0,49 mg/l de nitratos, del subacuífero Bambinos, y 26,16 mg/l, en el sitio RM08 en el cantón de Belén, subacuífero Barva Inferior. Asimismo, en la subcuenca del río Ciruelas, las concentraciones de nitratos oscilaron entre los 0,22 mg/l, en el manantial Iris Hernández, del subacuífero Bambinos, y 42,19 mg/l, en el pozo RM14, el cual extrae agua del subacuífero Barva Inferior (Tabla 3).

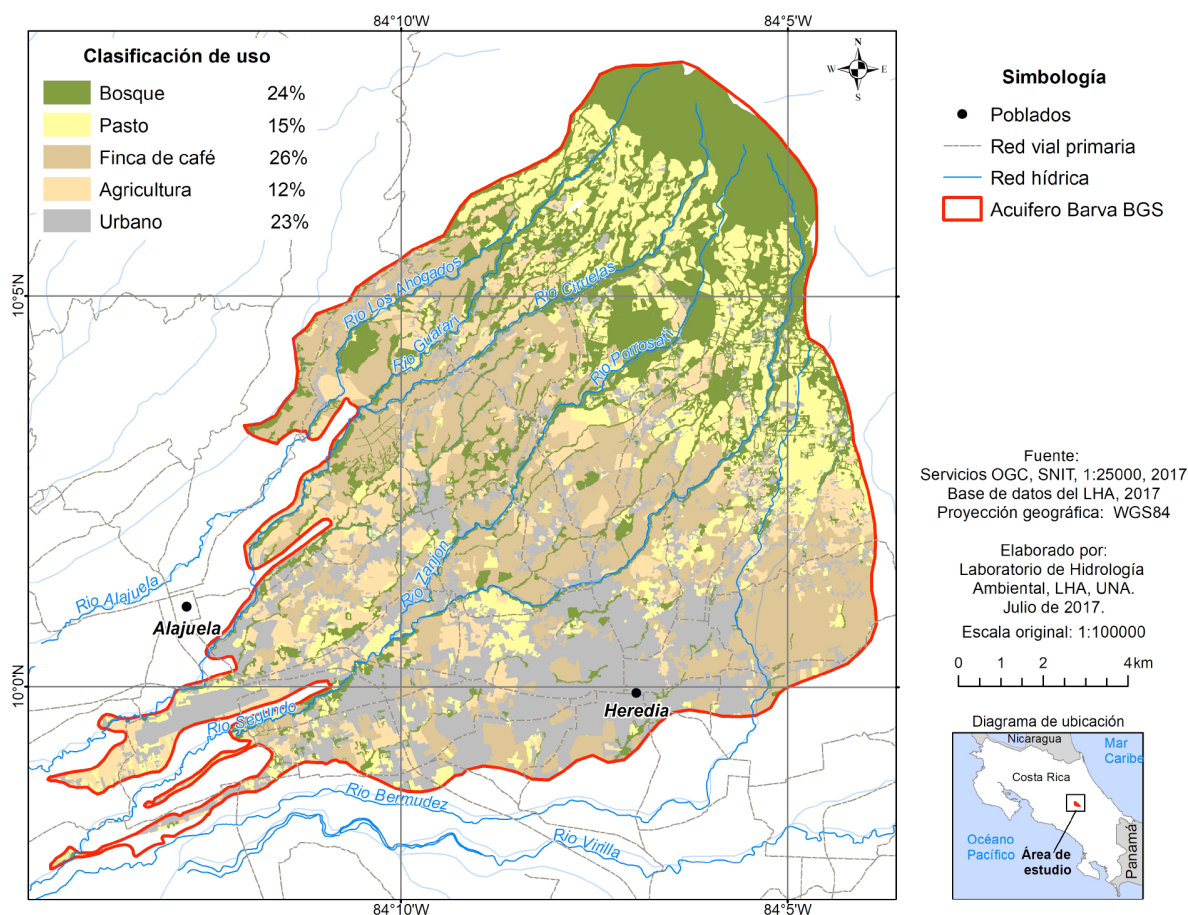


Figura 3. Uso de suelo sobre el acuífero Barva en el 2005, con comprobación de campo en el 2008. Elaborado a partir del Programa de Planificación Regional y Urbana de la GAM (PRUGAM, 2008).

Tabla 1. Red de monitoreo para la calidad física y química de las aguas subterráneas en las subcuencas de los ríos Bermúdez, Ciruelas y Segundo, Costa Rica

Código de monitoreo	Código oficial (SENARA)	Y	X	Acuífero	Tipo	Prof. total	Nivel estático
RM01	La Gruta	224 506	526 749	L.A.	Manantial	-	-
RM02	AB – 1303	219 095	527 127	C.S.	Pozo	139	111
RM03	San Antonio de Belén	218 469	517 155	B.	Manantial	-	-
RM04	Barvas del Viejo	227 216	525 079	B.	Manantial	-	-
RM05	BA-221	227 250	521 652	Bamb.	Pozo	35	24,5
RM06	BA-414	224 200	519 680	B.	Pozo	75	21
RM07	BA-789	222 240	519 190	B.	Pozo	55	32
RM08	AB- 1234	219 600	517 370	B.	Pozo	45	28
RM09	Ojo de Agua	218 770	514 938	B.	Manantial	-	-



Código de monitoreo	Código oficial (SENARA)	Y	X	Acuífero	Tipo	Prof. total	Nivel estático
RM10	Iris Hernández	231 000	525 000	Bamb.	Manantial	-	-
RM11	BA-513	225 200	517 900	B.	Pozo	70	42
RM12	La Mona	225 200	518 700	B.	Manantial	-	-
RM13	BA-479	223 200	516 900	B.	Pozo	70	44,5
RM14	BA-748	222 780	518 135	B.	Pozo	70	n. d.
RM15	BA-415	222 150	517 050	B.	Pozo	60	22
RM16	BA-713	221 150	513 225	C.S.	Pozo	154	100
RM17	AB- 1431	218 800	512 150	B.	Pozo	50	23
RM18	AB-2162	218 300	510 050	C.I.	Pozo	93	74

Nota: L.A. = Los Ángeles; Bamb. = Bambinos; B.= Barva; C.S.= Colima Superior; C.I. =Colima Inferior.
Fuente: Elaboración propia.

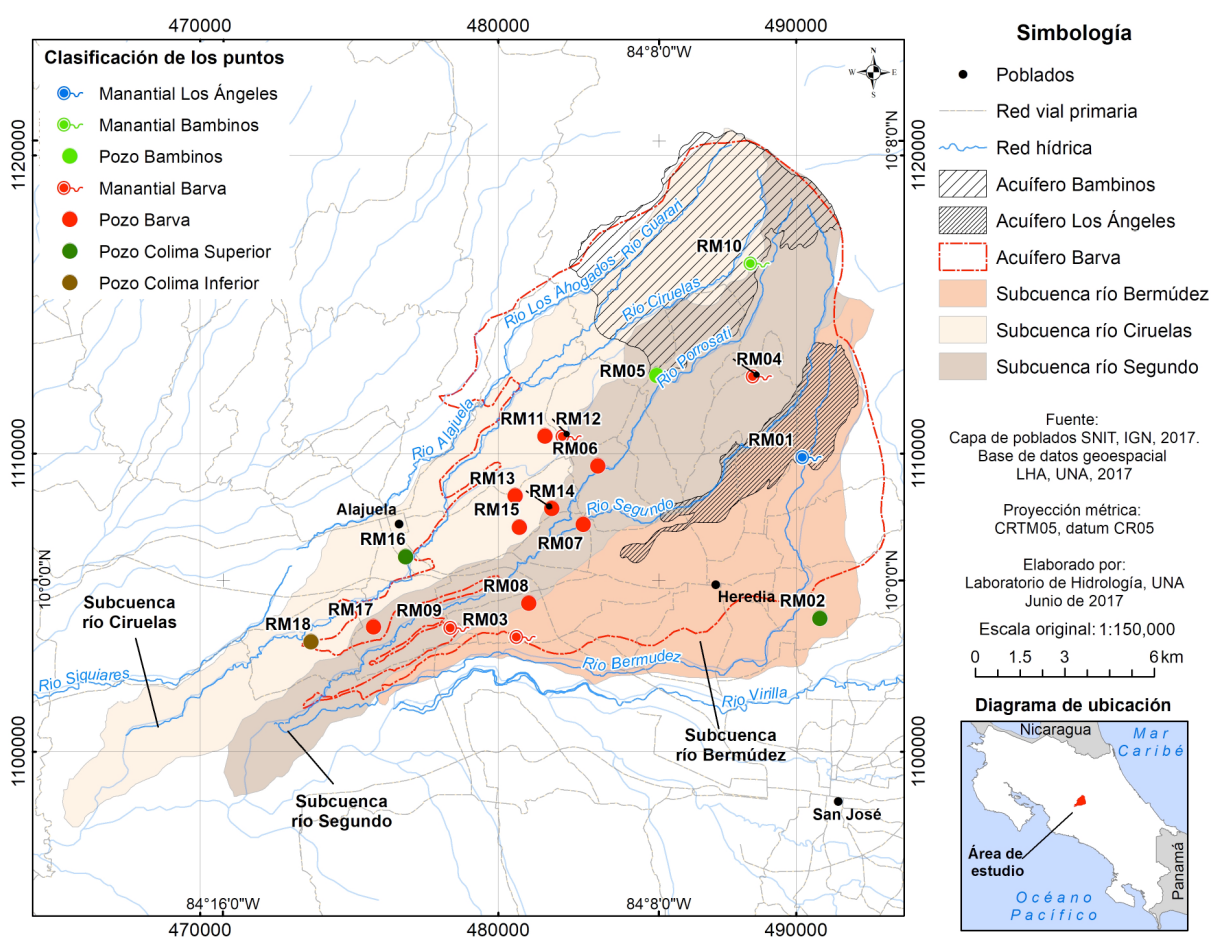


Figura 4. Ubicación de los pozos y manantiales que conforman la red de monitoreo de calidad física y química para aguas subterráneas de los acuíferos Barva y Colima en las subcuencas de los ríos Bermúdez, Ciruelas y Segundo, Costa Rica. Elaboración propia.



De los 15 sitios que extrajeron agua del Sistema Acuífero Barva, cinco sobrepasaron, de dos a cuatro ocasiones, el valor alerta (VA) de 25 mg/l, el cual se define como la concentración a la cual se corre un riesgo mínimo o aceptable para la salud de los consumidores, según el Reglamento para la calidad del Agua Potable de Costa Rica 38924-S (Tabla 3). Todos estos sitios se encontraban en zonas donde predominaba el uso urbano y cultivos de café. Sin embargo, durante las campañas de muestreo realiza-

das en este estudio, ningún sitio sobrepasó los valores máximos admisibles (VMA) de 50 mg/l de nitratos (NO_3^-). También se observó que los sitios con las menores concentraciones se encontraban en las zonas altas de las subcuencas, en donde predomina el bosque y los pastos.

De los tres sitios que captaron agua de los acuíferos Colima Superior e Inferior, ninguno sobrepasó los VA o los VMA en cuanto a nitratos, en alguna ocasión.

Tabla 2. Promedios, desviación estándar, mínimos y máximos de parámetros físicos en las tres redes de monitoreo para la calidad del agua subterránea en las subcuencas de los ríos Bermúdez, Ciruelas y Segundo, Costa Rica

Código de la red de monitoreo	Código Oficial (SENARA)	Acuífero	n.	pH				C.E. (uS/cm)			
				Prom.	D. E.	Mín.	Máx.	Prom.	D.E.	Mín.	Máx.
RM01	La Gruta	L.A.	4	6,3	0,3	5,9	6,6	62,4	14,4	46,7	77,0
RM02	AB - 1303	C.S.	4	6,6	0,4	6,3	7,3	156,1	3,4	153,1	161,0
RM03	San Antonio de Belén	B.	4	6,1	0,3	5,9	6,5	240,0	3,0	236,5	243,5
RM04	Barvas del Viejo	B.	4	5,8	0,1	5,8	5,9	110,7	2,1	109,2	112,1
RM05	BA-221	Bamb.	4	5,9	0,4	5,5	6,2	128,9	6,1	123,6	135,6
RM06	BA-414	B.	4	6,3	0,5	6,0	6,7	121,0	1,7	119,8	122,2
RM07	BA-789	B.	4	6,3	0,2	6,2	6,5	146,8	0,1	146,7	146,9
RM08	AB-1234	B.	4	6,8	0,2	6,6	6,9	183,9	7,2	177,9	191,8
RM09	Ojo de Agua	B.	1	6,0	0,0	6,0	6,0	179,7	-	179,7	179,7
RM10	Iris Hernández	Bamb.	4	6,2	0,1	6,1	6,2	52,0	0,0	52,0	52,0
RM11	BA-513	B.	4	5,9	0,1	5,8	5,9	188,5	2,1	187,0	190,0
RM12	La Mona	B.	4	6,1	0,1	6,0	6,2	128,3	0,6	128,0	129,0
RM13	BA-479	B.	4	6,6	0,1	6,5	6,6	189,7	2,5	187,0	192,0
RM14	BA-748	B.	4	5,6	0,2	5,5	5,8	259,3	8,5	252,0	268,0
RM15	BA-415	B.	4	6,1	0,2	5,9	6,2	166,7	0,6	166,0	167,0
RM16	BA-713	C.S.	4	6,5	0,0	6,5	6,5	149,0	0,0	145,0	153,0
RM17	AB- 1431	B.	4	5,3	0,4	5,0	5,6	208,3	17,6	190,0	225,0
RM18	AB-2162	C.I.	4	6,5	0,1	6,4	6,6	215,3	1,0	214,0	216,0

Nota: L.A. = Los Ángeles; Bamb. = Bambinos; B.= Barva; C.S.= Colima Superior; C.I. =Colima Inferior.
Fuente: Elaboración propia.



Tabla 3. Promedios, desviación estándar, mínimos y máximos de parámetros químicos analizados en las tres redes de monitoreo para la calidad del agua subterránea en las subcuencas de los ríos Bernúdez, Ciruelas y Segundo, Costa Rica

Código de red de monitoreo	Código oficial (SENARA)	Acuífero	no.	NO ₃ - (mg/l)				Cl- (mg/l)				HCO ₃ ⁻ (mg/l)				SO ₄ ⁻² (mg/l)			
				Prom.	D. E.	Mín.	Máx.	Prom.	D. E.	Mín.	Máx.	Prom.	D. E.	Mín.	Máx.	Prom.	D. E.	Mín.	Máx.
RM01	La Gruta	L.A.	4	1,21	1,52	0,04	3,23	3,18	0,43	2,58	3,57	30,4	9,7	20,0	40,0	2,4	1,2	1,3	4,1
RM02	AB - 1303	C.S.	4	14,82	0,45	14,30	15,36	2,83	0,64	1,89	3,28	104,8	2,5	102,4	107,0	1,8	0,1	1,7	2,0
RM03	San Antonio de Belén	B.	4	33,51	0,57	33,02	34,09	10,51	1,16	8,83	11,46	80,7	0,5	80,0	81,0	2,0	0,2	1,7	2,3
RM04	Barvas del Viejo	B.	4	9,13	5,62	2,30	16,03	2,96	1,30	1,24	4,40	36,2	2,2	34,6	37,7	1,5	1,0	0,3	2,4
RM05	BA-221	Bamb.	4	8,39	6,74	0,49	16,95	3,64	1,19	1,96	4,74	37,7	11,6	29,5	45,9	14,5	3,4	9,4	16,7
RM06	BA-414	B.	4	12,25	8,82	2,26	18,95	2,00	0,50	1,47	2,47	45,9	-	45,9	45,9	1,6	-	1,6	1,6
RM07	BA-789	B.	4	15,92	3,41	13,59	19,83	3,58	0,52	3,09	4,13	52,5	-	52,5	52,5	2,1	1,3	0,6	2,9
RM08	AB-1234	B.	4	22,36	2,98	19,21	26,16	5,30	0,61	4,89	6,19	63,5	5,3	59,7	67,3	3,1	2,0	0,2	4,6
RM09	Ojo de Agua	B.	1	22,00	-	22,00	22,00	5,38	-	5,38	5,38	63,8	-	63,8	63,8	1,5	-	1,5	1,5
RM10	Iris Hernández	Bamb.	4	0,22	0,00	0,22	0,22	5,10	4,60	1,84	8,35	76,1	1,4	75,1	77,1	10,1	4,9	4,5	13,2
RM11	BA-513	B.	4	29,88	2,66	27,27	32,58	10,33	3,34	8,26	14,19	96,6	1,0	95,6	97,5	17,0	9,0	9,1	25,2
RM12	La Mona	B.	4	15,25	0,34	15,01	15,49	5,47	4,65	0,48	9,69	73,9	2,0	72,2	76,1	10,9	4,2	8,5	15,7
RM13	BA-479	B.	4	16,72	0,84	16,07	17,66	6,25	4,21	3,30	11,07	100,5	2,8	98,5	102,4	7,3	3,3	4,7	11,0
RM14	BA-748	B.	4	41,35	0,78	40,33	42,19	20,37	8,00	9,71	27,33	69,7	2,1	68,3	71,2	8,5	0,6	8,1	9,2
RM15	BA-415	B.	4	15,58	0,81	14,65	16,16	7,95	5,96	2,91	14,53	94,6	-	94,6	94,6	21,2	-	21,2	21,2
RM16	BA-713	C.S.	4	5,25	0,00	3,41	7,08	2,63	0,13	2,53	2,72	57,2	8,3	47,8	63,4	5,4	5,1	1,0	10,9
RM17	AB- 1431	B.	4	29,72	6,04	23,24	35,19	9,06	2,53	6,41	11,46	49,3	6,1	45,0	53,7	7,9	2,9	4,7	10,0
RM18	AB-2162	C.I.	4	6,10	1,98	3,14	7,35	12,78	5,77	6,41	20,41	27,5	2,5	25,7	29,3	3,2	2,5	1,4	4,9

Nota: L.A. = Los Ángeles; Bamb. = Bambinos; B. = Barva; C.S. = Colima Superior; C.I. = Colima Inferior.

Fuente: Elaboración propia.



Talleres participativos. La conformación de las tres redes de monitoreo, así como los resultados físicos y químicos de las campañas de monitoreo se dieron a conocer mediante al menos tres talleres participativos por subcuenca, a los que asistieron representantes de las siguientes organizaciones: Asociaciones Administradoras de Acueductos Rurales (ASADAS), Federación de Municipalidades, organizaciones comunales ambientales, gobiernos locales, Ministerio de Salud, Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), asociaciones de desarrollo, Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) y del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).

Durante los talleres se conformó una comisión de monitoreo por subcuenca de seis personas. En el caso de la subcuenca Ciruelas, esta comisión fue conformada por representantes de los siguientes entes: Municipalidad de Alajuela, Municipalidad de Santa Bárbara, Comité de Vigilancia de los Recursos Naturales (COVIRENA) de Desamparados de Alajuela, Asociación Administradora de Acueducto Rural (ASADA) de Carrizal, Programa Interdisciplinario de Investigación y Gestión del Agua de la Universidad Nacional (PRIGA-UNA) y Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA). En el caso de la subcuenca del río Segundo, esta comisión fue conformada por representantes de ASADAS, asociaciones de desarrollo comunales, Ministerio de Salud y Municipalidad de Barva. En la subcuenca Bermúdez, esta comisión se conformó con representantes de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), la cual provee el servicio de agua potable en gran parte de la zona en estudio, así como con representantes de las municipalidades de Heredia, Santo Domin-

go, San Rafael de Heredia, Flores, San Rafael de Alajuela, Belén y San Pablo. Con el fin de capacitar en la ubicación de los sitios y protocolos de muestreo, las dos últimas campañas de muestreo en cada subcuenca se efectuaron en compañía de los integrantes de estas comisiones.

Posteriormente, se desarrolló un taller participativo, con el fin de discutir los lineamientos de un trabajo conjunto entre los acueductos comunales, las municipalidades, el SENARA y la Universidad Nacional, con la participación de los representantes de las comisiones de monitoreo de cada subcuenca y, además, la participación de 31 representantes de acueductos comunales y de la Federación de Municipalidades de Heredia y Alajuela. La realización de los seminarios-talleres y reuniones con integrantes de cada comisión permitió conocer las ventajas y desventajas que se tienen para el logro de los objetivos que busca el programa propuesto, a través de un análisis FODA realizado en conjunto con los actores representantes de municipalidades y organizaciones que asistieron a estas reuniones.

En cuanto a las *fortalezas*, se evidenció que existe una preocupación por el monitoreo de la calidad del agua subterránea por parte de las autoridades de gobiernos locales, SENARA, Ministerio de Salud, Federación de Municipalidades y acueductos comunales. Esto permitió la conformación de una subcomisión interdisciplinaria por subcuenca, para iniciar y darle continuidad a la red de monitoreo. Además, se contaba con el apoyo o seguimiento de la Universidad Nacional, la cual posee experiencia e información base para el apoyo de las actividades propuestas y la interpretación de datos. Asimismo, esta actividad involucraría a la sociedad civil en la participación activa para la protección del recurso hídrico.



Por su parte, la implementación de estas redes de monitoreo ofrece varias *oportunidades*. La información generada e interpretada serviría como fundamento científico para la toma de decisiones, con el fin de formular e implementar políticas de protección para el agua subterránea. Los participantes recibirían capacitaciones para la aplicación de las metodologías en el funcionamiento de una red de monitoreo. La información y las necesidades de las actividades relacionadas con la red de monitoreo se divulgarían en los distintos consejos municipales. Finalmente, existe una oportunidad de vinculación entre entidades como AyA, ESPH, ASADAS, ICE, MAG, MINAET, Ministerio de Salud, SENARA y COVIRENAS a través de las actividades del programa.

Sin embargo, también se identificaron algunas *debilidades*. El mayor problema que enfrentaría el funcionamiento de la red es la falta de financiamiento para el análisis físico-químico básico y otros análisis complementarios de las muestras. Además, existe una ausencia de obligatoriedad de participación y compromiso entre las distintas entidades y participantes de la actividad. Igualmente, entre las *amenazas* a la implementación de un programa de monitoreo, se identificó la falta de permanencia de las autoridades en los gobiernos locales, lo cual dificulta su compromiso y colaboración financiera a largo plazo con los objetivos del programa.

Discusión

Las redes de monitoreo son uno de los métodos más importantes para establecer estrategias y políticas de protección y conservación del recurso hídrico; la implementación de programas de monitoreo ayuda a mejorar la gestión y el manejo de las

aguas subterráneas y permite tanto anticipar como controlar procesos de contaminación. Además, la implementación de las redes de monitoreo propuestas ofrece una excelente oportunidad para la participación social en procesos de vigilancia de la calidad física y química del agua subterránea en forma sistemática y permanente e, incluso, brinda un espacio para concientizar sobre la importancia de acciones por parte de los habitantes y usuarios que contribuyan con un manejo racional y sostenible de las aguas subterráneas de la zona.

El hecho de que, por un lado, los sitios con menores concentraciones de nitratos se ubicaron en las zonas altas de las subcuencas estudiadas, dominadas por bosque y pastos y que, por otro, los lugares con mayores concentraciones se ubicaron en las zonas medias y bajas, donde predominó el uso urbano y el cultivo de café, es concordante con lo observado por Reynolds-Vargas *et al.* (2006) y Madrigal-Solís *et al.* (2017). Esto confirma la sospecha de que los nitratos provienen, por lixiviación, desde tanques sépticos, altamente utilizados en zonas urbanas y semiurbanas, y desde zonas agrícolas donde se aplican fertilizantes nitrogenados. El agua del acuífero Colima, por su parte, presentó bajas concentraciones de nitratos y cloruros, lo que se le atribuyó a que la mayor parte de su extensión se encuentra protegida por el acuífero Barva que lo sobreyace, aunque existe evidencia de cierta conexión hidráulica entre ambos acuíferos (Madrigal-Solís *et al.*, 2017). Debido a que los pozos que captan los acuíferos Colima, dependiendo de su ubicación, atraviesan, además, los acuíferos Los Ángeles, Bambinos y/o Barva Inferior, los constructores colocan rejillas para aprovechar estos niveles también. Por tanto, la mayoría de pozos



en la zona que capta los Colima extrae agua de mezcla, lo que hace difícil establecer una red de monitoreo especialmente diseñada para estos acuíferos.

En el caso del acuífero Barva y sitios que captan Colima, se recomienda una frecuencia de muestreo de al menos cada cuatro meses, es decir, un muestreo en época seca, otro en época lluviosa y otro en época de transición. Entre el grupo básico de parámetros se encuentran los nitratos y cloruros, el pH, conductividad eléctrica y temperatura. De manera ocasional y cuando se tenga sospecha de alguna fuente de contaminación del agua subterránea, se recomienda realizar análisis de metales pesados, residuos de plaguicidas, derivados de hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles. Estos análisis conforman el grupo de parámetros complementarios.

Cuando se cuente con la información técnica adecuada, la vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas constituye una herramienta que puede ser implementada por instituciones, asociaciones civiles, sector privado o administradores de agua en el nivel de cuenca o acuífero. Así mismo, la validación participativa que tienen los gobiernos locales, los entes administradores del agua y los actores locales de las comunidades es fundamental para integrar la gestión de recursos hídricos y la gestión participativa. Esta integración lograría el apoyo entre los actores en la cuenca, con el fin de fomentar la implementación del monitoreo y la consecuente generación de información técnica para la toma de decisiones y políticas de protección.

El éxito de una red de monitoreo recae en la participación activa de los interesados dentro de su territorio. Se sabe que muchas pueden ser las limitantes para lo-

gar los resultados deseados, principalmente los dirigidos a la gestión de los datos y la perdurabilidad en el tiempo de los muestreos, como el aspecto presupuestario. Sin embargo, si existe el empuje y la convicción comunal en conjunto con entes gestores del recurso hídrico local y nacional los alcances son mayormente positivos. Los ejercicios realizados con las personas en los talleres y las capacitaciones dejan ver un interés colectivo de intervención para la mejora en la calidad del agua; aprovechar esta coyuntura que está acompañada del aval político de las municipalidades y del Gobierno sería la plataforma ideal para generar avances importantes en este tema.

Uno de los obstáculos más grandes en el funcionamiento de las redes de monitoreo es la obtención de financiamiento, por lo que se recomienda que, para asegurar la continuidad del monitoreo de forma sistemática y permanente, se busque el apoyo de los gobiernos locales, de la empresa privada y de instituciones públicas como el SENARA o la ESPH, a través de alianzas o convenios. De realizarse los muestreos y el análisis, se recomienda que las comisiones busquen el apoyo de un profesional en el campo para interpretar de esta información. Lo anterior debido a que no solamente se debe vigilar que los parámetros físicos y químicos en el agua se mantengan debajo de los valores admisibles para consumo humano, sino que también es fundamental la interpretación integral de la información física y química para evaluar si existe una tendencia temporal y espacial en el acuífero.

Por su parte, existe debilidad en el nivel de legislación relacionada con la protección y el control de las aguas superficiales y subterráneas, en relación con la ejecución de redes de monitoreo para la calidad de



agua superficial y subterránea, a pesar de que el monitoreo constituye una herramienta determinante en la generación informativa para la toma de decisiones y la definición de estrategias protectoras de aguas subterráneas en los niveles locales, regionales y nacionales.

Debido a la falta de planificación que ha acompañado al cambio de uso del suelo en esta zona, la gestión del agua se ha convertido en un proceso complejo de manejarse en los niveles institucional y municipal. Es por esto que, para la implementación de las redes de monitoreo y otras medidas de protección y manejo del agua subterránea, es vital integrar la participación ciudadana en el proceso de su gestión, debido a las limitaciones humanas y económicas que sufren las instituciones estatales rectoras del recurso hídrico.

Reconocimientos

Este trabajo fue elaborado en el marco de tres proyectos de investigación del Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional: “Determinación de Perímetros de Protección de fuentes de agua subterránea en la subcuenca del río Bermúdez”, código 023504, “Expansión urbana y protección de fuentes de agua subterránea en la cuenca del río Ciruelas”, código IAAG03, y “Establecimiento de una red de monitoreo de la calidad del agua subterránea en la Cuenca del río Segundo”, código 023536.

Referencias

- Andrade, A. y Navarrete, F. (2004). *Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. México D. F., México: Red de Formación Ambiental. Serie Manuales de Educación y Capacitación Ambiental 8. PNUMA.
- AyA/MINAE/MS. (2016). *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016-2045*. San José, Costa Rica. ISBN 978-9977-62-153-1.
- Baran, N. y Gourcy, L. (2013). Sorption and mineralization of S-metolachlor and its ionic metabolites in soils and vadose zone solids: Consequences on groundwater quality in an alluvial aquifer (Ain Plain, France). *Journal of Contaminant Hydrology*, 154: 20-28. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.07.009>
- BGS/SENARA. (1985). *Mapa hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica*. Bradford, England: ESR Limited,. British Geological Survey, Servicio Nacional de Aguas Subterráneas.
- BGS/SENARA. (1988). *The continuation of hydrogeological investigations in the north and east of the Valle Central, Costa Rica*. Final Report 1984-1987. British Geological Survey Technical Report WD/88/13R. San José, Costa Rica: British Geological Survey, Servicio Nacional de Aguas Subterráneas.
- Castro, R.; Monge, E.; Rocha, C. y Rodríguez, H. (2004). Gestión local y participativa del recurso hídrico en Costa Rica. *Revista de Educación Ambiental Biocenosis*, 20(1-2), 36-45.
- Eaton, A.; Clesceri, L.; Greenberg, A. y Franson, M. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D. C.: American Public Health Association (APHA).
- Foster, S. y Gomes, D. (1989). *Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas una evaluación de métodos y costos*. CEPIS/OPS/OMS. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/repind46/monito/monito.html>
- Foster, S.; Hirata, R. y Andreo, B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, (21), 1389-3922. Doi:



- <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M. y Paris, M. (2007). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea*. Washington, D. C.: Banco Mundial.
- 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*. Washington, D. C.: Banco Mundial. Doi: <https://doi.org/10.1596/0-8213-4951-1>
- Gómez, A. (1987). *Evaluación del potencial de los acuíferos y diseño de las captaciones de agua subterránea en la zona de Puente de Mulas, provincia de Heredia, Costa Rica*. (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología, San José.
- Gómez-Cruz, A.; Núñez-Solís, C.; Madrigal-Solís, H. y Calderón-Sánchez, H. (2014). *Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica del cantón de Barva*. Informe técnico. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.
- GWP. (2013). *Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal*. Tegucigalpa, Honduras: Global Water Partnership.
- Kulkarni, H.; Vijayshankar, P. S.; Deolankar, S.B. y Shah, M. (2004). Groundwater demand management at local scale in rural areas of India: a strategy to ensure water well sustainability based on aquifer diffusivity and community participation. *Hydrogeology Journal*, 12, 184-196. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0320-x>
- Madrigal-Solís, H.; Fonseca-Sánchez, A. y Reynolds-Vargas, R. (2017). Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos volcánicos Barva y Colima en el Valle Central de Costa Rica. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 15-132. Doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-09>
- Madrigal-Solís, H.; Fonseca-Sánchez, A.; Núñez-Solís, C. y Gómez-Cruz, A. (2014). Amenaza de contaminación del agua subterránea en el sector norte del acuífero Barva, Heredia, Costa Rica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 109-118.
- Programa Estado de la Nación. (2005). *Undécimo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- PRUGAM. (2008). *Cartografía 1: 10 000, Uso de la Tierra Gran Área Metropolitana*. Proyecto de Actualización Cartográfica de Usos de la Tierra a escala 1:10.000 GAM de Costa Rica. Elaboración de Cartografía digital y Ortofotos. Costa Rica: PRUGAM.
- Ramírez, R. y Alfaro, A. (2002). Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 27, 53-60.
- Ramos, V. (2001). *Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos de un sector al noreste del Valle Central, Costa Rica*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología, San José Costa Rica.
- Reynolds-Vargas, J. (1997). *Evaluación de los recursos hídricos en Costa Rica: disponibilidad y utilización*. Informe final. Heredia, Costa Rica: Centro Científico Tropical / Centro Internacional en Política Económica para el Desarrollo Sostenible.
- Reynolds-Vargas, J.; Fraile, J. e Hirata, R. (2006). Trends in Nitrate Concentrations and Determination of its Origin Using Stable Isotopes (18O and 2H) in Groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. *Revista Ambio*, 35(5), 229-236.
- Rodríguez, H. (2002). *Características hidrogeológicas y físicas del acuífero Barva, Costa Rica*. Informe final. Laboratorio de Hidrología Ambiental. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.
- Tuinhof, A.; Foster, S.; Kemper, K.; Garduño, H y Nanni, M. (2006). *Requerimientos de monitoreo del agua subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua*. Washington D. C., EE. UU.: World Bank. Global Water Partnership. Recuperado de http://ponce.sdsu.edu/Banco_Mundial_GWM_Briefing_9_sp.pdf.
- Ureña, N.; Jiménez, F.; Reynolds-Vargas, J.; Jones, J. y Prins, C. (2006). Efectos del aumento poblacional y del cambio de uso del suelo en los recursos hídricos en la microcuenca del río Ciruelas, Costa Rica. *Revista Recursos Naturales y Ambiente*, 48, 75-80.



Van den Brink, C.; Frapporti, G.; Griffioen, J. y Jan Zaadnoordijk, W. (2007). Statistical analysis of anthropogenic versus geochemical-controlled differences in groundwater composition

in The Netherlands. *Journal of Hydrology*, 336, 470-480. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.024>



Diseño de una red de monitoreo como herramienta de gestión participativa: calidad física y química del agua subterránea en tres subcuencas del Valle Central, Costa Rica (Helga Madrigal-Solís y otros) por [Revista Uniciencia](#) se encuentra bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported](#).