

Amenaza de contaminación del agua subterránea en el sector norte del acuífero Barva, Heredia, Costa Rica

• Helga Madrigal-Solís* • Alicia Fonseca-Sánchez •
• Christian Núñez-Solís • Alicia Gómez-Cruz •

Universidad Nacional de Costa Rica

Autor de correspondencia

Resumen

Madrigal-Solís, H., Fonseca-Sánchez, A., Núñez-Solís, C., & Gómez-Cruz, A. (noviembre-diciembre, 2014). Amenaza de contaminación del agua subterránea en el sector norte del acuífero Barva, Heredia, Costa Rica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 103-118.

La mayor parte del agua para consumo humano y para el desarrollo de las actividades económicas en el Valle Central de Costa Rica proviene de los acuíferos ubicados en dicha región. Sin embargo, muchas de estas actividades se llevan a cabo sobre la zona de recarga del acuífero libre Barva, representando una amenaza a la calidad de sus aguas. El objetivo de este estudio fue elaborar un mapa de carga contaminante para los cantones de Santa Bárbara, Barva y San Rafael, Heredia, Costa Rica, como un primer paso en la generación de un mapa de riesgo para el acuífero Barva. Para esto, se seleccionaron, ubicaron y clasificaron las actividades, según el método POSH (Pollutant Origin Surcharge Hydraulically). Luego, el territorio se subdividió en celdas de 250 x 250 m y a cada una se le asignó el valor máximo de potencial de carga contaminante, según el valor asignado a las fuentes en esa celda. De las 2103 celdas, un 45% se encontró bajo al menos una actividad con potencial de carga contaminante elevado, un 32% con al menos una actividad con potencial moderado, un 14% con al menos una actividad con potencial reducido y un 9% con potencial nulo. Además, los subacuíferos Bambinos y Los Ángeles fueron identificados como los sectores más críticos. La información generada contribuirá al diseño e implementación de medidas de control más estrictas, encaminadas a minimizar la probabilidad de contaminación.

Palabras clave: amenaza, agua subterránea, acuífero Barva, fuentes puntuales, fuentes difusas, contaminación, carga contaminante, POSH method.

Introducción

En muchos países, la dependencia del agua subterránea para el desarrollo es generalizada, al igual que la amenaza a la que están expuestos

Abstract

Madrigal-Solís, H., Fonseca-Sánchez, A., Núñez-Solís, C., & Gómez-Cruz, A. (November-December, 2014). Potential Pollution Sources to Groundwater in the North Region of Barva Aquifer, Heredia, Costa Rica. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(6), 103-118.

Most of the drinking water and the water for economic activities in the Central Valley of Costa Rica come from aquifers located in this region. However, many of these activities take place on the recharge zone of unconfined Barva aquifer, posing a threat to water quality. The aim of this study was to develop a map of pollution load to the Counties of Santa Barbara, and San Rafael Barva, Heredia, Costa Rica, as a first step in the generation of a risk map for Barva aquifer. Activities were selected and classified according to the POSH method (Origin Surcharge Hydraulically Pollutant). Then, the study area was divided into a grid of 250 x 250 m and the maximum value of the potential for generation of a pollutant load was assigned, according to the value assigned to the activities into that cell. Of the 2103 cells, 45% had at least one activity with an elevated potential, 32% with at least one activity with moderate potential, 14% with at least one activity with reduced potential and 9% with zero potential. Furthermore, the areas above Bambinos and Los Angeles sub aquifers were identified as the most critical. The information generated will contribute to the design and implementation of more stringent control measures, designed to minimize the probability of contamination.

Keywords: Threat, groundwater, Barva aquifer, point sources, non-point sources, pollution, pollution surcharge, POSH method.

Recibido: 17/05/13

Aceptado: 19/05/14

acuíferos a la contaminación (Foster, Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002).

Para conocer la amenaza de contaminación que sufre un acuífero es necesario la identificación y caracterización de las actividades potencialmente contaminantes. Para esto, lo mejor es obtener la siguiente información sobre cada actividad antropogénica (Hirata, 2002): la clase de contaminante, la concentración y el volumen de la carga contaminante, el modo de disposición en el subsuelo y el tiempo de aplicación de la carga contaminante. Sin embargo, la complejidad y cantidad de información que se debe recabar hace que este acercamiento sea casi imposible de abordar. Debido a esto, Foster *et al.* (2002) propusieron un método basado en el origen del contaminante y su sobrecarga hidráulica, conocido como POSH, por sus siglas en inglés (Pollutant Origin Surcharge Hydraulically), para evaluar y clasificar las actividades humanas contaminantes al subsuelo, priorizando sobre las que presentan mayor probabilidad de generación de cargas contaminantes hacia el acuífero. Dicho método ha sido utilizado en países como España, Brasil, México y Argentina (Banda & Ruiz de Galarreta, 2002; González, López-Vera, Gomez, & Lacalle-Pareja, 2006; González, 2008; Oliveira & Guimarães, 2010).

La integración del potencial de carga contaminante con el mapa de vulnerabilidad, propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea que depende de sus características geológicas e hidrogeológicas, permite una visualización del riesgo, es decir, del peligro a la contaminación al que está expuesto el acuífero estudiado. Por lo tanto, se contribuye con la identificación de zonas de conflicto en donde existe vulnerabilidad y, además, el desarrollo de una o varias actividades potencialmente contaminantes, con el propósito de diseñar o corregir medidas regulatorias para la protección del agua subterránea.

La importancia del agua subterránea en Costa Rica es incuestionable, ya que la mayoría de la población costarricense se abastece de agua proveniente de fuentes subterráneas. Sólo para el Gran Área Metropolitana (GAM), más

del 50% del volumen de agua que demanda la población para el desarrollo, urbano, agrícola, comercial e industrial proviene de agua subterránea (Reynolds-Vargas y Fraile, 2002). A pesar de esto, las mismas actividades antropogénicas que utilizan el agua subterránea de estos acuíferos también se ubican en sus zonas de recarga, por lo que podrían considerarse como fuentes potenciales importantes de contaminación. Por su parte, el aumento de las concentraciones de nitratos en algunos puntos que captan agua de acuífero Barva (Reynolds-Vargas, Fraile, & Hirata, 2006) confirman su vulnerabilidad. El uso de tanques sépticos como sistema generalizado de eliminación de excretas y la aplicación intensiva de fertilizantes en el cultivo del café se han identificado como las principales fuentes de nitratos al flujo de agua subterránea (Reynolds-Vargas & Richter, 1994; Reynolds-Vargas *et al.*, 2006). A pesar de que la aplicación de fertilizantes nitrogenados recomendada por el ICAFE (2011) es de aproximadamente unos 325 kg/ha, tres veces al año (ICAFE, 2011), es posible que por mucho tiempo los agricultores hayan aplicado cantidades mayores, favoreciendo la lixiviación de nitrato hacia el agua subterránea (Reynolds-Vargas & Richter, 1994; Reynolds-Vargas, Richter, & Bomemisca, 1994).

En las últimas décadas se ha producido sobre el acuífero Barva un aumento en el área cubierta por asentamientos humanos. Por ejemplo, en la cuenca del río Ciruelas, el uso urbano pasó de 14.6% a 20.8% de 1989 a 2003, en detrimento del uso agrícola (Ureña, Jiménez, Reynolds-Vargas, Jones, & Prins, 2006). Según Reynolds-Vargas *et al.* (2006), el cambio de uso agrícola a urbano sin un sistema adecuado de alcantarillado sanitario puede representar un aumento de hasta un 40% en la carga contaminante de nitratos. Asimismo, el aumento de áreas urbanas ha implicado un incremento en la demanda de servicios, como estaciones gasolineras, lubricentros, talleres de mecánica y otras actividades ligadas al uso de hidrocarburos, los cuales, debido a su baja solubilidad y alta densidad les permite

lixiviarse hacia el agua subterránea, en donde pueden persistir por décadas o siglos. Estos compuestos son altamente tóxicos en organismos vivos aun en bajas concentraciones y tienden a acumularse en el cuerpo. Otras actividades, como ebanisterías, centros de belleza, viveros e industrias de todo tipo utilizan sustancias que podrían ser altamente contaminantes si se lixivian a través de la zona no saturada hacia las aguas subterráneas (Musolff, 2009).

Otra forma en la que el agua del acuífero Barva se puede contaminar es por el uso de plaguicidas desde zonas de cultivos y por el transporte de contaminantes desde cuerpos de agua superficial influentes al acuífero. El aporte casi inmediato desde zonas agrícolas, efluentes de aguas servidas, procesos industriales y plantas de tratamiento, afecta la calidad de los ríos de la cuenca del río Virilla, especialmente en puntos intermedios y bajos de las subcuencas (Calvo & Mora, 2007; Leandro, Coto, & Salgado, 2010). Además, en esta cuenca, de 62 sitios monitoreados desde 2006 hasta 2009, un 56% presentó niveles de contaminación de moderado a severo (Jorge Herrera, Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional de Costa Rica, datos sin publicar).

A pesar de la amenaza que representan estas fuentes potenciales de contaminación al agua subterránea, aún no se ha efectuado ni el mapeo ni la caracterización de estas fuentes sobre las partes altas del acuífero Barva, por lo que tampoco se han elaborado los mapas de riesgo. Debido a que este acuífero posee un alto potencial para el abastecimiento de los pobladores y el desarrollo de actividades económicas en la región noroeste del Valle Central y a que su agua es de calidad aceptable, emerge la necesidad de desarrollar la cartografía de amenaza como un paso necesario en la creación de mapas de riesgo. Esto es especialmente importante para las zonas altas del acuífero, en donde se da la mayor recarga del acuífero (Reynolds-Vargas & Fraile, 2009).

Los cantones de Santa Bárbara, Barva y San Rafael, en las partes altas del acuífero, cuentan con una población mayor a los 123

000 habitantes (INEC, 2011), la cual depende del agua subterránea casi por completo. El desarrollo de un mapa de amenaza contribuirá al diseño e implementación de medidas de control más estrictas, encaminadas a minimizar la probabilidad de contaminación. Por esta razón, el objetivo de este estudio fue elaborar la cartografía de amenaza a la que está expuesta el agua subterránea del acuífero Barva en los cantones de Santa Bárbara, Barva y San Rafael, ubicados en las partes altas y medias del acuífero, a través de la ubicación y caracterización de la carga contaminante.

Materiales y métodos

Área de estudio

El espacio en investigación comprende una porción del acuífero Barva dentro de los cantones de Santa Bárbara, Barva y San Rafael, en la provincia de Heredia, Costa Rica, específicamente entre las coordenadas geográficas $-84^{\circ} 10' 26, 19''$ y $-84^{\circ} 3' 50.7''$ longitud oeste, y $-9^{\circ} 59' 56, 48''$ y $10^{\circ} 8' 0.8''$ latitud norte, según el sistema de coordenadas WGS84 (figura 1). Esta zona comprende un área de 123.6 km² y presenta una gradiente altitudinal que va desde los 960 msnm hasta los 2 840 msnm. Se ubica en una zona con relieve irregular, con la existencia de pasos entre montañas y la influencia de masas de aire provenientes tanto de la vertiente pacífica como la vertiente atlántica (Reynolds-Vargas & Fraile, 2009). El promedio anual de precipitación en las partes de mayor altitud es de 5 750 mm y de 2 250 mm en las más bajas (IMN, 2012). Las temperaturas anuales van de 18.63 a 23.95 °C. Los suelos predominantes son andisoles (INTA-MAG, 1996).

Esta zona se ubica sobre la formación Barva, la cual está conformada por una intercalación de lavas y tobas (Denyer & Arias, 1991). Entre estas capas se distinguen al menos tres coladas de lava que reciben los nombres de Bermúdez, Los Ángeles y Bambino (Losilla, Rodríguez, Schosinsky, Stimson, & Bethune, 2001). Las dos últimas se encuentran sobreyaciendo a las

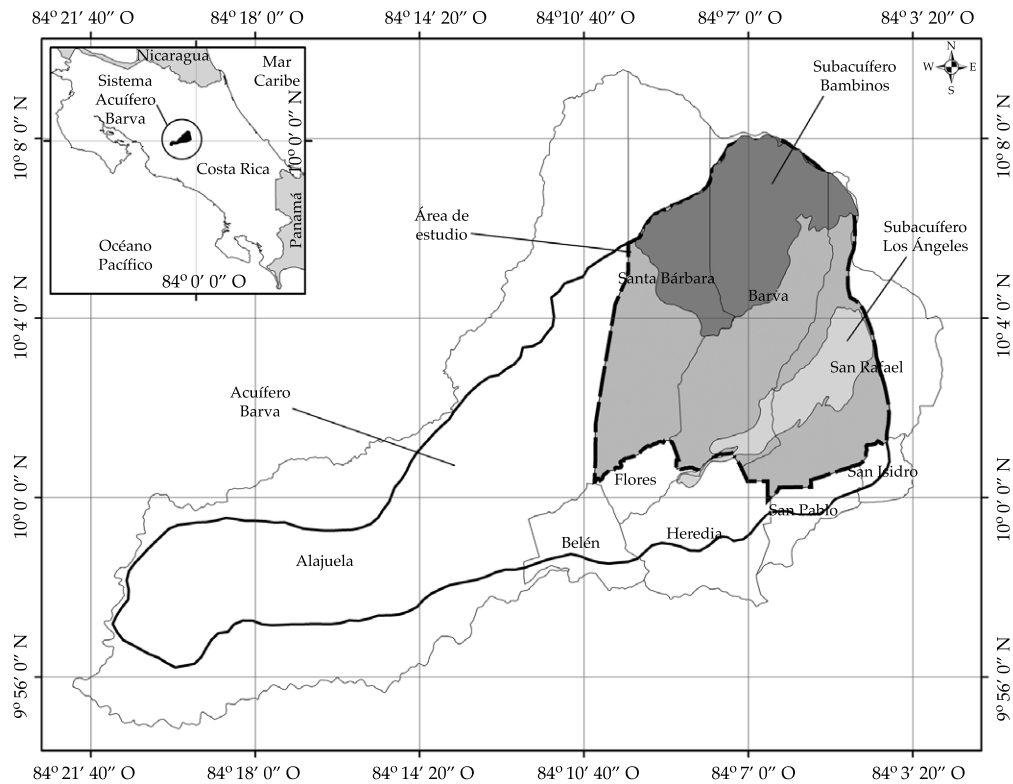


Figura 1. Zona de estudio, Sistema Acuífero Barva, Costa Rica.

lavas de Bermúdez y separados de estas lavas por una capa de tobas líticas y de ceniza muy meteorizadas que ha recibido el nombre de tobas carbonal (Protti, 1986). Las lavas, por lo general, son fracturadas o brechosas, y es en estas coladas de lava que se han desarrollado los acuíferos volcánicos y libres conocidos con los nombres de Barva y los subacuíferos Los Ángeles y Bambinos (figura 2). Todos ellos forman el Sistema Acuífero Barva, que a su vez también han sido denominados Barva Superior (Los Ángeles y Bambinos) y Barva Inferior (acuífero Barva). Subyaciendo el Sistema Acuífero Barva, se encuentran los acuíferos Colima Superior e Inferior, que a su vez componen el Sistema Acuífero Colima (figura 2).

El movimiento del agua subterránea en los acuíferos se da a través de fracturas en las lavas, por lo que el flujo es fisural. La dirección

del flujo de agua subterránea es hacia el suroeste, de preferencia siguiendo a grandes rasgos la morfología de la base del acuífero (Rodríguez, 2002). Los acuíferos Los Ángeles y Bambinos son de poca extensión, con niveles de agua desde 1 hasta 5 metros de profundidad y tienen recarga directa por la precipitación, lo cual indica que ésta se da en época de lluvias, condición que se refleja en la disminución de los caudales en los manantiales en verano.

La recarga al acuífero Barva tiene varios componentes, como drenaje desde los acuíferos superiores (Los Ángeles y Bambinos) y directamente a través de las tobas de Carbonal, las cuales lo sobreyacen donde los acuíferos superiores están ausentes. La infiltración a través de los lechos de los ríos se considera como un tercer mecanismo de recarga significativa al acuífero (Vargas, 2002; SENARA, 2007; Reynolds-Vargas & Fraile, 2009). Asimismo,

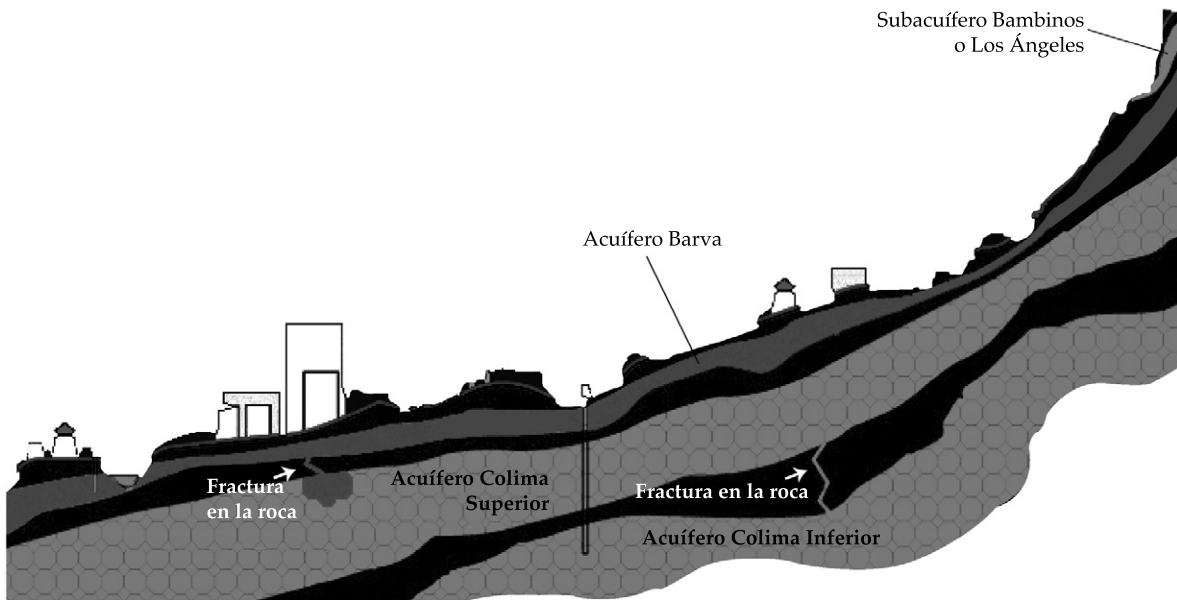


Figura 2. Esquema transversal del Sistema Acuífero Barva y Sistema Acuífero Colima en el área de estudio.

cada río en la zona presenta algunos tramos en que se comportan como efluentes y otros como influentes, dependiendo de la estación y de la geología (British Geological Survey, 1988; Marchand, Ryan, Bethune, & Chu, 2002).

Para 2008, la distribución del uso del suelo se caracterizó por un agrupamiento de zonas urbanas en las cabeceras de cantón (Santa Bárbara, Barva y San Rafael), correspondiente a un 13%. En las partes medias se combinaban las actividades agropecuarias, representadas de la siguiente manera: cultivos mixtos, en un 9%; plantaciones de café, en un 26%; pastos, en un 20%. Por último, las áreas de bosque son las predominantes en los sectores de mayor altitud, cuantificadas en un 32% (PRUGAM, 2008).

Aplicación de la metodología POSH

Para la elaboración del mapa de fuentes potenciales de contaminación se seleccionaron las actividades que según el método POSH (Foster *et al.*, 2002) son las que representaban un mayor potencial de generación de carga

contaminante al subsuelo. Durante esta investigación se tomaron en cuenta las fuentes potenciales puntuales, lineales y difusas. Según esta metodología, las fuentes puntuales a considerar son las siguientes: sitios de disposición de residuos sólidos, áreas industriales, lagunas de efluentes, gasolineras y cementerios, las cuales se clasificaron, según la metodología, en fuentes con potencial de generación de carga contaminante reducido, moderado y elevado. Además de las actividades consideradas por estos autores, se incluyeron y clasificaron con potencial de generación de carga contaminante reducido actividades como viveros, fábricas de alimentos, cementerios y ebanisterías; con potencial moderado, centros de belleza, lavandería, viveros, reparación de electrodomésticos, lavado de autos y gasolineras. También se clasificaron con potencial de generación de carga contaminante elevado las lecherías, porciculturas, talleres de enderezado y pintura, y beneficios de café.

La información sobre el nombre, la dirección y el tipo de actividad para cada

una de las fuentes potenciales puntuales de contaminación se obtuvo a partir de los registros de patentes otorgadas por los gobiernos locales hasta 2012. Además, se recopilaron los registros de permisos de funcionamiento otorgados hasta enero de 2013 por el Ministerio de Salud, en las Sedes Regionales. De estas instancias se obtuvo también la dirección de las plantas de tratamiento. La ubicación exacta de las actividades ganaderas, porcinas y avícolas, y las ventas de combustible al por menor, reportadas a 2012, se obtuvo del Servicio Nacional de Salud Animal (SENASA) y del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), respectivamente.

Una vez que se realizó la clasificación de las fuentes puntuales según su potencial, siguiendo el criterio de la metodología POSH, se procedió a su ubicación. De más de 750 fuentes clasificadas, se lograron ubicar 691. Para la localización geoespacial de aquellas actividades con direcciones claras se utilizó el *software Google Earth*, versión 6, con imágenes satelitales Ikonos, tomadas el 6 de abril de 2006. Para ubicar las actividades que no se pudieron localizar, por no contar con una dirección, o estaba incompleta, se realizaron seis campañas para su búsqueda y georreferenciación. Durante estas campañas se localizaron, además, actividades que no estaban inscritas en los registros de patentes o permisos de funcionamiento.

Para obtener la ubicación de las fuentes potenciales difusas se utilizó el uso del suelo de 2005, con comprobación de campo en 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. Este uso del suelo consta de 21 categorías, sin embargo, para los objetivos de este artículo se reclasificaron en cinco coberturas: bosque, pastos, cultivos mixtos, café y asentamientos humanos, en correspondencia con la metodología descrita por Foster *et al.* (2002). El cultivo

de café en la zona de estudio se consideró con potencial moderado, por ser un cultivo que necesita agroquímicos en menor intensidad que los cultivos anuales, como tomate, piña, banano, papa y otras hortalizas (De la Cruz *et al.*, 2004). Debido a que la cobertura del servicio de alcantarillado en viviendas fue menor a un 1.3% en la zona de estudio y a que ningún distrito en la zona contó con una densidad poblacional superior a 100 personas/ha (INEC, 2011), el saneamiento *in situ* se consideró como moderado, según el criterio establecido por Foster *et al.* (2002).

Los cauces de los ríos fueron considerados como fuentes potenciales de contaminación lineal y se clasificaron de acuerdo con la presencia o ausencia de fuentes potenciales de contaminación puntual o difusa a su alrededor: con potencial reducido, los tramos de los ríos que cursaron terrenos con bosque; reducido, los tramos bajo cobertura de pastos; moderado si hubo presencia de fuentes potenciales clasificadas como moderadas, y elevado cuando el río se ubica cerca de una fuente elevada. Se asumió que la calidad del agua disminuyó conforme el río atravesaba zonas con fuentes potenciales de contaminación moderada y elevadas, sin capacidad para autodepurarse.

Elaboración del mapa de amenaza

Se utilizó el programa *ArcGIS*, versión 10, con el fin de generar tres capas vectoriales, una para cada grupo de fuente contaminante: puntual, difusa y lineal. Estas capas se combinaron y sobrepusieron para obtener el mapa de carga contaminante. El territorio se subdividió en celdas de 250 x 250 m, para un total de 2 013 celdas de 0.0625 km² cada una. A cada celda se le asignó el valor máximo de potencial de carga contaminante, según el valor que presentaron las fuentes en esa celda.

Resultados y discusión

Si bien el agua subterránea es un insumo fundamental para el desarrollo social y

económico en los cantones de Santa Bárbara, Barva y San Rafael, este recurso se encuentra bajo una presión a la contaminación que va desde reducida hasta elevada. A pesar de que los incentivos que han promovido una u otra actividad han cambiado a través del tiempo, una característica se mantuvo invariable: controles para la planificación agrícola, urbana e industrial inadecuados o ausentes con respecto a la protección de la calidad del agua subterránea.

Primero se dio un cambio en la mayor parte de la superficie, de cobertura boscosa a pastos, luego a fincas cafetaleras y cultivos mixtos, y luego a proyectos habitacionales, lo que a su vez propició una transformación en la amenaza ejercida sobre la calidad del agua del acuífero Barva, la cual pasó de ser nula a moderada y elevada. Es así como, para el año 2008, cerca de un 40% del territorio estuvo cubierto por cultivo de café y asentamientos humanos, ambos con potencial de generación moderado; una quinta parte, por pastos con potencial reducido, y por cultivos mixtos con potencial elevado en una menor proporción (figura 3). Los cultivos mixtos cubren menos de una décima parte y, sin embargo, son los que requieren mayor cantidad de agroquímicos. Por su parte, la conversión de muchas fincas en proyectos ha-

bitacionales ha implicado también un posible aumento en la carga orgánica contaminante debido al uso generalizado de tanques sépticos, así como también en la inorgánica, por el uso indiscriminado de sustancias de limpieza, como detergentes y desinfectantes, y la lixiviación de antibióticos y otros fármacos desechados del cuerpo a través de la orina.

Como consecuencia de lo anterior, en los cantones estudiados, la cobertura boscosa se ha eliminado en un 70% del territorio, concentrándose principalmente en las zonas altas del acuífero, cerca del Parque Nacional Braulio Carrillo, sector Volcán Barva. Asimismo, las actividades con potencial reducido se localizaron principalmente en la parte alta y media, y las actividades difusas con potenciales moderados y elevados se ubicaron en la parte media y baja de la zona de estudio (figura 4).

Además, la expansión de las zonas urbanas también favoreció la aparición de fuentes potenciales de contaminación puntual. En este estudio se encontró que unas 691 actividades puntuales involucraron el manejo y/o desecho de hidrocarburos, metales pesados, nitratos y otras sustancias químicas tóxicas y patógenas. La mayor densidad de estas fuentes se encontró dentro o en los alrededores de los cascos urbanos, correspondientes a las cabeceras

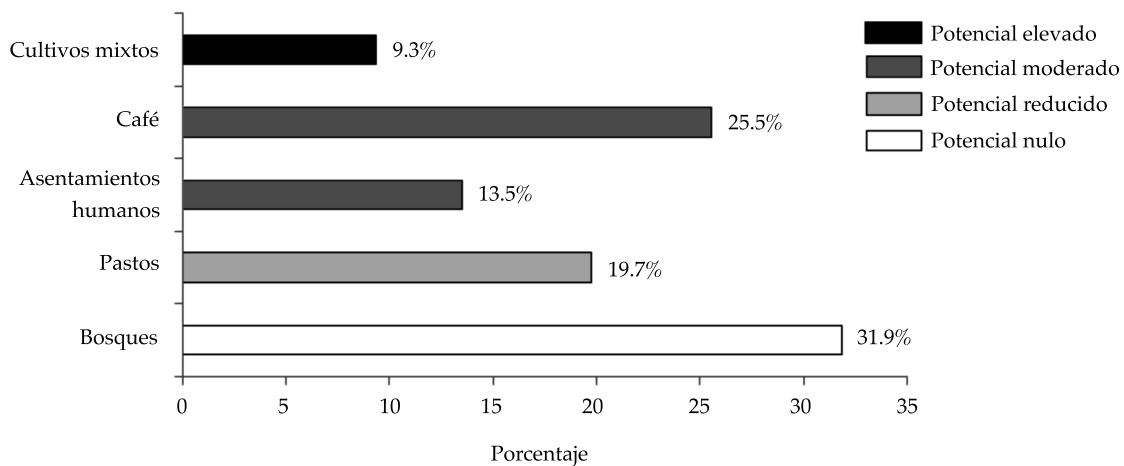


Figura 3. Fuentes difusas con potencial de generación de carga contaminante en el sector norte del Sistema Acuífero Barva.

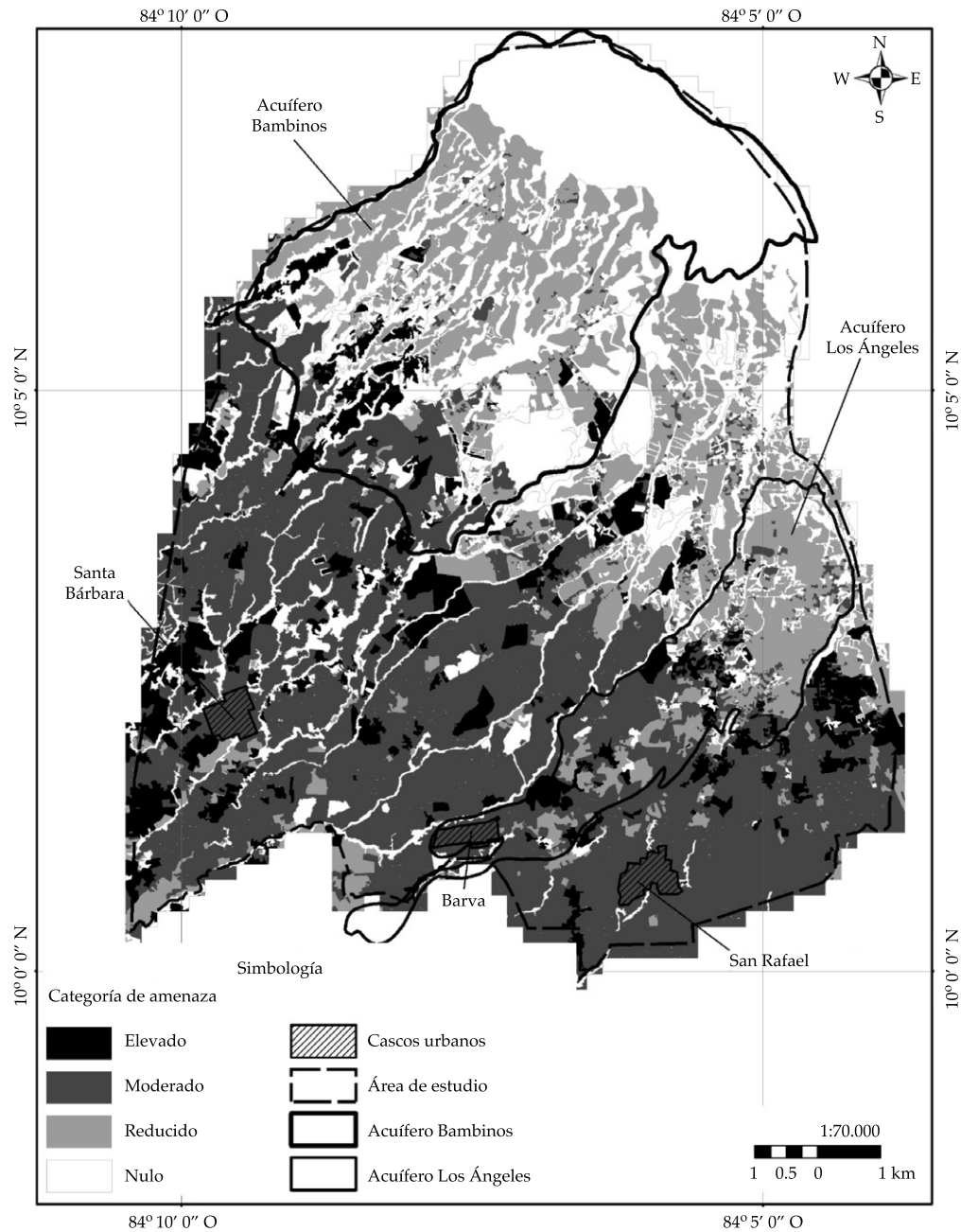


Figura 4. Fuentes difusas clasificadas según su potencial de generación de carga contaminante al subsuelo reducido, moderado y elevado en el sector norte del Sistema Acuífero Barva.

de cada cantón (figura 5). De estas fuentes puntuales, una décima parte (12%) se clasificó con un potencial de generación de carga reducido, un 44% con potencial moderado y con potencial elevado, otro 44%.

De las 303 fuentes puntuales con potencial elevado, los talleres mecánicos, de enderezado y pintura, lubricentros y otros talleres, representaron un 95%, lo que equivale a un 42% de todas las actividades puntuales consideradas

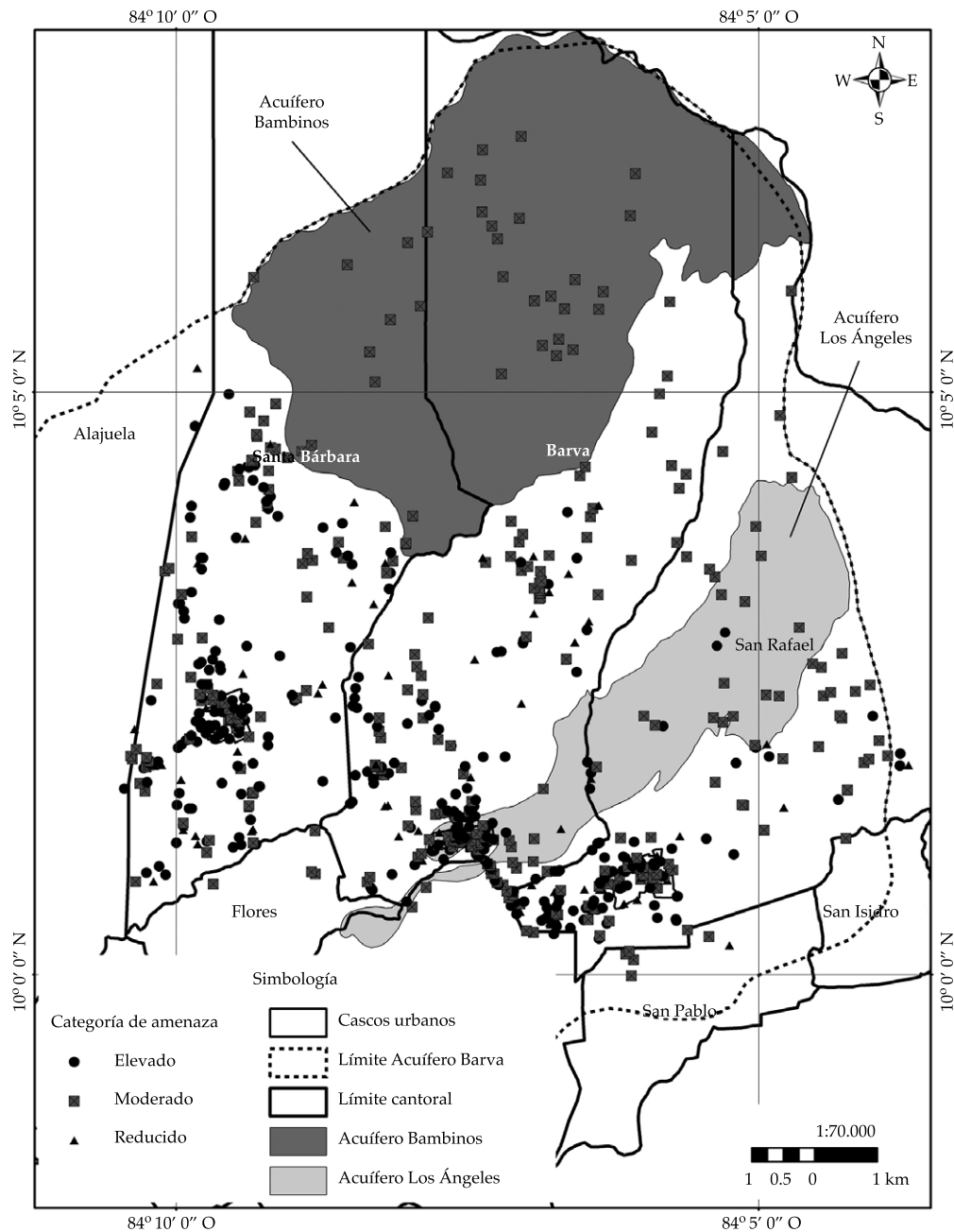


Figura 5. Fuentes puntuales clasificadas según su potencial de generación de carga contaminante al subsuelo reducido, moderado y elevado en el sector norte del Sistema Acuífero Barva.

en este estudio (figura 6). Los controles para prevenir la contaminación en estos lugares deberían ser también elevados debido a que en estos sitios se utilizan cantidades relativamente grandes de lubricantes, pinturas

y otras sustancias altamente tóxicas durante el mantenimiento de vehículos. En otros casos, los aceites quemados se desechan mediante el uso de trampas de grasas para retener tales aceites, según las recomendaciones técnicas.

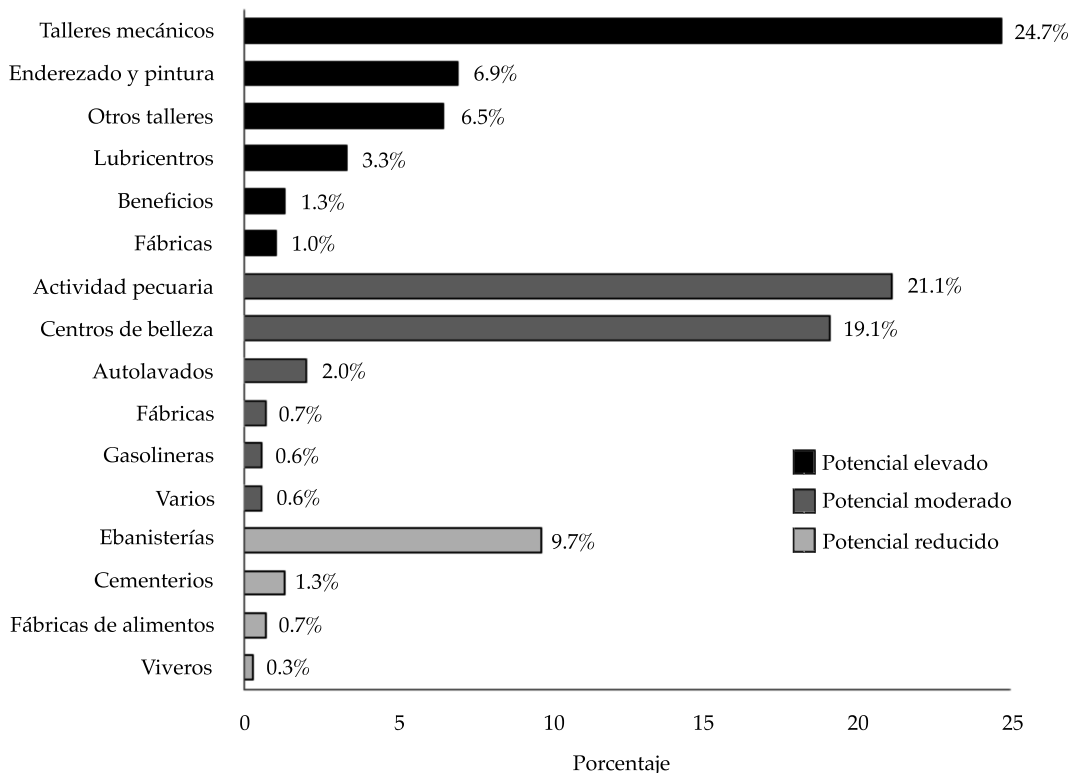


Figura 6. Porcentaje de cada fuente puntual con potencial de generación de carga contaminante elevado, moderado y reducido, con respecto al total de fuentes puntuales en el sector norte del Sistema Acuífero Barva.

Sin embargo, como consecuencia de un control inadecuado o ausente por parte de las instituciones encargadas de esta supervisión, en muchos lugares las trampas no reciben el mantenimiento adecuado o simplemente se encuentran ausentes, por lo que los aceites y grasas desechados se vierten de manera directa en la calzada o río más cercano (Cutrim & Campos, 2010).

Entre las 305 fuentes puntuales con potencial moderado, las actividades pecuarias, es decir, las lecherías, las chancheras, los establos para ganado y actividades avícolas, representaron casi la mitad, mientras que los centros de belleza cerca del 43%. Aún más, de todas las fuentes puntuales con potencial de generación de carga contaminante, los centros de belleza y las actividades pecuarias, representaron una quinta parte cada una (figura 6). Por su parte, las ebanisterías, consideradas con potencial

reducido por la utilización de pinturas y otros químicos que conlleva esta actividad, componen cerca del 10% de todas las fuentes puntuales sobre el área de estudio.

En resumen, las actividades potenciales de contaminación puntual con mayor representatividad en la zona de estudio son las relacionadas con el mantenimiento de vehículos de transporte y los centros de belleza, lo que coincide con los datos aportados por Vargas (2009) en un estudio en cantón de Belén, zona que también se sitúa sobre el acuífero Barva. Una situación preocupante surge en el caso de los centros de belleza ubicados en zonas rurales o urbanas sin conexión a sistemas de alcantarillado. Aquí, los desechos líquidos de tintes, permanentes y otros tratamientos son enviados a sistemas de drenaje, en donde se da una limitada o nula degradación de las sustancias químicas, consideradas como tóxicas por contener

metales pesados y otros contaminantes orgánicos persistentes (Schwarzenbach *et al.*, 2006).

Por otra parte, las actividades antropogénicas, tanto puntuales como difusas, además de representar una amenaza a la calidad del agua subterránea, también significan una presión sobre la calidad del agua en ríos y quebradas aledaños, en especial por la elevada carga contaminante que se descarga en estos cuerpos de agua con poco o ningún nivel de tratamiento previo (Programa Estado de la Nación, 2012; Vargas, 2012; Contraloría General de la República, 2013). Es por esto que de los 217 km lineales de ríos y quebradas existentes en la zona, cerca de 37% se clasificó con potencial elevado de generación de carga contaminante al subsuelo; 31%, con moderado; 27%, reducido, y 5% con potencial nulo (figura 7). Debido a las conexiones hidráulicas existentes entre aguas superficiales y subterráneas en el acuífero Barva, el control estricto sobre la calidad y cantidad de las descargas sobre los cuerpos superficiales debe ser tomado como una de las prioridades entre gobiernos locales y autoridades encargadas de la protección al ambiente.

Asimismo, de las 2103 celdas en las que quedó subdividido el área de estudio, un 45% se encontró, al menos, bajo una actividad con potencial de carga contaminante elevado, un 32% con al menos una actividad con potencial moderado, un 14% con al menos una actividad con potencial reducido y un 9% con potencial nulo (figura 8). La diferencia entre el 30% de cobertura boscosa y el 9% de las celdas con potencial nulo se debe a que cerca de los pequeños parches boscosos que se encuentran fuera del Parque Nacional Braulio Carrillo se desarrollan actividades que representan alguna amenaza y si existe dentro de la celda una actividad con valor contaminante mayor a nulo, automáticamente la celda adopta este valor.

De igual forma, en el Cantón de Santa Bárbara, más de la mitad del territorio está bajo la amenaza de actividades con potencial

elevado de generación de cargas contaminantes al subsuelo, mientras que el Cantón de San Rafael presentó cerca de la mitad de su territorio bajo este mismo nivel de amenaza. Además, el cantón con mayor territorio bajo amenaza nula fue Barva (cuadro 1 y figura 8), debido a una mayor cobertura boscosa en la zona de protección del Parque Nacional.

Conclusiones y recomendaciones

El hecho de que cerca del 70% del territorio cuenta con actividades antropogénicas que representan una amenaza a la calidad del agua subterránea resulta alarmante, si se toma en cuenta que el acuífero Barva presenta vulnerabilidad a la contaminación. La situación más preocupante se podría presentar en los subacuíferos de Los Ángeles y Bambinos, considerados como sistemas altamente vulnerables a la contaminación debido a que su nivel estático es muy superficial. Cerca de un 90% y un 50% del territorio sobre Los Ángeles y Bambinos, respectivamente, está bajo una amenaza de contaminación por presencia de actividades con potencial de generación de carga contaminante de elevada a moderada. Debido a ello, estas áreas son consideradas las más críticas en este estudio.

Hasta ahora, la ubicación de las actividades antropogénicas potencialmente contaminantes ha sido resultado de una inadecuada planificación urbana, agropecuaria e industrial, a pesar de que desde la aprobación de la Ley de Planificación Urbana en 1968 y de una serie de leyes sectoriales después de 1997, el gobierno ha desarrollado una serie de lineamientos relacionados con el ordenamiento territorial. Por ejemplo, algunas fuentes puntuales, tales como chancheras y lecherías, se han localizado cerca de ríos y quebradas, y probablemente utilizan estos cuerpos de agua para la eliminación de desechos. En el caso de actividades puntuales, como lubricentros, talleres mecánicos y centros de belleza, la distribución se ha concentrado dentro y alrededor de los principales cascos urbanos. Dado que estas actividades son

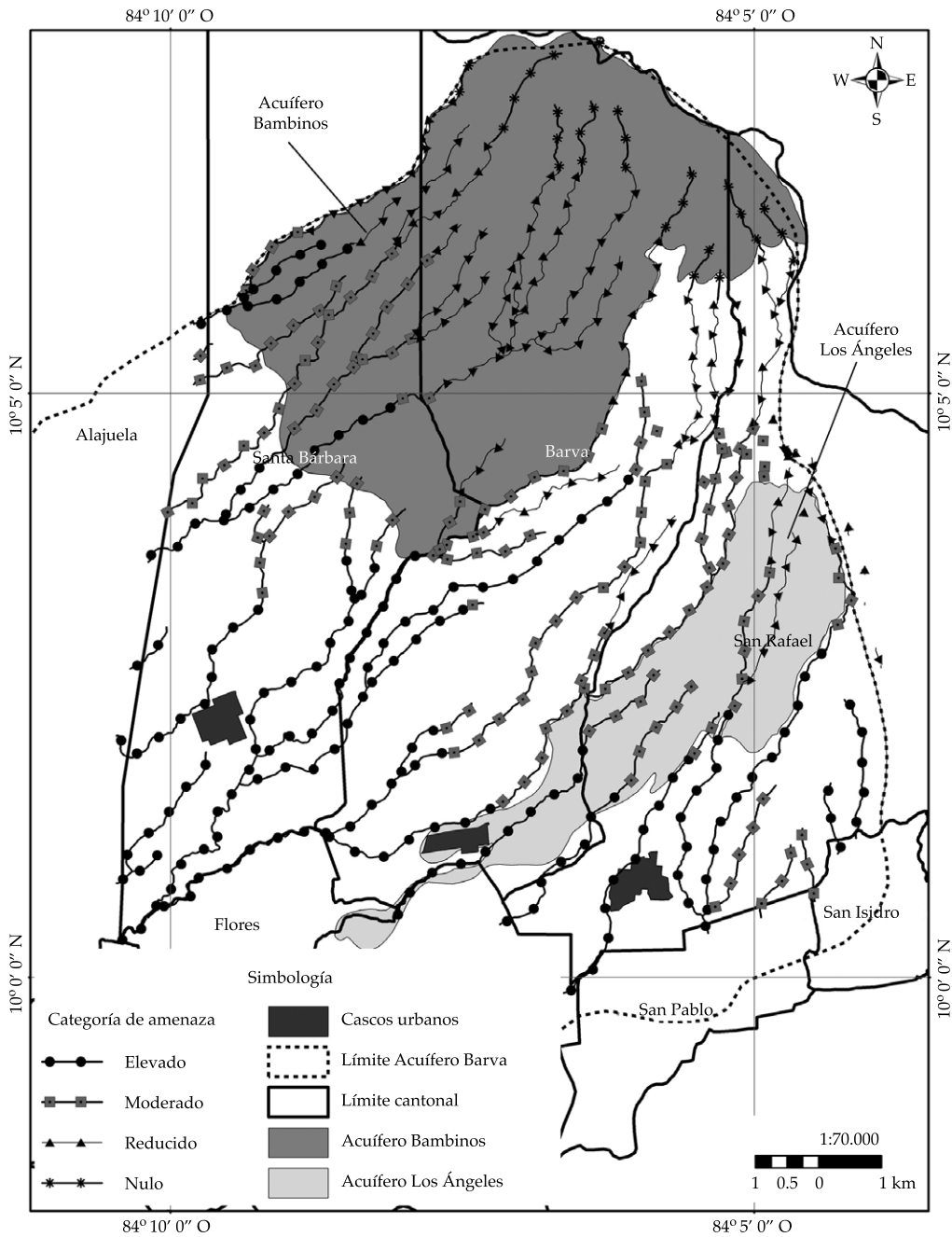


Figura 7. Tramos de ríos clasificados según su potencial de generación de carga contaminante al subsuelo reducido, moderado y elevado en el sector norte del Sistema Acuífero Barva.

mayoría, resulta urgente la exigencia de normas estrictas para el manejo y desecho de sustancias contaminantes por parte de las instancias gubernamentales encargadas de la protección del agua.

Actualmente, en ninguno de los tres cantones se han aprobado ni ejecutado los planes reguladores con los que cada gobierno local debería corregir y planificar a futuro el ordenamiento territorial dentro de su cantón.

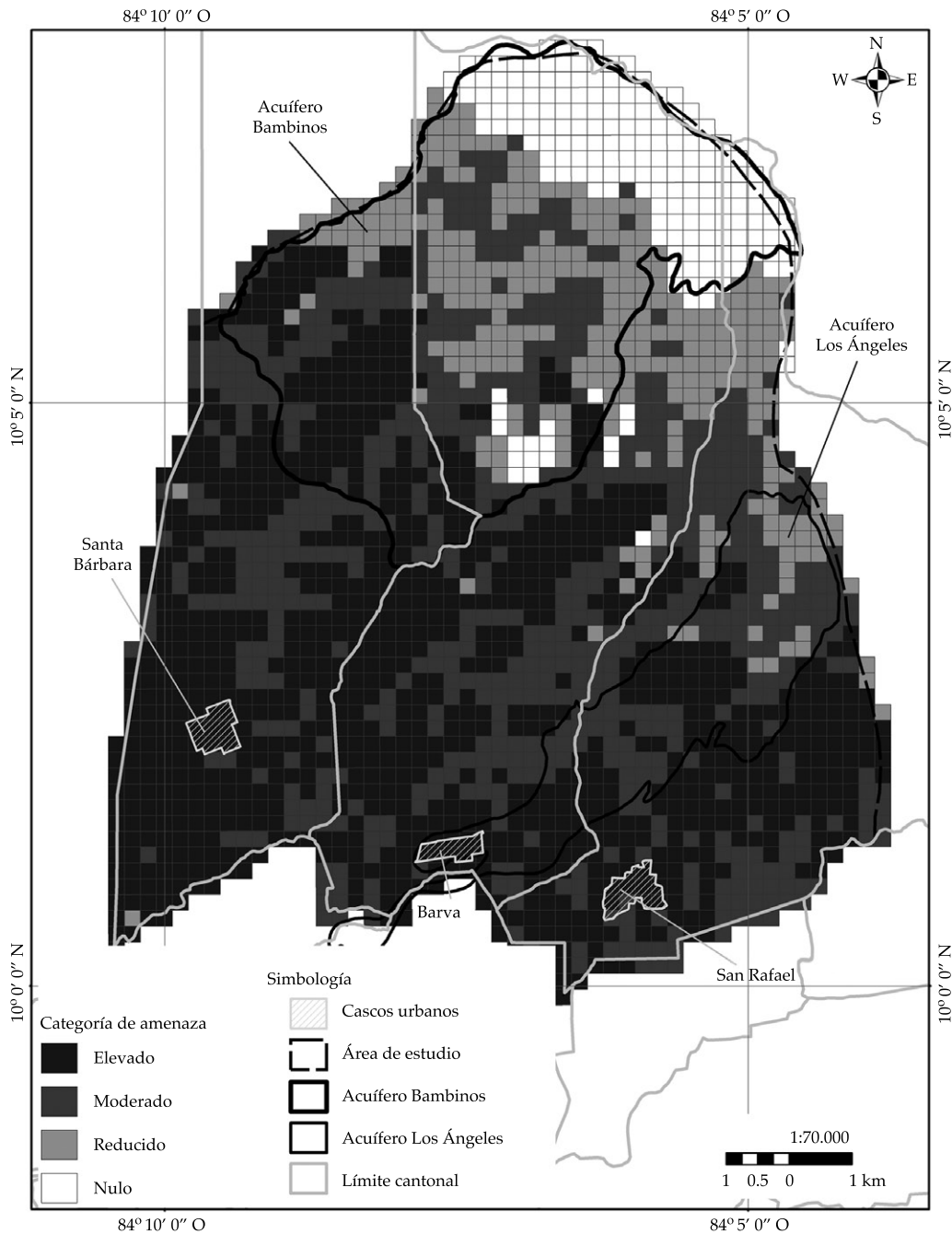


Figura 8. Mapa de carga contaminante del sector norte del Sistema Acuífero Barva.

Sin embargo, dichos planes se encuentran en sus últimas etapas de elaboración y, por tanto, recomendamos que la información generada durante este estudio sea incorporada como información base, lo que constituye el

primer paso en la determinación del riesgo a la contaminación. Esto representaría una herramienta para controlar el tipo y tamaño de actividades permitidas, según el nivel de riesgo que presenta cada sector, de manera tal

Cuadro 1. Cobertura con presencia de actividades con potencial de contaminación reducido, moderado y elevado por cantón en la parte norte del acuífero Barva.

Cantón	Área (km ²)	Nulo (%)	Reducido (%)	Moderado (%)	Elevado (%)
Santa Bárbara	36	0	4	29	67
Barva	55	17	22	31	31
San Rafael	33	4	12	39	45

que se disminuya o, al menos, no se incremente la amenaza existente.

Para esto, es fundamental sobreponer a la cartografía de amenaza la vulnerabilidad de la zona, para complementar la información generada en este estudio. Con ello se podrá tener mayor claridad del riesgo en zonas críticas, en donde la vulnerabilidad moderada, elevada o extrema, coincide con una amenaza de contaminación moderada o elevada. Por fortuna, en la actualidad, cada gobierno local sobre el acuífero debe elaborar un mapa de vulnerabilidad para su cantón, según un mandato de la Sala Constitucional de Costa Rica. Una vez que se aprueben estos mapas por parte de las autoridades correspondientes, se podrán generar los mapas de riesgo a la contaminación.

En cuanto a la utilización de la metodología POSH, se recomienda que el potencial de generación de carga contaminante asignado a los cultivos deba analizarse de acuerdo con el tipo de manejo que recibe ese cultivo en cada región. Por ejemplo, el potencial moderado considerado en este estudio para el cultivo del café podría ser mayor para cafetales en otras zonas del país. Se recomienda que en cada zona se evalúe el criterio de clasificación en potencial moderado o elevado según el caso.

Por su parte, la caracterización de las fuentes potenciales de contaminación a través del método POSH permite una visualización de la amenaza de una forma práctica, y es especialmente útil en sitios donde no existe o se dificulta la obtención de información detallada sobre todas las actividades antropogénicas, tal como ocurrió en la zona que nos ocupa. Sin embargo, se recomienda a las instituciones y

gobiernos locales que se exija a los propietarios información más detallada sobre el tipo, cantidad y frecuencia de todas las sustancias utilizadas y desechadas en cada actividad, y posteriormente corroborar esta información. Con esto se podrían estimar las cargas contaminantes.

Finalmente, los autores recomiendan implementar o seguir implementando otras herramientas de protección: perímetros de protección para manantiales y pozos de abastecimiento humano; incentivos económicos para promover cambios hacia actividades con menor potencial contaminante en zonas con riesgo moderado y elevado; redes de monitoreo para la calidad del agua subterránea; e implementación de programas de concientización social derivados de un manejo de cuencas conjunto entre cantones y localidades, apoyados por universidades, municipalidad, gobierno y empresa privada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las instituciones gubernamentales y municipales que aportaron la información requerida para realizar la investigación, entre ellas, Municipalidad de Santa Bárbara, Municipalidad de San Rafael, Municipalidad de Barva, Área Rectora del Ministerio de Salud Barva-San Rafael y Área Rectora de Santa Bárbara, SENASA y Dirección General de Transporte y Comercialización de Combustibles (DGTCC) del MINAET.

Referencias

- Banda, R., & Ruiz De la Garraleta, A. (2002). Riesgo de contaminación hídrica subterránea por actividad industrial, cuenca de los arroyos Martín y Carnaval, Buenos Aires, Argentina (pp. 153-162). En E. Bocanegra, D. Martínez, & H. Massone (Eds.). *Groundwater and*

- Human Development*. Recuperado de <http://www.alhsud.com/public/articulos/BandaNoriega.pdf>.
- British Geological Survey (1988). *The Continuation of Hydrogeological Investigations in the North and East of the Valle Central, Costa Rica: Final Report 1984-88* (120 pp.). United Kingdom: British Geological Survey Technical Report WD/88/13R. Hydrogeological Series.
- Calvo, G., & Mora, J. (2007). Evaluación y clasificación preliminar de la calidad de agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón. Parte III: calidad de cuerpos receptores de agua, según el Sistema Holandés de Valoración. *Tecnología en Marcha*, 20(4), 59-67.
- Contraloría General de la República (2013). *Informe No. DFOE-AE-IF-01-2013 informe acerca de la eficacia del estado para garantizar la calidad del agua en sus diferentes usos* (69 pp.). San José Costa Rica: División de Fiscalización Operativa y Evaluativa, Área de Servicios Ambientales y de Energía.
- Cutrim, O., & Campos, J. E. G. (2010). Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na Cidade De Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Geociências*, 29(3), 401-411.
- Denyer, P. & Arias, O. (1991). Estratigrafía de la región central de Costa Rica. *Revista Geológica de Costa Rica*, 12, 1-59.
- De La Cruz, E., Ruepert, C., Wesseling, C., Monge, P., Chaverri, F., Castillo, L., & Bravo, V. (2004). *Los plaguicidas de uso agropecuario en Costa Rica: impacto en la salud y el ambiente* (224 pp.). Informe de consultoría para Área de Servicio Agropecuario y Medio Ambiente de la Contraloría General de la República. Heredia, Costa Rica: IRET, Universidad Nacional Autónoma.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'elia, M., & Paris, M. (2002). *Groundwater Quality Protection: a Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environmental Agencies* (130 pp.). Washington, DC: The World Bank.
- González, M. (2008). *Evaluación del peligro de contaminación del acuífero del arroyo Alamar, Tijuana, Baja California* (103 pp.). Tesis para optar por el grado de Maestría en Administración Integral del Ambiental. Tijuana, México: El Colegio de la Frontera del Norte.
- González, P., López-Vera, F., Gomez, C., & Lacalle-Pareja, B. (2006). Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas de un municipio residencial (Villanueva de la Cañada, Madrid). *Boletín Geológico y Minero*, 117(3), 413-422.
- Hirata, R. (2002). Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 3, 81-90.
- ICAFFE (2011). *Guía Técnica para el Cultivo del Café* (72 pp.). Heredia, Costa Rica: Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE-CICAFFE).
- IMN (2012). *Archivos de Precipitación del Instituto Meteorológico Nacional (IMN)*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- INTA-MAG (2008). *Mapa de grupos y subgrupos de suelos para Costa Rica, 1996. Escala 1:200000. Cartografía digital del Atlas de Costa Rica*. Costa Rica: ITCR.
- INEC (2011). *X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda: Resultados Generales* (140 pp.). San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Costa Rica.
- Leandro, H., Coto, J., & Salgado, V. (2010). Calidad del agua de los ríos de la microcuenca del río Virilla. *Umiciencia*, 24, 69-74.
- Losilla, M., Rodríguez, H., Schosinsky, G., Stimson, J., & Bethune, D. (2001). *Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central* (205 pp.). San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Marchand, G., Ryan, M., Bethune, D., & Chu, A. (2002). *Groundwater-Surface Water Interaction and Nitrate Origin in Municipal Water Supply Aquifers, San Jose, Costa Rica* [en línea]. Releva NX, Innovation, Sustainability, Development, Calgary, Alberta. Citado en febrero de 2013. Recuperado de <http://relevanx.com/web/guest/technology-articles/article/-/article/N2ze/21607/-/1/1699/groundwater-surface-water-interaction-and-nitrate-origin-in-municipal-water-supply-aquifers,-san-jose,-costa-rica>.
- Musolff, A. (2009). Micropollutants: Challenges in Hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 17, 763-766.
- Oliveira, A., & Guimarães, J. (2010). Aplicação dos Métodos Drastic e Posch para Determinação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis-MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 15(2), 127-142.
- Programa Estado de la Nación (2012). *Decimotercero Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible/ Programa Estado de la Nación* (65 pp.). 18 edición. San José, Costa Rica: El Programa Estado de la Nación.
- Protti, R. (1986). Geología del flanco Sur del volcán Barba. *Bol. Vulcanología UNA*, 17, 23-31.
- 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.
- Reynolds-Vargas, J., & Fraile, J. (2002). Presente y futuro de las aguas subterráneas en el Valle Central (325 pp.). En J. Reynolds-Vargas (Ed.). *Manejo integrado de aguas subterráneas: un reto para el futuro*. San José, Costa Rica: Editorial UNED.
- Reynolds-Vargas, J., & Fraile, J. (2009). Utilización de isótopos estables en la precipitación para determinar zonas de recarga del acuífero Barva, Costa Rica (pp. 83-95). En *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina*. Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica, IAEA-TECDOC 1611.

- Reynolds-Vargas, J., & Richter, D. (1994). Nitrate in Groundwaters of the Central Valley, Costa Rica. *Environment International*, 21, 71-79.
- Reynolds-Vargas, J., Richter, D., & Bomemisca, E. (1994). Environmental Impacts of Nitrification and Nitrate Adsorption in Fertilized Andisols in the Valle Central of Costa Rica. *Soil Science*, 157, 289-299.
- Reynolds-Vargas, J., Fraile, J., & Hirata, R. (2006). Trends in Nitrate Concentrations and Determination of its Origin Using Stable Isotopes (^{18}O and ^2H) in Groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. *Ambio.*, 35(5), 229-236.
- Rodríguez, H. (2002). *Características hidrogeológicas y físicas del acuífero Barva* (9 pp.). Informe técnico para Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica: Laboratorio de Hidrología Ambiental.
- Schwarzenbach, R. P., Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Johnson, C. A., Von Gunten, U., & Wehrli, B. (2006). The Challenge of Micropollutants in Aquatic System. *Science*, 313, 1072-1077.
- SENARA (2007). *Recarga potencial del acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica* (41 pp.). Informe técnico. San José, Costa Rica: SENARA.
- Ureña, N., Jiménez, F., Reynolds-Vargas, J., Jones, J., & 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. *Recursos Naturales y Ambiente*, 48, 75-80.
- Vargas, A. (2002). Manantiales de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 27, 39-52.
- Vargas, I. (2009). *Informe final. Estudio para la delimitación de las zonas de protección de los pozos de abastecimiento público* (70 pp.). Heredia, Costa Rica: Municipalidad de Belén.
- Vargas, I. (2012). Informe final. Recurso hídrico y saneamiento (34 pp.). En *Decimotercero Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.

Dirección institucional de los autores

M.C. Helga Madrigal Solís
Lic. Alicia Fonseca Sánchez
Lic. Christian Núñez Solís
Lic. Alicia Gómez Cruz

Laboratorio de Hidrología Ambiental
Universidad Nacional de Costa Rica
Campus Omar Dengo, Heredia, COSTA RICA
Calle 9, Avenidas 0 y 1
Costa Rica 86-3000
Teléfono: +50 (6) 2260 2715, 2277 3494
helga.madrigal.solis@una.cr
alicia.fonseca.sanchez@una.cr
christian.nunez.solis@una.cr
agomezacruz@gmail.com