

# Situación actual del agua subterránea en Costa Rica y retos futuros en su gestión

Current situation of groundwater in Costa Rica and future challenges on its management

Ingrid Vargas-Azofeifa<sup>1,2\*</sup> y Paola Alvarado-Piedra<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Costa Rica (UCR), Escuela Centroamericana de Geología (ECG),  
San José, Costa Rica

<sup>2</sup>Universidad de Costa Rica (UCR), Posgrado en Geología, Maestría en Hidrogeología y  
Manejo de Recursos Hídricos, San José, Costa Rica

<sup>3</sup>Hidrogeóloga consultora, San José, Costa Rica

\*Autora para contacto: [ingrid.vargas@ucr.ac.cr](mailto:ingrid.vargas@ucr.ac.cr)

(Recibido: 09/08/2024; aceptado: 30/10/2024)

**RESUMEN:** El agua subterránea es clave para el desarrollo de distintas actividades socioeconómicas en el país, además es la mayor fuente concesionada para los usos de abastecimiento público, turístico-comercial e industrial y aunque en los usos tipificados como riego, agroindustrial y agropecuario predominan las fuentes superficiales, estos también utilizan fuentes subterráneas. A partir del año 2000 se han dado avances significativos en las investigaciones de algunos acuíferos del país, actualmente el área cubierta es 20 %. El agua subterránea no ha tenido la relevancia que se merece, por lo que ya se han dado problemas de contaminación por fuentes antrópicas debido a la falta de ordenamiento del territorio y la débil aplicación de medidas de protección y controles; por otra parte, también está presente la contaminación geogénica asociada al contexto geotectónico natural del país. La gobernabilidad del agua subterránea en Costa Rica debe fortalecerse mediante la aplicación de la normativa vigente, pese a que se han realizado esfuerzos para la coordinación interinstitucional, aún deben destinarse más recursos para fortalecer las investigaciones del país. Los mayores desafíos se dan en la gobernanza del agua, el control de la perforación ilegal y la implementación de herramientas para la protección de la calidad del agua subterránea.

**Palabras clave:** investigación; contaminación; aprovechamiento; gobernanza; acuíferos.

**ABSTRACT:** Groundwater is key in the development of different socioeconomic activities in the country, it is also the largest concessioned source for public supply, tourist-commercial and industrial uses and although in the other uses such as irrigation, agro-industrial and agriculture predominate surface sources, these also use groundwater. Since 2000, there have been significant advances in research into some of the country's aquifers; currently the area covered is 20 %, however, groundwater has not had the relevance it deserves, that is why pollution problems from anthropogenic sources have already occurred due to the lack of land planning and



the weak application of protection and control measures; on the other hand, geogenic contamination is also present and it is associated with the natural geotectonic setting of the country. Groundwater governance in Costa Rica must be strengthened through the application of current regulations. Although efforts have been made for inter-institutional coordination, more resources must still be allocated to strengthen the country's research. The greatest challenges occur in water governance, the control of illegal drilling and the implementation of tools to protect groundwater quality.

**Keywords:** research; pollution; use; governance; aquifers.

## Introducción

El agua subterránea es un recurso estratégico para el desarrollo socioeconómico del país y para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). De acuerdo con Cherry (2023), la solución a la crisis global del agua está en incluir el agua subterránea como eje principal, debido a que esta representa el 99% del agua dulce líquida del planeta y es clave para alcanzar 7 de los 17 ODS: contribuir directamente a la erradicación de la pobreza (Objetivo 1), la seguridad alimentaria (Objetivo 2), equidad de género (Objetivo 5), garantizar el acceso al agua y saneamiento para todos (objetivo 6), la sostenibilidad de las ciudades y asentamientos humanos (Objetivo 11), combatir el cambio climático (Objetivo 13) y proteger los ecosistemas terrestres (Objetivo 15).

Costa Rica no se escapa de la crisis global, debido a que a pesar de tener una dependencia en el uso del agua subterránea, no se le ha dado la relevancia que tiene este recurso. Como se mostrará más adelante, la industria, el comercio, el turismo y el abastecimiento público dependen del uso del agua subterránea en el país, entre otras actividades; de manera que el aprovechamiento del recurso hídrico debe basarse en un conocimiento amplio de la capacidad de los acuíferos y su vulnerabilidad a la contaminación. Sin embargo, la realización de estudios hidrogeológicos requiere de inversiones económicas importantes, debido a la necesidad de contar con información especializada en las disciplinas como, la geología, la hidrogeoquímica, la hidrogeología, entre otras, se requiere tanto de pruebas de campo como de laboratorio.

Durante la revisión documental realizada se encontró una gran cantidad de estudios, no obstante estos se encuentran dispersos y son pocos los estudios que abarcan todo el territorio nacional por ejemplo, Losilla et al. (2001) brindan una visión del agua subterránea en el país con énfasis en el Valle Central y las zonas de Bagaces y Liberia en Guanacaste, dicho estudio se enfoca en el uso del agua, la geología, hidrogeología y algunos problemas de contaminación y sobreexplotación.

Vargas (2000) delimita de manera general 34 acuíferos costeros, 9 continentales volcánicos, y 15 continentales sedimentarios en el territorio nacional. Arellano y Vargas (2001) estudian 24 acuíferos del Pacífico Norte y mencionan que hay indicios de intrusión salina en playas del Coco, Brasilito, playa Carmen y playa Grande.

Desde el año 2007, el Senara ha realizado estudios específicos a través del proyecto PROGIRH en veinte acuíferos ubicados en: la margen derecha del río Virilla, en la cuenca del río Grande, Potrero, Brasilito, Tamarindo, río Arío, Manzanillo, la margen derecha del río Tempisque, bahía Herradura, Punta Uvita, Herradura, Jacó, Hermosa, Esterillos, Parrita, Quepos, Naranjo, Savegre, Matapalo, Dominical y Ballena.

Con respecto al cálculo de la recarga del agua subterránea, el IMTA (2008) estimó la recarga en 15 de las 34 cuencas hidrográficas reconocidas en el territorio nacional.

Belcher et al. (2019) del USGS combinaron imágenes de radar con datos climáticos, geológicos, tectónicos, geofísicos e hidrogeológicos y determinaron el potencial para encontrar agua subterránea en el país a partir de la identificación de distintas zonas hidromórficas a profundidades que varían entre 0-30, 30-150 m y más de 150 metros, estos resultados se comentarán más adelante.

El objetivo de esta investigación es brindar un panorama de la situación actual del agua subterránea en Costa Rica que contribuya a mejorar la gestión. Se incluye una síntesis de las investigaciones más relevantes de los acuíferos, realizada principalmente a partir del año 2000. Además, se presentan datos del uso del agua subterránea, se contextualiza la situación en torno a la contaminación, la protección, la legislación vigente y conflictos en torno al agua. Finalmente, se analiza la gobernanza y los retos futuros.

## Metodología

Se realizó una investigación documental de la información publicada en línea del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (Senara), la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía (Minae), el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), de las tesis de la Licenciatura en Geología, y tesis de la Maestría en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos del Posgrado en Geología, datos tomados del Sistema de Bibliotecas de la Universidad de Costa Rica (Sibdi-UCR), de la Revista Geológica de América Central y de otras revistas internacionales. Con esta información se creó una base de datos de 123 documentos los cuales se clasificaron según las temáticas desarrolladas con el objetivo de brindar un panorama de la situación del agua subterránea en el país. Se analizan las principales investigaciones realizadas en los últimos veinticuatro años, considerando aspectos como el monitoreo, la protección y la contaminación de los acuíferos en relación con el uso de la tierra. Para concluir, se analiza la situación en torno a la gobernanza, el marco legal y se proponen los retos futuros.

Se descargó la información disponible en línea de las concesiones del sitio web oficial de la Dirección de Agua (2023a), ya que el Minae es el ente gubernamental que otorga las concesiones; esta información fue depurada antes de realizar los cálculos y elaborar los gráficos de aprovechamiento del agua, debido a que se identificaron algunos puntos ubicados fuera del territorio nacional y en otros casos, el registro no indicaba del tipo de fuente, entre otros aspectos.

Cabe resaltar que, respecto a la cantidad de pozos, se identificaron diferencias entre los datos de la Dirección de Agua y del Senara, según el registro de concesiones de la Dirección de Agua para el año 2023 se tenía un total de 13 602 pozos perforados, mientras que según el Senara y el Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación (2023) el acumulado de pozos para el mismo año es de 17 128. Esta diferencia es significativa, por lo que afecta el registro de concesiones y el cálculo de la extracción real de agua.

Se considera que existe un subregistro de los pozos a nivel nacional, ya que además de los pozos inscritos, existe la perforación ilegal en el país por lo que no se sabe con certeza el volumen de agua subterránea que realmente se extrae, de este modo la extracción real es mayor a la registrada. Por otro lado, se debe tener presente que los caudales concesionados no necesariamente representan el volumen real extraído, ya que no existe macromedición, por tanto, estos datos podrían variar.

## Aprovechamiento del agua subterránea en Costa Rica

La Dirección de Agua otorga concesiones de aprovechamiento para diferentes usos del agua en el país según la Ley de Aguas vigente; para el año 2023 existían alrededor de 30 000 concesiones distribuidas en todo el territorio nacional, que suman un volumen de agua total anual concesionado de  $4,72 \times 10^{10} \text{ m}^3$ . Porcentualmente, los usos concesionados se distribuyen de la siguiente forma: 85 % del volumen total de agua concesionada es utilizada en la generación de energía hidroeléctrica (uso no consuntivo, sin consumo, el agua se utiliza y luego es devuelta al medio del cual se extrajo), el restante 15 % corresponde con usos consuntivos, donde un 9,7 % se destina al riego de cultivos, un 2,9 % se usa en la industria, un 2 % es para el suministro de agua potable; el uso turístico y comercial corresponde con tan solo un 0,3 % (Dirección de Agua, 2023a).

La fuerza hidráulica es el mayor uso concesionado en Costa Rica, lo cual es esperado tomando en cuenta los grandes volúmenes utilizados en esta actividad (Fig. 1). Otros usos donde también predomina el agua superficial, corresponden al sector agropecuario, el agroindustrial y el agrícola por medio de riego; el bajo volumen de agua subterránea usado en el riego en el país contrasta con lo reportado a nivel mundial, ya que según Cherry (2023) el 73 % del agua usada en la agricultura, es subterránea, esta cifra se desglosa de la siguiente forma: un 43 % es extraída de los acuíferos y el 30 % restante corresponde con la extracción del flujo base de los ríos, la cual es sostenida por aguas subterráneas.

Por otra parte, si se compara el uso relativo del agua superficial versus agua subterránea en las concesiones otorgadas por uso, se observa que el 80 % del caudal de agua concesionada para consumo humano, es subterránea, además la industria usa un 60 % de agua subterránea, finalmente el turismo y el comercio utilizan un 70 % proveniente de fuentes subterráneas.

Con respecto a la cantidad o número de captaciones, el 81 % son fuentes de agua subterránea, ya sea pozos o manantiales, pero estas aportan únicamente un 3 % del volumen de agua concesionado, mientras que el restante 19 % del número de captaciones, son superficiales y estas aportan el 97 % del caudal total concesionado, eso se debe al gran caudal utilizado en fuerza hidráulica.

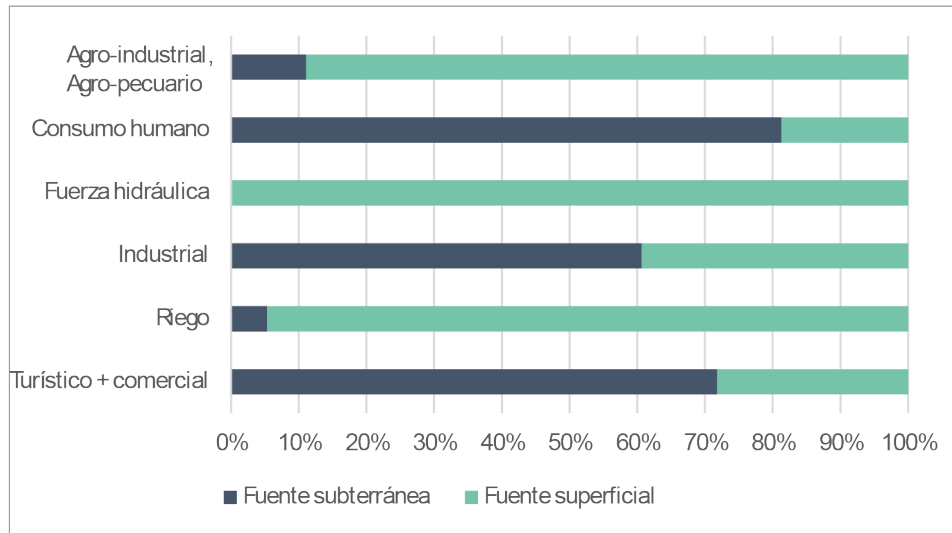


Fig. 1: Porcentaje de caudal concesionado según el uso y tipo de fuente. Elaboración propia a partir de datos de la Dirección de Agua (2023a).

La figura 2a muestra la distribución porcentual de los caudales concesionados según el tipo de fuente (superficial o subterránea) por cuenca, considerando que el objeto de interés en este trabajo es el agua subterránea, se incluyen todos los usos, excepto los no consuntivos. Se observa que el agua proveniente de fuentes subterráneas predomina en cuencas como las del río Tárcoles, río Frío, la Península de Nicoya y el río Reventazón entre otras, en las demás cuencas no predomina este tipo de fuente debido a que el volumen de agua superficial usada en el riego y el uso agroindustrial son mucho mayores, entonces al usar un dato global, la contribución del agua subterránea es relativamente menor.

La distribución de pozos y manantiales, según los datos de la Dirección de Agua (2023a), se presenta en la figura 3; se distinguen cuatro zonas con mayor concentración de pozos ubicados en la Península de Nicoya, la cuenca del río Tárcoles, una franja en la costa Pacífica y otra en sentido noroeste ubicada en la zona Atlántica-Norte, esto se asocia con una mayor demanda de agua debido a la existencia de centros de población y áreas dedicadas a distintas actividades agropecuarias.

Con respecto a los manantiales concesionados, la mayor cantidad se distribuyen en ambas vertientes de la Cordillera Volcánica Central y en menor cantidad en las faldas de la Cordillera de Guanacaste, en la vertiente Pacífica de la Cordillera de Talamanca y en la zona sur de la Península de Nicoya (Fig. 3). La zona con menos manantiales concesionados es la Cordillera de Talamanca donde se ubica el Parque Internacional La Amistad, el Parque Nacional Chirripó y el Parque Nacional Tapantí-Macizo Cerro de la Muerte.

En Costa Rica el suministro de agua potable para la población es suplido por distintos operadores de agua. De acuerdo con Mora y Portuguez (2021) un 48 % de la población es abastecida por el AyA, el 24,4 % por las Asociaciones Administradoras de Acueductos y Alcantarillados Comunes (Asadas), el 13,4 % por Municipalidades, un 5 % por la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), un 5,7 % por otros acueductos comunales y finalmente un 3,3 % por otros entes. Dichos operadores utilizan en total 5.674 captaciones de agua de las cuales un 70 % corresponde con manantiales y un 23 % son pozos, mientras que sólo un 7 % son captaciones de agua superficial proveniente de ríos (Mora y Portuguez, 2021); cabe mencionar que los manantiales son las principales fuentes usadas por las Asadas, suman 3.338 fuentes o sea un 59 % del total de las captaciones.

Como se observa en la figura 2b el agua subterránea es el recurso que predomina como fuente principal para el consumo humano en prácticamente todas las cuencas hidrológicas, únicamente es menor al 50 % en las cuencas de los ríos Banano, Bananito, La Estrella y Terraba ubicadas en las provincias Limón y Puntarenas. Según los datos analizados, San José y Limón son las provincias que usan menos agua subterránea comparativamente en el abastecimiento público, esto se debe a que en San José gran parte del agua viene del proyecto Orosi, además existe una moratoria en la perforación en el Valle Central para usos distintos al abastecimiento público (Senara, 2012) y en el caso de Limón hay más disponibilidad de agua superficial.

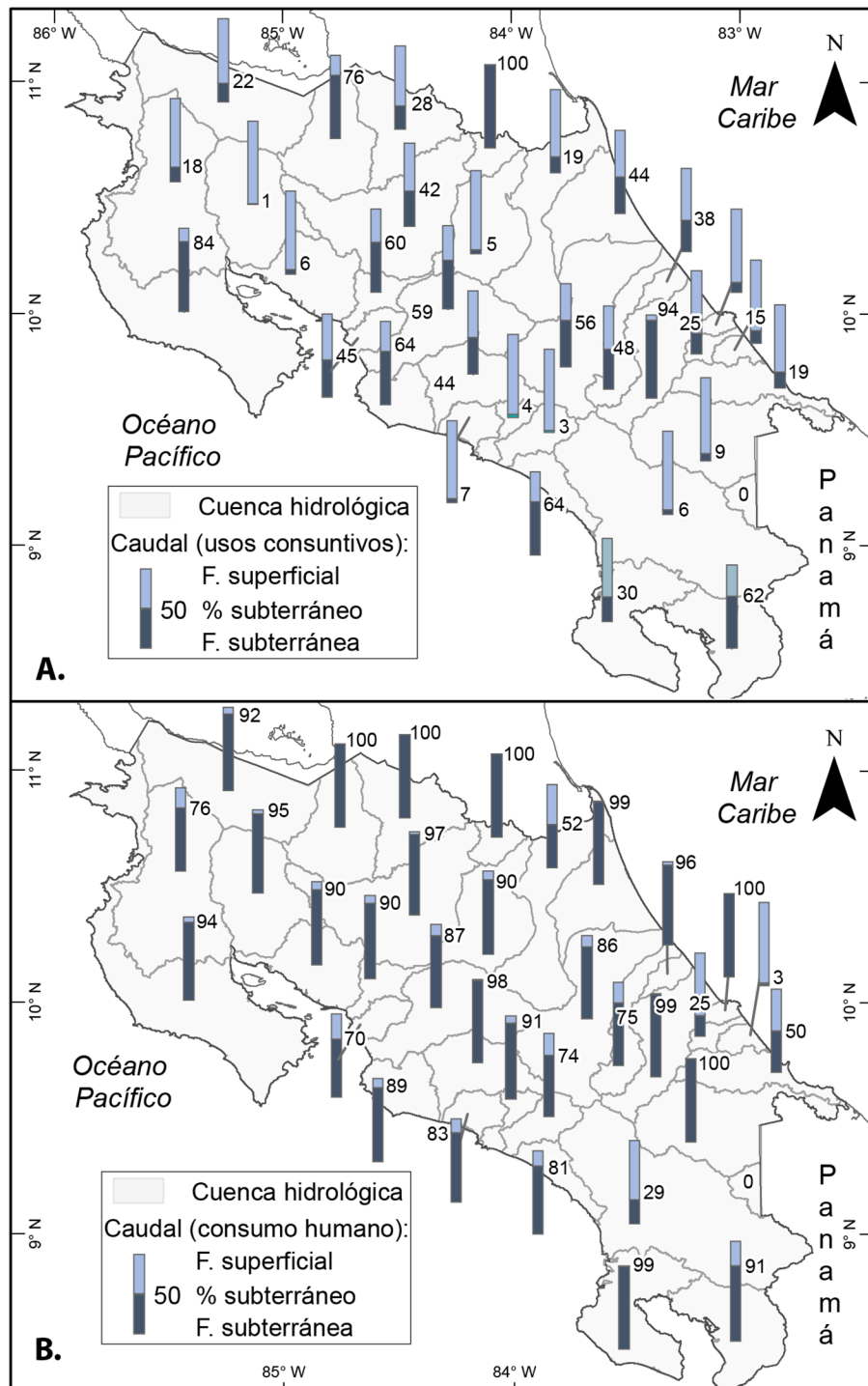


Fig. 2: Distribución de porcentaje de caudal concesionado según el tipo de fuente, superficial o subterránea. (A) Usos consuntivos (B) Únicamente concesiones utilizadas para consumo humano. Elaboración propia: a partir de datos de Dirección de Agua (2023a).

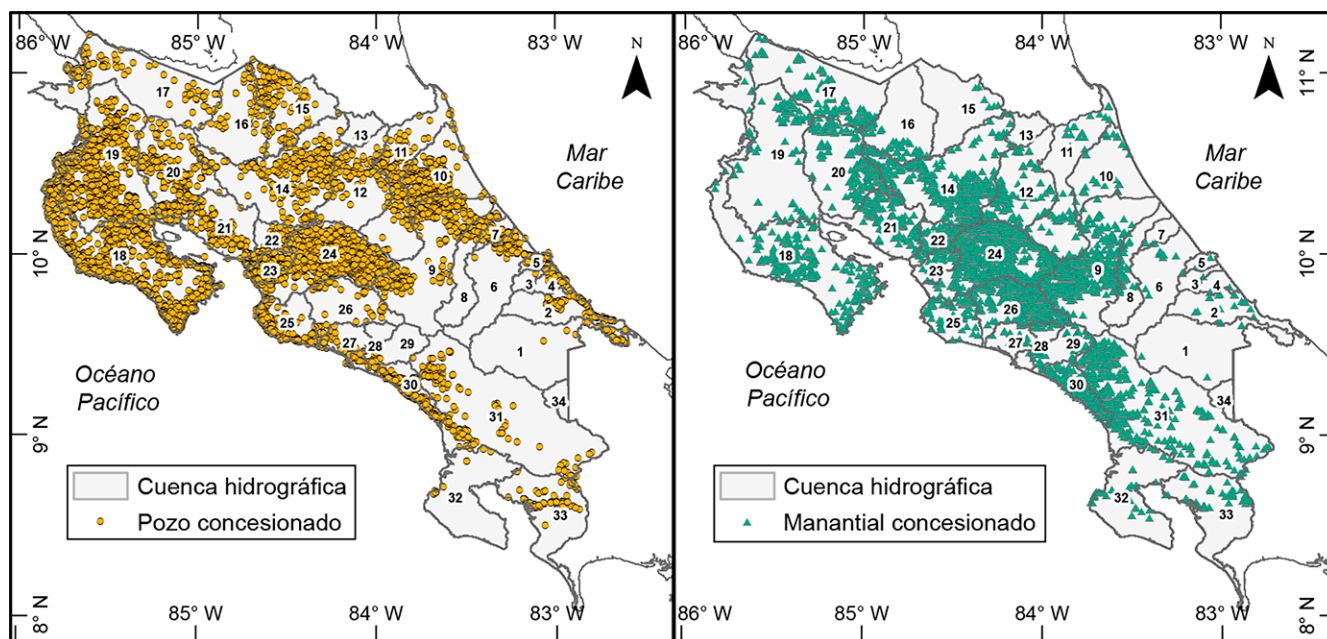


Fig. 3: Distribución de pozos y manantiales concesionados. Elaboración propia a partir de datos de Dirección de Agua (2023a).

Llama la atención que, en la Política Nacional de Agua Potable de Costa Rica, 2017-2030, publicada por el AyA (2016) no se mencionan datos del volumen de agua subterránea utilizada en el abastecimiento público y tampoco se menciona al Senara como ente responsable del estudio y protección de los acuíferos de donde proviene la mayor cantidad de fuentes usadas en el abastecimiento público.

La figura 4 muestra el número acumulado de pozos construidos entre el año 2009 y el año 2022, es notorio el constante aumento de pozos a lo largo de dicho período. Destaca el año 2016 en el cual se dio un súbito incremento en el número de pozos construido como respuesta posiblemente a la sequía ocurrida en el año 2015.

Por otra parte, según datos del informe del Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación para el año 2022, localidades ubicadas en el centro del país y en zonas costeras enfrentaron problemas de disponibilidad hídrica. En el 2021, un 66 % de los acueductos nacionales presentaron capacidad hídrica reducida, es decir, enfrentaron problemas de escasez en sus fuentes; un 34 % exhiben algún nivel de estrés hídrico, lo cual implica que disponen de menos agua de la que se requiere para abastecer a su población meta (Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación, 2022). Durante la primera mitad del presente año, 2024, la Defensoría de los Habitantes recibió 250 denuncias relacionadas con el suministro de agua potable, 91% de estas corresponden al abastecimiento dentro de la GAM (Defensoría de los Habitantes, 2024).

Costa Rica es uno de los países con mayores precipitaciones del mundo (FAO, 2016), sin embargo la precipitación en el país no se distribuye de forma homogénea, ya que hay diferencias temporales y espaciales entre la vertiente Pacífica (en Guanacaste, Pacífico Sur y Centro) y la zona Atlántica (Solano y Villalobos, s/f;). En el país la fuente principal de recarga es por lluvia, aunque diversos factores influyen en el proceso de recarga, de 59 investigaciones hidrogeológicas analizadas se determinó que la recarga potencial promedio de los acuíferos varía entre un 20 % a 40 %, por tanto, no debería darse problemas de escasez (Fig. 5). Si bien los operadores de agua han realizado esfuerzos para reducir el desabastecimiento, en muchos casos los problemas de disponibilidad hídrica no están relacionados con un déficit del recurso, sino por problemas operativos y la falta de inversión en infraestructura y planificación, como ha sido señalado por la Sala IV en diversas ocasiones (Angulo, 2021; Sala Constitucional, 2024. Sentencias: 2024-019544, 2024-019561, 2024-019565, 2024-019597, 2024-019602, 2024-019612, 2024-019651).

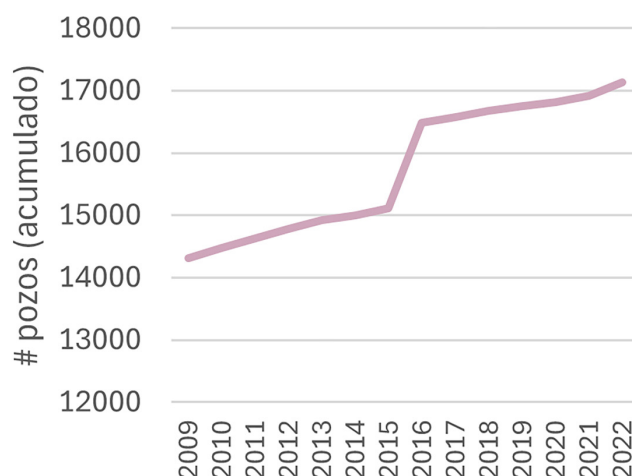


Fig. 4: Cantidad de pozos perforados en el período 2009 - 2022. Elaboración propia a partir de datos del Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible (Costa Rica) para los años 2012, 2014, 2018 y 2023.

## Avances en la investigación de los acuíferos en Costa Rica

La historia de las investigaciones acerca del agua subterránea en el país ha sido detallada por Suarez (1994), quien resalta la gran visión de futuro que existió en la década de los años 60 y 70, acerca de la importancia del agua subterránea y el rol fundamental del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas (Senas) en la exploración de este recurso. Uno de los legados del Proyecto AQUASUB y el Senas, es la base de datos de pozos a nivel nacional, el cual ha continuado el Senara y es de acceso público (<https://base-digh.senara.or.cr/>). Este registro abarca más de 50 años de información base para la realización de estudios acerca de los acuíferos del país, esto es único en Centroamérica y el Caribe; por su parte la Dirección de Agua, también cuenta con una base de datos de las concesiones de agua del país y se puede consultar en línea (<https://da.go.cr/descarga-de-capas-de-concesiones-y-dictámenes/>). La transformación del Senas en Senara en 1982, afectó el ritmo de avance en la investigación a nivel gubernamental ya que se cerró el Departamento de Perforación (Suárez, 1990), no obstante, el Senara ha continuado realizando estudios hidrogeológicos en el país y también ha apoyado estudios en la academia y en el sector hídrico gubernamental como se verá más adelante.

Los acuíferos que han sido estudiados con mayor detalle son: el acuífero Barva, acuíferos Colima en el Valle Central y la zona oeste, en la cuenca del río Grande y en Guanacaste, el acuífero Tempisque y Liberia, tal y como se observa en el cuadro 1, esto se debe a que en el Valle Central se concentra la mayor parte de la población del país y también en estas zonas se desarrollan gran parte de las actividades industriales, según Minaet (2008) el 85 % de la industria nacional se ubica en la cuenca del río Grande de Tárcoles.

La figura 6 muestra las áreas donde hay estudios hidrogeológicos, estos cubren un 20% del territorio nacional, o bien un 41% si se excluyen las áreas protegidas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Sinac) dado que estas están dedicadas a la conservación. Las zonas estudiadas se ubican principalmente en el sector central y el Pacífico Norte, las escalas de estos estudios varían normalmente entre 1:50.000 y 1:25.000. Es evidente que la provincia de Limón es la zona menos estudiada del país, únicamente en un 9 % de ésta se han realizado estudios hidrogeológicos, la provincia de Heredia está cubierta en un 10 %, Cartago en un 12 %, San José en 16 %, Alajuela en 19 %, Puntarenas en 21 % y la más estudiada de todas corresponde con Guanacaste con un 37 %. Los bajos porcentajes y diferencias por provincia posiblemente están relacionados con la disponibilidad de mapas geológicos detallados, la demanda de agua y la disponibilidad de agua superficial. Mientras que las cuencas más estudiadas corresponden con las cuencas de los ríos Tárcoles, Jesús María, Tempisque y la Península de Nicoya, entre otras (Fig. 6).

El AyA, la ESPH y las Asadas realizan investigaciones en el país en zonas de su jurisdicción donde brindan el servicio de abastecimiento público, sin embargo, según la Ley N° 6877 (Gobierno de Costa Rica, 1983) el Art. 3, incisos ch), e) y h) es

Cuadro 1

Recuento de los estudios más relevantes realizados en el acuífero Tempisque, Liberia y los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.

Acuífero	Autores/año	Temática
Acuífero Tempisque	Bohnenberger (1968)	Prospección de aguas subterráneas.
	Naciones Unidas (1975)	Prospección de aguas subterráneas.
	Elizondo (1982)	Estudio hidrogeológico con fines de riego.
	Gómez (1993)	Estudio de la recarga mediante isótopos estables en el agua subterránea.
	Vargas (2013) UCR-Senara-AIEA	Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos estables, recarga, modelo conceptual del acuífero de la margen derecha del río Tempisque.
	Orozco (2014)	Modelo matemático del acuífero de Tempisque.
	Alpizar (2014)	Modelo numérico del acuífero aluvial del río Tempisque en el sector Trancas.
Acuífero Liberia	Banks (1971)	Prospección de aguas subterráneas.
	ONU (1975)	Prospección de aguas subterráneas.
	Senara (1992)	Mapa hidrogeológico de la Península de Nicoya.
	Collins (1999)	Modelo matemático acuífero de Liberia.
	Alvarado (2018)	Modelo conceptual margen izquierda del río Tempisque, Liberia.
Acuíferos del Valle Central	Fernández (1969)	Primera caracterización de los acuíferos del Valle Central.
	ONU (1975)	Prospección de aguas subterráneas.
	Losilla y Rodríguez (1978)	Recarga del acuífero Colima.
	Echandi (1981)	Acuíferos del Valle Central.
	Senara-BGS (1985)	Mapa hidrogeológico. Hidrogeología, hidrogeoquímica-isótopos
	Senara-BGS (1988)	Hidrogeología.
	TAHAL (1990)	Hidrología, hidrogeología, abastecimiento público.
	AyA (1995)	Fluctuación de niveles, Valle Central.
	Ramírez y Alfaro (2002)	Vulnerabilidad de un sector del Valle Central.
	Ramírez (2014)	Recarga y extracción hídrica de los acuíferos Colima y Barva
	Vargas (2016) UCR-Senara-AIEA	Hidrogeología, hidrogeoquímica-isótopos. Modelo conceptual de la cuenca del río Grande, Alajuela.
	Nemus y Senara (2016)	Modelo numérico del Valle Central.

competencia del Senara realizar las investigaciones a nivel gubernamental y aunque el Senara ha realizado gran cantidad de estudios hidrogeológicos, se requiere de mayores presupuestos para realizar más estudios detallados en nuevas zonas.

Por su parte la Dirección de Agua ha contratado algunos estudios usando recursos del Canon de Aprovechamiento sobre vulnerabilidad y zonas de protección de manantiales (Ballester y Zeledón, 2016), el estudio más reciente contratado fue el realizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) en el año 2019, el cual se enfocó en determinar el potencial del agua subterránea, este será comentado más adelante. Además, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) realiza investigaciones acerca del agua subterránea en las zonas en donde tiene proyectos de generación hidroeléctrica, sin embargo, estos últimos no se incluyen en la figura 6.

En forma independiente las universidades públicas también contribuyen a investigar el agua subterránea en Costa Rica. Es importante resaltar los aportes realizados mediante la formación de profesionales especializados en el estudio y evaluación del agua subterránea, lo cual ha sido recalado por Arias et al. (2006). Hasta la fecha se han desarrollado 37 tesis de la Licenciatura en Geología enfocadas en el estudio del agua subterránea y 46 tesis de la Maestría de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos del Posgrado en Geología, ambas de la UCR. Debe mencionarse que los estudios hidrogeológicos son



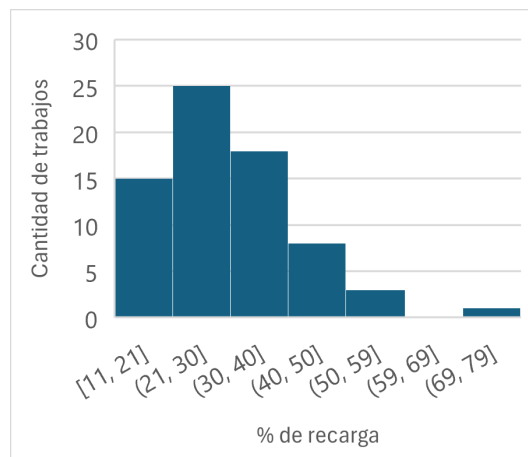


Fig. 5: Histograma de la recarga promedio reportada en 59 estudios hidrogeológicos del país (n = 59), los valores se expresan en porcentaje. Elaboración propia, a partir del análisis documental realizado para esta investigación.

costosos debido a que requieren de la realización de trabajo de campo, análisis de laboratorio y en algunos casos se requiere de equipos especiales, por ejemplo, cuando se aplican métodos geofísicos y se perfora el subsuelo, de manera que la investigación de los acuíferos requiere de inversiones importantes. Es por esta razón que las tesis mencionadas han sido realizadas gracias a la combinación de financiamiento interno de la UCR y externo, principalmente por del sector gubernamental, tal como se muestra en la figura 7.

Las investigaciones existentes se enfocan hacia la exploración del agua subterránea, la caracterización de las unidades hidrogeológicas basados en datos hidráulicos, químicos e isotópicos, estas últimas técnicas se usan con menor frecuencia debido a los altos costos de los análisis químicos. También se han evaluado temas de riesgo a la contaminación (Carmona, 2016; Araya-Quirós, 2017; Fallas, 2017), algunas se han enfocado en variables como los parámetros bacteriológicos (Ramos, 2005), otras enfatizan en los nitratos (Agudelo, 2001; Reynolds-Vargas et al., 2006); algunos caracterizan derrames puntuales de hidrocarburos (Guzmán, 2006 y Ramos et al., 2010). Son pocos los estudios mostrados en la figura 6 que determinan las zonas de protección al menos a nivel de tesis, se pueden mencionar a Vásquez (2005), Arellano (2005), González (2014) y Chinchilla (2022), no obstante, los operadores de agua están trabajando arduamente en la definición de estas zonas para sus captaciones (Ramos, 2024).

Arias et al. (2003) delimitaron la cuña de intrusión salina en el acuífero costero de Jacó. Mientras tanto, Arias (2007), Murillo (2008), Murillo et al (2007), Castro (2010) y González (2017) utilizaron métodos geofísicos para estudiar la extensión de la intrusión salina en los acuíferos Tamarindo, Playa Panamá, Naranjito de Quepos y el acuífero aluvial de Puerto Jiménez. Por su parte, Alvarado (2023) estudió la interfase agua dulce-agua salada utilizando métodos hidrogeoquímicos e isotópicos.

Mediante la Ley N°8685 (Gobierno de Costa Rica, 2008) el Senara desarrolló el Proyecto PROGIRH, financiado por el BCIE con un costo de US \$ 35 millones para cubrir cuatro ejes: gestión de aguas subterráneas, producción agrícola con riego, mejoramiento de tierras agrícolas con drenaje y fortalecimiento institucional. Con parte de estos fondos se ha investigado desde el año 2010, los acuíferos en la margen derecha del río Virilla, en la cuenca del río Grande, Potrero, Brasilito, Tamarindo, río Arío, Manzanillo, la margen derecha del río Tempisque, bahía Herradura, Punta Uvita, Herradura, Jacó, Hermosa, Esterillos, Parrita, Quepos, Naranjo, Savegre, Matapalo, Dominical y Ballena.

Investigaciones en los acuíferos de la margen derecha del Tempisque en Guanacaste y en la cuenca del río Grande, Alajuela fueron desarrollados vía convenio de cooperación interinstitucional entre el Senara y la UCR, lo que ha contribuido a mejorar el entendimiento del flujo, el almacenamiento y la composición del agua subterránea. Vargas (2013) indica que las aguas del acuífero Tempisque han tenido poca interacción con el medio geológico, se clasifican como bicarbonatadas cálcico magnésicas y los isótopos estables evidencian evaporación en el proceso de recarga, esto confirma lo publicado por Gómez (1993). Un estudio similar realizado en la zona oeste del Valle Central indica la influencia de la geología en la composición del agua subterránea, son evidentes las diferencias obtenidas en la margen izquierda del río Grande, en donde las

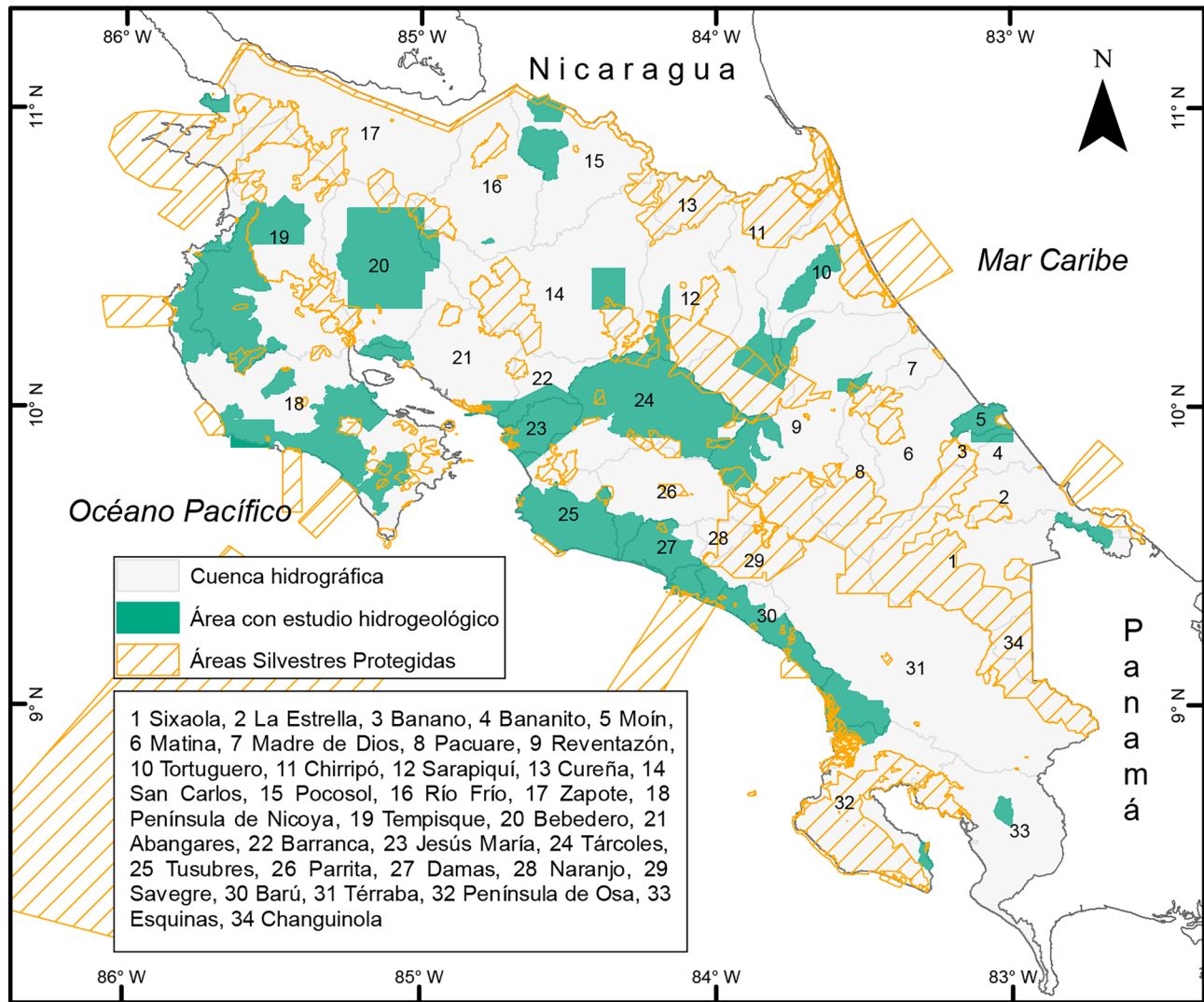


Fig. 6: Áreas del país que cuentan con estudios hidrogeológicos a escalas iguales o menores que 1: 50 000, también se muestran las áreas protegidas y las cuencas hidrográficas. Elaboración propia: a partir de la revisión de informes disponibles en línea del Senara, Dirección de Agua, AyA, tesis de la licenciatura en Geología, Tesis de Maestría en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos, datos tomados del Sibdi-UCR.

aguas que circulan en la Formación Aguacate y tienen mayores contenidos de calcio y sulfato, que las demás muestras analizadas, debido a los mayores tiempos de residencia y a la influencia de alteración hidrotermal de las rocas (Vargas, 2016). Estas investigaciones generaron modelos conceptuales de las zonas de estudio con base en datos de campo y análisis de laboratorio; se midieron niveles de redes de pozos, mediante el estudio de los tipos de suelos, se determinaron las tasas de infiltración y a partir de análisis químicos e isotópicos del agua subterránea se mejoró la comprensión de la dinámica del agua subterránea en las cuencas de Tempisque y Río Grande.

Madrigal-Solís et al. (2022) reportan diferencias en la composición química en las aguas del acuífero Barva y Colima, donde la meteorización de los aluminosilicatos es el principal proceso hidrogeoquímico que controla la composición del agua en los acuíferos Colima superior e inferior.

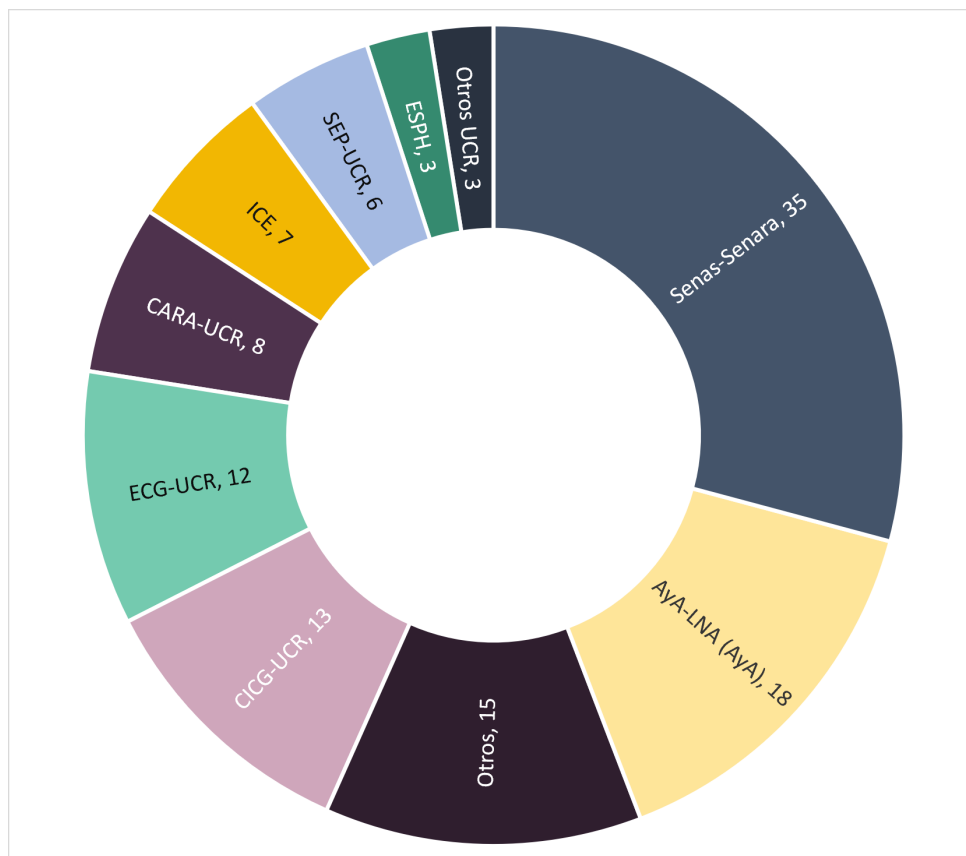


Fig. 7: Cantidad de tesis según la institución que brinda el financiamiento. Elaboración propia, a partir de la revisión bibliográfica realizada para este estudio. La abreviación corresponde con la institución que apoyó el desarrollo de la investigación, además se agrupan en Otros UCR (CICA, Cicanum, CIA, EQ, Instituto Clodomiro Picado). Otros (DAAD, CNFL, Conare, IRET UNA, SIL-UNA, LIMRHI-UNA, Ministerio de Salud, Universidad Earth, Municipalidad Santo Domingo, OIEA, DGM, Recope, Dirección de Agua, Asadas, empresa privada).

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación también ha sido determinada para diferentes acuíferos en Costa Rica; esta suele obtenerse mediante la metodología de GOD, sin embargo, en concordancia con el medio hidrogeológico y la información disponible, también se han utilizado otros métodos como, por ejemplo, DRASTIC (Ramos, 2001; Fuentes, 2006; Castro, 2010), EPIK (Ramos, 2005) y SEA-GINDEX (Torres, 2020). De manera oficial Senara (s/f-a) ha determinado la vulnerabilidad de los acuíferos: Cañas, Costeros Sur, Tempisque, Andamojo, Belén, Cantón Barva, Chanquera Térraba, Fortuna, Grecia, Huacas, Montes de Oro, Moravia, Nimboyores, Parrita, Potrero-Brasilito, Potrero-Caimital, Poás, San Pablo, Santo Domingo, Tapantí-Pejibaye, Zona Diría, Barranca-Miramar-Chapernal, Pacífico Central, Palmares, Ríos Grande, río Ario, Sámara-Malanoche, Alajuela, Barranca-Jesús María, Liverpool y Siquirres.

Gran parte de las investigaciones realizadas incluyen balances hídricos de suelos para el cálculo de la recarga potencial en diferentes acuíferos y zonas específicas del país, mediante la metodología de Schosinsky (2006) (por ejemplo, Miller, 2024; Alvarado, 2023; Vargas, 2022, Chinchilla, 2022; Zúñiga, 2021; entre otros). También para el cálculo de la recarga se ha utilizado balance de cloruros en el sector de Venado y Nandayure (Obando, 2023; Miller, 2024). Mientras que el cálculo de la recarga real, mediante la metodología del hidrograma de pozos o fluctuación de niveles, únicamente se ha estimado en los acuíferos de Playa Potrero, Playa Brasilito, Tempisque, Liberia, Barú-Guabo, Herradura y Uvita (Monge, 2015; Alvarado, 2018; Arias Fernández, 2018; Alfaro, 2021, Chinchilla, 2022).

Si bien la metodología de Schosinsky (2006) es de uso obligatorio en el país (según acuerdo 60-2012 del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (Minaet), hoy denominado Minae), es pertinente promover la selección de método de recarga en función del modelo conceptual, por ejemplo, métodos de presupuestos de agua, métodos basados en modelación de simulación, métodos físicos de la zona saturada y no saturada y métodos basados en trazadores químicos y de calor (Healy, 2010).

El IMTA (2008), calculó la recarga del agua subterránea en 15 cuencas hidrográficas de las 34 cuencas reconocidas para el año 2000 (Abangares, Barranca, Río Frío, Tárcoles, Térraba, Naranjo, Pacuare, Nicoya a, Nicoya b, Reventazón, San Carlos lago, San Carlos, Sarapiquí-Chirripó, Savegre y Tempisque-Bebedero), usando la metodología de Unesco (2006) la cual permite obtener un dato más cercano a la realidad. Adamson-Badilla y Masís (2010), calcularon el balance hídrico para las cuencas faltantes, no obstante, este trabajo se enfocó en un balance de agua superficial, por lo que falta generar datos que permitan completar las zonas sin información y calcular la recarga acuífera real.

Por otra parte, se han realizado en el país 14 modelos numéricos, la mayor parte de estos con el fin de evaluar el comportamiento del agua subterránea ante diferentes escenarios climáticos y de extracción; también para la determinación de zonas de protección de pozos y la evaluación del agua subterránea en proyectos hidroeléctricos. Ocho de estos estudios se ubican en la provincia de Guanacaste (Collins, 1999; Zúñiga, 2006; García, 2013; Alpizar 2014; Orozco, 2014; García, 2015; Vargas, 2022 y Alvarado, 2023), tres en Puntarenas (Murillo, 2017; Alfaro, 2021; Chinchilla, 2022) dos en Limón (Vásquez, 2005 y Chaves, 2016) y uno en el Valle Central (Nemus y Senara, 2016). De estos únicamente en los acuíferos Playa Potrero y Playa Brasilito se han evaluado utilizando un estado transitorio.

Nemus y Senara (2016) elaboraron el modelo numérico del Valle Central, una investigación que estima los escenarios más favorables de extracción de agua subterránea que no afecte el entorno ambiental y estructural del acuífero en las condiciones actuales y en diferentes escenarios climáticos futuros. Para la implementación del modelo se utilizaron nueve capas que corresponden con las unidades hidroestratigráficas del sistema acuífero del Valle Central y se realizaron dos versiones del modelo considerando o no la recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano. En cada versión del modelo se simuló tres escenarios de explotación y disminuciones de 10 % y 15 % en la recarga (Nemus y Senara, 2016). El escenario más exigente de extracción simulado muestra disminuciones de hasta cerca de 500 l/s en la descarga de manantiales, mientras que los restantes resultan en la disminución de 100 l/s a 250 l/s en los mismos. La carga hidráulica no presenta diferencias significativas considerando o no la recarga urbana, en los escenarios más exigentes hay disminuciones de la carga de hasta 9 m a 6 m en los sectores simulados de mayor extracción, y son inferiores a 1 m en sectores alejados (Nemus y Senara, 2016). Mientras tanto, los resultados de los escenarios climáticos indican que el aumento en la explotación podrá presentar más efectos en la descarga de manantiales que las alteraciones climáticas, al igual que con la carga hidráulica. Las zonas más afectadas por los cambios en la recarga son las de la periferia del modelo y en particular, las formaciones del Terciario y Zurquí (Nemus y Senara, 2016).

El estudio de Belcher et al. (2019) del USGS divide el país en tres bloques, dos ubicados al norte y noreste respectivamente y uno al sur del país, el bloque norte y sur están sometidos a esfuerzos tectónicos regionales compresivos, el bloque norte corresponde con la cuenca antearco y trasarco en el sector de la Cordillera de Guanacaste y el bloque sur es la zona de la Cordillera de Talamanca, ambos bloques están divididos por el sistema de Fallas transcurrente de Costa Rica, propuesto por Astorga et al. (1991) y estudiado por diferentes autores (Fan et al., 1993; Fisher et al., 1994; Montero, 1994). En el centro de ambos bloques se generó una cuenca Pull-apart, en la zona noreste del país, en donde existe un régimen de esfuerzos distensivos, caracterizado por la presencia de fracturas profundas abiertas que favorecen el almacenamiento profundo del agua subterránea, es así como la zona trasarco, al noreste de la Cordillera Volcánica Central, en la vertiente Atlántica del país, fue clasificada como la de mayor potencial para extraer agua subterránea profunda, este hallazgo permitiría orientar el desarrollo socio-económico del país con base en información científica (RTI, 2019), esta zona ya había sido clasificada por Astorga y Arias (2002) como de alto potencial en el mapa de geoaptitud hidrogeológica. En el estudio del USGS además se calculó la recarga a nivel regional para las cuencas del río Tempisque y la de los ríos Tortuguero y Sarapiquí, los resultados obtenidos son de  $2,61 \times 10^{12}$  L/año y de  $7,76 \times 10^{12}$  L/año respectivamente (Belcher et al., 2019).

Debe mencionarse que la Política Hídrica Nacional (Minaet, 2009) en el eje N°5 Desarrollo del conocimiento propone “invertir en la investigación de aguas subterráneas priorizando en los acuíferos del centro del país que resulten estratégicos para el abastecimiento de las poblaciones”, sin embargo, deben asignarse más recursos a nivel gubernamental.

## Monitoreo del agua subterránea

Entre la década de los años setenta y ochenta gracias al Senas (hoy día Senara), se inició el monitoreo del agua subterránea en el Valle Central mediante una red de monitoreo de más de 40 piezómetros, esta fue la primera red de monitoreo en Costa Rica, creada con el objetivo de conocer la dinámica de los acuíferos en torno al proceso de recarga (Suárez, 1990). Se midieron periódicamente los niveles de agua durante el año hidrológico en los acuíferos Barva, Colima Superior e Inferior, lo cual permitió determinar la respuesta inmediata del acuífero Barva al inicio de la lluvia, también se observó un desfase de 4 a 5 meses en el proceso de lluvia y la recarga del acuífero Colima Superior, en incremento en los niveles se dio a partir de setiembre y octubre (Suárez, 1990). Lamentablemente, con los recortes de presupuesto y personal por la reestructuración del Senas en 1982, no se le dio seguimiento a esta iniciativa y se abandonó. Posterior a eso y en forma independiente, el AyA y la ESPH efectuaron controles en los principales sistemas de abastecimiento que utilizan.

La Política Hídrica Nacional (Minaet, 2009) en su eje N° 7 Vulnerabilidad y adaptación frente al cambio climático, propone “mantener un monitoreo constante del comportamiento en cantidad y calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos costeros”, esto se ha venido implementando a partir del 2015 cuando se estableció el proyecto Sistema de Monitoreo de Agua Subterránea en Tiempo Real (Simastir), el cual es una red en tiempo real, aunque también se miden niveles manualmente, con el objetivo de registrar las variaciones de los niveles de aguas subterráneas, la temperatura del agua y la conductividad eléctrica en algunos sitios. Este proyecto es coordinado por la Dirección de Agua con el apoyo del AyA y el Senara, actualmente existen más de 400 pozos monitoreados (Minae, 2024).

Los acuíferos monitoreados son: Colima Superior e Inferior, Aguas Zarcas-Pital, Sardinal-Tempisque margen derecha, Santa Cruz, Nimboyores, Huacas-Tamarindo, Nicoya-Caimital, Quiriman, Liberia, Bagaces, La Cruz, Portalón, en las playas de: Agujas-Mantas, Panamá, el Coco, Brasilito, Potrero, Cóbano-Montezuma, Nosara, Marbella, Sámara y Carrillo (Dirección de Agua, 2023b). Los pozos se muestran en la figura 8; idealmente, esta red debería ampliarse a todo el país para prevenir la extracción intensiva y la contaminación del agua subterránea.

Las zonas hídricas especiales han sido definidas por el Senara con base en la realización de estudios técnicos, en donde existen evidencias de sobreexplotación, intrusión salina o alta vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos. Estas son: la Zona del Valle Central, la Zona del acuífero Mala Noche en la Zona de Sámara, la Zona del acuífero Huacas-Tamarindo y acuíferos costeros norte del cantón de Santa Cruz, la Zona del acuífero de Sardinal, cantón de Carrillo, todas estas ubicadas en la provincia de Guanacaste y la Zona del acuífero Mantas-Playa Agujas, sector de Garabito de Puntarenas (Senara 2007, Senara, 2013a, Monge (2016), Senara (2016a), Senara (2016b), Senara 2017), Senara (s/f-b) y Senara (s/f-c).

La vigilancia del agua subterránea permite mejorar la adaptación al cambio climático, previniendo el posible aumento del nivel del agua subterránea en la costa, como consecuencia del aumento del nivel del mar, permite a su vez, enfrentar el riesgo de intrusión salina, contemplar las variaciones en la recarga acuífera por los cambios en la precipitación y por el aumento de la temperatura lo que causa una mayor evapotranspiración. Además, mediante la modelación numérica de acuíferos, el monitoreo de niveles y de calidad del agua subterránea se pueden establecer diferentes escenarios climáticos y de extracción del agua subterránea, para no comprometer la disponibilidad del agua en zonas menos lluviosas, por ejemplo, en Guanacaste. El monitoreo también favorece la toma de decisiones en torno a la asignación de usos del agua. El sector hídrico del país y los gobiernos locales deben incorporar los resultados de estas y otras investigaciones en la gestión del recurso hídrico, como parte de la adaptación al cambio climático.

## Contaminación del agua subterránea

En los últimos veinte años han ocurrido distintos casos de contaminación puntual y difusa del agua subterránea en Costa Rica, la figura 8 muestra la ubicación de pozos y manantiales en donde en agua ha tenido algún componente ya sea de origen natural o antropogénico que excede el valor máximo admisible (VMA) según lo establecido en el Reglamento para la calidad del agua potable N° 38924-S (Gobierno de Costa Rica, 2015). En Costa Rica al igual que en otras regiones del mundo, el tipo de contaminación antrópica más frecuentemente reportada son los nitratos. La fuente de los nitratos en el acuífero Barva fue primeramente estudiado por Reynolds et al. (2006), quienes propusieron a partir de análisis de isótopos estables, que el

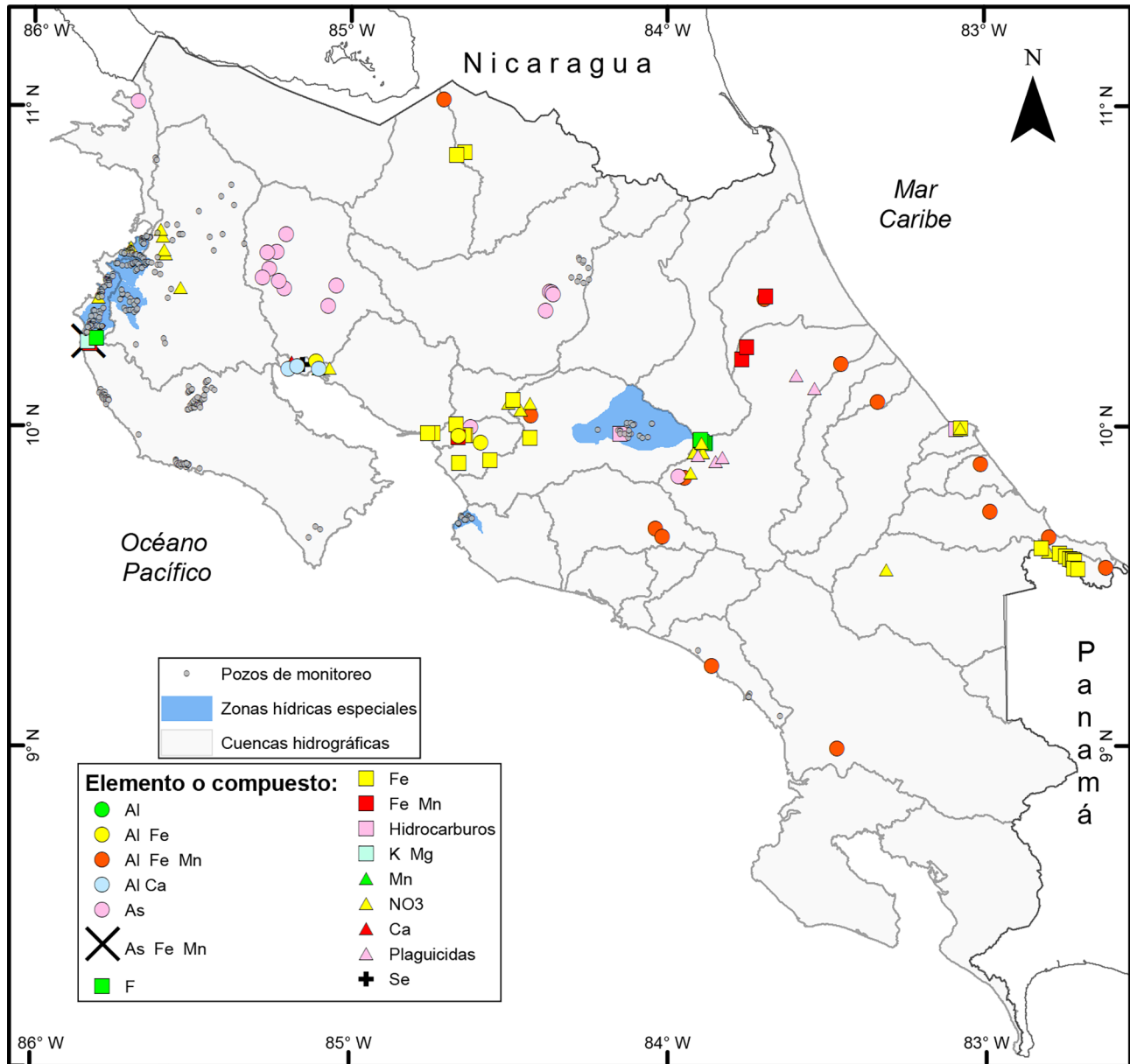


Fig. 8: Ubicación de sitios en donde se reporta contaminación antrópica o geogénica y la concentración de algún elemento o compuesto químico excede el VMA. Elaboración propia a partir de tesis e informes técnicos consultados para este estudio. La red de monitoreo de pozos se obtuvo del proyecto Simastir (Minae-AyA-Senara, ESPH); las zonas hídricas especiales se tomaron de Dirección de Agua (2023b), Monge (2016) y Senara (2007, 2013, 2016a, 2016b, 2017, s/f-b, s/f-c).

origen del nitrato en este acuífero proviene del uso de tanques sépticos y en menor grado de la descomposición de fertilizantes nitrogenados, esto concuerda con los datos de Mora y Portuguez (2021), ya que según estos autores cerca del 80 % de la población usa tanque séptico en el país, los cuales son fuentes potenciales de contaminación por nitratos. Desde principios del siglo XXI, Losilla et al. (2001) reportaron un aumento en las concentraciones de nitratos en el Manantial La Libertad, en Heredia. Estudios más recientes en los acuíferos Barva y Colima indican que las concentraciones de nitratos exceden la

normativa de agua potable en la zona central y baja del área de estudio, además concluyen que los fertilizantes inorgánicos son una fuente importante de contaminación en comparación con las aguas residuales en términos de concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ , además encuentran que en la zona norte la fuente principal de nitratos son los fertilizantes aplicados al cultivo del café y en la zona sur son las aguas residuales que percolan de la zona urbana (Madrigal-Solís et al., 2024). Incrementos en los nitratos también se reportan en manantiales en otras zonas como, por ejemplo, Banderillas, Tierra Blanca, La Misión en Cartago (Mora y Portuquez, 2021). La presencia de nitratos en el agua subterránea merece atención especial, ya que al tratarse de la molécula viaja en forma advectiva y al ser relativamente fácil y de bajo costo su análisis químico, se usa como indicador de la contaminación de los acuíferos. También los coliformes fecales en el agua subterránea se han reportado en diferentes partes del país (Hidalgo et al., 2020).

El origen de elementos como el arsénico, el hierro y el manganeso presentes en el agua subterránea en concentraciones cercanas y superiores al VMA en aguas de consumo humano, han sido estudiados en detalle en algunas zonas. Tres zonas fueron investigadas mediante un convenio de cooperación interinstitucional entre la UCR y el AyA. Mollinedo (2013) determina un origen geogénico del arsénico presente en algunos manantiales en la zona de Aguas Zarcas, el cual asocia con una anomalía geotérmica regional y con la mezcla de aguas meteóricas con aguas termales presentes en la zona de la falla inversa Florencia-Palmira. Por su parte Araya (2020) asocia la presencia de hierro, manganeso y arsénico con procesos redox en una zona donde hay fallamiento local que afecta las tobas de la Formación Buena Vista en Amparo, Los Chiles de Alajuela. En las zonas Cañas y Bagaces, Guanacaste se determinó que el arsénico encontrado en algunos puntos se relaciona con procesos geológicos-tectónicos regionales (Ramos et al., 2014). Posteriormente, Solano (2021) identifica zonas en donde las concentraciones de hierro y manganeso exceden el VMA en algunos sitios en Esparza y Orotina y Santamaría (2023) concluye que la reducción de óxidos y oxihidróxidos de hierro y de sulfuros como la pirita es el mecanismo que genera el hierro disuelto en concentraciones altas en el agua subterránea en pozos en la zona de Esparza, Coyolar y Uvita-Ceiba. Valores de fluoruro superiores al VMA han sido reportados por Obando (2017) en la zona de Tierra Blanca, Cartago, el autor indica que el origen no está claro, podría provenir de las cenizas volcánicas o bien de los plaguicidas fosfatados, por lo que este tema debe ampliarse en estudios posteriores.

El riesgo a la contaminación con plaguicidas es un tema preponderante porque Costa Rica ha sido un país agrícola y ya se han contaminado fuentes de abastecimiento con distintos plaguicidas. Morales (2014) propone una metodología para evaluar el riesgo de contaminación en la cuenca del río San Blas en Guanacaste. Ruerpert et al. (2005) reportaron presencia de plaguicidas en pozos seleccionados en la zona Atlántica. Estos compuestos al ser liberados al medio ambiente se incorporan al suelo, atmósfera y al agua superficial y en algunos casos al agua subterránea por infiltración, es así como en lugares como el Cairo y Milano; Veracruz, Río Cuarto, Cipreses, Oreamuno, entre otros se han contaminado fuentes de abastecimiento público. Castillo et al. (2012) publicaron datos para el período 2003-2012 del herbicida Bromacil en la captación de la Asadade Milano. El bromacil también se ha reportado en Veracruz de Pital de San Carlos, Santa Rita, La Tabla y Santa Isabel de Río Cuarto de Grecia y otros plaguicidas se han detectado en Matina, Pococí y Siquirres (Mora y Portuquez, 2021).

Análisis de plaguicidas en aguas subterráneas en redes de monitoreo del acuífero de Tempisque y en la cuenca del río Grande, Alajuela, no reportan la presencia de estos compuestos en los sitios estudiados por Vargas (2013) y Río Grande (Vargas, 2016), lo cual llama la atención ya que considerando las grandes cantidades de plaguicidas en el país, se esperaría encontrar estas sustancias en el agua subterránea, sin embargo no ocurrió debido a la complejidad de los procesos que determinan el destino ambiental de estos compuestos, a los procesos de atenuación de contaminantes en la zona no saturada y a la diversidad de plaguicidas aplicados a los cultivos, este tema debe estudiarse más en el país. García (2017) mediante muestreos de suelos y ensayos de laboratorio, estudia los procesos de sorción de plaguicidas seleccionados en una finca experimental en Poás, Alajuela, los resultados de esta investigación señalan el rol de la retención del suelo en la atenuación de plaguicidas.

Orozco-Gutiérrez (2019) en un estudio realizado en pozos seleccionados para el abastecimiento público, reporta la presencia de algunos de los siguientes elementos y compuestos en concentraciones superiores a los VMA en dos pozos seleccionados denominados: Boruca y San Lucas (antimonio, cadmio, calcio, cianuro, cloruros, cobre, cromo, dureza total, fluoruros, magnesio, mercurio, níquel, nitratos, nitritos, plaguicidas, plomo, selenio, sulfato y zinc), sin embargo debe investigarse más a fondo la fuente de dichos elementos o compuestos para determinar su origen.

La contaminación del agua subterránea es cada vez más frecuente y se debe diversificar el tipo de análisis químicos que se realizan para buscar otros tipos de contaminantes como los compuestos polifluoroalquilados (PFAS), productos farmacéuticos y los contaminantes orgánicos persistentes (COP), estos últimos son tóxicos y persistentes, tienden a incorporarse en la cadena alimenticia y tienen graves efectos en la salud y el medio ambiente, esto debe realizarse sobre todo en los acuíferos

más vulnerables, por lo general acuíferos libres, ubicados cerca de centros de población, en zonas costeras y en zonas agrícolas. Así mismo, está pendiente evaluar los efectos en el agua subterránea de la falta de tratamiento de aguas residuales en el territorio nacional.

## Protección del agua subterránea en Costa Rica

La Ley de Aguas N°276 (Gobierno de Costa Rica, 1942), vigente en Costa Rica, establece que se debe solicitar permiso para perforar y además propone la figura de la concesión para el aprovechamiento del agua subterránea (Arts. 7, 21, 22); además indica que debe existir un radio retiro para los pozos de 40 metros de la infraestructura (Art. 8), que ha sido interpretado como radio operacional. Esta ley ha sido visionaria no solo en cuanto al aprovechamiento del agua subterránea sino en lo que concierne a su protección, es así como el Artículo 32, dota al Poder Ejecutivo a determinar “las medidas que juzgue oportunas para evitar el peligro de contaminación”, y desde su creación reserva un radio de fijo de protección de 200 metros para las fuentes de abastecimiento público (Art.31) en aras de la prevención de la contaminación.

Por su parte, la Ley Forestal N° 7575 (Gobierno de Costa Rica, 1976), indica un radio de 100 metros para nacientes permanentes, esta misma ley menciona que las áreas de recarga acuífera serán establecidas por los entes competentes. Sin embargo, a pesar de que existe normativa que busca la protección de las fuentes de agua, cada año se reportan incidentes de contaminación de fuentes de abastecimiento público (Mora y Portuguesez, 2021).

En lo que se refiere a la protección de las captaciones de abastecimiento público, el AyA cuenta con 570 fuentes de captación, de los cuales 314 son pozos, 256 son manantiales y 67 son captaciones superficiales; según Ramos (2024), el 48 % de las captaciones de agua subterránea, manantiales y pozos ya cuentan con zonas de protección definidas. En el caso de la ESPH, todas las captaciones tienen definidas las zonas de protección, 25 corresponden con pozos, 11 son manantiales y 10 son captaciones superficiales (Castro, 2024). Arias Salguero (2018) elaboró las zonas de protección para diez manantiales seleccionados de la Asada de Piedades Sur de San Ramón de Alajuela.

Es pertinente mencionar que la definición de zonas de protección implica una inversión considerable para realizar estudios hidrogeológicos puntuales, por lo que no todos los operadores de agua tienen la misma capacidad de inversión para realizar dichos estudios. Debido a lo anterior en 2018 la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (Aresep) aprueba la “Metodología Tarifaria para la protección del Recurso Hídrico”, esta herramienta busca generar recursos financieros para los prestadores del servicio, con el fin de desarrollar proyectos que permitan proteger las fuentes de aprovechamiento de agua con las que se abastecen. La tarifa se establece con el costo asociado a cada proyecto con un período de ejecución de estos de cinco años (Aresep, 2021).

Son pocas las Asadas que hasta el momento cuentan con tarifa hídrica aprobada por Aresep entre estas están las de: Río Blanco, Aguas Zarcas, Río Celeste y Sucre (Aresep, 2022, 2023, 2024) por lo que éstas cuentan con la definición de al menos una de sus fuentes. Los proyectos asociados buscan la protección, restauración y conservación de ecosistemas, promover una nueva cultura del agua, entre otros.

Aunado a esto se han utilizado algunas de las metodologías para la protección de la calidad del agua subterránea propuestas por Foster et al. (2002), específicamente los mapas de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea se han usado para prevenir la contaminación del agua subterránea, no obstante, debido a conflictos generados con el uso de la tierra cesó la obligatoriedad que tuvo la matriz de vulnerabilidad del Senara, esta dejó de aplicarse en el año 2019 (Cuadro 2).

Otra herramienta que contribuye en la protección de la calidad del agua subterránea es la identificación y caracterización de las amenazas potenciales de contaminación y su posterior incorporación en el análisis de peligro de contaminación (Foster et al., 2002), no obstante, esta es una tarea pendiente en nuestro contexto. Son pocos los estudios que han inventariado fuentes y estos tienen un alcance local, Vargas (2009) elaboró el primer inventario detallado para el cantón de Belén para evaluar el riesgo a la contaminación del agua subterránea y han sido pocos los estudios posteriores en esta temática. Otros estudios de este tipo han sido realizados por Ramos (2001), Monge (2015), Carmona (2016), Araya-Quirós (2017), Fallas (2017) y Orozco-Gutiérrez, J. (2019) entre otros.

También son pocos los análisis de peligro y riesgo a la contaminación del agua subterránea que se han realizado y estos podrían resultar muy útiles sobre todo en zonas urbanas y rurales en donde se tienen múltiples fuentes potenciales ya sean puntuales o dispersas de contaminación. En vista que se dejó de aplicar la Matriz Genérica de Protección de Acuíferos (Cuadro 2),



Cuadro 2

Políticas, reglamentos y decretos relacionados con el agua subterránea aprobados en los últimos 20 años en Costa Rica. Elaboración propia.

Institución responsable	Tipo de alcance: política, reglamento o decreto	Referencia	Fecha
Minaet	Canon de uso del agua	N° 35097	2005
Setena	Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación del Impacto Ambiental (Manual EIA)-Parte III	Decreto N° 32967	20 de febrero de 2006
Minae	Plan nacional para la GIRH		2008
Minae	Política Hídrica Nacional		2009
CGR	Solicita al Minae, AyA y Senara, diseñar en forma conjunta, una metodología de investigación para llevar a cabo los estudios hidrogeológicos a utilizar como fundamento para emitir regulaciones en la perforación de pozos y como requisito fundamental de las solicitudes de permisos para la perforación de pozos.	Informe DFOE-PGAA-11-2009	17 de julio, 2009
Senara	Matriz de criterios de uso del suelo según la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la protección del recurso hídrico del cantón de Poás.	Acuerdo 3303 Junta Directiva	26 de septiembre de 2006
Senara	Definición de las Zonas hídricas especiales.	Acuerdo 3748. Junta Directiva 267-09	27 de mayo 2009.
Senara	Reforma Estudios hidrogeológicos para el trámite de perforación de pozos.	Acuerdo N° 3748 Junta Directiva de Senara. Sesión extraordinaria N° 267-09	27 de mayo del 2009
Minaet	Reglamento de Perforación del Subsuelo para la Exploración y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas.	Decreto Ejecutivo N° 35884-Minaet	07 de marzo de 2010
Minaet	Reglamento de Registro de Pozos sin número y habilitar el trámite de concesión de aguas subterráneas, Dirección de Aguas.	Decreto N° 35882-Minaet. La Gaceta, N°88,	7 de mayo, 2010
Minaet	Metodologías Hidrogeológicas para la evaluación del Recurso Hídrico.	La Gaceta N° 31	13 de febrero 2012
Sala Constitucional	Aplicación a nivel nacional de la Matriz de Vulnerabilidad.	voto 2012-08892	27 de junio del 2012
Minae-MAG	Creación de la Comisión Técnica Interinstitucional para la Gestión de Acuíferos (CTI).	N°38449 Minae-MAG	Enero, 2014
AyA	Política nacional de agua potable de Costa Rica, 2017-2030		2016
Sala Constitucional	Votos 4790-2008 y 8892-2012 de la Sala Constitucional	Votos 4790-2008 y 8892-2012	2016
Senara	Matriz Genérica de Protección de Acuíferos.	Junta Directiva mediante Acuerdo Número 5497 La Gaceta N° 245	12 de octubre del 2017.
CGR	Reglamento de Incorporación de variable ambiental en Planes Reguladores y otros instrumentos de ordenamiento territorial (RIVAIOT)	DFOE-AE-IF-00008-2017	2017
Minae	Comisión para el manejo integrado del Acuífero Nimboyores y Acuíferos Costeros de Santa Cruz de Guanacaste (CONIMBOCO)	Decreto Ejecutivo N° 41093-Minae	16 abril 2018
Minae	Comisión para el manejo integrado de acuíferos en el Distrito de Sardinal, Cantón de Carrillo, Guanacaste.	Decreto Ejecutivo No. 41094-Minae	3 mayo, 2018
Minae	Reglamento de registros de pozos sin número y habilitación del trámite de concesión de aguas subterráneas.	N°41851-MP-Minae-MAG	Julio, 2019

Cuadro 2 (continuación)

Políticas, reglamentos y decretos relacionados con el agua subterránea aprobados en los últimos 20 años en Costa Rica. Elaboración propia.

Institución responsable	Tipo de alcance: política, reglamento o decreto	Referencia	Fecha
MAG -Minae- S- Mivah	Reglamento de Coordinación Interinstitucional para la Protección de los Recursos Hídricos Subterráneos.	N°42015-MAG -Minae-S- Mivah Alcance N° 237 a La Gaceta N° 203	25 de octubre del 2019
Senara	Secretaría Técnica Nacional Ambiental (Setena), es responsable legal de la evaluación ambiental para la no afectación a la calidad y la cantidad de los recursos hídricos por la realización de actividades, obras y proyectos.	Acuerdo N° 6039 Junta Directiva Sesión Extraordinaria N°401-19	28 de octubre 2019
Senara	Se deroga la Matriz Genérica de Protección de Acuíferos.	Acuerdo No. 6039	5 de noviembre de 2019
Minae	Reglamento para la Perforación de Pozos y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas.	Decreto N° 43053-La Gaceta, Año CXLIII N° 175	10 de setiembre, 2021
Minae	Especificaciones para cartografía de la variable ambiental en planes de ordenamiento territorial	N° 42696-Minae	15 octubre, 2020
Setena	Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental	Decreto N°43898	19 de abril, 2023
Minae	Reglamento a los capítulos Primero, Segundo, Tercero, Cuarto y Sexto de la Ley de Aguas N°246 del 27 de agosto de 1942	Decreto N° 44410-Minae	12 de junio, 2024

el país debe buscar algún otro tipo de herramienta que permita un balance en la protección de los acuíferos y la realización de actividades económicas que no comprometan la disponibilidad y calidad del recurso hídrico subterráneo futuro.

Las Zonas Hídricas Especiales son otro ejemplo de las medidas de protección del agua subterránea establecidas en el país (Fig. 6), no obstante, la vigilancia de niveles y calidad del agua de los acuíferos debe extenderse a todo el país.

## Conflictos por el agua subterránea en Costa Rica

A pesar de que en Costa Rica el acceso a agua potable es un derecho humano, según la reforma del Art. 50 de la Constitución Política (Ley N°9849 [Gobierno de Costa Rica, 2020a]) y el uso del agua en el abastecimiento público es prioritario según el Art. 27 de la Ley de Aguas N°276 (Gobierno de Costa Rica, 1942), se han presentado diversos conflictos asociados al uso del agua subterránea (Cuadro 3). Las causas de estos conflictos han sido analizadas por distintos autores. Ramírez-Cover (2007), contextualiza el impacto en el cambio en el modelo de desarrollo económico en la década de los ochenta en Guanacaste, al pasar de una economía predominantemente agrícola, ganadera y agroindustrial a otra basada en servicios, asociado al turismo masivo, lo que conlleva un crecimiento inmobiliario importante, el cual tiene repercusiones en la utilización del agua subterránea. Por su parte Cuadrado (2017) indica que las disputas se deben a la falta de aplicación de las leyes por parte de instituciones públicas, competencias en el uso del agua, problemas de contaminación del agua, entre otros.

Alpizar (2019) sostiene que las luchas por el agua en Costa Rica van más allá de aspectos técnicos y tienen que ver con las relaciones desiguales de poder que generan afectación en el acceso al agua potable y el saneamiento. Quizás esta es la razón por la cual a pesar de que han habido diversos intentos de aprobar una nueva ley del recurso hídrico en el país, a más de veinte años de primera propuesta, la ley N° 17.742, Proyecto de Ley para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico presentada mediante iniciativa popular, esto no ha sido posible, ya que existen diferentes intereses políticos y económicos en torno al uso del agua. Del análisis de los proyectos de ley que han llegado a la Asamblea Legislativa, se observa un factor común y es la transferencia de competencias del Senara y el AyA a la Dirección del Agua, lo cual debe analizarse con mucho cuidado ya que la centralización de todas las competencias de rectoría, regulación, investigación y gestión en único ente, eliminaría los contrapesos que han existido históricamente en torno al agua y que existen en un país democrático como el nuestro (Senara, 2013b). Además, el tema de las Asadas queda por fuera en varias de las propuestas analizadas. Se considera que la investigación acerca del agua

Cuadro 3

Conflictos asociados al uso del agua subterránea en Costa Rica. Elaboración propia, a partir de Cuadrado (2017), Alpízar (2019), Valenciano y Rojas (2020).

Lugar	Motivo del conflicto	Fecha
Lorena, Santa Cruz, Guanacaste (Acuífero Nimboyores)	Proyecto de ampliación en la extracción del caudal de uso mayoritariamente comunal, el cual pasaría de 75 a 350 L/s previsto para el Hotel Meliá Conchal	2001-2006
Playas del Coco-Ocotol (Acuífero Sardinal)	Ampliación del acueducto, caudal previsto 176 L/s, mediante 4 pozos ubicados entre el río Sardinal y el río Brasil.	2008-2011
Potrero, Santa Cruz	La comunidad en contra de la ASADA, del Estado costarricense, la institucionalidad pública en materia hídrica, los vecinos/as y organizaciones base defienden su idoneidad para administrar el acueducto comunitario.	2014
Guácimo, Limón	Riesgo de contaminación del agua subterránea ante la expansión del cultivo de la piña en Guácimo. Las comunidades presionan al gobierno local para actuar ante la falta de acciones del MAG	2007
Mala Noche, Sámará	Conflictos sobre derechos de tierra y el agua entre la comunidad e intereses privados (usos de la tierra, contaminación, vulnerabilidad)	2002-2012
Los Chorros, Tacaes	Conflicto de intereses por el agua de los vecinos de Tacaes y el AyA por aumentar el caudal de agua de la captación del Parque Los Chorros en Grecia para llevarla a Arenas	2019

subterránea en el país la debe realizar un ente independiente al Minae, en otros países dicho ente es la figura de servicio geológico, sin embargo, este no existe en el país y las competencias de investigación las realizó el Senas hasta el año 1982 (Suarez, 1990) y luego el Senara ha continuado esta tarea hasta la actualidad.

Si bien es necesaria una actualización del marco legal en torno al recurso hídrico de manera integral, mientras esto ocurre se debe aplicar la normativa vigente y mejorar los controles en torno al aprovechamiento del agua subterránea, de lo contrario los conflictos irán en aumento. Además, deben considerarse los distintos actores sociales, usuarios del agua y los múltiples servicios que ofrece el agua subterránea, donde se incluyen: prestación de servicios (extracción de agua subterránea), regulación de servicios (capacidad de amortiguación de los acuíferos a la hora de regular el régimen de cantidad y calidad de los sistemas de aguas subterráneas), servicios de apoyo (sustento de ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas) y servicios culturales (relacionados con actividades de ocio, tradiciones, valores religiosos o espirituales asociados con determinados lugares más que con los acuíferos), (Unesco, 2022).

En vista de que las Asadas, tienen la mayor cantidad de captaciones en el país, 70 % de los manantiales captados para abastecimiento público pertenecen a las Asadas (Mora y Portuquez, 2021), es prioritario brindarles el acompañamiento técnico adecuado para garantizar la protección de sus fuentes. Las Asadas, organizaciones locales y municipios están tomando conciencia de la importancia del uso sustentable de los recursos hídricos de Costa Rica, por lo que algunos de ellos han tomado acciones para exigir al gobierno la solución de varios conflictos hídricos en las regiones del Pacífico noroeste y del Atlántico (Cuadrado, 2017).

## Uso de la tierra y el agua subterránea

En Costa Rica existen grandes desafíos en cuanto al ordenamiento del territorio y los impactos antrópicos en el agua subterránea. Foster et al. (2010) afirman que la gobernanza de las aguas subterráneas no puede abordarse de forma aislada al uso de la tierra debido a que “estas dependen en gran medida del uso de la tierra y los cambios en el uso en las áreas de recarga de acuíferos ejercen una influencia directa tanto en las tasas como en la calidad de la recarga”. El crecimiento de las ciudades intensifica el uso del agua subterránea y el desarrollo de actividades antrópicas sin la debida planificación amenazan la calidad del recurso hídrico. En Costa Rica el 51 % de la población y el 85 % del total de las industrias se ubican en la cuenca del río Grande de Tárcoles (Minaet, 2008), lo que genera una gran presión en torno al recurso hídrico y también produce descargas de aguas residuales con poco tratamiento en la cuenca hidrológica; este impacto ya se está detectando en el acuífero Colima Superior y el Barva en la zona NE de Heredia según los valores y las fuentes de nitratos estudiados por Solís et al. (2024).

Si bien la legislación vigente a nivel nacional establece que el agua es un bien de dominio público y por lo tanto el Estado debe administrarlo y protegerlo adecuadamente, el avance en la implementación de planes de ordenamiento territorial es lento; esto aunado al aumento en la demanda del agua subterránea y a la falta de implementación de zonas de protección de las fuentes de agua, ha causado conflictos y casos de contaminación de fuentes subterráneas. Según datos del INVU (2024) de los 82 cantones del país, 40 cuentan con plan regulador (48,7 %), 51 % de los planes fueron aprobados antes del 2000, mientras que 21 consideran todo el territorio del cantón; es preocupante que solo 21 cuentan con viabilidad ambiental de Setena y 4 cuentan con matriz de vulnerabilidad hidrogeológica. Mientras tanto, se siguen desarrollando distintas actividades antrópicas que afectan la explotación del agua subterránea y su calidad, ya que son una amenaza potencial para la contaminación del agua subterránea. La aplicación de la Matriz Genérica de Protección de Acuíferos aplicada por el Senara 2017-2019 causó inconformidad ya que se consideró como un gran obstáculo para el desarrollo del Ordenamiento Ambiental del Territorio en el país (Astorga, 2018), es por esta razón que se eliminó su aplicación en el año 2017 (Cuadro 2). Actualmente el Decreto N°42015-MAG -Minae-S- MIVAH establece las variables de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea y la recarga acuífera dentro de los criterios para la evaluación de los estudios de impacto ambiental.

Astorga y Arias (2002) publicaron una zonificación del territorio nacional basado en la geoaptitud, la cual aproxima la capacidad de formar acuíferos libres, tomando en cuenta las condiciones geológicas existentes considerando aspectos antrópicos, es así como identificaron que 44 % del área del país tiene un alto potencial de geoaptitud hidrogeológica y se ubica en el Valle Central y en la zona norte; según los autores el desarrollo económico desordenado, no planificado y en particular el urbano, representa un riesgo de contaminación del recurso hídrico subterráneo.

Se reconoce la importancia de la agricultura en el desarrollo económico del país, no obstante la falta de planificación y controles generan conflictos como se analizará más adelante. En el país existen 431 937,80 hectáreas cultivadas, de las cuales el 83 % corresponde con cultivos permanentes y 17 % son perennes (INEC, 2021), ambos tipos hacen uso de distintas cantidades de agroquímicos. Según Ramírez et al. (2012) el banano y la piña son los cultivos que más toneladas de ingrediente activo de plaguicidas usan en el país (2102-2058 y 1125-1710 respectivamente). De acuerdo con PNUD (2024), el uso aparente de plaguicidas en Costa Rica es de 34,45 Kg/hect. y 20 de los 22 plaguicidas más peligrosos del mundo se utilizan en Costa Rica.

González (2019) indica que ha existido un aumento en el área cultivada de piña en los últimos años y ya para el año 2017 existían 66 670 hectáreas cultivadas de piña, de las cuales un 25 % están ubicadas en zonas con ecosistemas de humedales, ubicados en la zona norte, Caribe y Pacífico sur, lo cual ya ha generado conflictos en el uso de la tierra.

## Perforación ilegal en el país

Según Adamson-Badilla y Masís (2010), existen hasta un 20 % más de los pozos concesionados que son pozos ilegales. Según datos de la CGR (2022) en el sector agropecuario existen alrededor de 8000 productores que requieren inscribir pozos ilegales. El Minae conoce la situación en torno a la actividad de perforación ilegal, el Sr. Edgar Gutiérrez, exministro del Minae declaró que en el país en ese momento podía haber unos 40 000 pozos ilegales, con lo cual duplicaban los legales (Chacón, 2019).

En los últimos 22 años se han realizado tres amnistías para legalizar pozos que se construyeron al margen de la ley, la primera fue en el año 2002, en la cual se legalizaron 256 pozos, la segunda fue en el año 2010, la cual contabilizó 380 pozos y la última se efectuó en el año 2019 (ver Cuadro 2), en el año 2021 hubo otra iniciativa similar, sin embargo, no fue aprobada debido a que la Sala Constitucional indicó que era inconstitucional (Muñoz, 2023). Los datos reportan una baja cantidad de pozos legalizados y aunque las causas se desconocen, estas deben ser analizadas, ya que pareciera que las amnistías no han logrado cumplir con su objetivo inicial.

Desde nuestra experiencia en el trabajo de campo, con cierta frecuencia se observan pozos con distintos usos, incluyendo los de consumo humano, que no tienen registros de perforación porque se construyeron de manera ilegal. Es preocupante sobre todo cuando se trata de acueductos rurales que brindan servicio a comunidades, por lo que los controles sobre la perforación en el país deben mejorarse, ya que la perforación ilegal puede poner en riesgo captaciones que sí cumplen con los requisitos establecidos, además de que se desconoce el volumen real extraído, lo que podría comprometer la disponibilidad y la calidad del recurso en el futuro, sobre todo en zonas como Guanacaste en donde existen cuencas pequeñas, donde el clima y las condiciones hidrogeológicas pueden limitar el almacenamiento del agua en el subsuelo. Además, la perforación

ilegal representa pérdidas para el Estado ya que los pozos construidos no pagan el Canon de Aprovechamiento. La Dirección de Agua es el ente responsable de regular la perforación en el país, de otorgar permisos y concesiones de aprovechamiento de acuerdo con el marco legal vigente, lamentablemente la perforación ilegal ocurre y eso evidencia la ingobernabilidad que existe hacia el agua subterránea en ese campo, este es un problema que merece especial atención.

## Gobernanza del agua subterránea en Costa Rica

De acuerdo con Undesa-UNDP-Unesco (2012), la gobernanza establece el marco correspondiente para una gestión eficaz del agua, la gestión de recursos, incluida la prestación de todos los servicios hídricos de forma socialmente responsable, ambientalmente sustentable y económicamente eficiente, y comprende los procesos de definición de políticas, formulación de objetivos, de proporcionar a las instituciones los procedimientos, los recursos, brindar seguimiento y registro, para permitir la participación de las partes interesadas y que asuman la responsabilidad de los resultados. Según Foster et al. (2010) la gobernanza se enfoca en el ejercicio de autoridad y la promoción de acciones colectivas responsables para garantizar la utilización sostenible y eficiente de las aguas subterráneas en beneficio de la humanidad y los ecosistemas dependientes.

A nivel nacional la Constitución del Mecanismo Nacional de Gobernanza del Agua, en el Decreto N°41058-Minae (Gobierno de Costa Rica, 2018), define la gobernanza como un proceso sociopolítico que involucra diferentes actores y demás entes de la sociedad, en el diseño, construcción de política pública, movilización de recursos y su participación, de esta manera, gobernantes y gobernados adquieren y están conscientes de sus derechos, obligaciones y responsabilidades en la solución de sus problemas. La gobernanza es un proceso, mientras que la gobernabilidad corresponde a un fin de la administración pública, en la aplicación y ejecución de las normas formales establecidas (Minae, 2018).

En Costa Rica, la rectoría sobre el recurso hídrico la tiene el Minae, entidad encargada de emitir políticas públicas para mejorar el aprovechamiento, protección e investigación del recurso hídrico. A través de la Dirección de Agua, el Minae “ejecuta acciones orientadas a gestionar y proteger el recurso hídrico, específicamente le compete el otorgamiento de concesiones de aprovechamiento de agua y de fuerza hidráulica, los permisos de vertidos, los dictámenes de cuerpos de agua, los permisos para realizar obras en cauce y descarga de aguas de drenaje agrícola” (Dirección de Agua, 2024). No obstante existen otras instituciones que por su ley constitutiva se les ha asignado competencias directas en cuanto a la vigilancia y el control, o sea fungen como reguladores (Senara, 2013b), por ejemplo el AyA en lo que se refiere al abastecimiento público y alcantarillado sanitario, para cumplir con este mandato, el AyA cuenta distintos departamentos, específicamente acerca del agua subterránea, esta entidad con una unidad de investigación especializada en donde trabajan 19 profesionales especializados en el campo de la Geología e Hidrogeología, lo que es una fortaleza a nivel institucional.

El AyA mediante el Reglamento de Asadas (Decreto Ejecutivo N°42582-S-Minae [Gobierno de Costa Rica, 2020b]) delega la administración local de acueductos rurales. En el caso de las Asadas, falta capacitación técnica y administrativa dirigida hacia estos entes (Cuadrado, 2017), lo cual es preocupante ya que los manantiales son las principales fuentes utilizadas en el abastecimiento por parte de estos operadores y la mayor parte de sus captaciones no cuentan con las zonas de protección delimitadas.

Senara, cuya ley constitutiva N° 6877 (Gobierno de Costa Rica, 1983) le asignó la función de “investigar, proteger y fomentar el uso de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos”. En respuesta a sus funciones el Senara cuenta con una Dirección de Investigación y Gestión Hídrica, especializada en aguas subterráneas en donde laboran 8 profesionales en hidrogeología. Foster et al. (2010) resaltan dentro de la lista de criterios para evaluar la capacidad de provisión de gobernanza de aguas subterráneas en los países, la existencia de una agencia gubernamental que sea “guardiana del recurso hídrico subterránea”, en el caso de Costa Rica dicho rol lo ha desarrollado históricamente el Senara; según los autores, esta agencia debe ubicarse en la estructura jerárquica gubernamental de tal modo que pueda interactuar al mismo nivel con otros sectores, de manera que se puedan implementar medidas en la gestión y la protección del recurso hídrico.

La Contraloría General de la República (CGR, 2009) ha indicado la necesidad de mejorar la coordinación interinstitucional para unificar criterios técnicos entre el AyA, el Senara y la Dirección de Agua, es así como se definieron las Metodologías hidrogeológicas para la evaluación del Recurso Hídrico (Cuadro 2). Dicha coordinación ha mejorado sin duda con la creación de la Comisión Técnica Interinstitucional para la gestión de los acuíferos (CTI), en el 2015 vía decreto N° 38449-Minae-MAG (Gobierno de Costa Rica, 2014), la cual tiene la finalidad de “integrar y potencializar esfuerzos para que se asignen recursos

en cada presupuesto institucional, a fin de invertir en la gestión de aguas subterráneas, particularmente en el monitoreo y los estudios que realicen las instituciones que conforman la comisión o por terceros. La CTI debe además consensuar y acordar sobre las condiciones de la perforación del subsuelo y aprovechamiento sostenible del agua y sistemas de acuíferos” (Art. 3º, Decreto N° 38449-Minae-MAG [Gobierno de Costa Rica, 2014]). La CTI está conformada por el AyA, el Senara y el Minae, este último funge como ente coordinador, estas tres instituciones han unido esfuerzos y han destinado recursos para realizar estudios conjuntos y vigilar acuíferos seleccionados, principalmente en Guanacaste (Fig. 5). Esta comisión ha establecido los caudales disponibles en distintos acuíferos costeros, con base en estudios técnicos realizados por las instituciones que integran dicha comisión, además emite criterios unificados, lo cual es un esfuerzo por mejorar la gobernabilidad del recurso hídrico en el país.

El Minae en el año 2018, establece el Mecanismo Nacional de Gobernanza del Agua vía Decreto N° 41058, el cual abre espacios como los foros regionales y nacionales del agua del grupo gobernanza del agua, no obstante, estos son no vinculantes y la conceptualización de estos espacios están más enfocados en las aguas superficiales que en las subterráneas.

El cuadro 2 resume las principales políticas, reglamentos y decretos aprobados en los últimos veinte años en el país relacionados con el uso y protección del agua subterránea. Se extrae de estos documentos que existen tres grandes temas alrededor de los cuales giran estas regulaciones: el aprovechamiento del agua subterránea mediante pozos, la regulación del uso del suelo y evaluación ambiental versus protección del agua subterránea, lo cuales intentan cubrir los vacíos existentes por la falta de gobernabilidad del recurso hídrico subterráneo, por ejemplo, la inexistencia de un reglamento de la ley de aguas, esta necesidad ha sido señalada por Astorga y Arias (2002).

La creación de la Comisión para el Manejo Integrado del Acuífero Nimboyores y Acuíferos Costeros de Santa Cruz de Guanacaste (Conimboco) y la Comisión para el Manejo Integrado de Acuíferos en el Distrito de Sardinal, Cantón de Carrillo, Guanacaste (Cuadro 2) son ejemplos de gobernanza en el país, las cuales surgieron como respuesta a los conflictos por el aprovechamiento del agua subterránea en la provincia de Guanacaste.

La creación de herramientas legales permite planificar y orientar las acciones para el uso sostenible y la protección de los acuíferos del país y por lo tanto mejorar los procesos de gestión del agua subterránea. Sin embargo, como se observa en el cuadro 2 ha habido cambios en torno a los roles de las instituciones, por lo que es pertinente evaluar los resultados y las repercusiones en el futuro de la implementación de dichos cambios en la efectividad en la gestión del agua, mejora en los servicios ofrecidos a los distintos usuarios y también en la protección del agua subterránea. Ante la necesidad de proteger el recurso hídrico y solventar estos vacíos que han generado conflictos en torno al uso del agua, la Sala Constitucional con los Votos 4790-2008 y 8892-2012 clarifica las competencias del Senara en el 2016, no obstante, con la aplicación de la Matriz Genérica de Protección de Acuíferos, el sector productivo ejerció presión, lo que culminó en la derogación de dicho instrumento y no se estableció otro en su lugar.

## Retos futuros

Los retos futuros son muchos, sin embargo, se considera que los más relevantes son en el ámbito de la investigación y la gobernanza, los cuales se resumen a continuación:

Con respecto a la investigación, los esfuerzos deben enfocarse en zonas nuevas donde se priorice según los planes de desarrollo. Además existen nuevos retos en temas de contaminación y remediación de acuíferos, por lo que es importante diversificar las investigaciones en estas temáticas. Es imprescindible continuar con la formación de profesionales con especialización formal en Hidrogeología para buscar soluciones a los problemas existentes, prevenir la extracción intensiva y la contaminación del agua subterránea que usará el país en el futuro. Esto conlleva a la articulación de esfuerzos en el sector hídrico y académico para maximizar recursos enfocados en la investigación del agua subterránea. Si bien la estimación de la recarga potencial ayuda a conocer el recurso disponible, lo ideal sería combinar distintos métodos y ampliar las redes de vigilancia en tiempo real de la variación de niveles de agua subterránea para aproximar la recarga real y la composición del agua de recarga. Otra labor de investigación que es perentoria es el estudio de acuíferos transfronterizos entre Costa Rica, Panamá y Nicaragua y su relevancia en el desarrollo humano de estas regiones y de las relaciones internacionales entre los países de la región centroamericana. El monitoreo de acuíferos debe extenderse a todo el país, donde además de medir los niveles, se deben realizar análisis de calidad del agua, con el fin de enfrentar desafíos ante el cambio climático, afectación en la recarga,

aumento de la extracción para riego y consumo, así como otros usos y fortalecer la prevención de la contaminación. Si bien los avances tecnológicos como los datos satelitales y monitoreo en tiempo real contribuyen en la vigilancia de los acuíferos del país, aún falta bastante trabajo de campo para delimitar acuíferos y su potencial en la zona norte y Atlántica del país, entre otras zonas. Es pertinente gestionar el agua subterránea como recurso estratégico en la adaptación al cambio climático.

Desde el marco legal y gobernanza, debe fortalecerse el marco vigente y aplicarse, desde una visión integral del agua, no centrada en el agua superficial como ha ocurrido. Esto conlleva reconocer el rol preponderante que tiene el agua subterránea y los servicios ecosistémicos que brinda, ya que en muchos casos existe una dependencia de los sistemas acuáticos, en especial los humedales del agua subterránea, lo cual ha sido muy poco estudiada en el país. El ordenamiento del territorio es una tarea urgente, debido a que el crecimiento desordenado genera afectación en la calidad del agua subterránea, por lo que el Estado debe gestionar procesos de gobernanza en donde se establezcan herramientas para prevenir la contaminación del agua subterránea. La CTI ha contribuido a mejorar la toma de decisiones a nivel político para mejorar la gestión del agua subterránea, las instituciones deben fortalecerse según sus competencias, a nivel gubernamental es el Senara el ente responsable de realizar investigaciones acerca de los acuíferos y su protección. Desde la parte administrativa, la Dirección de Agua debe depurar y actualizar la base de datos y trabajar en unificar la información de pozos de Senara con el fin de conocer el volumen total de agua concesionada, también debe mejorar los controles en la extracción del agua subterránea mediante macromedición para conocer el caudal real de agua extraída de los acuíferos. De lo anterior queda la labor de implementar controles a nivel regional por parte de la Dirección de Agua para eliminar la perforación ilegal en el país.

## Conclusiones y recomendaciones

El agua subterránea es la fuente principal de los usos de abastecimiento público, turístico-comercial e industrial en Costa Rica y aumenta anualmente; para otros usos como: agro-industria, agro-pecuario y riego, se reportan consumos bajos del agua subterránea, pero eso posiblemente es el reflejo del subregistro que existe por la perforación ilegal y no muestra los volúmenes que en realidad se usan. El agua subterránea es un recurso estratégico en el desarrollo del país, por lo que debe caracterizarse de manera integral y establecerse como un eje central para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En las últimas dos décadas han habido avances significativos en la investigación de algunos acuíferos del país, los estudios hidrogeológicos analizados incluyen aspectos como: la estimación de la recarga potencial, la caracterización del flujo del agua subterránea, la determinación de las propiedades hidráulicas de los acuíferos, la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, modelación del flujo del agua subterránea y con menor frecuencia se indican datos de la calidad del agua y rasgos hidrogeoquímicos e isotópicos. No obstante, la mayor parte del territorio no cuenta con estudios de detalle debido a la falta de políticas claras que reconozcan y fortalezcan el rol preponderante del agua subterránea en el desarrollo socioeconómico de la nación.

Si bien diferentes instituciones realizan investigaciones sobre el agua subterránea con distintas aplicaciones, el Senara es el ente gubernamental responsable de investigar este recurso. Resulta imprescindible unir esfuerzos entre distintas instituciones para maximizar los recursos disponibles y ampliar las zonas estudiadas. Se resalta el aporte de la academia en la caracterización del agua subterránea mediante tesis y proyectos de investigación.

Debe invertirse más recursos económicos y formar más profesionales en hidrogeología para continuar las investigaciones de los acuíferos, esto fortalecerá la toma de decisiones basada en estudios científicos que permitan tener una visión real de la dinámica del recurso en el marco del ciclo hidrológico y de la adaptación al cambio climático.

La gobernabilidad del agua subterránea en Costa Rica debe fortalecerse mediante una aplicación de la normativa vigente y la coordinación interinstitucional, lo cual ha mejorado gracias a la creación de la CTI, no obstante, los presupuestos institucionales deben adecuarse para fortalecer las investigaciones en el territorio nacional.

La falta de planificación del uso de la tierra genera conflictos asociados al uso y la calidad del agua subterránea, esto aunado a la perforación ilegal existente atenta contra la protección y la gestión del agua de manera sustentable. Es evidente que la aplicación de amnistías no es el camino para resolver esta problemática, la falta de una nueva ley de aguas no justifica los pocos controles en la perforación, la cual pone de manifiesto la falta de aplicación del marco legal vigente. Las reformas a la legislación actual deben buscar un aprovechamiento sustentable y la protección del agua, tomando en cuenta la dinámica del ciclo hidrológico, en donde se reconozca la relevancia del agua subterránea y todos los servicios que brinda.

## Agradecimientos

Este artículo es una contribución del proyecto ED-2799, Gestión y entendimiento del flujo del agua subterránea en Costa Rica, de la Vicerrectoría de Acción Social de la Universidad de Costa Rica.

## Referencias bibliográficas

- Adamson-Badilla, M., y Masís, J. (2010). *Disponibilidad del Recurso Hídrico en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Centro de Estudios Económicos y Ambientales. <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/>
- Agudelo, C. (2001). *Evaluación de las concentraciones altas de nitrato en el manantial La Libertad y su relación con el campo de pozos La Valencia, Santo Domingo de Heredia, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Alfaro, A. (2021). *Modelo numérico de los acuíferos Herradura y Jacó, cantón de Garabito, Provincia de Puntarenas, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Alpízar, R. (2014). *Modelo conceptual y aplicación de modelo numérico usando Visual Modflow del acuífero aluvial del río Tempisque en el sector Trancas, provincia de Guanacaste, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Alpízar, F. (2019). Conflictos del agua en Costa Rica de 1980 a 2017. En F. Alpízar (ed.), *Agua y poder en Costa Rica*. Centro de Investigación y Estudios Políticos UCR (pp. 17-51). CIEP-UCR.
- Alvarado, P. (2018). *Hidrogeología de la margen izquierda del río Tempisque, sector central del cantón de Liberia, Guanacaste*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Alvarado, P. (2023). *Entendimiento y simulación del flujo del agua subterránea ante diferentes escenarios climáticos y de extracción en el sector de Pinilla, Santa Cruz, Guanacaste*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Angulo, F. (2021). *Uso, manejo y gestión del agua en Costa Rica*. En Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2021. Programa Estado de la Nación.
- Araya-Quirós, C. (2017). *Caracterización hidrogeológica del área de influencia del vertedero de residuos de Golfito, Puntarenas*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Araya, M. (2020). *Movilidad del manganeso, hierro y arsénico en el agua subterránea del distrito del Amparo y alrededores, Los Chiles, Alajuela, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Arellano, F., y Vargas, A. (2001). Casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros de la península de Nicoya (Costa Rica). *Revista Geológica de América Central*, 25, 77–84. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i25.8540>
- Arellano, F. (2005). *Caracterización hidrogeológica de la zona aluvial del Río Sixaola comprendida entre Bribri y Finca Celia de Sixaola*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Aresep (2021). *Guía para solicitar la tarifa de protección del recurso hídrico y diseño del plan quinquenal*. Aresep.
- Aresep. (2022, 2 de febrero). *Aresep aprueba tarifa de protección del recurso hídrico a la Asada de Río Blanco*. <https://aresep.go.cr/noticias/aresep-aprueba-tarifa-de-proteccion-del-recurso-hidrico-asada-rio-blanco/>
- Aresep. (2023, 29 de junio). *Aresep fomenta la protección del recurso hídrico*. <https://aresep.go.cr/noticias/aresep-fomenta-proteccion-recurso-hidrico/>
- Aresep. (2024, 5 de febrero). *Asada de Río Celeste protegerá naciente de agua gracias a la Tarifa de protección al recurso hídrico*. <https://aresep.go.cr/noticias/asada-rio-celeste-protegera-naciente-de-agua-gracias-tarifa-proteccion-recurso-hidrico/>
- Arias, M., Vargas, A., y Guérin, R. (2003). Geofísica aplicada al problema de la intrusión salina en los acuíferos costeros de Costa Rica. *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos*, 8(1), 163–167. <https://aguas.igme.es/igme/publica/tiac-01/Area-II-4.pdf>
- Arias, M. (2007). La primera experiencia en la aplicación de los métodos electromagnéticos en acuíferos costeros de Costa Rica: el caso de Tamarindo, Guanacaste. *Boletín Geológico y Minero*, 118(1), 51–62.
- Arias, M., Losilla, M., y Arredondo, S. (2006). El estado del conocimiento del agua subterránea en Costa Rica. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (1), 63-73.



- Arias Fernández, M. (2018). *Potencial hidrogeológico de la parte media-baja de las microcuencas Barú y Guabo, provincias de Puntarenas y San José, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Arias Salguero, M. (2018). *Estudio de las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento público utilizadas por las Asadas en el sector de Piedades Sur de San Ramón, Costa Rica*. CICG-UCR.
- Astorga, A. (2018). *Ordenamiento Ambiental del Territorio: situación y perspectivas en Costa Rica. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2018*. Estado de la Nación.
- Astorga, A., y Arias, M. (2002). Mapa de Geoaptitud Hidrogeológica de Costa Rica: implicaciones respecto a la gestión ambiental del desarrollo. *Revista Geológica de América Central*, 29, 95-101. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i29.7778>
- Astorga, A., Fernández, J.A., Barboza, G., Campos, L., Obando, J., Aguilar, A., y Obando, L.G. (1991). Cuencas sedimentarias de Costa Rica: evolución geodinámica y potencial de hidrocarburos. *Revista Geológica de América Central*, 13, 25-59. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i13.13074>
- Banks, H. (1971). *Investigación de aguas subterráneas en tres áreas seleccionadas de Costa Rica*. Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo. Informe interno.
- Ballesteros, M., y Zeledón, J.M. (2016). *Canon de aprovechamiento de agua: 10 años invirtiendo en el recurso hídrico*. Minae.
- Belcher, W., Amer, S., Gachet, A., Silvestre, D., Ward, F., Salman, D., y Carillo, S. (2019). *Groundwater exploration and assessment in the Republic of Costa Rica*. USGS.
- Bohnenberger, O. (1968). *Un reconocimiento fotogeológico en Guanacaste*. Ed. Naciones Unidas.
- Carmona, T. (2016). *Evaluación hidrogeológica del cantón San Isidro de Heredia y su aplicación a la conservación del recurso hídrico, planificación urbana y ordenamiento territorial*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Castillo, L., Ruedert, C., Ramírez, F., Van Wendel, B., Bravo, V., y De la Cruz, E. (2012). *Plaguicidas y otros contaminantes. Investigación base. Decimotavo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. Estado de La Nación.
- Castro, L. (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a partir de métodos geofísicos y determinación del potencial hídrico en el Acuífero Aluvial Naranjito, Quepos, Puntarenas*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Castro, L. (2024, 5 de abril). *Conversatorio: protección de las captaciones de abastecimiento público* [Archivo de video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=jBdoNrFBnI4>
- Chacón, V. (2019, 6 de agosto). Gobierno legaliza pozos con polémica amnistía y sin tener recursos. *Semanario Universidad*. <https://semanariouniversidad.com/pais/gobierno-legaliza-pozos-con-polemica-amnistia-y-sin-tener-registros/>
- Chaves, M. (2016). *Estimación de los efectos en el caudal y en el nivel del agua subterránea por la excavación de los túneles de desvío Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, Siquirres, Limón, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Cherry, J. (2023). *The global groundwater crisis- a perfect storm from three directions: Poverty, Depletion And Pollution Groundwater Project, July 30, 2023*. <https://gw-project.org/about/>
- Chinchilla, J. (2022). *Modelo numérico del acuífero aluvial en la cuenca del río Uvita: una herramienta para estudiar la dinámica del flujo del agua subterránea, cantón de Osa, Provincia de Puntarenas, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Collins, J. L. (1999). *A Groundwater Resource Evaluation of a Volcanic Aquifer System near the City of Liberia, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. University of Waterloo.
- Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. (2012). *Decimotavo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. Programa Estado de la Nación.
- Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. (2014). *Vigésimo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. PEN-Conare.
- Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. (2018). *Informe estado de la nación 2018*. PEN-Conare.
- Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación (2022). *Estado de la Nación 2022*. Conare-PEN.
- Consejo Nacional de Rectores y Programa Estado de la Nación. (2023). *Estado de la Nación 2023*. Conare-PEN.
- Contraloría General de la República (CGR). (2009). *Informe sobre la gestión integral de las aguas subterráneas en las zonas costeras DFOE-PGAA-11-2009 del 17 de julio de 2009*. Contraloría General de la República, División de Fiscalización Operativa y Evaluativa. [https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs\\_cgr/2009/SIGYD\\_D\\_2009012592.pdf](https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs_cgr/2009/SIGYD_D_2009012592.pdf)

- Contraloría General de la República (CGR). (2022). *Oficio 3435 DFOE-SOS-0109 del 4 de marzo de 2022*. Contraloría General de la República, División de Fiscalización Operativa y Evaluativa. [https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs\\_cgr/2022/SIGYD\\_D/SIGYD\\_D\\_2022003882.pdf](https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs_cgr/2022/SIGYD_D/SIGYD_D_2022003882.pdf)
- Cuadrado, G. (2017). Gobernanza de aguas subterráneas, conflictos socioambientales y alternativas: experiencias en Costa Rica. *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 43, 393. <https://doi.org/10.15517/aeca.v1i1.28852>
- Defensoría de los Habitantes. (18 de junio de 2024). *2024 ha sido un año de alerta roja en crisis por agua potable*. <https://www.dhr.go.cr/index.php/mas/comunicacion/comunicados-de-prensa/defensoria-2024-ha-sido-un-ano-de-alerta-roja-en-crisis-por-agua-potable>
- Dirección de Agua. (2023a). Datos de extracción de aguas por usos para el año 2023, según Registro Nacional de Concesiones. Ministerio de Ambiente y Energía. <https://da.go.cr/descarga-de-capas-de-concesiones-y-dictámenes/>
- Dirección de Agua. (2023b). *Monitoreo de acuíferos*. <https://da.go.cr/monitoreo-de-acuíferos/>
- Dirección de Agua. (2024). *Funciones de la Dirección de Agua*. <https://da.go.cr/funciones/>
- Echandi, E. (1981). *Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Elizondo, J. (1982). *Estudio hidrogeológico con fines de riego en la margen derecha del río Tempisque*. [Informe técnico N°152]. Senas.
- Fan, G., Beck, S. L., y Wallace, T. C. (1993). The seismic source parameters of the 1991 Costa Rica Aftershock Sequence: Evidence for a transcurrent plate boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B9), 15759–15778. <https://doi.org/10.1029/93JB01557>
- Fallas, L. (2017). *Análisis de riesgo hidrogeológico del distrito central de Alajuela; interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Fernández, M. (1969). *Las unidades hidrogeológicas y los manantiales de la Vertiente Norte de la cuenca del río Virilla [Informe N°27]*. Senas.
- Fisher, D.M., Gardner, T.W., Marshall, J.S., y Montero, W. (1994). Kinematics associated with late Cenozoic deformation in central Costa Rica: Western boundary of the Panama microplate. *Geology*, 22 (3): 263–266. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0263:KAWLCD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0263:KAWLCD>2.3.CO;2)
- Foster, S., Garduño, A., Tuinhof, A., y Tovey, C. (2010). *Groundwater governance: conceptual framework for assessment of provisions and needs*. Sustainable groundwater management: contributions to policy promotion. GW-MATE, The World Bank.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'elia, M., y Paris, M. (2002). *Groundwater Quality Protection. A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. The World Bank.
- Fuentes, P. (2006). *Caracterización hidrogeológica y análisis de la vulnerabilidad del acuífero de la cuenca del Río Potrero en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- García, J. (2017). *Atenuación de contaminantes por procesos de sorción en la zona no saturada, en una parcela experimental del Valle Central de Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- García, M. (2013). *Modelación hidrogeológica del acuífero Nimboyores Guanacaste Costa Rica utilizando Modflow Premium 2012*. [Tesis de Maestría]. Universidad de Costa Rica.
- García, P. (2015). *Determinación de la disponibilidad del agua subterránea en el Sistema Acuífero Potrero y Caimital, Nicoya, Guanacaste*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Gobierno de Costa Rica. (27 de agosto de 1942). *Ley de Aguas*. Ley N° 276. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=11950&nValor3=91553&strTipM=TC#ddown](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=11950&nValor3=91553&strTipM=TC#ddown)
- Gobierno de Costa Rica. (18 de julio de 1983). *Ley de Creación de Servicio Nacional de Aguas, Riego y Avenamiento (Senara)*. N° 6877. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=9209&nValor3=130353&param2=1&strTipM=TC&lResultado=2&strSim=simp](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=9209&nValor3=130353&param2=1&strTipM=TC&lResultado=2&strSim=simp)
- Gobierno de Costa Rica. (16 de marzo de 1996). *Ley Forestal*. Ley N° 7575. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=41661&nValor3=131992&param2=1&strTipM=TC&lResultado=10&strSim=simp](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=41661&nValor3=131992&param2=1&strTipM=TC&lResultado=10&strSim=simp)

- Gobierno de Costa Rica. (19 de noviembre de 2008). *Aprobación Contrato de Préstamo entre República de Costa Rica y Banco Centroamericano de Integración Económica BCIE (Contrato de Préstamo N° 1709) para la ejecución del Programa de Gestión Integrada de Recursos Hídricos*. Ley N° 8685. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=64545&nValor3=74937&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=64545&nValor3=74937&strTipM=TC)
- Gobierno de Costa Rica. (21 de enero de 2014). *Creación de Comisión Técnica Interinstitucional para la Gestión de Acuíferos*. N° 38449-Minae-MAG. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=77442&nValor3=0&strTipM=TC#ddown](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=77442&nValor3=0&strTipM=TC#ddown)
- Gobierno de Costa Rica. (12 de enero de 2015). *Reglamento para la calidad del Agua Potable*. N°38924-S. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC)
- Gobierno de Costa Rica. (12 de marzo de 2018). *Constitución del Mecanismo Nacional de Gobernanza del Agua*. N°41058-Minae. [https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2018/05/07/ALCA92\\_07\\_05\\_2018.pdf](https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2018/05/07/ALCA92_07_05_2018.pdf)
- Gobierno de Costa Rica. (5 de julio 2020a). *Reconocer y garantizar el derecho humano de acceso al agua, reforma Constitución Política*. Ley N°9849. [https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2020/07/02/COMP\\_02\\_07\\_2020.html](https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2020/07/02/COMP_02_07_2020.html)
- Gobierno de Costa Rica. (11 de agosto de 2020b). *Reglamento de las Asociaciones Administradoras de Sistema de Acueductos y Alcantarillados comunales*. N° 42582-S-Minae. [https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2020/09/04/ALCA233\\_04\\_09\\_2020.pdf](https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2020/09/04/ALCA233_04_09_2020.pdf)
- Gómez, A. (1993). *Estudio de recarga y contaminación a acuíferos con énfasis en el Valle del río Tempisque usando técnicas isotópicas*. [Informe Interno Senara, Proyecto ARCAL XIII RLA/08/14]. Agencia Internacional de Energía Atómica.
- González, M. (2014). *Aplicación de metodologías para la delimitación de zonas de protección de nacientes: casos Rosario y San Miguel, Naranjo de Alajuela*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- González, M. (2017). *Determinación de la interfase agua dulce - agua salada en el acuífero aluvial de Puerto Jiménez, Puntarenas, Pacífico Sur*. [Tesis de Maestría]. Universidad de Costa Rica.
- González, V. (2019). La Piña en Costa Rica: Ubicando conflictos ambientales en Áreas Silvestres Protegidas y Ecosistemas de Humedal. En Programa Estado de la Nación (ed.), *Informe Estado de la Nación 2019* (pp. 1-15). <https://estadonacion.or.cr/wp-content/uploads/2019/12/Gonzalez-V.-2019.-Pin%CC%83a.pdf>
- Guzmán, A. (2006). *Estudio de contaminación por hidrocarburos tipo BTEX, en el plantel de RECOPE, Moín Limón*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Healy, W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press.
- Hidalgo, H., Springer, M., Astorga, Y., Gómez, E., Vargas, I., y Meléndez, E. (2020). *Water quality in Costa Rica. Water Quality in the Americas Risks and Opportunities*. IANAS.
- IMTA. (2008). *Elaboración de balances hídricos por cuencas hidrográficas y propuesta de Modernización de las Redes de Medición en Costa Rica*. Minae, BID. <https://da.go.cr/wp-content/uploads/2016/07/>
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). (1995). *Fluctuaciones del nivel del agua en los acuíferos lávicos del Valle Central. 1974-1975*. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Departamento de Estudios Básicos
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). (2016). *Política Nacional de Agua Potable de Costa Rica 2017 – 2030*. Comisión Interinstitucional. AyA.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2021). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. INEC.
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU). (2024). *Planes Reguladores*. <https://www.invu.go.cr/planes-reguladores>
- Losilla, M., y Rodríguez, H. (1978). *Condiciones de recarga y descarga del acuífero Colima en el área del campo de pozos de Santo Domingo*. [Informe Técnico N°102]. Senas.
- Losilla, M., Rodríguez, H., Schosinsky, G., Stimson, J., y Bethune, D. (2001). *Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central*. Ed. Universidad de Costa Rica.
- Madrigal-Solís, H., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo-Pérez, I., Fonseca-Sánchez, A., Calderón-Sánchez, H., Quesada-Hernández, L., y Gómez-Cruz, A. (2022). Discriminant model and hydrogeochemical processes for characterizing preferential flow paths in four interconnected volcanic aquifers in Costa Rica. *Hydrogeology Journal*, 30(8), 2315–2340. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02557-7>

- Madrigal-Solis, H., Vadillo-Perez, I., Jimenez-Gavilan, P., Fonseca-Sanchez, A., Quesada-Hernandez, L., Calderon-Sanchez, H., Gomez-Cruz, A., Herrera-Murillo, J., y Perez-Salazar, R. (2024). A multidisciplinary approach using hydrogeochemistry,  $\delta^{15}\text{NNO}_3$  isotopes, land use, and statistical tools in evaluating nitrate pollution sources and biochemical processes in Costa Rican volcanic aquifers. *Science of the Total Environment*, 951(174996). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174996>
- Miller, R. (2024). *Estimación de la recarga acuífera y construcción del modelo hidrogeológico conceptual del sector noreste de Nandayure, Guanacaste*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (Minaet). (2008). *Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. Minaet- BID.
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (Minaet). (2009). *Política Hídrica Nacional*. <https://da.go.cr/wp-content/uploads/2018/05/Pol%C3%ADtica-H%C3%ADrica-Nacional.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Energía (Minae). (2024). *Simastir*. <https://da.go.cr/simastir/>
- Mollinedo, N. (2013). *Investigación hidrogeológica para determinar el origen del arsénico en aguas para consumo humano en la región noroeste de Aguas Zarcas, San Carlos, Alajuela, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Monge, M. (2015). *Estudio Hidrogeológico y Balance Hídrico de los acuíferos de Playa Potrero y Playa Brasilito, Santa Cruz, Guanacaste*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Monge, M. (2016). *Vulnerabilidad del Acuífero Potrero-Brasilito*. [Escala 1:50 000]. Senara. [https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterraneeas/Zonas\\_Hidricas\\_Especiales.aspx](https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterraneeas/Zonas_Hidricas_Especiales.aspx)
- Mora, D., y Portuquez, C. (2021). Agua para el consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2020: brechas en tiempos de pandemia. AyA. [https://www.aya.go.cr/transparenciainst/rendicion\\_cuentas/planesespecificossectorial/](https://www.aya.go.cr/transparenciainst/rendicion_cuentas/planesespecificossectorial/)
- Morales, R. (2014). *Propuesta metodológica para el análisis del riesgo por contaminación de plaguicidas en la cuenca del Río San Blas, Guanacaste*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Montero, W. (1994). Neotectonics and related stress distribution in a subduction-collisional zone: Costa Rica. *Profil*, 7, 125-141.
- Muñoz, D. (29 de marzo de 2023). Sala Cuarta: proyecto para dar amnistía a productores con pozos ilegales es inconstitucional. *Semanario Universidad*. <https://semanariouniversidad.com/pais/sala-iv-proyecto-para-dar-ammistia-a-productores-con-pozos-ilegales-es-inconstitucional/>
- Murillo, D., Da Rosa, F., y Hindi, C. E. (2007). Identificação da zona de dispersão salina com aplicação dos métodos eléctrico e eletromagnético no domínio da frequência no acuífero costeiro de playa Panamá, Costa Rica. *Águas Subterrâneas*, 21(1), 35–50. <https://doi.org/10.14295/RAS.V21I1.16165>
- Murillo, D. (2008). Aplicación ambiental del método de resistividad eléctrica en el modelado del acuífero costero en playa Panamá, Guanacaste, Gosta Rica. *Revista Geológica de América Central*, 38, 21-31. <https://doi.org/10.15517/RGAC.V0I38.4214>
- Murillo, J. (2017). *Modelación numérica del acuífero costero Palmar-Cortés, bajo diferentes escenarios hidrológicos*. [Tesis de Maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Nemus y Senara. (2016). *Evaluación y propuesta de la explotación de las aguas subterráneas utilizando modelación hidrogeológica y numérica del Valle Central de Costa Rica, América Central*. [Informe interno]. Senara.
- Obando, A. F. (2023). *Caracterización hidrogeológica del Sistema Kárstico Gabinarraca-Menonitas-La Higuera en la cuenca de la quebrada El Túnel, Venado de San Carlos, Alajuela, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Obando, A. F. (2017). *Modelo hidrogeológico conceptual de las cuencas de los ríos Reventado y Toyogres, provincia de Cartago, Costa Rica*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Organización de la Naciones Unidas (ONU). (1975). *Investigaciones de aguas subterráneas en zonas seleccionadas, Costa Rica*. [Informe técnico]. Naciones Unidas.
- Orozco, E. (2014). *Modelo numérico del acuífero de la margen derecha del Río Tempisque, desde Monte Galán hasta Filadelfia, Guanacaste, Costa Rica*. [Tesis de Maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Orozco-Gutiérrez, J. (2019). Clasificación de potenciales fuentes de abastecimiento subterráneas y subsuperficiales en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 32(10), 138–146. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i10.4887>

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2024). *Uso aparente de plaguicidas en la agricultura de Costa Rica*. <https://impactoplaguicidas.cr/>
- Ramírez-Cover, A. (2007). Conflictos socioambientales y recursos hídricos en Guanacaste; una descripción desde el cambio en el estilo de desarrollo (1997-2006). *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 33-34, 359-385.
- Ramírez, F; Bravo, V., y de la Cruz, E. (2012). *Importación y uso de plaguicidas en Costa Rica: periodo 2006-2012*. Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas, Universidad Nacional.
- 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. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i27.7804>
- Ramírez, R. (2014). *Recarga y extracción hídrica de los acuíferos Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- 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.
- Ramos, V. (2024, 5 de abril). Conversatorio: Protección de las captaciones de abastecimiento público. [Archivo de video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=jBdoNrFBnI4>
- Ramos, V. (2005). *Estudio hidrogeológico y vulnerabilidad del Acuífero Moín, Limón*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Ramos, V., Morales, R., Alfaro, A. (2010). Remediación por contaminación con hidrocarburos en un acuífero colgado, caso del pozo AB-1089. *Hidrogenesis*, 8(2), 31-40.
- Ramos, V., Corrales, C., Zúñiga, M., Alpizar, M., Vargas, I., Ramírez, R., y Barrantes, A. (2014). *Investigación geológica hidrogeológica, e hidrogeoquímica sobre el origen del arsénico en la zona de Cañas-Bagaces y alrededores*. Comisión Científica del origen del arsénico. [Informe interno]. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), Escuela Centroamericana de Geología, Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental (CICA), Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (Senara), Dirección de Aguas (DA-Minae).
- Reynolds-Vargas, J., Fraile-Merino, J., y Hirata, R. (2006). Trends in nitrate concentrations and determination of its origin using stable isotopes ( $^{18}\text{O}$  and  $^{15}\text{N}$ ) in groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 35(5), 229–236. <https://doi.org/10.1579/05-R-046R1.1>
- RTI. (2019). *Proyecto USGS Minae*. [Archivo de video]. Youtube. [https://www.youtube.com/watch?v=VaQxi3VjKss&ab\\_channel=DirecciondeAgua](https://www.youtube.com/watch?v=VaQxi3VjKss&ab_channel=DirecciondeAgua)
- Ruepert, C., Castillo, L., Bravo, V., y Fallas, J. (2005). *Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica*. Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET), Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre (Icomvis), Escuela de Ciencias Ambientales Universidad Nacional (Edeca-UNA). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35300.99205>
- Sala Constitucional (16 de julio de 2024). *Sala Constitucional declara con lugar 7 recursos de amparo a favor de vecinos que han reclamado por faltante de agua potable*. <https://salaconstitucional.poder-judicial.go.cr/index.php/component/content/article/72-comunicados/641-sala-constitucional-declara-con-lugar-7-recursos-de-amparo-a-favor-de-vecinos-que-han-reclamado-por-faltante-de-agua-potable?Itemid=437>
- Santamaría, R. (2023). *Presencia de hierro y manganeso en aguas subterráneas en Esparza y Orotina*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34–35, 13–30. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>
- Senara (s/f-a). *Mapas de vulnerabilidad*. [https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Mapas\\_Vulnerabilidad.aspx](https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Mapas_Vulnerabilidad.aspx)
- Senara (s/f-b). *Mapa de vulnerabilidad Acuífero Nimboyores*. [Escala 1:50 000]. Senara. [https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas\\_Hidricas\\_Especiales.aspx](https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas_Hidricas_Especiales.aspx)
- Senara (s/f-c). *Mapa del Acuífero Sardinal*. [Escala 1:50 000]. Senara. [https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas\\_Hidricas\\_Especiales.aspx](https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas_Hidricas_Especiales.aspx)
- Senara-BGS. (1988). *Continuación de las investigaciones hidrogeológicas en el Valle Central de Costa Rica*. [Informe final]. Servicio Nacional de Aguas subterráneas, Riego y Avenamiento /British Geological Service. Senara.
- Senara. (1992). *Mapa hidrogeológico de la península de Nicoya*. [Escala 1: 250 000]. Dirección de Aguas y Estudios Básicos del Senara.

- Senara-BCIE-IICA. (2005). Programa de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (PRO-GIRH-Senara). [Informe principal]. Senara.
- Senara. (2007). Mapa de vulnerabilidad acuífero Mala Noche, Sámara. [Escala 1:50 000]. Senara. [https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas\\_Hidricas\\_Especiales.aspx](https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas_Hidricas_Especiales.aspx)
- Senara. (2012). Perforación de pozos en el Valle Central. [Circular DIGH-CIR-004-2012]. Senara.
- Senara. (2013a). Mapa unificado de Zonas de Reserva del Valle Central. Senara. [https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas\\_Hidricas\\_Especiales.aspx](https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas_Hidricas_Especiales.aspx)
- Senara. (2013b). La protección jurídica de los recursos hídricos. *Boletín Jurídico*, 1(1). [https://www.senara.or.cr/acerca\\_del\\_senara/direcciones/direccion\\_juridica/boletin\\_juridico/boletin%20agua.pdf](https://www.senara.or.cr/acerca_del_senara/direcciones/direccion_juridica/boletin_juridico/boletin%20agua.pdf)
- Senara. (2016a). *Mapa de vulnerabilidad a la contaminación Acuífero Huacas-Tamarindo*. [Escala 1:50 000]. Senara. [https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas\\_Hidricas\\_Especiales.aspx](https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas_Hidricas_Especiales.aspx)
- Senara. (2016b). Mapa del Acuífero de Playa Hermosa, Panamá, El Coco y Ocotol. Senara. [https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas\\_Hidricas\\_Especiales.aspx](https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterranas/Zonas_Hidricas_Especiales.aspx)
- Senara. (2017). *Mapa Zona de restricción a la perforación Acuífero Playa Agujas-Quebrada Mantas*. [Escala 1:50 000]. Senara.
- Solano, C. (2021). *Geoquímica Ambiental de las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y parte de Barranca, provincias de Alajuela y Puntarenas, Costa Rica*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Solano y Villalobos. (s/f). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>
- Suarez, A. (1990). *Proyecto de investigación de aguas subterráneas en tres áreas seleccionadas de Costa Rica*. [Manuscrito inédito]. Documento en posesión de Ingrid Vargas-Azofeifa.
- Suarez, A. (1994). *Perforación para la explotación de aguas subterráneas*. En P. Denyer y S. Kussmaul (eds.), *Atlas geológico del Gran Área Metropolitana* (pp. 211-218). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- TAHAL. (1990). *Plan maestro de abastecimiento de agua potable de la Gran Área Metropolitana. Tomo III. Aspectos Hidrológicos e Hidrogeológicos*. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Torres, N. (2020). *Determinación del potencial acuífero de las cuencas costeras de la zona sur del Cantón de Nandayure, Guanacaste, Costa Rica*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Undesa, UNDP, y Unesco. (2012). *Governance and development. Thematic Think Piece. Un system task team on the post 2015 un development agenda*. [https://www.un.org/millenniumgoals/pdf/Think%20Pieces/7\\_governance.pdf](https://www.un.org/millenniumgoals/pdf/Think%20Pieces/7_governance.pdf)
- Unesco. (2006). *Evaluación de los recursos hídricos Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas*. [Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4]. Unesco.
- Unesco. (2022). *Aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible*. [Resumen ejecutivo]. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022. Unesco.
- Valenciano, M., y Rojas, J. (2020). Agua en Disputa. *Diálogos, Revista Electrónica de Historia*, 21(2), 38-65.
- Vargas, A. (2000). Acuíferos. En P. Denyer y S. Kussmaul (eds.), *Geología de Costa Rica* (pp. 425-441). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Vargas, I. (2009). *Estudio para la delimitación de zonas de protección de los pozos de abastecimiento público*. Municipalidad de Belén.
- Vargas, I. (ed.). (2013). *Manejo sostenible de la zona norte del acuífero Tempisque*. [Informe final]. Vicerrectoría de Investigación, Escuela Centroamericana de Geología, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, UCR. Senara, IAEA.
- Vargas, I. (ed.). (2016). *Propuesta del modelo hidrogeológico conceptual para la estimación de la disponibilidad de agua subterránea y análisis de la vulnerabilidad de los acuíferos en la zona oeste del Valle Central, cuenca del río Grande, Alajuela*. [Informe final]. Vicerrectoría de Investigación. Escuela Centroamericana de Geología, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, UCR, Senara, IAEA.

- Vargas, J.D. (2022). *Modelación numérica de los acuíferos costeros de Playa Potrero y Playa Brasilito, Santa Cruz de Guanacaste*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Vásquez, M. (2005). *Evaluación del potencial hidrogeológico del acuífero La Bomba, cuenca del río Banano, Limón, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Zúñiga, H. (2006). *Caracterización hidrogeológica del Acuífero Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Zúñiga, M. (2021). *Análisis del potencial hídrico subterráneo de la cuenca hidrográfica del río Cañas*. [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.