



Universidad[®]
Católica
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

ce centro
editorial

Riesgo de contaminación de acuíferos asociado a actividades productivas

Autores

Ángela María Alzate Álvarez • Erika Juliana Aldana Arcila • Paola Alejandra Vásquez Cardona • Diana Marcela Agudelo Morales • Mariana Llano Manjarrés • Lucerito Ramírez Sanabria • Gloria Yaneth Flórez Yepes • Luis Alberto Vargas Marín

Catalogación en la fuente

Riesgo de contaminación de acuíferos asociados a actividades productivas /
Ángela María Alzate Álvarez [y otros siete]. Manizales : Centro Editorial Universidad
Católica de Manizales, 2024.

73 páginas: figuras, tablas
Incluye: Referencias Bibliográficas.
ISBN: 978-628-7622-16-6

1. Acuíferos. 2. Aguas subterráneas. 3. Aguas subterráneas.

CDD 627

BIBLIOTECA UCM



Copyright© 2024

Universidad Católica de Manizales

Autores: Ángela María Alzate Álvarez, Erika Juliana Aldana Arcila, Paola Alejandra Vásquez Cardona, Diana Marcela Agudelo Morales, Mariana Llano Manjarrés, Lucerito Ramírez Sanabria, Gloria Yaneth Flórez Yepes, Luis Alberto Vargas Marín

Editor: Jacobo Rivera Tejada

Corrección de estilo: Laura Marín Castro - Centro Editorial UCM

Diseño: Melissa Zuluaga Hernández - Unidad de Marca

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en sistema recuperable o transmitida en ninguna forma por medios electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros, sin la previa autorización por escrito del Centro Editorial de la Universidad Católica de Manizales y de los autores. Los conceptos expresados en este documento son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente corresponden con los de la Universidad Católica de Manizales. Se da cumplimiento al Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 de 1995, el 2150 de 1995, el 358 de 2000, la Ley 1379 de 2010, y en el Decreto 149 de 2024.

©Centro Editorial Universidad Católica de Manizales

Carrera 23 n.º 60-63

<http://www.ucm.edu.co/centro-editorial/>

centroeditorialucm@ucm.edu.co

Manizales - Caldas

Hecho en Manizales, Caldas · Colombia

Contenido

Introducción	8
Capítulo 1. Contexto, importancia, marco normativo y métodos asociados a los acuíferos	11
Contexto general	11
Los acuíferos y su importancia	13
Aspectos normativos asociados a los acuíferos	15
Algunos modelos utilizados para el análisis de contaminación de acuíferos	17
Modelo DRASTIC	17
Modelo MODFLOW	18
Modelo MT3DMS	18
Modelo PHREEQC	19
Modelo SUTRA	19
Modelo PEST	20
Capítulo 2. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo de los acuíferos	21
Contexto nacional e internacional	21
En Colombia	24
Amenazas contaminantes para los acuíferos	26
Vulnerabilidad de los acuíferos	28
Riesgo de los acuíferos	29

Capítulo 3. Caso: riesgo de contaminación asociado a las actividades productivas de los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda30
Área de estudio31
Acuífero Santágueda (km 41)	31
Acuífero río Risaralda	33
Aspectos metodológicos para determinar el riesgo de contaminación de los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda	35
Aspectos metodológicos para el método POSH	37
Análisis de los cultivos que generan tensiones en la zona de estudio	44
Análisis de la amenaza de los diferentes sistemas productivos en los acuíferos	45
Categorías de cargas contaminantes	46
Evaluación de la amenaza	49
Evaluación del riesgo.	55
Reflexiones y consideraciones finales59
Referencias64
Sobre los autores73

Lista de figuras

Figura 1. Localización de los municipios y del acuífero Santágueda (km 41)	32
Figura 2. Localización de los municipios y del acuífero río Risaralda	34
Figura 3. Metodología de evaluación del riesgo	35
Figura 4. Clasificación de las categorías en gráficos: clase, intensidad, modo y duración	47
Figura 5. Evaluación de la amenaza por producción agrícola para el acuífero Santágueda (km 41)	50
Figura 6. Evaluación de la amenaza por producción agrícola para el acuífero río Risaralda	51
Figura 7. Evaluación de la amenaza por actividad pecuaria porcícola para el acuífero Santágueda (km 41)	53
Figura 8. Evaluación de la amenaza por actividad pecuaria porcícola para el acuífero río Risaralda	54
Figura 9. Evaluación del riesgo por producción agrícola para el acuífero Santágueda (km 41)	55
Figura 10. Evaluación del riesgo por producción agrícola para el acuífero río Risaralda	56
Figura 11. Evaluación del riesgo por actividad pecuaria porcícola para el acuífero Santágueda (km 41)	57
Figura 12. Evaluación del riesgo por actividad pecuaria porcícola para el acuífero río Risaralda	58

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Metodología para la clasificación de categorías de cargas contaminantes</i>	39
Tabla 2. <i>Clasificación de categorías de cargas contaminantes asociadas a la producción agrícola</i>	40
Tabla 3. <i>Matriz de interacción para determinar el riesgo de contaminación del agua subterránea</i>	42
Tabla 4. <i>Matriz de riesgo para referenciar los valores cuantitativos en ArcGIS.</i>	43
Tabla 5. <i>Rangos establecidos para la clasificación del riesgo</i>	43
Tabla 6. <i>Clasificación de la amenaza según la puntuación de la evaluación</i>	49
Tabla 7. <i>Clasificación de la amenaza según la puntuación de la evaluación</i>	52

Introducción

El agua cumple un papel fundamental en el bienestar humano. Entre otras funciones, resulta esencial para el equilibrio biológico y la armonía de los ecosistemas. A nivel global, fuentes como pozos, manantiales y aljibes abastecen de agua a ciudades, cultivos, ganado e industrias. No obstante, la explotación excesiva de este recurso básico ha derivado en la escasez hídrica, el agotamiento de recursos, la contaminación de aguas superficiales, la subsidencia del suelo, la contaminación de los acuíferos y el deterioro de las reservas subterráneas. Cabe destacar que el agua subterránea constituye aproximadamente el 99 % del agua dulce en estado líquido en nuestro planeta, representa la mitad del volumen extraído para consumo humano y contribuye con el 25 % del total de agua utilizada en actividades de riego (Organización de las Naciones Unidas, 2022). Lo anterior explica la importancia de este recurso para las poblaciones y ecosistemas urbanos y rurales que carecen de agua dulce superficial.

El agua subterránea, como parte del ciclo hidrológico terrestre, recarga continuamente los acuíferos a partir de la infiltración y percolación profunda por gravedad del agua en el subsuelo. Además, alimenta los acuíferos, conocidos como unidades hidrogeológicas que permiten el ingreso, transmisión y almacenamiento de agua posterior a un evento de precipitación (MinAmbiente, 2014).

Bolaños & Betancur (2018) resumen la fase subterránea del ciclo hidrológico en entradas, almacenamiento y salidas. Las entradas dependen principalmente de las precipitaciones, la infiltración y la pérdida por evapotranspiración. El almacenamiento corresponde a la diferencia de las entradas y salidas o la recarga y la descarga, que dependen de las propiedades específicas del acuífero, como su tamaño y tipo. Las salidas son la resta de las entradas y el almacenamiento, las cuales son representadas por el caudal directo o superficial producto de la saturación del suelo por un evento de precipitaciones o por el caudal base que se libera de forma más lenta y gradual, días después. Vélez-Otálvaro *et al.* (2011) indican que la transmisión del agua en el subsuelo depende de las propiedades del suelo, como su porosidad, la cual está representada por los vacíos donde se deposita el agua y la conexión entre los mismos que permite la circulación del agua con facilidad, entendida como la permeabilidad o conductividad hidráulica.

La contaminación del recurso hídrico —que consiste en la alteración de los factores biológicos, físicos y químicos— se da principalmente por los vertimientos que no cumplen con los parámetros

permisibles tanto para los cuerpos de agua superficiales como para las aguas subterráneas, en mayor medida en cuencas hidrográficas donde hay mayores asentamientos humanos, lo cual genera un alto estrés hídrico (IDEAM, 2019). Las interacciones entre la calidad del agua subterránea y la agricultura, que ocurren en los sistemas hidrológicos, son complejas y múltiples. Los suelos agrícolas en las áreas periurbanas son importantes para el suministro de alimentos; sin embargo, la contaminación de las aguas subterráneas está aumentando como resultado de una intensificación significativa de la producción agrícola (Pacheco-Ávila *et al.*, 2004; Pérez-Ceballos & Pacheco-Ávila, 2004; Arizabalo & Díaz, 1991). Durante los últimos 50 años, ha habido un enorme aumento en la producción de alimentos en muchos países debido al mayor uso del riego. Gran parte de esta agua de riego se ha extraído del agua subterránea a medida que las personas se dieron cuenta de las ventajas de aumentar la productividad del riego oportuno y la seguridad de la aplicación (Morris *et al.* 2003).

De igual manera, la porcicultura es una actividad productiva que genera grandes volúmenes de aguas residuales no domésticas, principalmente de la limpieza de las cocheras. De acuerdo con la estrategia planteada por Porkcolombia (Fondo Nacional para la Porcicultura), las aguas residuales derivadas de la actividad productiva son utilizadas como fertilizantes agrícolas, para lo cual se diseña un plan de fertilización que queda sujeto únicamente a la supervisión por parte del porcicultor. La manera en la que se desarrolla esta actividad, sin control ni implementación de sistemas de tratamientos de aguas residuales, le da el carácter de actividad de alto impacto frente a la contaminación de los acuíferos (Noreña, Osorio & Gómez, 2016).

Debido a que los acuíferos poseen propiedades que favorecen la percolación y almacenamiento de agua subterránea, es necesario monitorearlos a través de diferentes métodos con el apoyo de procesos de gobernanza para gestionar adecuadamente el recurso hídrico y disminuir el riesgo de afectar la salud a causa de la contaminación (Akber *et al.*, 2020). Otros problemas identificados en los acuíferos, específicamente que alteran la calidad del agua, son la contaminación de la cabecera del pozo, la intrusión salina (en acuíferos costeros) y la contaminación natural a partir de la evolución química del agua y la solución de minerales (Foster *et al.*, 2002).

La calidad del agua subterránea se ha vuelto una gran preocupación a nivel mundial en las últimas décadas, especialmente en países donde es fundamental para el abastecimiento de las poblaciones, entre ellos: China, India, Estados Unidos y la Amazonía (Qiu, 2010; Yu, 2011; Grinshpan *et al.*, 2021; Jarrín, *et al.* 2017). Zhang, Xu & Qian (2020) realizaron una investigación en la cuenca hidrográfica de Guanzhong en China, la cual arrojó información esencial para la protección y el manejo del agua subterránea local, y aportó al desarrollo sostenible del agua potable de la zona, generando

una relación armoniosa entre la sociedad y el medio ambiente. Se pudo determinar cuáles eran las actividades que estaban aportando contaminantes al agua subterránea y los mayores aportantes de concentraciones de nitrógeno y fluoruro por el uso de fertilizantes.

Existen diferentes métodos para evaluar el riesgo de contaminación de los acuíferos. En el caso de Costa Rica, se elaboró un mapa de carga contaminante en el sector norte del acuífero Barva a partir de la metodología POSH, para posteriormente generar el mapa de riesgo de contaminación (Madrigal *et al.*, 2014). Este método se ha empleado en España, Brasil, México y Argentina (Banda & Ruiz de Galarreta, 2002; González, López-Vera, Gómez & Lacalle-Pareja, 2006; González, 2008; Oliveira & Guimarães, 2010). La amenaza del acuífero por contaminación se conoce una vez se identifican y caracterizan las fuentes potenciales de contaminación, de las cuales se debe conocer la clase, concentración, el volumen, el modo de disposición del suelo y el tiempo de aplicación de la carga contaminante (Madrigal *et al.*, 2014).

En Colombia, Gaviria & Betancur (2005) realizaron una caracterización de cargas contaminantes a los acuíferos libres del bajo Cauca Antioqueño a partir de la metodología de Foster e Hirata del año 2002, para así evaluar el riesgo de contaminación de los acuíferos. Este estudio ha sido referente para el desarrollo de tesis de grado e investigaciones relacionadas con el tema, como es el caso de Agudelo & Sepúlveda (2017), los cuales identificaron las amenazas antrópicas y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en la zona de expansión occidental del municipio de Pereira, para así evaluar el riesgo como herramienta para el manejo integrado de los recursos hídricos (Agudelo-Moreno *et al.*, 2020).

Este libro producto de investigación tiene como objetivo principal abordar los temas mencionados relacionados con el agua subterránea y los acuíferos, su riesgo de contaminación y mostrar los resultados de una investigación. El libro se compone de tres capítulos. El primero está enfocado en las generalidades de la importancia de los acuíferos, se hace un recorrido para analizar los factores determinantes en la contaminación de los acuíferos y se revisan diferentes antecedentes como estudios precedentes asociados y algunos métodos utilizados para el análisis de los acuíferos. El segundo capítulo aborda el contexto internacional y nacional alrededor de estudios asociados a acuíferos y describe los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, y los métodos para su determinación. En el tercer capítulo se expone el proceso metodológico para llevar a cabo el análisis en un caso de estudio en el sector de Santágueda (km 41) y río Risaralda donde, además, se plantean los análisis realizados frente a los sistemas productivos existentes y las afectaciones que causan a los acuíferos de la zona de estudio.

Capítulo 1.

Contexto, importancia, marco normativo y métodos asociados a los acuíferos

Contexto general

El 70 % del planeta se encuentra cubierto por agua, del cual el 97 % corresponde a agua salada y el 3 % restante a agua dulce. De ese 3 %, el 2 % está en los glaciares, la nieve o el hielo; el 1 % está en las aguas superficiales y subterráneas, y menos del 1 % está disponible para el consumo humano y el funcionamiento de los ecosistemas (Pouleurs, 2021). Históricamente, los asentamientos humanos se han desarrollado cerca de un cuerpo de agua, por lo cual la relación agua-sociedad se ha naturalizado entre generaciones. La preocupación por obtener agua de calidad para las diferentes actividades humanas, cómo evacuar las aguas residuales y evitar enfermedades persiste hasta la actualidad.

Desde tiempos remotos la humanidad ha reconocido su valor, como se evidencia en los primeros asentamientos urbanos alrededor del año 3500 a. C. en Uruk, Babilonia (la actual Irak), que ya contaban con sistemas de abastecimiento de agua. Civilizaciones como los griegos —con figuras como Eupalinos o Tales de Mileto— y los romanos —con sus grandiosos acueductos y la famosa Cloaca Máxima— aprovecharon el agua para construir obras arquitectónicas y baños públicos representativos para la ciudad. Los árabes, por su parte, establecieron normas hídricas que influyeron en el uso y gestión del agua. Posteriormente, en el Renacimiento, el agua desempeñó un papel fundamental en el crecimiento demográfico y el aumento de la población en las ciudades-Estado italianas (Argudo, 2019).

El aumento de la población en todo el mundo y el cambio hacia modelos económicos que demandan un mayor consumo de recursos han dado como resultado un dramático incremento del uso de agua dulce a nivel global. Las extracciones de agua dulce para fines agrícolas, industriales y municipales se han multiplicado casi seis veces desde el año 1900. El consumo global de agua dulce se puede dividir por regiones: las naciones de la OCDE, los países BRICS (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica) y el resto del mundo (ROW). A pesar del incremento absoluto en el uso de agua dulce a lo largo de este período, la distribución entre las regiones ha permanecido relativamente constante en el último siglo. En la actualidad, los países de la OCDE continúan utilizando aproximadamente entre el 20 % y el 25 % del total, mientras que los países BRICS se destacan como los mayores consumidores al abarcar aproximadamente el 45 % del uso global. El ROW sigue representando entre el 30 % y el 33 % restante (Ritchie & Roser, 2015).

El incremento de la población, el aumento de los ingresos y la expansión urbana se unen para generar una creciente demanda de agua, al tiempo que el suministro de este recurso se vuelve cada vez más impredecible y sujeto a incertidumbre. En este sentido, la escasez de agua se está convirtiendo en un problema crítico debido al estrés hídrico local y a la creciente contaminación del agua dulce que se está propagando con rapidez (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

A nivel global, se estima que los recursos hídricos renovables provenientes de ríos y acuíferos alcanzan los 44.000 km³/año. Sin embargo, las extracciones en diversos sectores ya rebasan los 4.000 km³/año y representan aproximadamente el 10 % de dichos recursos. Las repercusiones locales derivadas de la escasez física del agua y la contaminación de las fuentes de agua dulce se expanden y agudizan a un ritmo preocupante. En muchos casos, la disminución de los niveles freáticos se erige como el primer indicio de escasez, asociado al incremento en las extracciones. La explotación de aguas subterráneas se encuentra considerablemente restringida, dado que la mayoría de los acuíferos continentales principales y las fértiles llanuras costeras experimentan un uso intensivo, lo cual genera una amenaza constante de intrusión salina. Las áreas de riego bajo condiciones de estrés hídrico están estrechamente ligadas a la utilización de aguas subterráneas y al agotamiento progresivo de los acuíferos (FAO, 2021).

El agotamiento de acuíferos se manifiesta cuando la extracción de agua excede la capacidad de recarga, aunque factores como la variabilidad y el cambio climáticos pueden desempeñar un papel significativo. La mayoría de los casos de agotamiento sostenido de acuíferos a largo plazo se atribuyen a una importante extracción, cifrada a principios de este siglo en un rango de 100 a 200 km³/año. Esta cifra representa aproximadamente entre el 15 % y el 25 % de las extracciones históricas totales de agua subterránea (Organización de las Naciones Unidas, 2022).

Los acuíferos y su importancia

De acuerdo con lo anterior, es claro que los acuíferos han formado parte fundamental de la humanidad, y su deterioro ha estado relacionado con las necesidades básicas diarias y las actividades productivas desarrolladas. El agua superficial ha sido evidente, toda vez que es la parte del ciclo que se puede observar fácilmente porque escurre por los ríos o se almacena en los lagos; sin embargo, esta también se infiltra y percola a través del subsuelo conformando las unidades hidrogeológicas, las cuales alimentan los cuerpos de agua superficiales en épocas de estiaje.

Las unidades hidrogeológicas se componen de un estrato o un conjunto de estratos adyacentes que poseen propiedades o características hidrogeológicas similares (Betancur, 2023). Existen diferentes tipos de unidades hidrogeológicas, según su capacidad de recibir, almacenar y transmitir el agua: acuíferos, acuicludos, acuitardos y acuífugos (Vélez-Otálvaro *et al.*, 2011).

Los acuíferos, sistemas sujetos de esta investigación, son formaciones de rocas permeables saturadas que reciben, almacenan y transmiten agua subterránea con facilidad. La transmisividad del agua en el subsuelo depende de la presencia de poros y la interconexión que existe entre ellos, así como su ubicación en el subsuelo (Betancur, 2010). Los tipos de acuíferos son: acuíferos libres, freáticos o no confinados y acuíferos confinados, cautivos o a presión. Los acuíferos libres son aquellas unidades hidrogeológicas someras que tienen contacto con la atmósfera y cuya agua puede ser aprovechada apreciablemente. Por el contrario, los acuíferos confinados son aquellos que se encuentran a una presión mayor que la atmosférica, entre dos capas impermeables o semipermeables (Vélez-Otálvaro *et al.*, 2011).

Los acuicludos son rocas que poseen alta capacidad de almacenamiento, pero baja transmisividad; los acuitardos almacenan agua, pero la transmiten de forma lenta, por ende, son claves para el estudio regional de las aguas subterráneas; finalmente, los acuífugos son rocas impermeables que no almacenan ni transmiten el agua (Vélez-Otálvaro *et al.*, 2011).

El agua subterránea es determinante, ya que esta mantiene el flujo de agua superficial en tiempos de sequía y es de una calidad adecuada; por esta razón, es una importante fuente de suministro de agua para las comunidades. En diversas situaciones los acuíferos se han visto afectados, debido a que las personas no tienen conocimiento sobre cómo se debe cuidar el agua subterránea. Por lo tanto, se ha visto afectada su disponibilidad (relación entre la oferta y la calidad) y se pone en riesgo la sostenibilidad.

La sostenibilidad en el desarrollo de aguas subterráneas generalmente se interpreta como la extracción de un volumen inferior al que se recarga de forma natural en un enfoque de gestión conocido como “rendimiento seguro”. Sin embargo, es importante destacar que el cono de depresión en expansión provocado por la extracción excesiva de aguas subterráneas puede tener efectos secundarios, como la reducción de la evapotranspiración existente, la infiltración desde fuentes superficiales cercanas y la captura de agua que, en condiciones naturales, se descargaría (Poeter *et al.*, 2020).

Cuando se logra un equilibrio entre la extracción de agua subterránea y las fuentes secundarias, se establece un nuevo equilibrio conocido como “rendimiento sostenido”. No obstante, es importante señalar que la gestión basada en el rendimiento sostenido puede pasar por alto el impacto de la extracción en otros recursos hídricos conectados al sistema a través del ciclo hidrológico más amplio. Un cambio en una parte del ciclo hidrológico puede afectar a otras partes de este, lo que a su vez puede tener implicaciones culturales y legales (Poeter *et al.*, 2020).

De las aguas subterráneas y los acuíferos se tiene poca información por ser un tema relativamente nuevo en lugares donde la escorrentía superficial ha sido abundante. Por ende, se ha generado la necesidad de investigar y obtener datos que permitan establecer parámetros y lineamientos para el manejo y gestión del recurso en el marco de la gobernanza. El agua subterránea tiene como ventaja la utilidad para llevar a cabo proyectos agroindustriales, hidrocarburos y mineros. Al mismo tiempo, también contribuye al sostenimiento de corrientes superficiales.

Comprender la trascendencia de los acuíferos en el contexto de la gobernanza es esencial para discernir que las tensiones en la disponibilidad del agua provienen de la utilización, gestión y demanda llevadas a cabo por diversas entidades gubernamentales y no gubernamentales, sectores productivos, servicios públicos, la sociedad civil, organismos de cooperación internacional y demás actores involucrados.

Aspectos normativos asociados a los acuíferos

En Colombia, las regulaciones vinculadas a los recursos hídricos —ya sean de origen superficial o subterráneo— se derivan de acuerdos internacionales, cumbres y otros instrumentos normativos. En consonancia con la agenda 2030 (particularmente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6), a pesar de un incremento del 9 % en la eficiencia en el uso del agua, la presión hídrica y la escasez de este recurso continúan generando preocupación en diversas regiones del mundo. Para el año 2020, aproximadamente 2.400 millones de personas habitaban en naciones afectadas por la escasez de agua. Estos desafíos se ven exacerbados por conflictos y el impacto del cambio climático (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

Alcanzar el cumplimiento del Objetivo 6 implica la implementación de estrategias fundamentales, entre las que se destacan el aumento de la inversión y la capacitación en el ámbito hídrico, la promoción de la innovación y la toma de decisiones basada en evidencia, la mejora en la coordinación entre distintos sectores y la fomentación de la cooperación entre todas las partes interesadas. Asimismo, se hace imperativo adoptar un enfoque más integral y holístico en la gestión del agua (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

En Colombia, para los organismos gubernamentales, la gestión del recurso hídrico subterráneo ha tenido una gran acogida, ya que los acuíferos han sido una fuente importante de abastecimiento para las comunidades que no cuentan con acceso al agua superficial. En épocas de fuertes precipitaciones los cuerpos de agua se alimentan de agua superficial, y en épocas de bajas precipitaciones o sequía son alimentados por las aguas subterráneas que representan el caudal base. A partir de esta dinámica del ciclo hidrológico, se han desarrollado diferentes proyectos y políticas alrededor del tema. Algunas de ellas se presentan a continuación.

Las aguas subterráneas han tenido un sustento normativo desde el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, como el Decreto 2811 de 1974 y la Ley General Ambiental (Ley 99 de 1993) a partir del ordenamiento ambiental del territorio. Estas normas forman parte de la estructura del derecho ambiental colombiano, de ellas se desprenden diferentes decretos asociados a la gestión del recurso hídrico que se encuentran compilados en el Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015, como es el caso del Decreto 1541 de 1978. Específicamente

en el artículo 2.2.3.2.16.5 indica que “las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas que deseen explorar en busca de aguas subterráneas, deberán presentar solicitud de permiso ante la autoridad ambiental competente con los requisitos exigidos para obtener una concesión de agua (...)” (Presidencia de la República, 2015, p. 327).

Por otra parte, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) del año 2010 y su Plan Hídrico Nacional plantean seis objetivos principales alrededor de los siguientes aspectos: oferta, demanda, calidad, riesgo sobre la oferta, fortalecimiento institucional y gobernabilidad (MAVDT, 2010).

El Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB) se formula en el marco de la PNGIRH. Este programa tiene como objetivo principal asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico a través de una gestión eficiente y efectiva integrada con la planificación territorial y la preservación de los ecosistemas que influyen en la disponibilidad del agua. Además, reconoce el valor del agua como un impulsor del desarrollo económico y del bienestar social (MADS, 2014).

El Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos del año 2010 “tiene como propósito principal establecer los criterios técnicos, procedimientos y metodologías que orienten a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible y de los grandes centros poblados, en el proceso de formulación e implementación de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA)” (MADS, 2014, p. 9).

En el departamento de Caldas, con el fin de dar cumplimiento a la PNGIRH del año 2010 y el Decreto 1076 de 2015 (donde se encuentra compilado el decreto 1640 de 2012 sobre cuencas), se han desarrollado diferentes estudios por parte de la Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas), en conjunto con la Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales (Asocars), Parques Nacionales y la Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales). La cuenca del río Chinchiná, como cuenca piloto en el país, cuenta con un Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), el cual comenzó a construirse entre los años 2012 y 2013. El estudio se concentró en seis componentes: hidrología e hidráulica, biota, socioeconomía, calidad, riesgos y participación (Corpocaldas, 2013).

Por último, Corpocaldas –como autoridad máxima encargada de administrar los recursos naturales del departamento– ha formulado su Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR 2020-2031) donde abarca, entre otros temas, el recurso hídrico superficial y subterráneo.

Algunos modelos y métodos utilizados para el análisis de contaminación de acuíferos

Existen varios modelos y métodos para el análisis de la contaminación de acuíferos. Estos modelos ayudan a los científicos e ingenieros a comprender la propagación de contaminantes en el agua subterránea y a desarrollar estrategias de gestión y remediación. Aquí se presentan algunos modelos y métodos de análisis de contaminación de acuíferos:

Método DRASTIC

El método DRASTIC es utilizado para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero a la contaminación. Examina factores como la profundidad del agua subterránea, la recarga, la topografía, la permeabilidad y conductividad del suelo, entre otros factores que determinan áreas de mayor riesgo. Este método fue desarrollado para ayudar a identificar y mapear áreas que son más susceptibles a la contaminación de las aguas subterráneas (Gomes *et al.*, 2021).

La profundidad del agua subterránea considera la distancia vertical desde la superficie del suelo hasta el nivel freático. Cuanto más cerca esté el nivel freático de la superficie, mayor será la vulnerabilidad a la contaminación, ya que los contaminantes tienen menos distancia que recorrer para llegar al agua subterránea. La recarga se refiere a la cantidad de agua que ingresa al acuífero desde la superficie. Lugares con una alta recarga pueden tener una mayor vulnerabilidad, pues los contaminantes transportados por el agua de lluvia pueden infiltrarse más fácilmente. Los acuíferos compuestos por materiales permeables, como las areniscas, son más vulnerables que los acuíferos compuestos por materiales menos permeables, como las arcillas (Torres *et al.*, 2022).

La topografía del terreno puede influir en la dirección del flujo del agua subterránea y, por lo tanto, en la ruta que pueden seguir los contaminantes. La zona vadosa es la capa del suelo no saturada entre la superficie del suelo y el nivel freático, su impacto se considera en términos de cómo puede afectar la filtración de contaminantes hacia el acuífero. Por otra parte, la conductividad hidráulica es la capacidad del material del acuífero para permitir el flujo de agua, acuíferos con una alta conductividad hidráulica pueden ser más vulnerables a la contaminación (Torres *et al.*, 2022).

El método DRASTIC asigna valores ponderados a cada uno de estos componentes y luego combina estos valores en un índice de vulnerabilidad. Este índice se utiliza para crear mapas que muestran las áreas con diferentes grados de vulnerabilidad a la contaminación. Cuanto mayor sea el valor del índice DRASTIC en un área, mayor será la vulnerabilidad de esa área a la contaminación de las aguas subterráneas. Es una herramienta útil para la gestión y protección de los recursos hídricos subterráneos, ya que permite identificar áreas críticas que requieren una atención especial en términos de prevención de la contaminación y toma de decisiones en la planificación del uso de la tierra y el agua (Arévalo-Ulloa, 2022).

Modelo MODFLOW

Este es uno de los modelos ampliamente utilizados para simular el flujo de agua subterránea constante o transitoria y el transporte de contaminantes en acuíferos confinados o no confinados. También permite analizar cómo se mueven los contaminantes bajo diferentes escenarios y condiciones geológicas. MODFLOW representa el agua subterránea como una grilla con múltiples celdas independientes, las cuales presentan sus propios parámetros de flujo y ecuaciones (Troncoso, 2021). El modelo tiene en cuenta factores como la recarga, la descarga, la infiltración, la extracción de agua, las condiciones de límites y las propiedades hidráulicas del acuífero (López, 2023).

MODFLOW se utiliza en una amplia gama de aplicaciones que incluyen la gestión de recursos hídricos, la protección de la calidad del agua subterránea, la planificación del uso de la tierra, la evaluación del impacto ambiental y la investigación científica. Es especialmente útil en la gestión de acuíferos, la planificación de pozos de extracción de agua y la evaluación de la sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos.

Modelo MT3DMS

El nombre “MT3DMS” proviene de “*Modular Three-Dimensional Multi-Species Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems*” (Modelo Tridimensional Modular Multiespecie de Transporte para la Simulación de Advección, Dispersión y Reacciones Químicas de Contaminantes en Sistemas de Agua Subterránea), lo que refleja su capacidad para abordar una amplia variedad de procesos de transporte de solutos

y simular la dispersión y la reacción química de estos a través de una isoterma de adsorción de Freundlich no lineal en medios subterráneos (Kumar *et al.*, 2023). Una de las ventajas clave de MT3DMS es su capacidad para interactuar de manera efectiva con el modelo MODFLOW.

Modelo PHREEQC

PHREEQC (*PHotoreaction Equilibrium in Water and Sediments: Quality and CQuantity*) es un *software* aplicado en áreas como hidrogeología, geoquímica de aguas subterráneas y otros campos relacionados. Puede ayudar a predecir la especiación química de los elementos y compuestos en soluciones acuosas en función de las condiciones ambientales, como pH, temperatura, presión parcial de gases y concentraciones iniciales de especies químicas (Pereira, 2021).

Este software lleva a cabo diversos cálculos hidrogeoquímicos, lo que permite una mejor comprensión de las reacciones y procesos químicos que ocurren en el agua subterránea. A través de la recopilación de datos tanto de la comunidad científica como de análisis en laboratorio, se ha observado que la disolución de minerales de carbonato desempeña un papel fundamental en la composición del agua subterránea. Esto se debe a que minerales como la calcita, la dolomita, el yeso y la halita se encuentran disueltos en el flujo del agua subterránea, lo que da como resultado un aumento de la concentración de iones principales (Pereira, 2021).

Una de las ventajas clave de PHREEQC es su flexibilidad, ya que los usuarios pueden definir sus propias reacciones y equilibrios químicos personalizados a través de archivos de entrada, lo cual permite adaptar el modelo a situaciones específicas.

Modelo SUTRA

El modelo SUTRA (*Saturated-Unsaturated Transport*) es un programa de simulación numérica utilizado para modelar el flujo de agua subterránea y el transporte de solutos en medios porosos saturados y no saturados. Es ampliamente utilizado en la hidrogeología y geoquímica para comprender y predecir el comportamiento del agua subterránea en sistemas complejos (Mielles-Montenegro, 2021). SUTRA es capaz de modelar tanto el flujo de agua subterránea en medios saturados (acuíferos) como el flujo en medios no saturados (zona vadosa), lo que lo hace

adecuado para estudiar una variedad de situaciones hidrogeológicas. Además del flujo de agua, SUTRA permite modelar el transporte de solutos, lo que significa que se puede simular cómo los contaminantes se mueven a través del subsuelo en función de las condiciones hidrogeológicas y las propiedades de transporte (Mieles-Montenegro, 2021).

El modelo SUTRA tiene en cuenta los procesos de advección (transporte causado por el flujo de agua) y difusión (transporte molecular) para calcular cómo se dispersan los solutos en el subsuelo.

Modelo PEST

El modelo PEST (*Parameter ESTimation*) es una técnica utilizada en hidrogeología y gestión de recursos hídricos para estimar los parámetros que describen el comportamiento de un acuífero. Es un código que se utiliza para la calibración de modelos de agua subterránea y ayuda a ajustar los parámetros del modelo a los datos observados. Se utiliza para calibrar y mejorar los modelos matemáticos que representan la hidrogeología de un área específica. Estos modelos matemáticos se basan en ecuaciones que describen cómo el agua fluye a través del acuífero y cómo interactúa con otras características geológicas y ambientales. En estos modelos, parámetros como la conductividad hidráulica, la recarga, la descarga y la capacidad de almacenamiento del acuífero son esenciales para comprender y predecir el comportamiento del sistema de aguas subterráneas (Cisneros, 2019).

Capítulo 2.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo de los acuíferos

Contexto nacional e internacional

A escala mundial, los acuíferos están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y los emprendimientos mineros. Por ello existe una gran necesidad de llevar a cabo campañas proactivas y prácticas destinadas a proteger la calidad natural del agua subterránea, las cuales se pueden justificar sobre la base de criterios amplios (Foster *et al.*, 2002). Así mismo, para conocer el estado de la calidad del agua subterránea en diferentes países, ha sido de gran importancia desarrollar estudios de la amenaza y vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación a partir de diferentes métodos que permiten determinar el riesgo (Flórez *et al.*, 2024).

En São Paulo, Brasil también se ha desarrollado una investigación alrededor del estado de los acuíferos, en la cual se proponen tres indicadores: dependencia del agua subterránea, disponibilidad y calidad. Los resultados arrojaron que la dependencia de la población al agua subterránea es alta (específicamente al norte, centro y oeste de São Paulo), ya que existe una gran demanda del recurso para diferentes actividades. En cuanto a la disponibilidad, en ciertos lugares se presenta sobreexplotación del recurso y en otros, debido a la población presente, baja disponibilidad para su distribución. Finalmente, la calidad del agua subterránea se ve afectada debido a concentraciones naturales de cloruro y fluoruro, y actividades humanas en áreas urbanas. Sin embargo, la calidad es categorizada como muy buena en gran porción del territorio (Hirata, Suhogusoff & Fernandes, 2007).

Después de identificar las fuentes de contaminación del agua subterránea en zonas urbanas y rurales, es necesario evaluar el riesgo teniendo en cuenta que dicha agua abastece a las comunidades tanto para consumo como para diferentes actividades, tales como la agricultura y la ganadería. Por este motivo, otros estudios se han desarrollado con el fin de identificar y evaluar la amenaza y vulnerabilidad a la contaminación en acuíferos. La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se ha identificado en diversas investigaciones, especialmente en América Latina y el Caribe (Jarrín, Salazar & Martínez, 2017).

Por otro lado, en la cuenca amazónica ecuatoriana se desarrolló un estudio con el fin de evaluar el riesgo de contaminación de los acuíferos a partir de la superposición de mapas de vulnerabilidad aplicando el método GODS de Foster *et al.* (2002) y cargas contaminantes aplicando el método POSH, para priorizar las zonas de protección del recurso hídrico. Las cargas contaminantes se identifican de acuerdo con el origen del contaminante y el incremento del agua natural al acuífero (Jarrín, 2017). Según Foster *et al.* (2002), en el método GODS: G corresponde al grado de confinamiento hidráulico; O es la capacidad de atenuación del contaminante debido al sustrato, en función de los parámetros del suelo; D está relacionado con la profundidad del agua subterránea o el techo del acuífero para los confinados; y S indica la forma de atenuación del contaminante y su eliminación de acuerdo con la cantidad de materia orgánica. La vulnerabilidad fue categorizada en: nula, despreciable, baja, media, alta y extrema (Jarrín, 2017).

Foster *et al.* (2002) han recopilado diferentes estudios donde han aplicado GODS y DRASTIC. Además, han realizado inventarios de cargas contaminantes y definiciones de zonas de captura de las fuentes. Por otra parte, también han empleado Sistemas de Información Geográfica (SIG) en diferentes lugares de Latinoamérica y el Caribe, como Barbados; São Paulo, Brasil; y Río Cuarto, Argentina (Blarasin *et al.*, 2020).

En el estudio llevado a cabo por Ouedraogo *et al.* (2016), se abordó el tema del mapeo de la vulnerabilidad de la contaminación de las aguas subterráneas a nivel panafricano. Utilizaron el método DRASTIC para crear un mapa a escala 1:60.000.000 que reveló que las aguas subterráneas en África central y occidental eran altamente vulnerables debido al bajo nivel freático y a la influencia significativa de las actividades agrícolas, dado que las aguas subterráneas en esta región son poco profundas. Además, realizaron un análisis de sensibilidad que demostró que factores como la profundidad del agua subterránea, la conductividad hidráulica y la recarga neta tenían un impacto considerable en la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación.

Un trabajo relevante adicional fue realizado por Pisciotta y sus colegas en 2015, quienes evaluaron el riesgo de nitratos en las aguas subterráneas en la región mediterránea de Sicilia (Italia), como resultado del aumento en el uso de agroquímicos y estiércol en la agricultura intensiva. Utilizaron el método IPNOA (Índice de Peligro de Nitratos Agrícolas) junto con métodos de vulnerabilidad intrínseca del acuífero, como SINTACS y DRASTIC, y aplicaron técnicas de SIG. Concluyeron que el método SINTACS era el más adecuado para crear un mapa de riesgo significativo (Pisciotta *et al.*, 2015).

En otra investigación relevante, Han *et al.* (2015) estudiaron los tiempos de residencia del agua subterránea y el transporte de nitratos en el área de Daweijia, noreste de China. Emplearon métodos H y CFC para analizar la relación entre el tiempo medio de residencia del agua subterránea y el transporte de nitratos. Sus hallazgos indicaron que los nitratos sin un proceso de desnitrificación pueden acumularse durante muchos años en las fuentes de agua, lo que aumenta considerablemente la contaminación (Han *et al.*, 2015).

En el estudio titulado “Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas usando métodos DRASTIC y Pesticida DRASTIC en un área de agricultura intensa de las llanuras del Ganges, India” se consideraron siete parámetros: profundidad al nivel del agua, recarga neta, material del acuífero, material del suelo, topografía, impacto de la zona vadosa y conductividad hidráulica. Adicionalmente, se trabajó con el DRASTIC LU, para el cual se agregó el uso de la tierra. A partir de un análisis de regresión lineal, se pudo establecer que para medir la vulnerabilidad de las aguas subterráneas el mejor método es el Pesticida DRASTIC, y se encontró que las zonas más vulnerables son aquellas cuyo uso del suelo está dedicado al cultivo intensivo de hortalizas con áreas urbanas intermedias (Saha & Alam, 2014).

En Bangladesh existe una creciente preocupación en cuanto a la seguridad del suministro de agua potable. Para abordar este problema, se llevó a cabo una investigación con el propósito de evaluar la calidad del agua subterránea mediante análisis fisicoquímicos y encuestas sociales para comprender la percepción de la comunidad respecto al agua para el consumo. Los análisis indicaron la presencia de intrusiones de agua salada, lo que sugiere un potencial problema de salinización del agua subterránea. Todos los resultados de las muestras señalaron que el agua no es adecuada para el consumo humano. Además, se evaluó la percepción de la comunidad sobre las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua, lo que convierte este estudio en un recurso importante para la formulación de políticas sostenibles relacionadas con el agua (Rakib *et al.*, 2020).

En Bangladesh, el agua subterránea se extrae comúnmente a través de pozos y se utiliza para el consumo humano en áreas rurales, tanto áridas como húmedas, debido a su disponibilidad. Por esta razón, se llevó a cabo un estudio que tenía como objetivo evaluar la calidad del agua a través de un amplio número de muestras tomadas de varios pozos en la región. Este estudio se centró particularmente en medir las concentraciones de nitrógeno, que son conocidas por representar un riesgo para la salud de la población. Además, se reconoció que en Bangladesh existe un problema significativo de contaminación por arsénico en las aguas subterráneas, el cual ha afectado a numerosas víctimas (Akber *et al.*, 2020).

En Colombia

En Colombia, para los organismos gubernamentales, la gestión del recurso hídrico subterráneo se ha vuelto de gran relevancia, toda vez que los acuíferos han sido una fuente importante de abastecimiento para las comunidades que no cuentan con acceso al agua superficial. A partir de la dinámica del ciclo hidrológico, se han desarrollado diferentes estudios e investigaciones, programas y una política alrededor del tema. Algunos de ellos se presentan a continuación.

La Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) llevó a cabo una investigación en el municipio de Pereira utilizando un enfoque metodológico que se centró en la gestión del riesgo basada en procesos y complementada con la Planeación Prospectiva Estratégica. En esta investigación se evaluó el riesgo considerando la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca del acuífero —que se determinó mediante una versión modificada del método DRASTIC, conocida como DRATIC— y las amenazas de origen humano, evaluadas desde seis aspectos clave: gestión de los puntos de extracción de agua subterránea, manejo de residuos sólidos, tratamiento de aguas residuales, contaminación proveniente de fuentes superficiales receptoras, derrames de hidrocarburos y manejo de sustancias peligrosas, así como la producción agrícola.

Los resultados del estudio revelaron que los niveles más altos de riesgo de contaminación estaban relacionados con los derrames de hidrocarburos (42,9 %) y la disposición inadecuada de aguas residuales (38,2 %). En el desarrollo de estrategias para abordar estos riesgos, se puso un énfasis particular en la gestión de la calidad del agua. Estos aspectos se identificaron como áreas en las

que se pueden tomar medidas, ya que no son intrínsecos a la naturaleza del acuífero, sino que se originan a partir de actividades humanas (Agudelo & Sepúlveda, 2017).

A través de una tesis de grado llevada a cabo en la Universidad de la Salle en Bogotá, se implementó el método DRASTIC como parte de un esfuerzo significativo para evaluar y abordar la calidad del agua subterránea en el acuífero Guadalupe, situado en Tenjo, Cundinamarca. Este estudio tenía como objetivo principal identificar las áreas de mayor vulnerabilidad del acuífero en términos de contaminación. El enfoque metodológico adoptado no solo consideró aspectos técnicos y científicos, sino que también incorporó la perspectiva de la Planeación Prospectiva Estratégica. Como resultado, se desarrolló una herramienta sólida y confiable que no solo ofrece información valiosa sobre la vulnerabilidad del recurso hídrico, sino que también puede servir como una base esencial para futuros planes de desarrollo y ordenamiento territorial en la región (Gómez, 2017).

En cuanto a los acuíferos de Funza (Cundinamarca), se llevó a cabo un estudio integral para evaluar su grado de vulnerabilidad intrínseca e identificar el riesgo potencial que representan las actividades humanas en términos de su impacto en la sostenibilidad del agua subterránea. Para lograr esto, se utilizaron metodologías especializadas como la GOD (*groundwater occurrence, overall lithology of aquifer, and depth of groundwater*) y DRASTIC, la cual incluyó una evaluación específica de la influencia de pesticidas en la calidad del agua. Los resultados de esta investigación proporcionan información valiosa para la toma de decisiones en la gestión y protección de estos recursos hídricos críticos (Buitrago, 2015).

En otra región, en colaboración con la Universidad de Sucre y la Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE), se emprendió un estudio destinado a la elaboración de Mapas de Vulnerabilidad Intrínseca y Específica a plaguicidas para el acuífero Morroa. Este proceso se basó en la aplicación del sistema paramétrico DRASTIC, donde se definieron meticulosamente las características geomorfológicas del sistema utilizando variables específicas de este método y se emplearon herramientas como el software ArcGIS 9.2. Los resultados de este esfuerzo se consideran esenciales para la gestión ambiental de la región y proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y políticas destinadas a proteger el acuífero contra la contaminación por plaguicidas y otras sustancias de especial preocupación ambiental (Vergara *et al.*, 2009).

Finalmente, en una tesis de grado realizada en la Universidad Católica de Colombia, se propuso una metodología adaptada del método DRASTIC para evaluar el potencial de contaminación de las aguas subterráneas en el contexto colombiano. Esta adaptación fue esencial para

abordar las características hidrogeológicas específicas de Colombia, lo que a su vez contribuye significativamente a la comprensión y gestión de la calidad del agua subterránea en el país. Esta iniciativa no solo ofrece una valiosa contribución al campo de la hidrogeología en Colombia, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones y acciones encaminadas a la preservación de este recurso vital (Vásquez-Carreño, 2017).

El Servicio Geológico Colombiano ha venido llevando a cabo diferentes estudios alrededor del subsuelo y el recurso hídrico desde la década de los 50. En el año 2004, se apoyó de las Corporaciones Autónomas Regionales, Institutos de Investigación, el IDEAM y universidades para elaborar el “Programa de Exploración de Aguas Subterráneas” con el fin de evaluar el potencial del recurso hídrico del subsuelo y generar nuevo conocimiento para áreas que presentan déficit de agua potable; este se convierte en un aporte técnico para los tomadores de decisiones en el territorio. Dicho programa se compone de tres etapas: (1) estudios hidrogeológicos de reconocimiento a escalas iguales o menores a 1:500.000; (2) estudios de exploración y evaluación hidrogeológica regional de escalas de 1:250.000 a 1:50.000; (3) estudios de exploración hidrogeológica de detalle a escala igual o mayor a 1:25.000 (Ingeominas, 2003).

Amenazas contaminantes para los acuíferos

La amenaza por contaminación a los acuíferos suscita un desafío para la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo en la medida que estos depósitos de agua dulce son fundamentales para las actividades productivas y el abastecimiento de agua potable. Sin embargo, muchas de estas actividades se llevan a cabo sobre la zona de recarga, lo cual compromete la calidad y cantidad de estos.

Las amenazas en el contexto del agua subterránea se refieren a la probabilidad de ocurrencia de fenómenos potencialmente dañinos, los cuales se derivan de actividades tanto humanas como naturales que pueden ocasionar la contaminación del sistema acuífero. Estas amenazas son de gran importancia, ya que pueden incluir la infiltración de contaminantes químicos o vertidos de

desechos tóxicos provenientes de actividades antrópicas como la producción agrícola, actividades industriales y domésticas; así como eventos naturales, inundaciones o deslizamientos de tierra que podrían afectar la calidad del agua subterránea (Bautista, 2011).

El impacto en la calidad del agua, además de tener repercusiones sobre la salud pública y el ecosistema, representa una disminución efectiva de su disponibilidad. Los vertimientos industriales y urbanos incontrolados, la ausencia de regulaciones bien implementadas de ciertas actividades contaminantes, y la utilización masiva de fertilizantes y agroquímicos en la actividad agropecuaria están contaminando los acuíferos y, en algunos casos, esto ha llegado a ser grave (Sahuquillo *et al.*, 2009).

Los impactos negativos sobre la calidad del agua subterránea se han abordado por medio de la metodología POSH (*Pollutant Origin, Surchage Hydraulically*), utilizada para la evaluación de las fuentes potenciales de cargas contaminantes al subsuelo. Tiene en cuenta dos características: a) la posibilidad de presencia de contaminantes persistentes y móviles en el subsuelo (origen de la contaminación); b) la existencia de una carga hidráulica capaz de generar el transporte advectivo de contaminantes hacia los acuíferos (sobrecarga hidráulica). Sin embargo, esta información no está fácilmente disponible, lo que hace necesario partir de la hipótesis de asociar la posibilidad de una sustancia contaminante del agua subterránea con las actividades antrópicas y estimar la sobrecarga hidráulica sobre la base del uso del agua en la actividad relacionada (Foster *et al.*, 2002).

De acuerdo con lo anterior, la comprensión y evaluación de las amenazas asociadas a la contaminación de acuíferos son fundamentales para el diseño e implementación efectiva de estrategias de gestión y conservación de estos. Las metodologías existentes para la monitorización constante de las actividades humanas sobre las zonas de recarga y la adopción de medidas preventivas son esenciales para preservar la integridad y la calidad del agua subterránea, y asegurar de esta manera la sostenibilidad a largo plazo de este recurso vital.

Vulnerabilidad de los acuíferos

El concepto de vulnerabilidad acuífera se refiere a la posibilidad de que el agua subterránea se contamine con sustancias en cantidades que excedan los límites máximos permisibles establecidos en las normas para consumo humano o los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Aunque en un principio este concepto se centraba en la calidad cualitativa del agua, hoy en día también abarca aspectos cuantitativos gracias a la utilización de diversos métodos de evaluación que consideran tanto la naturaleza de la contaminación como su magnitud. Esto permite tener un enfoque más completo en la gestión y protección de estos recursos (Estrada *et al.*, 2013).

La vulnerabilidad natural de un acuífero se da principalmente por las características propias del medio físico que componen los materiales donde se almacena el agua subterránea. La interacción del agua que se infiltra producto de las precipitaciones y de la escorrentía, que ocurre en la superficie de la cuenca con los materiales presentes, ocasiona diferentes procesos, como la disolución en rocas solubles y mezcla con aguas de mayor concentración debido a las actividades antropogénicas que pueden generar contaminantes, los cuales eventualmente se infiltran en los acuíferos afectando la calidad del agua almacenada (Tomalá & Bailón, 2022).

Para Gómez *et al.* (2011) las formaciones geológicas donde se encuentran localizados los acuíferos (formaciones geológicas que almacenan agua) presentan condiciones físicas que defienden y retardan la entrada de un contaminante al suelo; es decir, los acuíferos tienen una capacidad de atenuación. La llamada zona no saturada, la cual se extiende desde la superficie del suelo hasta el nivel de agua de los acuíferos, se constituye en una especie de “colchón” para un contaminante, el cual tiene mayor o menor efecto dependiendo de sus condiciones y dimensiones físicas.

Evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero permite representar las características intrínsecas, las cuales sirven para determinar la susceptibilidad de un acuífero que se ve afectado adversamente por una carga contaminante. Estas propiedades dependen de algunos factores como la inaccesibilidad de la zona saturada, características hidráulicas y la capacidad de atenuación del suelo, la cual se expresa en forma de índices o grados de vulnerabilidad en una región a través de mapas. Este es el primer paso para evaluar el riesgo de contaminación del agua subterránea (Foster *et al.*, 2002).

Riesgo de los acuíferos

La evaluación del riesgo se refiere a la determinación de valores cualitativos y cuantitativos relacionados con un evento adverso reconocido y se realiza de acuerdo con el nivel de conocimiento y las condiciones específicas del área de estudio (Troldborg, 2010).

El riesgo se puede determinar mediante la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad natural que presenta un acuífero a la contaminación (Henry & Heinke, 1996). Por medio de la sobreposición de los productos que se obtienen a partir de los mapas de vulnerabilidad y amenaza, se puede categorizar el riesgo de los acuíferos en las diferentes zonas estudiadas. Así, el riesgo de contaminación de un acuífero se considera como la probabilidad de que este tenga impactos negativos producidos por una actividad antrópica, hasta un nivel donde la calidad del agua resulta no apta para el consumo humano.

Capítulo 3.

Caso: riesgo de contaminación asociado a las actividades productivas de los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda

Las actividades productivas se han convertido en fuentes potenciales de contaminación de los acuíferos debido al manejo inadecuado de las aguas residuales domésticas y no domésticas, a la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, a las condiciones climáticas del territorio y a las prácticas insostenibles de los habitantes. En el departamento de Caldas (Colombia), entre los municipios de Manizales, Palestina, Anserma, Neira, Filadelfia, Viterbo, Belalcázar, San José y Risaralda se encuentran los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda. En ellos se presentan actividades antrópicas relacionadas con los sectores porcícola y agrícola (cítricos, caña, café y plátano), los cuales impactan la calidad del agua subterránea. Este estudio evalúa las actividades e identifica la amenaza y riesgo en los acuíferos para lograr un aprovechamiento responsable del recurso y evitar alteraciones en su funcionamiento. La metodología POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*), propuesta por Foster *et al.* (2002), y la vulnerabilidad intrínseca —estudiada por medio de la metodología GOD (*groundwater occurrence, overall lithology of aquifer, and depth of groundwater*), propuesta por Foster & Gomes (1989)— permitieron identificar el potencial de cargas contaminantes a las que están expuestos los acuíferos y, de esta forma, aportar información que contribuirá en el proceso de establecer un plan de

gestión del riesgo y manejo del recurso hídrico subterráneo. Los resultados son presentados por medio de mapas de amenaza y riesgo para las actividades agrícolas y pecuarias porcícolas. También se identificaron extensas áreas que poseen potenciales fuentes de contaminación en un nivel de riesgo moderado y alto que pueden generar efectos importantes sobre los acuíferos.

Área de estudio

Acuífero Santágueda (km 41)

Se encuentra en la región occidente del departamento de Caldas, Colombia. Está ubicado en las zonas bajas de las cuencas hidrográficas de los ríos Chinchiná, Tapias-Tareas, Opirama y aferentes al río Cauca en el flanco occidental de la cordillera central. Comprende un área total de 34.666 ha y se encuentra en jurisdicción de cinco municipios: Manizales, Palestina, Neira, Anserma y Filadelfia (Figura 1). El acuífero Santágueda (km 41) corresponde a un acuífero multicapa con porosidad primaria y niveles tanto libres como semiconfinados. Este acuífero aparece como una franja alargada en dirección NW sobre el río Cauca, al centro-occidente de la zona de estudio. Cubre un área aproximada de 11,2 km² (Corpocaldas & UTP, 2016).

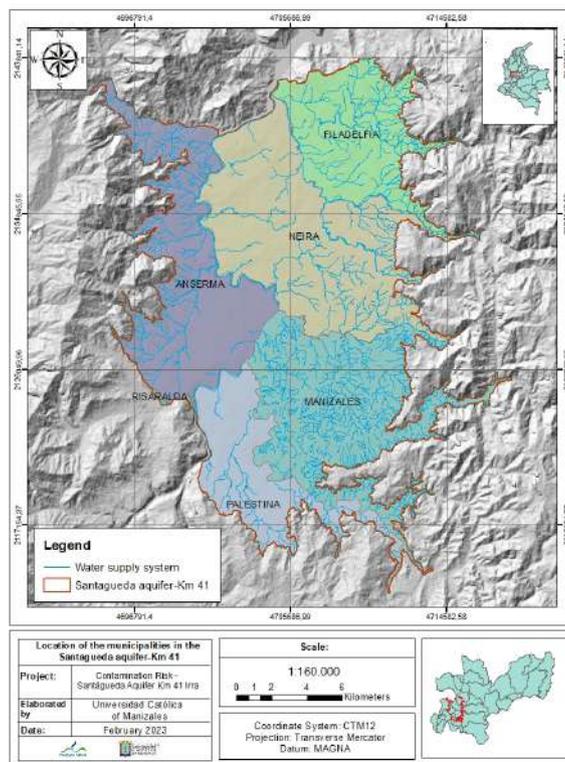


Figura 1. Localización de los municipios y del acuífero Santagueda (km 41)

Fuente: Corpocaldas & UTP (2016).

El acuífero está compuesto por flujos de lodo, posiblemente originados en el río Chinchiná, con mayor espesor hacia el sector occidental, el cual disminuye paulatinamente hacia el oriente. Esto se refleja en los rendimientos de los pozos, con 5,63 LPS para el pozo de la Argentina y 3,15 LPS para la América. El carácter químico del agua es bicarbonatado cálcico a magnésico con alcalinidad baja y potable para todo uso. Su espesor probable es de 15 metros, sus límites hidrogeológicos al nororiente y sur son rocas terciarias y cretácicas, y al occidente el río Cauca, el cual se encuentra controlado estructuralmente. Este sector se encuentra a una cota aproximada de 900 metros, por lo que se evidencia el contraste morfológico en relación con el sector de Cambía (Corpocaldas & UTP, 2019).

Este depósito se caracteriza por presentar cantos subangulares de composición ígnea como lavas basálticas, pórfido-andesíticos, granitoides y un gran aporte de fragmentos piroclásticos y algunos esquistos verdes y negros. Los tamaños varían de 4 cm hasta 50 cm de diámetro, y en general el depósito es matriz-soportado y su matriz es lodoso-arenosa compuesta esencialmente por líticos (50 %-70 %), cuarzo (10 %-20 %) y feldespatos (10 %-5 %); también presenta restos de plantas carbonizadas. El espesor máximo de este acuífero es de 15 metros (Corpocaldas & UTP, 2019).

Esta unidad acuífera es aprovechada mediante 18 aljibes y 5 pozos; la profundidad de los aljibes varía entre 2,2 y 16 metros, y el nivel estático medido para estas captaciones se encuentra entre 0 y 9 metros de profundidad. En cuanto a parámetros fisicoquímicos, se encontró que en los puntos medidos la temperatura media es de 26,7 °C, la conductividad varía entre 183 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 358 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y el pH varía en un rango de 6,57 a 7,66. Esta unidad no cuenta con datos de hidráulica (Corpocaldas & UTP, 2019).

De acuerdo con la clasificación Stuyfzand (1993), el agua de las captaciones muestreadas químicamente es muy dulce, bicarbonatada magnésica a bicarbonatada cálcica de alcalinidad moderada a moderadamente baja; el sodio, el magnesio y el potasio se encuentran en equilibrio con el medio poroso. La capacidad específica promedio calculada para dos pozos profundos que captan esta formación es de 0,18 LPS/m, la cual es clasificada como baja por la AIH (Corpocaldas & UTP, 2019).

Acuífero río Risaralda

La cuenca del río Risaralda se encuentra en jurisdicción de los departamentos de Risaralda y Caldas, en la zona centro-occidente del territorio colombiano; es decir, converge en el centro de la zona cafetera del país. El 60 % de este territorio pertenece al departamento de Risaralda y el 40 % restante al departamento de Caldas (Corpocaldas & UTP, 2015).

El acuífero del río Risaralda está ubicado en la parte media-baja de la cuenca de dicho río, entre los municipios de Anserma, Viterbo, San José, Belalcázar y Risaralda en el departamento de Caldas. La cuenca del río Risaralda se encuentra encajada en un área de diversidad geológica, toda vez que convergen diversos ambientes y estilos de formación de las rocas aflorantes en esta, lo que le imprime un modelado geomorfológico propio. En esta cuenca se presentan asociaciones litológicas, desde ígneas a metamórficas, cubiertas discordantemente por rocas sedimentarias de diferentes edades, cortadas por fallas paralelas ligeramente oblicuas asociadas al Sistema de

Fallas Romeral y Cauca-Almaguer. Esto genera una deformación frágil en las rocas cristalinas y deformación en las rocas blandas (Corpocaldas & UTP, 2015).

En síntesis, las unidades de roca dominantes en el área de influencia del acuífero del río Risaralda en Caldas son la Formación Barroso (Kvb) del Grupo Penderisco, rocas terciarias asociadas con la Formación La Paila (Tmp) y los depósitos cuaternarios (Qal- Qtsv) que rellenan el valle del río Risaralda (Corpocaldas & UTP, 2015).

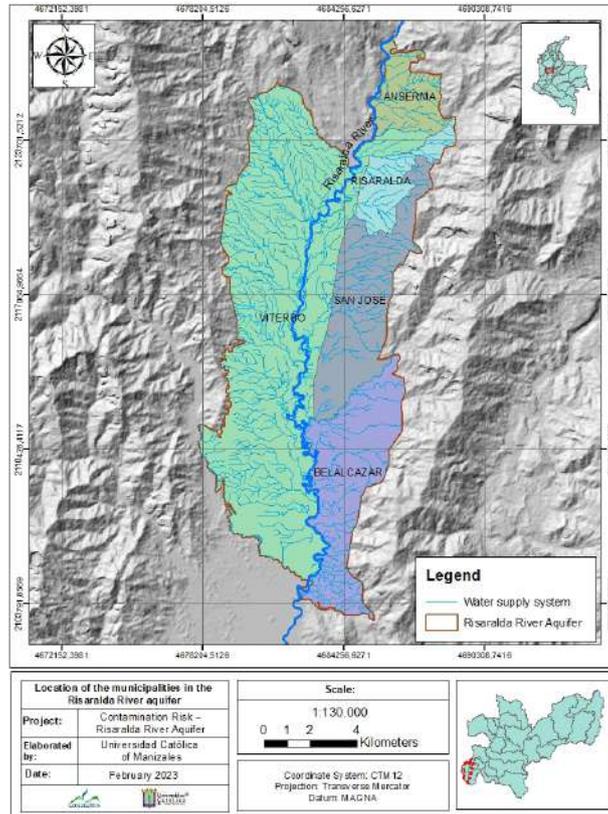


Figura 2. Localización de los municipios y del acuífero río Risaralda
Fuente: Corpocaldas & UTP (2015).

Aspectos metodológicos para determinar el riesgo de contaminación de los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda

Este estudio se basó en la guía para la protección de la calidad del agua subterránea (Foster *et al.*, 2002) con el fin de evaluar el riesgo de las fuentes potenciales de cargas contaminantes en los acuíferos Santágueda (km-41) y río Risaralda a partir de la metodología POSH (Figura 3), utilizada ampliamente en América Latina y el Caribe en la década de los 90. Esta metodología es aplicable a áreas de trabajo con escasa información, con irregular distribución de datos o incertidumbre de la información (Foster *et al.*, 2002).



Figura 3. Metodología de evaluación del riesgo
Fuente: elaboración propia.

Para la determinación del riesgo se tuvo como insumo el estudio de vulnerabilidad (a partir de la metodología GOD) realizado por Corpocaldas. Con esta metodología fue posible determinar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación a partir de: el grado de confinamiento hidráulico con la identificación del tipo de acuífero, en el cual su índice puede variar entre 0 y 1 (G); la caracterización de la zona no saturada del acuífero o de las capas confinantes, donde los índices más bajos (0,4) corresponden a los materiales no consolidados, mientras que los más altos (0,9 – 1,0) corresponden a rocas compactas fracturadas o certificadas (O); y la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o la profundidad del techo del acuífero en los confinados (D).

Aquí, los índices más bajos (0,6) corresponden a acuíferos libres con profundidad mayor a 50 m; mientras que los índices altos (1,0) corresponden a acuíferos que independientemente de la profundidad se encuentran en medios fracturados (Foster *et al.*, 2002). Así, los resultados obtenidos fueron presentados a partir de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para construir mapas de comportamiento geoespacial con el fin de identificar los grados de vulnerabilidad, clasificados en: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja (Corpocaldas & UTP, 2016).

El acuífero Santágueda (km 41) presentó un valor de 0,63 que, de acuerdo con la metodología GOD, se clasifica como vulnerabilidad alta debido a la presencia de flujos de lodo, unidad geológica caracterizada por suelos y rocas permeables y donde la distancia al nivel del agua subterránea es menor a 5 m. Se evidencia una zona de vulnerabilidad despreciable con valores de 0,05 asociados a unidades geológicas como: Stock Monzodiorítico de Irra (Kmi), Esquistos de Lisboa-Palestina (Kiea-Kies), Formación Nogales (Kn), Pórfidos Andesíticos y Dacíticas de Irra (Tadi), Rocas Ultramáficas de Filadelfia (Kusf-Kmi), y Anfibolita Sausurítica de Chinchiná (Kach). También se identificó la existencia de depósitos aluviales con un valor de 0,14 y, para otras formaciones geológicas, entre 0,19 y 0,22. Según la metodología GOD, esto indica una vulnerabilidad baja. Estos valores finales se obtienen una vez se califica el grado de confinamiento hidráulico, ocurrencia del sustrato suprayacente y la distancia a nivel freático (Corpocaldas & UTP, 2016).

Por su parte, el acuífero río Risaralda presenta una vulnerabilidad moderada de acuerdo con la clasificación de la metodología GOD debido a sus unidades geológicas. Entre ellas están los depósitos aluviales, formaciones y rocas que presentan valores de 0,1 para el grado de confinamiento hidráulico; 0,6 en ocurrencia del sustrato suprayacente y 0,9 en la distancia al nivel del agua subterránea (Corpocaldas & UTP, 2015).

Una vez se tienen los resultados de vulnerabilidad en mapas, se analizan con el propósito de evaluar la amenaza de contaminación a los acuíferos. La proximidad de actividades antrópicas a las fuentes de abastecimiento de agua subterránea es un factor clave que influye en el riesgo de contaminación a las aguas si se tiene en cuenta que a su vez dicha agua abastece a las comunidades, tanto para consumo humano doméstico como para las diferentes actividades agrícolas y pecuarias.

Aspectos metodológicos para el método POSH

La amenaza se refiere a aquellas actividades generadas por el hombre que tienen como resultado cargas contaminantes capaces de alterar la calidad del agua, el funcionamiento natural del ecosistema y la salud humana (Gómez, Gutiérrez & Torres, 2011). Estas dependen de muchos factores. Este estudio se centra en la amenaza y riesgo a causa de la actividad pecuaria porcícola (PPI) y de la presencia de compuestos químicos tóxicos y persistentes usados en la producción agrícola (PA) que pueden generar plumas de contaminación importantes para los acuíferos.

Generalmente, existe una relación entre la cantidad de agroquímicos aplicados y su tasa de lixiviación del suelo al agua subterránea. Sin embargo, solo una proporción es lixiviada, ya que esta resulta de una compleja interacción entre: tipo de cultivo, propiedades del suelo, régimen de lluvias y de riego, manejo del suelo y aplicaciones de agroquímicos. Más del 75 % del nitrógeno total aplicado puede ser oxidado y lixiviado al agua subterránea; en cuanto a pesticidas, las pérdidas por lixiviación normalmente son menores al 1 % (Foster *et al.*, 2002).

La caracterización de las fuentes potenciales de cargas contaminantes en los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda inició en el año 2021 y se realizó bajo la metodología POSH, propuesta por Foster e Hirata. Se hizo inicialmente un recorrido por la zona de estudio para identificar dichas fuentes a partir del reconocimiento de las principales actividades productivas. Con ello se efectuó un inventario que comprendió la toma de información primaria, donde se realizaron encuestas a funcionarios públicos y técnicos, e información secundaria a partir de revisión de bases de datos de entidades oficiales.

De acuerdo con la guía para la protección de la calidad del agua subterránea (Foster *et al.*, 2002), se agrupan las potenciales actividades de contaminación en los tipos de desarrollo urbano, industrial, agrícola y minero. En este caso, la producción agrícola (PA) es la de mayor relevancia para este estudio debido a la susceptibilidad que tienen los acuíferos a la infiltración de agua de riego por ser de porosidad primaria. Una vez comprendidas la localización espacial y las coberturas, se caracterizó la carga contaminante asociada al uso de agroquímicos a partir de cuatro categorías cuya magnitud se califica de 0 a 1: la clase de agroquímico con la familia química, intensidad, modo de disposición y duración (Tabla 1).

Clase (VRC): familia química. Está definida por su tendencia a la degradación *in situ* y su coeficiente de retardo.

Intensidad (VRI): riego x categoría de distribución x valores OMS. Está definida por la concentración del contaminante en el efluente o lixiviado.

Modo de disposición (VRM): recarga x tipo de producción x forma de aplicación. Está definido por la carga hidráulica asociada con la descarga del contaminante y la profundidad.

Duración (VRD): periodo de aplicación x persistencia del ingrediente activo. Está definida por la probabilidad de descarga del contaminante al subsuelo y el período durante el cual es aplicado.

La producción agrícola (PA) tiene que ver con los cultivos y la manera como se presentan en la zona de estudio. En la subclase 1 se diferenciaron las coberturas, y para estas tres formas de cobertura se definió la subclase 2 asociada a los cultivos que se dan en forma extensiva o de pancoger.

A partir de la metodología propuesta por Foster *et al.* (2002), adoptada en Gaviria & Betancur (2005), se evalúa el índice de carga contaminante con base en las cuatro categorías utilizando la siguiente expresión matemática:

$$ICC = CIFC \times VRC + CIFI \times VRI + CIFM \times VRM + CIFT \times VRD$$

Donde:

VRC, VRI, VRM y VRD: son valores relativos asignados a la clase, intensidad, modo de disposición y duración del contaminante.

CIFC, CIFI, CIFM y CIFT: son coeficientes de importancia de los factores: clase, intensidad, modo de disposición y duración del contaminante.

Los coeficientes de importancia son: 0,31 para la clase de agroquímico; 0,25 para la intensidad; 0,23 para el tiempo de aplicación; y 0,21 para el modo de disposición.

El ICC tiene valores entre 0 y 1. Se califica como elevado en el intervalo 0,61 - 1,0; moderado entre 0,31 y 0,6; y reducido desde 0 hasta 0,3.

Tabla 1
Metodología para la clasificación de categorías de cargas contaminantes

Tipo de actividad	Subclase 1	Subclase 2	Categoría	Descripción de la categoría	Clase de contaminante (VRC)	Intensidad de contaminación (VRI)	Modo de disposición de la CC (VRM)	Duración de la CC (VRD)	Índice potencial de generación de CC (ICC)	Clasificación ICC
PA Producción agrícola	Cobertura urbana		PA1	Tejido urbano continuo; tejido urbano discontinuo; zonas industriales o comerciales; red vial, ferroviaria y terrenos asociados						
	Cobertura no agrícola		PA2	Bosque de galería y ripario; arbustal denso; vegetación secundaria o en transición; ríos		Coficiente de importancia: 0,25	Coficiente de importancia: 0,23	Coficiente de importancia: 0,21		Elevado: entre 0,61 y 1,0
		Cultivo de pancoger o semintensivo	PA3	Zonas quemadas; otros cultivos transitorios	Coficiente de importancia: 0,31	Valor relativo (VR) = (peso por tipo de riego x categoría de distribución) x (peso toxicología OMS).	Valor relativo (VR) = (peso por recarga x tipo de producción agrícola) x (peso por forma de aplicación).	Valor relativo (VR) = (probabilidad de descarga al subsuelo) x (frecuencia de aplicación del agroquímico).	ICC = CIFC x VRC + CIFI x VRI + CIFM x VRM + CIFD x VRD	Moderado: entre 0,31 y 0,6
	Cobertura agrícola	Cultivo extensivo	PA4	Cultivos permanentes herbáceos; cultivos permanentes arbustivos; pastos limpios; pastos arbolados; pastos enmalezados; mosaico de cultivos; mosaico de pastos y cultivos; mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; mosaico de pastos con espacios naturales	Valor relativo (VR) = familia química					Reducido: entre 0 y 0,3

Fuente: elaboración propia, adaptada de Foster *et al.* (2002).

De acuerdo con la metodología POSH, se relacionan el tipo de actividad que se realiza y las características de la carga contaminante asociada. Este método permite una evaluación de las fuentes potenciales de contaminación en tres niveles cualitativos: reducido, moderado y elevado, y se basa en dos características fácilmente estimables: el origen del contaminante y su sobrecarga hidráulica. La información sobre georreferenciación, descripción de coberturas, encuestas, definición de los principales agroquímicos y su consecuente clasificación en lo que respecta a clase, intensidad, modo de dispersión y duración (Tabla 1) fueron tabuladas y configuraron la base de datos para el posterior procesamiento mediante SIG. Así fue posible traducir la información a mapas y visualizar el estado de amenaza al que están sometidos los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda. Las cuatro categorías ubicadas en las cuatro gráficas propuestas por Foster *et al.* (2002) permiten calificar la carga contaminante y realizar el respectivo análisis a partir del comportamiento de fertilizantes y plaguicidas en la zona de estudio.

Tabla 2

Clasificación de categorías de cargas contaminantes asociadas a la producción agrícola

Clase (CIFC 0,31)
Familia química (VRC) (Rango: 0,2 - 1)
*NO ₃ ; Cl; SO ₄ ; F: 1 *Na; K; Mg: 0,8 *Fe; Mn; As; NH ₄ : 0,2 *Plaguicida no polar: 0,6 *Plaguicida catiónico: 0,2 *Plaguicida aniónico: 0,6 *Plaguicida I: 1 *Plaguicida II: 0,9 *Plaguicida III: 0,8

Intensidad (CIFI 0,25)		
Riego (VRI) (Rango: 0 - 1)	Categoría de distribución (VRI) (Rango: 0,8 - 1)	“Valores OMS (VRI) (Rango: 0,5 - 1)
Sin riego: 0 Agua superficial o subterránea: 0,8 Reutilización de agua residual: 1	Difusa: 0,8 Multipuntual: 0,9 Puntual: 1	“*IA Sumamente peligroso: 1 *IB Muy peligroso: 0,9 *II Moderadamente peligroso: 0,8 *III Poco peligroso: 0,7 *U Poco probable que presente un peligro agudo: 0,5”
Modo de disposición		
Recarga (VRM) (Rango 0,3 - 1)	Tipo de producción agrícola (VRM) (Rango: 0,1 - 1)	Forma de aplicación (VRM) (Rango: 0,09 - 1)
Alta: 1 Moderada: 0,7 Baja: 0,3	Producción agrícola intensiva: categoría alta: 1 Otro tipo de cultivos, semintensivos: categoría moderada: 0,5 Cultivos tradicionales y/o áreas no agrícolas o áreas urbanas: categoría baja: 0,1	Follaje: 0,09 Suelo: 0,1 - 0,4 Zona no saturada: 0,8 Zona saturada: 1
Duración (CIFT 0,21)		
PERIODO DE APLICACIÓN (VRD) (Rango: 0,6-1)	Persistencia del ingrediente activo (VRD) (Rango 0,7 - 1)	
Horas: 0,6 Días: 0,7 Meses: 0,8 Años: 0,9 Décadas: 1	No persistente: de días hasta 12 semanas: 0,7 Moderadamente persistente: de 1 a 18 meses: 0,8 Persistente: de varios meses a 20 años: 0,9 Permanentes: indefinidamente: 1	

Fuente: elaboración propia, adaptada de Foster *et al.* (2002).

Después de obtener el inventario de cargas contaminantes y el resultado de amenaza, para la evaluación del riesgo se adaptó la metodología propuesta en Gómez *et al.* (2011) para los acuíferos en jurisdicción de Corpocaldas. Se correlacionaron los mapas tanto de la vulnerabilidad como de

la amenaza, dando a cada píxel un valor; por lo tanto, se realizaron la superposición y la operación de los mapas respectivos. En la tabla 3, se presenta la matriz de cruce de los diferentes atributos de estas dos variables.

Tabla 3

Matriz de interacción para determinar el riesgo de contaminación del agua subterránea

Amenaza	Vulnerabilidad				
	Extrema	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
ICC elevado	Extrema	Alta	Alta	Moderada	Baja
ICC moderado	Alta	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
ICC reducido	Alta	Moderada	Baja	Baja	Muy baja

Fuente: adaptada de Gómez *et al.* (2011).

La metodología empleada en esta matriz fue ajustada para su integración con el software ArcGIS 10.8 mediante la superposición de los indicadores de vulnerabilidad y amenaza con el fin de generar como producto final el mapa de riesgo. Para que el sistema de información pueda interpretar los datos de esta matriz, se asignan valores cuantitativos a los distintos niveles de vulnerabilidad y amenaza. Este enfoque permite realizar cálculos numéricos dentro del software, lo cual facilita el análisis y la visualización de la información de riesgo de manera más precisa y efectiva.

A las categorías de vulnerabilidad se les asignan los siguientes valores: 500 para extrema, 400 para alta, 300 para moderada, 200 para baja y 100 para muy baja. A los índices de carga contaminante, un valor de 1 para el ICC reducido, 2 para el ICC moderado y un valor de 3 para el ICC elevado (Gómez *et al.*, 2011).

Para ajustar la matriz a cada valor de vulnerabilidad dado, se multiplica por un factor de ajuste dependiendo de su importancia: 0,5 para la vulnerabilidad MB (muy baja); 1,0 para B (baja); 1,5 para M (moderada); 2,0 para A (alta); 2 y 2,5 para E (extrema) (Gómez *et al.*, 2011). Posteriormente, se procedió a realizar las multiplicaciones de filas por columnas como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Matriz de riesgo para referenciar los valores cuantitativos en ArcGIS

Amenaza	Vulnerabilidad					Sin información
	1250 (Extrema)	800 (Alta)	450 (Moderada)	200 (Baja)	50 (Muy baja)	
ICC elevado (3)	3750 (Extrema)	2400 (Alta)	1350 (Alta)	600 (Moderada)	150 (Baja)	
ICC moderado (2)	2500 (Alta)	1600 (Alta)	900 (Moderada)	400 (Baja)	100 (Muy baja)	Sin información
ICC reducido (1)	1250 (Alta)	800 (Moderada)	450 (Baja)	200 (Baja)	50 (Muy baja)	

Fuente: adaptada de Gómez *et al.* (2011).

A partir de estos parámetros, se pudieron definir los rangos de peligro tal y como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5

Rangos establecidos para la clasificación del riesgo

Índice de peligro	Rango
Muy bajo	0 - 100
Bajo	101 - 500
Moderado	501 - 1000
Alto	1001 - 3000
Extremo	> 3000
Sin información	No aplica

Fuente: adaptada de Gómez *et al.* (2011).

Análisis de los cultivos que generan tensiones en la zona de estudio

Los cultivos extensivos desempeñan un papel fundamental en la producción agrícola a nivel mundial al contribuir significativamente a la seguridad alimentaria y al desarrollo económico. Estos cultivos, que abarcan grandes extensiones de tierra, incluyen cereales como el trigo, arroz, maíz y leguminosas como la soja, la caña, el plátano y el café. Su importancia radica en su capacidad para proporcionar alimentos a una población en constante crecimiento y para satisfacer la creciente demanda de materias primas agrícolas. Sin embargo, generan impactos negativos en los ecosistemas debido a la cantidad de suelo y agua necesarios para su crecimiento, y a la contaminación causada por los fertilizantes usados para su producción.

Dentro de los cultivos extensivos encontrados se tienen los siguientes:

Cultivos permanentes herbáceos: esta cobertura se incluye dentro de la subzona de uso y manejo de áreas de importancia ambiental. Se ejerce una fuerte demanda industrial para la producción de azúcar. En campo, se evidenciaron áreas de cultivo de caña de azúcar, café, plátano y cítricos.

Cultivos permanentes arbustivos: la cobertura que más ha crecido entre todas las coberturas de la cuenca son los cultivos permanentes arbustivos de café; sin embargo, predomina el café de exposición.

Pastos limpios: esta cobertura de pastos limpios es significativa, se observa como uso principal del suelo en un 23,33 % del área total de estudio.

Pastos arbolados: esta cobertura se evidencia en campo; sin embargo, no es muy representativa, pues corresponde al 0,19 % del área de estudio.

Pastos enmalezados: teniendo en cuenta la presencia de llanuras aluviales, se evidencian zonas inundables que representan el 1,08 % del área de estudio.

Mosaico de cultivos: se evidencian mosaicos de cultivo; sin embargo, predominan aquellos con pastos y espacios naturales.

Mosaico de pastos y cultivos: esta cobertura se observa en campo como uno de los usos principales del suelo.

Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, y mosaico de pastos con espacios naturales: esta cobertura se observa en campo como uno de los usos principales del suelo después de los cultivos permanentes herbáceos con un 17,82 %.

Cultivo pancoger o semintensivo: se identifican diversas categorías, entre ellas las zonas quemadas. Este escenario se caracteriza por la expansión de la cobertura del suelo, especialmente para el cultivo de café en altitudes más elevadas. Esta expansión implica la intervención en áreas boscosas, donde una práctica común de manejo del suelo es la realización de quemas agrícolas. Estas quemas pueden afectar zonas de bosque, especialmente en áreas protegidas de la cuenca. Se ha observado la presencia de áreas quemadas en la interfaz entre las plantaciones forestales y los bosques densos. Se evidencia una amenaza de incendios forestales hacia las áreas de bosque denso como resultado de estas prácticas.

Otros cultivos transitorios: se engloban las áreas destinadas a cultivos temporales que no se clasifican en los grupos convencionales de cereales, oleaginosas, leguminosas, hortalizas y tubérculos. Estas tierras se incorporan específicamente en la subzona destinada al uso y manejo de áreas de importancia ambiental.

Análisis de la amenaza de los diferentes sistemas productivos en los acuíferos

Para los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda, la evaluación de la producción agrícola se realizó a partir del análisis de los parámetros de clasificación establecidos para las coberturas de la zona de estudio con base en la metodología CORINE *Land Cover*, para Colombia a escala 1:100.000 (IDEAM, 2010). Sin embargo, para este estudio se trabajó una escala 1:160.000 para el acuífero Santágueda (km 41) y 1:120.000 para el acuífero río Risaralda. Los resultados obtenidos de la información secundaria y el trabajo de campo fueron los insumos para la construcción de tablas y tabulación de datos que permitieron la aplicación de la metodología POSH a partir de la

caracterización de la carga contaminante por medio de las cuatro categorías: clase, intensidad, modo de disposición y duración. En cada caso se obtuvo el ICC.

Categorías de cargas contaminantes

De acuerdo con la información proporcionada en la Tabla 2, se procedió a la categorización de las clasificaciones asociadas a la producción agrícola mediante gráficos que abarcan la clase, intensidad, modo y duración. Posteriormente, en la Tabla 3, se resumen los Índices de Carga Contaminante (ICC) encontrados para cada una de estas categorías.

Los resultados derivados de la Figura 3, la cual presenta la clasificación de las categorías de cargas contaminantes vinculadas a la producción agrícola, ponen de manifiesto una carga contaminante originada por la aplicación de agroquímicos. En este contexto, se identifican los compuestos de nutrientes y los plaguicidas como posibles fuentes de contaminación, particularmente en los cultivos de pancoger (PA3) y cultivos extensivos (PA4).

En la figura 4, y de acuerdo con la información de la tabla 2, se clasifica la retardación y degradación del contaminante por cada uno de los agroquímicos de interés en la investigación. Con una puntuación de 0,8 (que se caracteriza por una retardación del contaminante débil y una degradación del contaminante insignificante) están los siguientes agroquímicos: Producake, Remital, Regio 480 SL, Triple café, Crecer 500, Agrosemin SL, OXI-CUP WG y Oxidloruro de cobre. Por otro lado, para los contaminantes con unas características de retardación débil y degradación lenta, se tiene el valor de 0,6 y se encuentran los siguientes agroquímicos: Agroleaf Power, Agrispon SL, Fluopicolide, Clemetgros, Glifosato, Nativo, Gribgro y Ure 46. Por último, para los agroquímicos con retardación y degradación del contaminante insignificante, se tiene un valor de 1 y son: Voyager 250 EC y Limpion 200SL.

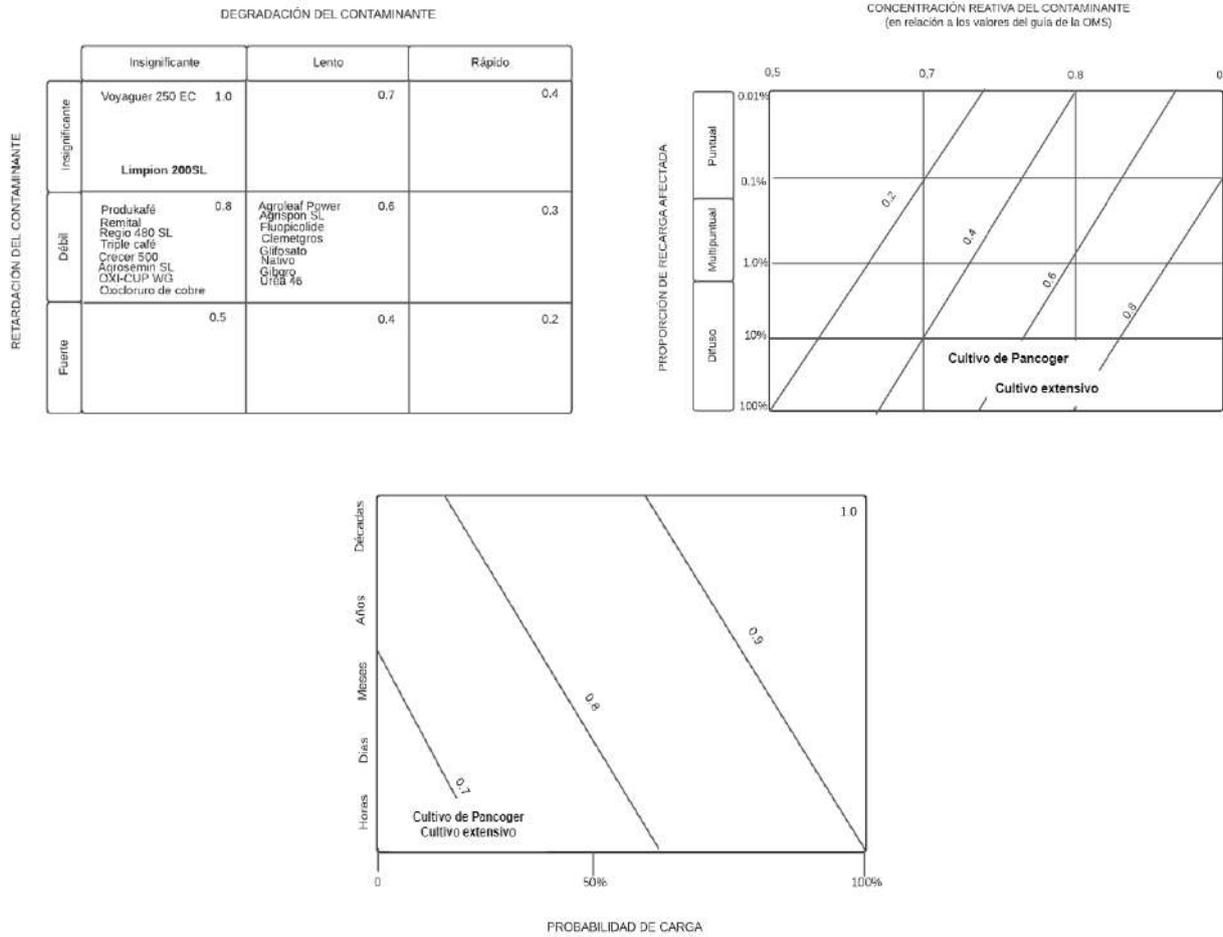


Figura 4. Clasificación de las categorías en gráficos: clase, intensidad, modo y duración

Fuente: adaptada de Foster *et al.* (2002).

La clasificación de la intensidad de la contaminación se determina mediante la probable concentración del contaminante en el efluente o lixiviado, en comparación con los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua potable. Además, se considera la proporción de la recarga del acuífero involucrada en el proceso de contaminación (Foster *et al.*, 2002). Se tuvieron en cuenta para esta categoría el riego, la categoría de distribución y la concentración relativa con relación a los valores de la guía OMS, donde para riego de cultivos se tuvieron presentes las siguientes clases:

- **Sin riego: 0**
- **Con agua superficial o subterránea: 0,8**
- **Con reutilización de agua residual: 1**

Con relación a la categoría de distribución, se tuvieron en cuenta la distribución difusa con un valor de 0,8; multipuntual de 0,9 y puntual de 1. Por otro lado, los valores OMS fueron tomados de la siguiente manera para una clasificación:

- **Sumamente peligroso: 1**
- **Muy peligroso: 0,9**
- **Moderadamente peligroso: 0,8**
- **Poco peligroso: 0,7**
- **Poco probable que presente un peligro agudo: 0,5**

Para el cultivo pancoger o semintensivo y para el cultivo extensivo se halla el ICC con un valor de 0,47 y 0,62 respectivamente.

La categoría de duración se establece considerando la probabilidad de la descarga del contaminante al subsuelo, ya sea de manera intencional, incidental o accidental, y la extensión temporal durante la cual la carga contaminante estará en aplicación. Para el cultivo pancoger o semintensivo, el período de aplicación tiene como resultado 0,6; por lo tanto, tiene un tiempo de aplicación de horas y una persistencia del ingrediente de 0,78, por lo que se puede clasificar como moderadamente persistente con un tiempo de 1 a 18 meses. Por otra parte, en el cultivo extensivo no se obtuvo una diferencia considerable, pues para el período de aplicación su clasificación fue de 0,6 horas, por lo que su aplicación dura horas. Para persistencia del ingrediente tuvo un valor de 0,76; por consiguiente, el ingrediente dura activo alrededor de 1 a 18 meses por aproximación.

Evaluación de la amenaza

Se evaluó la amenaza en los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda a partir de la clasificación de coberturas con base en los cultivos y agroquímicos asociados. Como se indica en la Tabla 6: la cobertura urbana (PA1) corresponde al tejido urbano continuo, discontinuo, aeropuertos e instalaciones recreativas; y la cobertura no agrícola (PA2) concierne a zonas de extracción minera, bosque de galería y ripario, arbustal denso, vegetación secundaria o en transición, zonas pantanosas, y ríos. Ambas coberturas no presentan amenazas en cuanto al uso de agroquímicos. Los usos del suelo asociados a la cobertura agrícola que representan los cultivos de pancoger o semintensivos (PA3) como cítricos, cultivos permanentes arbóreos, bosque fragmentado y otros cultivos transitorios presentan amenaza moderada con una cobertura en los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda de 3.451.603,51 m² y 380.849,92 m² respectivamente. En cuanto a los cultivos extensivos (PA4), que abarcan desde cultivos herbáceos permanentes hasta pastizales con diversas características, se identifica una amenaza significativa con un área de 299.243.767,28 m² para el acuífero Santágueda (km 41) y 140.254.093,31 m² para el acuífero río Risaralda.

Tabla 6

Clasificación de la amenaza según la puntuación de la evaluación

Tipo de actividad	Subclase 1	Subclase 2	Categoría	Valor ICC	Clasificación
PA Producción agrícola	Cobertura urbana		PA1	0	Reducido
	Cobertura no agrícola		PA2	0	Reducido
	Cobertura agrícola	Cultivo de pancoger o semintensivo	PA3	0,46708	Moderado
		Cultivo extensivo	PA4	0,61902667	Elevado

Fuente: elaboración propia, adaptada de Foster *et al.* (2002).

En las Figuras 5 y 6 se presentan los mapas con los resultados finales de la clasificación y grado de amenazas existentes en el acuífero Santágueda (km 41) y río Risaralda con el fin de tener como referencia la magnitud de la amenaza producto de los vertimientos que generan una carga contaminante puntual y difusa, y a la que están sometidas las aguas subterráneas clasificadas en acuíferos de porosidad primaria. En el acuífero río Risaralda se encuentra la mayor área cultivada con respecto al acuífero Santágueda (km 41), por lo que su clasificación en un nivel elevado se encuentra en una mayor extensión.

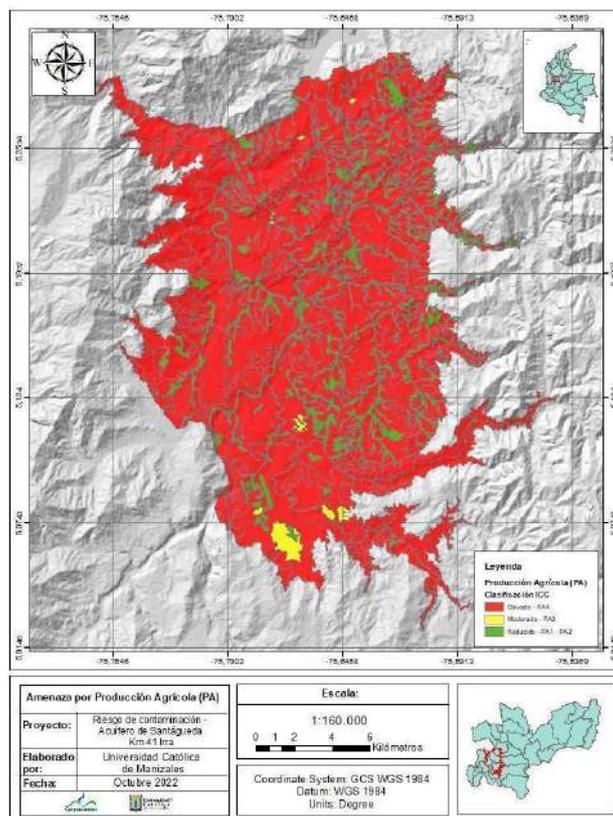


Figura 5. Evaluación de la amenaza por producción agrícola para el acuífero Santágueda (km 41)

Fuente: Corpocaldas & UTP (2022).

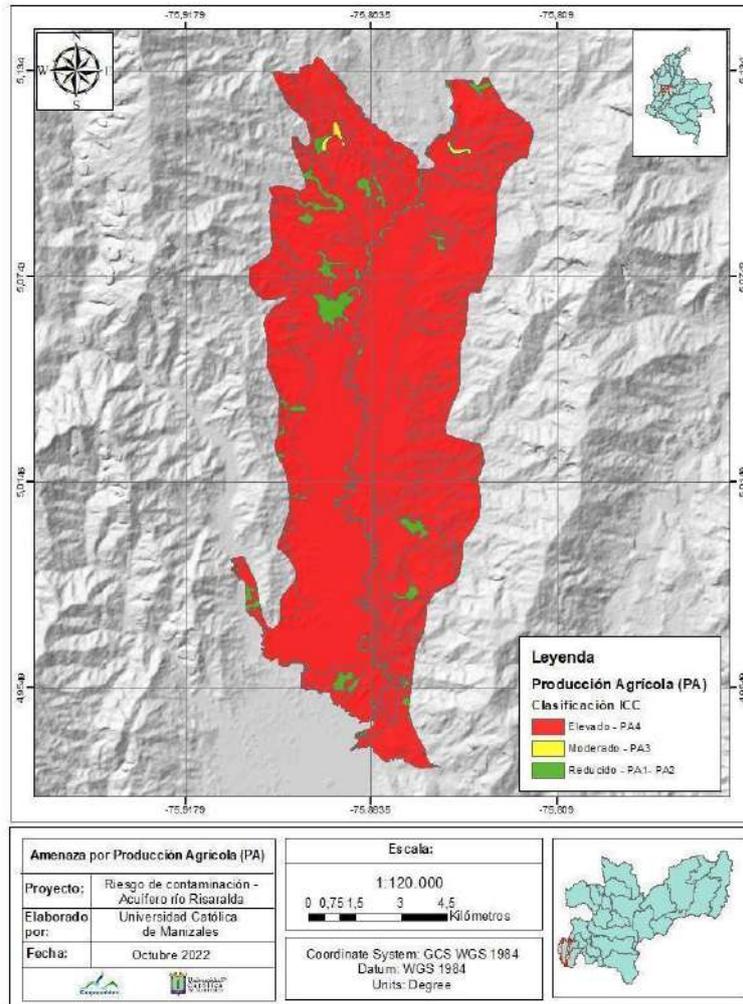


Figura 6. Evaluación de la amenaza por producción agrícola para el acuífero río Risaralda
Fuente: Corpocaldas & UTP (2022).

En cuanto a la actividad pecuaria porcícola (PPI), se evaluó la amenaza en los municipios de San José (2 porcícolas), Belalcázar y Viterbo. Esta arrojó un valor de ICC de 0,48 que la ubica en un nivel moderado, como se evidencia en la Tabla 7.

Tabla 7
Clasificación de la amenaza según la puntuación de la evaluación

Tipo de actividad	Municipio	Categoría	Valor ICC	Clasificación
Pecuaria porcícola	San José	PPI	0,48	Moderado
	San José	PPI	0,48	Moderado
	Belalcázar	PPI	0,48	Moderado
	Belalcázar	PPI	0,48	Moderado
	Viterbo	PPI	0,48	Moderado

Fuente: elaboración propia, adaptada de Foster *et al.* (2002).

En los mapas de amenaza para la actividad pecuaria porcícola (Figuras 7 y 8) se observan el origen y grado de amenaza. Para el acuífero Santágueda (km 41) se identificó un vertimiento puntual no significativo con respecto al área del acuífero. Por otra parte, en el acuífero río Risaralda se evidencian los cuatro puntos correspondientes a cada municipio evaluado, donde se identificaron dos producciones porcícolas en el municipio de San José representadas en la zona nororiente del acuífero; dos para Belalcázar y una para Viterbo. Esta actividad productiva genera vertimientos puntuales y dispersos en el acuífero, los cuales pueden afectar la disponibilidad y calidad para los usos domésticos.

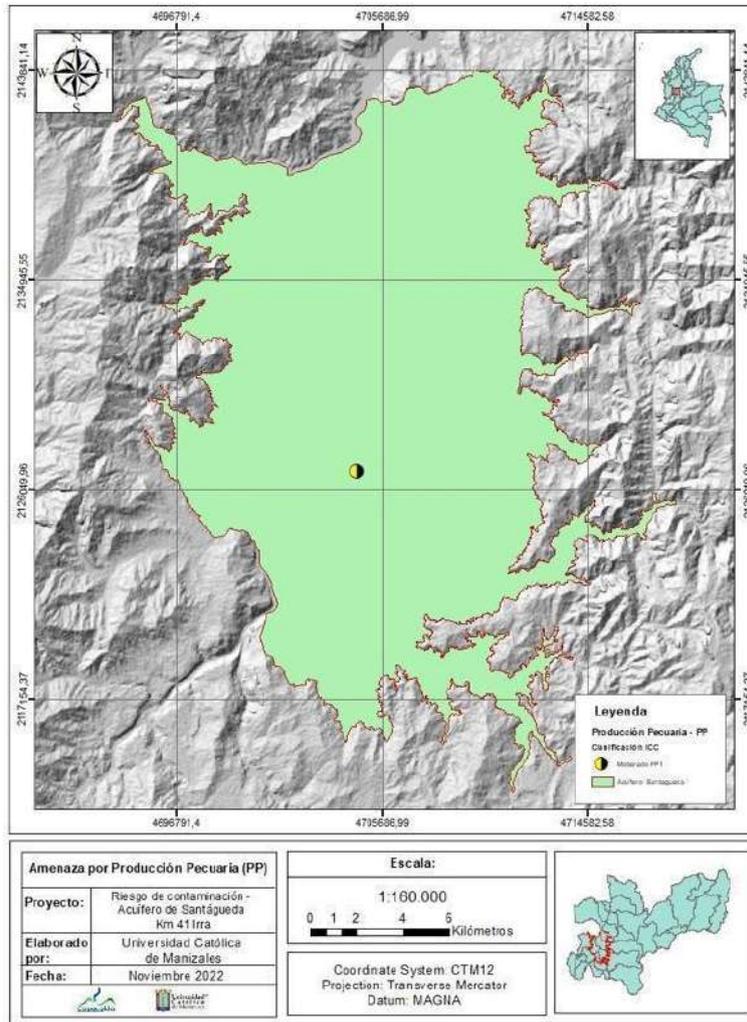


Figura 7. Evaluación de la amenaza por actividad pecuaria porcícola para el acuífero Santágueda (Km 41)

Fuente: Corpocaldas & UTP (2022).

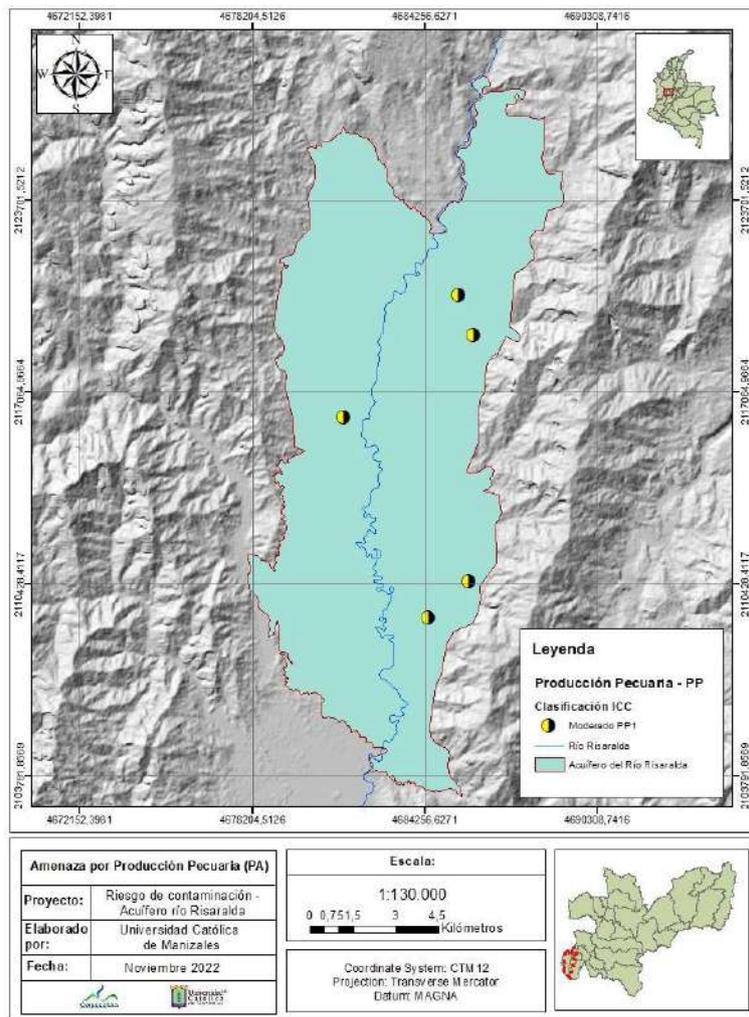


Figura 8. Evaluación de la amenaza por actividad pecuaria porcícola para el acuífero río Risaralda
Fuente: Corpocaldas & UTP (2022).

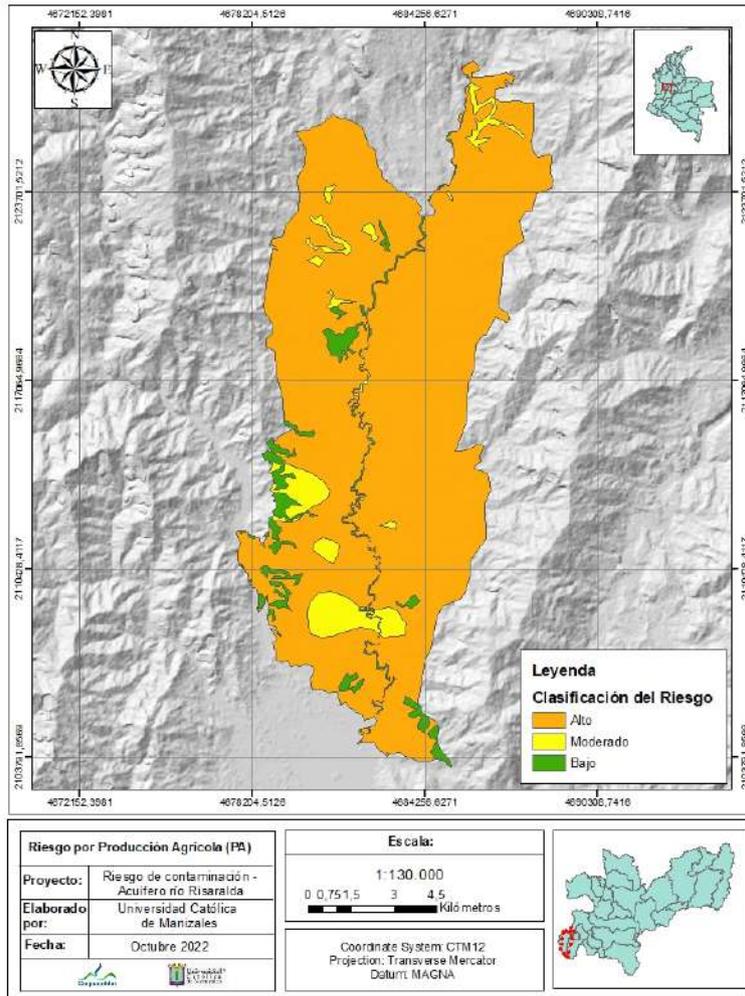


Figura 10. Evaluación del riesgo por producción agrícola para el acuífero río Risaralda
Fuente: Corpocaldas & UTP (2022).

Por su parte, la actividad pecuaria porcícola representa un solo punto con riesgo potencial bajo para el acuífero Santágueda (km 41) (Figura 11), identificado a partir de la información de permisos de vertimiento suministrada por la corporación; sin embargo, debe ser tenido en cuenta, ya que puede tener implicaciones sobre la zona de influencia. En el acuífero del río Risaralda (Figura 12) se evidencia un riesgo moderado en cuatro puntos y alto en un punto, pues tiene una mayor área urbana respecto al acuífero Santágueda (km 41); por ende, existe un mayor número de reportes generados por Corpocaldas.

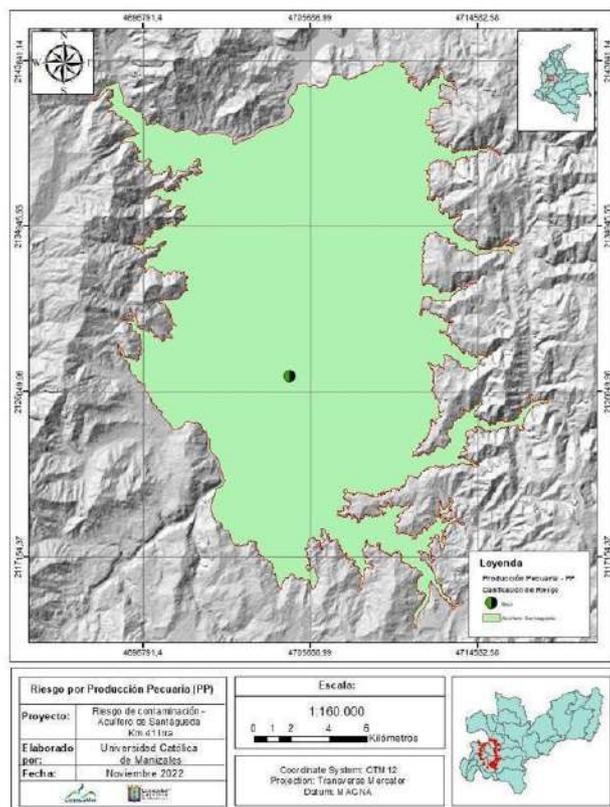


Figura 11. Evaluación del riesgo por actividad pecuaria porcícola para el acuífero Santágueda (km 41)

Fuente: Corpocaldas & UTP (2022).

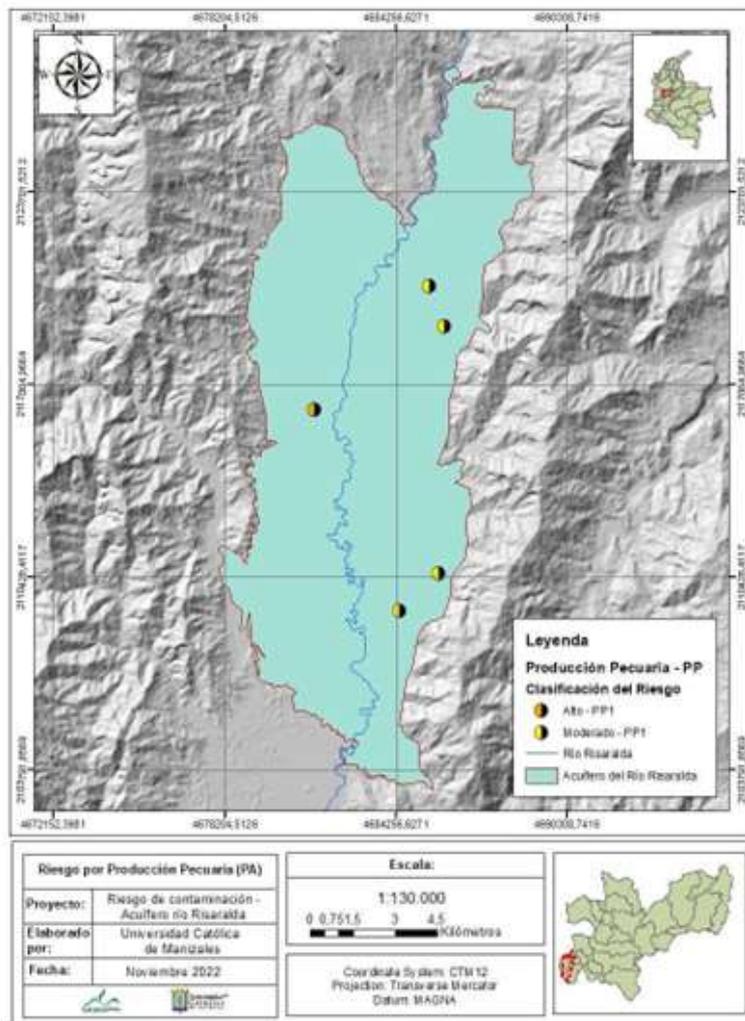


Figura 12. Evaluación del riesgo por actividad pecuaria porcícola para el acuífero río Risaralda
Fuente: Corpocaldas & UTP (2022).

Reflexiones y consideraciones finales

La evaluación de la amenaza para los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda es un paso esencial en la comprensión y protección de estos recursos hídricos subterráneos. Al llevar a cabo esta evaluación de manera cualitativa, se pudo determinar que la cobertura agrícola juega un papel crítico en la amenaza de contaminación de estos acuíferos. Específicamente, se identificaron dos categorías de cobertura agrícola: los cultivos de pancoger (PA3) y los cultivos extensivos (PA4). Los primeros presentaron una amenaza moderada, mientras que los segundos mostraron una amenaza elevada. Esta clasificación es de gran importancia debido a la extensión de los cultivos extensivos, lo que los convierte en una fuente potencial de contaminación significativa para las aguas subterráneas en la región.

Lo que hace que esta situación sea aún más preocupante es la naturaleza de estos acuíferos, pues son de porosidad primaria y tienen una mayor vulnerabilidad intrínseca a la contaminación. Esto se debe a que los poros del acuífero son más grandes y permiten una mayor movilidad de sustancias tóxicas utilizadas en la agricultura. En contraste, las coberturas urbanas (PA1) y las no agrícolas (PA2) no representan una amenaza significativa debido a su menor impacto y a las prácticas de gestión de aguas residuales más avanzadas en entornos urbanos.

Para evaluar de manera integral el riesgo de contaminación, se combinaron dos enfoques: la amenaza calculada mediante la metodología POSH y la vulnerabilidad intrínseca determinada por Corpocaldas utilizando la metodología GOD. La superposición de estos mapas reveló diferentes niveles de riesgo, donde el nivel más alto se presentó en el acuífero Santágueda (km 41). En este acuífero los niveles de riesgo se distribuyeron en un rango de moderado, bajo y alto, en orden de mayor a menor área, en gran parte debido a la influencia de la actividad agrícola. En el acuífero del río Risaralda también se observaron niveles de riesgo altos, moderados y bajos, nuevamente relacionados principalmente con la actividad agrícola. No obstante, la actividad pecuaria porcícola también fue considerada, pues reveló niveles de riesgo bajos y moderados en ambos acuíferos.

Es fundamental tener en cuenta que la vulnerabilidad intrínseca del acuífero desempeña un papel crítico en la determinación del riesgo de contaminación. A mayor vulnerabilidad, mayor es el riesgo, independientemente de la amenaza por cargas contaminantes.

En relación con la actividad pecuaria porcícola, es importante mencionar que se enfrentaron desafíos en la obtención de información detallada, lo que limitó la capacidad de elaborar mapas y evaluar el riesgo en esta área específica.

La categorización del riesgo de contaminación de los acuíferos Santágueda (km 41) y río Risaralda, basada en la categorización de la amenaza para las actividades agrícolas y pecuarias, proporciona una base sólida para la toma de decisiones y acciones de protección ambiental. Esto es particularmente relevante debido al alto porcentaje de área cubierta por actividades agrícolas en la región y el impacto potencial de las aguas residuales no domésticas generadas por la actividad porcícola. La evaluación del riesgo de contaminación complementa los esfuerzos de planificación y gestión ambiental en la zona, ya que ayudan a identificar áreas críticas que requieren acciones prioritarias para garantizar la protección a largo plazo de estos valiosos acuíferos.

La contaminación de las aguas subterráneas debido a la actividad de los sistemas productivos es un tema de creciente preocupación a nivel mundial. A medida que la población mundial aumenta y la demanda de alimentos, energía y productos industriales crece, la presión sobre los recursos hídricos subterráneos también se intensifica. Algunas de las implicaciones que tiene el agua subterránea en los sistemas productivos se mencionan a continuación.

Las aguas subterráneas son una fuente crucial de agua dulce en muchas partes del mundo. Son esenciales para la agricultura, la industria, el suministro de agua potable y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Además, son un recurso estratégico en regiones donde la escasez de agua superficial es un problema recurrente.

A pesar de su importancia, las aguas subterráneas son particularmente vulnerables a la contaminación debido a su aislamiento en el subsuelo. Los contaminantes como pesticidas, fertilizantes, productos químicos industriales y desechos orgánicos pueden infiltrarse en el suelo y alcanzar los acuíferos, donde la depuración natural es a menudo limitada o muy lenta. Esto significa que una vez que se contamina un acuífero, la recuperación puede llevar décadas o incluso siglos.

Los sistemas productivos pueden contribuir significativamente a la contaminación de las aguas subterráneas. Las prácticas agrícolas como el uso excesivo de fertilizantes, pesticidas y la gestión inadecuada de los desechos de la ganadería son fuentes comunes de contaminación. Del mismo modo, las actividades industriales pueden liberar productos químicos tóxicos que se infiltran en los acuíferos.

La contaminación de las aguas subterráneas plantea riesgos significativos para la salud humana y el medio ambiente. El consumo de agua contaminada puede causar una serie de problemas de salud, desde enfermedades gastrointestinales hasta la exposición a sustancias químicas tóxicas. Además, la contaminación de los acuíferos puede dañar los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad, afectando a especies vegetales y animales.

Asimismo, la contaminación de las aguas subterráneas conlleva costos significativos. Esto incluye la necesidad de encontrar fuentes alternativas de agua potable, purificar el agua contaminada y abordar los impactos en la salud pública. Además, la pérdida de la calidad del agua puede tener un efecto negativo en la productividad agrícola y la viabilidad económica de las comunidades rurales.

Para abordar este problema, es esencial implementar enfoques de mitigación y prevención efectivos. Esto incluye la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, la regulación y supervisión de la gestión de desechos industriales, y la inversión en tecnologías de tratamiento de aguas residuales. La educación y la concienciación también desempeñan un papel crucial en la promoción de prácticas responsables.

Abordar la contaminación de las aguas subterráneas generada por los sistemas productivos representa un desafío complejo y multifacético que demanda una respuesta coordinada a escala global. La preservación de estos recursos hídricos subterráneos emerge como un pilar fundamental para garantizar la seguridad alimentaria, promover la salud pública y respaldar la sostenibilidad ambiental. Mantener un equilibrio entre el desarrollo económico y la salvaguarda de estos recursos valiosos se erige como una pieza clave para la construcción de un futuro sostenible.

Por otro lado, existen herramientas importantes —modelos y las metodologías— que se convierten en una especie de simulador que utiliza cálculos hidrogeoquímicos para desentrañar las complejas reacciones químicas que ocurren en el subsuelo. Esto es fundamental para

analizar la evolución de la composición química del agua subterránea a lo largo del tiempo y el espacio. Gracias a estas herramientas, los científicos e investigadores pueden obtener una visión más completa de los factores que afectan la química del agua subterránea, lo que a su vez contribuye a la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos subterráneos.

Es importante destacar que el desarrollo de estos modelos hidrogeoquímicos se ha beneficiado enormemente de la recopilación de datos que provienen tanto de la ciencia ciudadana como de análisis en laboratorio. La contribución de la comunidad científica y la disponibilidad de datos precisos y detallados son fundamentales para calibrar y validar estos modelos.

Un aspecto interesante que ha emergido de estos estudios es la importancia de la disolución de minerales de carbonato en la composición del agua subterránea. Minerales como la calcita, la dolomita, el yeso y la halita han sido identificados como componentes clave que se disuelven en el agua subterránea; lo que, a su vez, conduce a un aumento en la concentración de iones mayores en el agua subterránea. Este hallazgo resalta la complejidad de los procesos hidrogeoquímicos y subraya la necesidad de modelos precisos para comprender y gestionar adecuadamente nuestros recursos hídricos subterráneos.

Es fundamental conocer y evaluar el riesgo de contaminación de los acuíferos por diferentes razones. Los acuíferos a menudo sirven como fuentes significativas de agua potable para comunidades locales y regionales, entonces conocer el riesgo de contaminación es esencial para garantizar la seguridad del suministro de agua potable, pues la contaminación de los acuíferos podría poner en peligro la salud de las personas que dependen de ellos para beber y otros usos domésticos. Además, son cruciales para el mantenimiento de ecosistemas acuáticos y terrestres. La contaminación de los acuíferos puede dañar la flora y fauna, alterando los ecosistemas y afectando a la biodiversidad.

Por otro lado, como ya se ha mencionado, la agricultura y la industria a menudo dependen del agua subterránea para riego, procesos industriales y otros fines. La contaminación de los acuíferos podría dañar estas actividades económicas, lo que a su vez tendría un impacto en la seguridad alimentaria y en la economía. Los acuíferos son recursos finitos que deben ser gestionados de manera sostenible para las generaciones futuras; por lo tanto, evaluar y mitigar el riesgo de contaminación es esencial para preservar estos recursos hídricos a largo plazo y garantizar su disponibilidad para las generaciones venideras. Por otra parte, la limpieza y

descontaminación de los acuíferos puede ser extremadamente costosa. Conocer el riesgo de contaminación y tomar medidas preventivas puede ayudar a evitar gastos significativos y a mitigar los impactos económicos adversos.

Finalmente, conocer el riesgo de contaminación de los acuíferos es esencial para proteger la salud humana, el medio ambiente y la economía. La gestión adecuada de las aguas subterráneas es esencial para asegurar un futuro sostenible y saludable para las comunidades, especialmente aquellas más vulnerables.

Referencias

- Agudelo Moreno, L. J., Zuleta Lemus, D. D. S., Lasso Rosero, J., Agudelo Morales, D. M., Sepúlveda Castaño, L. M. & Paredes Cuervo, D. (2020). Evaluation of aquifer contamination risk in urban expansion areas as a tool for the integrated management of groundwater resources. Case: Coffee Growing Region, Colombia. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100298>
- Agudelo, D. M. & Sepúlveda, L. M. (2017). *Gestión del riesgo a la contaminación del acuífero en la zona de expansión del municipio de Pereira, Risaralda* [Trabajo de grado]. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/3e59e10e-6607-46e2-af24-bfbf6c163eab/content>
- Akber, M. A., Dutta, M., Islam, M. A., Billah, S. M. (2020). Nitrate contamination of water in dug wells and associated health risks of rural communities in southwest Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(163) <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8128-2>
- Arévalo Ulloa, M. A. (2022). *Vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional de Tumbes. <https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/63778>
- Argudo García, J. J. (2019). La gestión del agua en distintas civilizaciones: de Grecia a la actualidad. *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de Los Ingenieros Técnicos de Minas*, (15), 60-75. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7401435>
- Arizabalo, R. D. & Díaz, G. (1991). La contaminación del agua subterránea y su transporte en medios porosos. *Cuadernos del Instituto de Geofísica UNAM*, (6), 7-34. https://www.researchgate.net/publication/316004500_La_contaminacion_del_agua_subterranea_y_su_transporte_en_medios_porosos
- Banda, R. & Ruiz De la Garraleta, A. (2002). *Riesgo de contaminación hídrica subterránea por actividad industrial, cuenca de los arroyos Martín y Carnaval, Buenos Aires, Argentina*, (153-162). En Bocanegra, E., Martínez, D. & Massone, H. (eds) *Groundwater and human development*. Universidad Nacional de Mar del Plata, (624-633).

- Bautista, F. (2011). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la península de Yucatán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), VII-VIII. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93917767002>
- Betancur, T. (2023). *El potencial de las aguas subterráneas en el departamento de Antioquia*. Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/37051/1/BetancurTeresita_2023_PotencialAguasSubterranas.pdf
- Blarasin, M., Cabrera, A., Matiatos, I., Becher Quinodóz, F., Giuliano Albo, J., Lutri, V., Matteoda, E., & Panarello, H. (2020). Comparative evaluation of urban versus agricultural nitrate sources and sinks in an unconfined aquifer by isotopic and multivariate analyses. *Science of The Total Environment*, 741(140374). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140374>
- Bolaños, S. & Betancur, T. (2018). Estado del Arte sobre el Cambio Climático y las Aguas Subterráneas. Ejemplos en Colombia. *Revista Politécnica*, 14(26), 52-64. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n26a5>
- Buitrago, L. M. (2015). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el municipio de Funza, Cundinamarca* [Trabajo de grado]. Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/03839746-3e17-4927-a9b7-8755f3b33852/content>
- Cisneros Zamora, G. Z. (2019). *Modelo de flujo del agua subterránea del acuífero laguna de hormigas, Chihuahua, México* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Chihuahua. <https://repositorio.uach.mx/277/>
- Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas) & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Chinchiná Departamento de Caldas- POMCA Chinchiná*. Contrato 203 de 2011.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas) & Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). (2015). *Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Río Risaralda*. Contrato 136 de 2015.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas) & Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). (2016). *Plan de Manejo del Acuífero Santágueda (Km 41) – Formulación y Ejecución*. Contrato 223 de 2016.

- Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas) & Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). (2019). *Actualización del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero Santágueda (Km 41)*. Convenio interadministrativo 078 de 2018.
- Estrada Godoy, F., Silva García, J. T., Ochoa Estrada, S., Moncayo Estrada, R., Cruz-Cárdenas, G., Villalpando Barragán, F., Ramos Leal, A. & Nava Velázquez, J. (2013). Aplicación del método SINTACS para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la cuenca del río Duero, Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4), 235-248. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/35579>
- Flórez, G. Y., Alzate, A. M., Vásquez, P., Vargas, L. A., Aldana E. J. & Hoyos, F. E. (2024). Risk to pollution of aquifers associated with productive activities and environmental management of water resources: bibliometric analysis and trends. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 15(1), 577-590. <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i1.pp577-590>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite* [Informe de síntesis]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Foster, S. & Gomes, D. (1989). *Groundwater Quality Monitoring: An Appraisal of Practices and Costs* [Manual técnico]. Publicación de la Organización Mundial de la Salud, la Organización Panamericana de la Salud & el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia M. & París, M. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>
- Gaviria, J. I. & Betancur, T. (2005). Una caracterización de carga contaminante a los acuíferos libres del Bajo Cauca Antioqueño. *Gestión y Ambiente*, 8(2), 85-102. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/89358>
- Gomes, M. G., de Vargas, T., Belladonna, R., Dalbosco, V., de Araujo, B. & Bortolin, T. A. (2021). A vulnerabilidade natural de aquíferos fraturados: avaliando os modelos DRASTIC e GOD, originais e adaptados. *Geosciences = Geociências*, 40(3), 735-749. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i03.15735>

- Gómez Acero, G. P. (2017). *Evaluación de la vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero Guadalupe en Tenjo Cundinamarca, con la implementación del modelo Drastic* [Trabajo de grado]. Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/734
- Gómez-Isidro, S., Gutiérrez-Lozano, F. J. & Torres, C. M. (2011). Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga. *Revista UIS Ingenierías*, 10(1), 52-64. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/53-64>
- González, M. (2008). *Evaluación del peligro de contaminación del acuífero del arroyo Alamar, Tijuana, Baja California* [Tesis de maestría]. El Colegio de la Frontera del Norte. <https://www.colef.mx/posgrado/tesis/2006732/>
- González, P., López-Vera, F., Gómez, C. & Lacalle, B. (2006). Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas de un municipio residencial (Villanueva de la Cañada, Madrid). *Boletín Geológico y Minero*, 117(3), 413-422. https://www.igme.es/boletin/2006/117_3_2006/ART.%207.%20Evaluacion%20del%20peligro%20de%20contaminacion_ontaminacion.pdf
- Grinshpan, M., Furman, A., Dahlke, H. E., Raveh, E. & Weisbrod, N. (2021). From managed aquifer recharge to soil aquifer treatment on agricultural soils: Concepts and challenges. *Agricultural Water Management*, 255, 106991. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106991>
- Han, D., Cao, G., McCallum, J. & Song, X. (2015). Residence times of groundwater and nitrate transport in coastal aquifer systems: Daweijia area, northeastern China. *Science of The Total Environment*, 538, 539–554. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969715305374?via%3Dihub>
- Henry, J. G. & Heinke, G. W. (1996). *Ingeniería Ambiental*. Prentice Hall.
- Hirata, R., Suhogusoff, A. & Fernandes, A. (2007). Groundwater resources in the State of São Paulo (Brazil): the application of indicators. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 79(1), 141–152. <https://www.redalyc.org/pdf/327/32779116.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2019). *Estudio Nacional del Agua, 2018*. [Documento público]. MinAmbiente. https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000* [Documento público]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://www.corpocesar.gov.co/files/Ref_UnicoyPersistente/Corine_Land_Cover.pdf
- Jarrín, A. E., Salazar, J. G. & Martínez-Fresneda Mestre, M. (2017). Evaluación del riesgo a la contaminación de los acuíferos de la Reserva Biológica de Limoncocha, Amazonía Ecuatoriana. *Revista Ambiente & Agua*, 12(4), 652-665. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92851634011>
- Kumar, A., Alam, A. & Singh, A. (2023). Simulation of One-Dimensional Solute Transport with Equilibrium-Controlled Non-Linear Sorption Using Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model. *Engineering Proceedings*, 37(1), 28. <https://doi.org/10.3390/ECP2023-14741>
- López, A. (2023). *Modelo matemático de flujo de la masa de agua subterránea de Sierra de Crevillente (Alicante-Murcia, España)* [Trabajo de máster]. Universitat Politècnica De València. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/196670/Lopez%20-%20Modelo%20matematico%20de%20flujo%20de%20la%20masa%20de%20agua%20subterranea%20de%20Sierra%20de%20Crevillente%20Alican....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Madrigal Solís, H., Fonseca Sánchez, A., Núñez Solís, C. & Gómez Cruz, A. (2014). Amenaza de contaminación del agua subterránea en el sector norte del acuífero Barva, Heredia, Costa Rica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 103-118. <https://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1223>
- Mieles Montenegro, M. M. (2021). *Determinación de la influencia de la recarga por precipitación en el desplazamiento de la cuña salina de un acuífero costero piloto utilizando el software Sutra* [Trabajo de grado]. Universidad de Cartagena. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/11509/TRABAJO%20DE%20GRADO%20MÓNICA%20MIELES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2014). *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos* [Documento público]. MinAmbiente. <https://www.studocu.com/co/document/universidad-nacional-abierta-y-a-distancia/ingenieria-ambiental/guia-metodologica-para-la-formulacion-de-planes-de-manejo-ambienta-de-acuiferos/41269153>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2014). *Programa Nacional de Aguas Subterráneas - PNASUB: “Un camino estratégico para la gestión de un recurso invisible”* [Documento público]. MinAmbiente. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Anexo-37.-Programa-Nacional-de-Aguas-Subterráneas.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Viceministerio de Ambiente. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>
- Morris, B. L., Lawrence, A. R. L., Chilton, P. J. C., Adams, B., Calow, R. C. & Klinck, B. A. (2003). *Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management* [Informe]. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Departamento de Desarrollo Internacional, Cooperación Belga para el Desarrollo & Servicio Geológico Británico. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/19395>
- Noreña, J. M., Osorio, N. W. & Gómez, J. P. (2016). *Manual de uso de la porcina en la agricultura, “De la granja al cultivo”*. Universidad Nacional de Colombia. <https://www.miporkcolombia.co/wp-content/uploads/2018/07/Manual-Porcina.pdf>
- Oliveira, A., & Guimarães, J. (2010). Aplicação dos Métodos Drastic e Posh para a Determinação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis-MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 15(2), 127-142. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v15n2.p127-142>
- Organización de las Naciones Unidas. (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas Subterráneas, hacer visible el recurso invisible* [Informe]. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible* [Informe]. Organización de las Naciones Unidas. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf

- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua* [Informe]. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384657_spa
- Ouedraogo, I., Defourny, P. & Vanclooster, M. (2016). Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan African scale. *The Science of the Total Environment*, 544, 939-953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.135>
- Pacheco Ávila, J., Cabrera Sansores, A., y Pérez Ceballos, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(2), 165-179. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46780214.pdf>
- Pereira Romero, H. N. (2021). *Aplicación del modelo PHREEQC para estimar procesos hidrogeoquímicos y calidad química de agua, a partir de monitoreo comunitario* [Trabajo de grado]. Universidad de Concepción. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9600>
- Pérez Ceballos, R. & Pacheco Ávila, J. (2004). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería*, 8(1), 33-42. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen8/vulnerabilidad.pdf>
- Pisciotta, A., Gioacchino, C. & Favara, R. (2015). “Groundwater nitrate risk assessment using intrinsic vulnerability methods: A comparative study of environmental impact by intensive farming in the Mediterranean region of Sicily, Italy,” *Journal of Geochemical Exploration*, 156, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.002>
- Poeter, E., Fan, Y., Cherry, J., Wood, W. & Mackay, D. (2020). *Groundwater in Our Water Cycle. Getting to Know Earth's Most Important Fresh Water Source*. The Groundwater Project. <https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/groundwater-in-our-water-cycle.pdf>
- Pouleurs, D. (2021). *El gran libro del agua*. Xilem Watermark. https://recursos.educacion.gob.ec/wp-content/uploads/2022/eds/consumo_responsable/El_Gran_Libro_del_Agua_Latinoamerica.pdf
- Presidencia de la República (2015). *Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible* [Documento público]. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>

- Qiu, J. (2010). China faces up to groundwater crisis. *Nature* 466, 308. <https://doi.org/10.1038/466308a>
- Rakib, M. A., Sasaki, J., Matsuda, H., Quraishi, S. B., Mahmud, M. J., Bodrud-Doza, M., Ullah, A. K. M. A., Fatema, K. J., Newaz, M. A. & Bhuiyan, M. A. H. (2020). Groundwater salinization and associated co-contamination risk increase severe drinking water vulnerabilities in the southwestern coast of Bangladesh. *Chemosphere*, 246(125646). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125646>
- Ritchie, H. & Roser, M. (2015). *Water Use and Stress* [Artículo]. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/water-use-stress>
- Saha, D. & Alam, F. (2014). Groundwater vulnerability assessment using DRASTIC and Pesticide DRASTIC models in intensive agriculture areas of the Gangetic plains, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(12), 8741–8763. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4041-x>
- Sahuquillo, A., Custodio, E. & Llamas, M. R. (2009). La gestión de las aguas subterráneas. *Tecnología del agua*, 305, 60-67. <https://rac.es/ficheros/doc/00643.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano (Ingeominas). (2003). *Memoria mapa hidrogeoquímico de la plancha 5-13, Atlas de aguas subterráneas de Colombia a escala 1:500.000* [Proyecto: exploración y evaluación regional de las aguas subterráneas]. Hidrogeocol Ltda, contrato 412/2003. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B3/12006050020005/documento/Pdf/58.MemoriaMapaHidrogeoquímicaPL5-13.pdf>
- Stuyfzand, P. J. (1993). *Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands* [Tesis de doctorado]. Universidad Libre de Ámsterdam. <https://research.vu.nl/ws/portalfiles/portal/75835105/214.pdf>
- Tomalá Guale, H. M. & Bailón Piguave, I. M. (2022). *Determinación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Olón por el método GOD* [Tesis de grado]. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/6940>
- Torres, M. T. (2022). *Water, carbon, and nutrient cycles in terrestrial groundwater-dependent ecosystems of drylands: Ziziphus lotus shrublands as case study* [Tesis de doctorado]. Universidad de Almería. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/13124>

- Troldborg, M. (2010). *Risk assessment models and uncertainty estimation of groundwater contamination from point sources* [Tesis de doctorado]. Universidad Técnica de Dinamarca.
- Troncoso Ugalde, F. A. (2021). *Herramienta V.GeoLinkage para automatización del pre procesamiento de modelos hidrológicos y evaluación de criterios de sustentabilidad de acuíferos* [Trabajo de grado]. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181372>
- Vásquez-Carreño, F. (2017). *Propuesta metodológica para la evaluación del potencial de contaminación de aguas subterráneas en Colombia, a partir del método Drastic* [Trabajo de grado]. Universidad Católica de Colombia. <https://repositorio.ucatolica.edu.co/handle/10983/14543?mode=full>
- Vélez Otálvaro, M. V., Ortiz Pimienta, C. & Vargas Quintero, M. C. (2011). *Las aguas subterráneas. Un enfoque práctico* [Manual]. Universidad Nacional de Colombia & el Instituto Colombiano de Geología y Minería. <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/Aguas-subterraneas-enfoque-practico.PDF>
- Vergara, V., Gutiérrez, G. & Flórez, H. (2009). Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Morroa a contaminación por plaguicidas aplicando la metodología DRASTIC. *Ingeniería y Desarrollo*, (26), 51–64. https://www.researchgate.net/publication/239596753_Vulnerability_assessment_to_pesticides_contamination_via_DRASTIC_method_in_the_Morroa_aquifer
- Yu, C. (2011) China's water crisis needs more than words. *Nature* 470, 307. <https://doi.org/10.1038/470307a>
- Zhang, Q., Xu, P. & Qian, H. (2020). Groundwater Quality Assessment Using Improved Water Quality Index (WQI) and Human Health Risk (HHR) Evaluation in a Semi-arid Region of Northwest China. *Exposure and Health*, 12, 487-500. <https://doi.org/10.1007/s12403-020-00345-w>

Sobre los autores

Ángela María Alzate Álvarez¹, Erika Juliana Aldana Arcila², Paola Alejandra Vásquez Cardona³, Diana Marcela Agudelo Morales⁴, Mariana Llano Manjarrés⁵, Lucerito Ramírez Sanabria⁶, Gloria Yaneth Flórez Yepes⁷, Luis Alberto Vargas Marín⁸

^{1,2,5,6,7} Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales (GIDTA), Semillero de Investigación en Gestión Integral del Patrimonio Hídrico (GIPH), Universidad Católica de Manizales (UCM), Carrera 23 no. 60 – 63, Manizales, Caldas, 170004, Colombia.

³ Grupo de Investigación en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Corpocaldas (GIRNMAC), Calle 21 no. 23 – 22, edificio Atlas, Manizales, Caldas, 170006, Colombia.

⁴ Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento (GIAS), Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), Carrera 27 #10-02, barrio Álamos, Pereira, Risaralda, 660003, Colombia.

⁸ Centro de Investigación en Medio Ambiente y Desarrollo (CIMAD), Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.

Riesgo de contaminación de acuíferos asociado a actividades productivas

Esta obra nos impulsa a explorar la delicada conexión entre las actividades productivas y la vulnerabilidad de los acuíferos en Colombia, un tema de creciente relevancia en el contexto actual. A través de un enfoque meticuloso que combina investigación de campo y análisis documental, los autores revelan las complejidades del riesgo de contaminación en los acuíferos Santágueda y río Risaralda, ofreciendo una visión integral sobre cómo las prácticas agrícolas e industriales impactan la calidad del agua subterránea. Se examinan las dinámicas de la producción agrícola, la actividad pecuaria y la gestión inadecuada de aguas residuales, así como las amenazas que estas representan para la sostenibilidad de los recursos hídricos. En definitiva, esta obra invita al lector a reconsiderar la relación entre el desarrollo económico y la conservación ambiental. Al abordar el riesgo de contaminación desde una perspectiva holística, la obra contribuye significativamente al entendimiento de la gestión sostenible de los acuíferos y resalta la necesidad de adoptar un enfoque colaborativo para proteger estos recursos vitales.

www.ucm.edu.co · (60) 6 8933050

ce centro
editorial
Universidad Católica de Manizales

