



**Identificación de amenazas a la calidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero
Cartama**

Santiago Díez Palacio

Informe de proyecto de investigación como requisito para optar al título de pregrado en
Ingeniería Ambiental

Asesora

Ph.D Teresita Betancur Vargas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2023

Cita	(Díez, 2023)
Referencia	Díez, S. (2023). <i>Identificación de amenazas a la calidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero Cartama</i> [Proyecto de investigación]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Línea en hidrogeología del Grupo de Investigación y Gestión Ambiental – GIGA



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio Cessar Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Lina Maria Berrouet Cadavid

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A Dios, por mis padres, quienes siempre me brindaron formación académica y apoyo incondicional. A mi hermanita Vanessa, mis primos y primas, tíos y a tías, abuelos y abuelas; sin el respaldo y cariño de ustedes esto no hubiese sido posible.

A mis angelitos del cielo.

Al grupo GIGA línea en Hidrogeología, por la oportunidad de vivir esta maravillosa experiencia; y por los aportes valiosos de cada uno de los profesionales (Tere, Juli, Cris, Miriam, Marta, Doris Liliana, Yuliana, Dei, María Inés, Luz América, Breiner y Andrés Felipe) y compañeras auxiliares (Mariana y Paulina) en el desarrollo de esta investigación.

A mí mismo, por mi capacidad de entrega y convicción. Estos son los frutos de un arduo trabajo.

Agradecimientos

Le agradezco a Dios y a la vida por permitirme terminar el pregrado siendo auxiliar de este excepcional grupo de investigación. Extiendo mis agradecimientos a cada una de las personas que lo conforman; por sus conocimientos, consejos y gratos momentos compartidos. Fue un sueño realizado.

A lo largo de todo el proceso tuve la fortuna de conversar y discutir las ideas, las inquietudes, los avances y retrocesos con la profe Tere; a quien agradezco por su disponibilidad, aprendizajes, exigencia y gran ayuda en la realización de este bonito trabajo. Toda mi admiración y respeto para ella.

Quisiera agradecer especialmente a Breiner, mi gran maestro y un referente a seguir. Reconozco con gratitud sus enseñanzas a nivel personal y académico; aprecio su comprensión, motivación constante y confianza en mí.

Valoro mucho las palabras de tranquilidad y aliento que me brindó Deisy y el interés por parte de Andrés Felipe, compañero de viaje, quien siempre me escuchó atento y sugirió ideas para mejorar el proyecto.

A la Universidad de Antioquia y sus excelentes profesores, sin duda mi formación como profesional estuvo en manos de los mejores. A mis compañeros de carrera, del semillero y profes del grupo G-LIMA, donde dí mis primeros pasos en la investigación. También, a cada uno de mis compañeros del semillero ENTRE POROS, los aprecio.

Mis más sinceros agradecimientos a CORANTIOQUIA y a la comunidad del territorio Cartama, quienes compartieron con libertad su tiempo e información con nosotros.

“Caminante, no hay camino, se hace camino al andar”. Antonio Machado

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
1 Introducción	10
2 Objetivos	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 Zona de estudio	12
3.1 Localización geográfica	12
3.2 Caracterización sociodemográfica	13
3.2.1 Aspectos demográficos	13
3.2.2 Condiciones de vida	14
3.2.3 Cobertura en los servicios de acueducto y alcantarillado	15
3.2.4 Cobertura en los servicios de salud y educación	16
3.3 Aspectos económicos	16
3.3.4 Actividad agrícola	17
3.3.2 Producción pecuaria	17
3.4 Sistema hidrogeológico	18
4 Metodología	22
4.1 Materiales y métodos	32
5 Resultados y discusión	36
6 Conclusiones	48
7 Referencias	51

Lista de tablas

Tabla 1. Cobertura de los servicios de acueducto y alcantarillado por municipio y sector – subregión Suroeste antioqueño.....	16
Tabla 2 . Subclases y categorías de actividades potencialmente contaminantes.....	23
Tabla 3. Resumen de las guías para la calidad de agua potable y del comportamiento de contaminantes seleccionados en el subsuelo	26
Tabla 4. Valores relativos y clasificación del ICC de cada una de las categorías de actividades contaminantes para el sistema Cartama	40
Tabla 5. Veredas con un mayor potencial afectación a las aguas subterráneas del sistema Cartama	44

Lista de figuras

Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio	13
Figura 2. Distribución de la población por sectores para cada uno de los tres municipios de estudio	14
Figura 3. Índice de pobreza multidimensional – IPM por sector – subregión Suroeste antioqueño	14
Figura 4. Cantidad de ganado bovino (lado izquierdo) y porcino (lado derecho) en cada uno de los municipios que conforman el sistema acuífero Cartama.....	18
Figura 5. Ficha de información del sistema acuífero Cartama.....	18
Figura 6. Resumen de las actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al medio subterráneo	22
Figura 7. Gráfica alusiva al tipo o clase de contaminante.....	27
Figura 8. Gráfica de intensidad de la contaminación	29
Figura 9. Gráfica de modo de disposición del contaminante	29
Figura 10. Gráfica alusiva al factor tiempo de aplicación del contaminante	30
Figura 11 . Valores de ponderación para las cuatro características de la carga contaminante.....	31

Figura 12. Espacialización de las actividades potencialmente contaminantes de tipo puntual sobre el acuífero Cartama.....	36
Figura 13. Espacialización de las actividades potencialmente contaminantes de tipo difuso sobre el acuífero Cartama	38
Figura 14. Espacialización de las categorías de actividades potencialmente contaminantes de tipo puntual sobre el mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del sistema acuífero Cartama	42
Figura 15. Espacialización de las categorías de actividades potencialmente contaminantes de tipo puntual sobre el mapa de función de recarga del sistema acuífero Cartama.....	44
Figura 16. Superposición de las categorías de actividades potencialmente contaminantes de tipo difuso con las tres (3) zonas de interés hidrogeológico	46
Figura 17. Especialización de las amenazas por contaminación de tipo puntual y difuso sobre el sistema Cartama	46

Lista de fotografías

Fotografía 1. Participantes del taller de identificación de amenazas, impactos y problemáticas asociadas al sistema hidrogeológico Cartama	33
---	----

Anexos

Documento Soporte: Identificación de amenazas por contaminación.....	36
--	----

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
BsT	Bosque Seco Tropical
PMAA	Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MHC	Modelo Hidrogeológico Conceptual
CNVP	Censo Nacional de Población y Vivienda
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
SGSSS	Sistema General de Seguridad Social de Salud
UCI	Unidad de Cuidados Intensivos
IPM	Índice de Pobreza Multidimensional
ARD	Aguas Residuales Domésticas
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario
ICC	Índice potencial de generación de Carga Contaminante
SIG	Sistemas de Información Geográfica
e-Sirena	Sistema de Información de Recursos Naturales
FUNIAS	Formulario Único Nacional de Inventario de Aguas Subterráneas
MDT	Modelo Digital del Terreno
POTA	Plan de Ordenamiento Territorial Agropecuario
OMS	Organización Mundial de la Salud

Resumen

A las aguas subterráneas de los municipios de La Pintada, Valparaíso y Caramanta (territorio Cartama), se le asocian funciones y servicios ecosistémicos que pueden ser afectados negativamente ante el deterioro de su calidad. Conforme a ello, esta investigación propone mediante la aplicación de una metodología validada por la Universidad de Antioquia y el desarrollo de trabajo de campo, documentar aquellas actividades humanas que representan una mayor probabilidad de generación de cargas contaminantes al subsuelo. Como resultado, se reconocieron en la zona de estudio 22 categorías de actividades potencialmente contaminantes, en su mayoría calificadas con un índice de carga contaminante *elevado*. Adicionalmente, producto del cruce espacial de esta información con las tres zonas de interés hidrogeológico consideradas, se sugieren unas áreas específicas relacionadas con los tres (3) acuíferos que conforman el sistema hidrogeológico Cartama –principalmente en los municipios de La Pintada y Valparaíso–, donde la afectación potencial por nitratos a las aguas subterráneas es mayor; debido a la fragilidad ambiental en dichas áreas, sumado a la alta posibilidad de que la generación de la carga contaminante se haga efectiva. Finalmente, estas situaciones de riesgo son alertas, que pueden comprometer la calidad del recurso subterráneo y, a su vez, la calidad de vida de los seres vivos y ecosistemas que dependen de él.

Palabras clave: agua subterránea, sistema acuífero Cartama, carga contaminante, zonas de interés hidrogeológico.

Abstract

To the groundwater of the municipalities of La Pintada, Valparaíso and Caramanta (Cartama's territory), is associated with ecosystem functions and services that can be negatively affected by deterioration of its quality. In accordance with the latter, this investigation proposes, through the application of a methodology validated by Universidad de Antioquia and field work, to record those human activities that represent a higher probability of generating a polluting load to the subsoil. As a result, 22 categories of potentially polluting activities were recognized in the study area, most of them classified as having an elevated polluting load index. Furthermore, as a result of the cartographic overlap of this information with the three zones of hydrogeological interest considered, specific areas related to the three (3) aquifers that make up the Cartama hydrogeological system –mainly in La Pintada and Valparaíso– are suggested, where the potential impact by nitrates percolating the groundwater is higher; due to the environmental fragility in these areas, added to the high probability that the generation of the polluting load becomes effective. Finally, these risk situations are alerts, they can compromise the underground resource quality and, in turn, the life conditions of the living beings and ecosystems that depend on it.

Keywords: groundwater, Cartama aquifer system, polluting load, zones of hydrogeological interest.

1 Introducción

Según Jhonson (1975), no hay verdad más grande que la expresión de que toda la vida depende del agua. Esta sustancia superior es definida por el autor, como el don máspreciado que la naturaleza le ha dado al hombre, al considerar que en los lugares donde se ha satisfecho la demanda de agua pura para beber, el desarrollo nacional y el nivel de vida han aumentado. Cabe aclarar que, menos de un 3% de la disponibilidad de agua dulce fluida, de nuestro planeta tierra, corresponde a ríos y lagos; de ahí que el 97% restante, algo así como 1.230 kilómetros cúbicos de agua se encuentran en el subsuelo (Jhonson, 1975).

El agua subterránea representa, a escala planetaria, una de las principales fuentes de abastecimiento para consumo humano en grandes ciudades y en extensas regiones agrícolas (Universidad de Antioquia y AMVA, 2015).

Estudios recientes realizados entre (Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, 2021) y (Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, 2022) muestran la coherencia a escala local de lo anteriormente mencionado, logrando determinar que más de 10.000 personas del Suroeste antioqueño se abastecen de las aguas subterráneas. Destacando los municipios de La Pintada, Valparaíso y Caramanta (territorio Cartama), donde el agua subterránea constituye un recurso natural estratégico, como potencial fuente de abastecimiento capaz de satisfacer las necesidades básicas de consumo humano, tanto para viviendas individuales, sin acceso al servicio de acueducto, como para el suministro público; además puede atender demandas para usos agropecuarios. Así mismo, se ha determinado la importancia de este recurso para la sostenibilidad de las funciones ecosistémicas del bosque seco tropical (Bs-T), bioma altamente vulnerable y con pocos relictos en la región.

De acuerdo con la importancia que juegan las aguas subterráneas del sistema acuífero Cartama en el desarrollo socioeconómico de la región, el bienestar del ser humano y de los ecosistemas asociados, se prioriza y define por necesidad la implementación de un instrumento normativo que oriente su planificación y administración, como lo es el Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos – PMAA; el cual, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2014) busca la conservación, protección y uso sostenible del recurso a través de la ejecución de programas, proyectos y actividades.

La Formulación de un PMAA se desarrolla según la Guía Metodológica (MADS, 2014) mediante las siguientes fases: aprestamiento, diagnóstico, formulación, ejecución y seguimiento y evaluación, teniendo en cuenta en todas estas las instancias de participación con las comunidades y demás actores relacionados con el recurso subterráneo. El contenido de la fase de diagnóstico se divide en dos componentes fundamentales, por un lado está la caracterización sociodemográfica y la descripción de aspectos económicos de la población asociada a la zona de estudio y, por otro lado, se tiene la caracterización del sistema acuífero dado por el conocimiento sintetizado en un modelo hidrogeológico conceptual – MHC, donde se busca trascender a la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, a la caracterización de la calidad del recurso subterráneo y a la evaluación de oferta y demanda.

El punto de llegada en la fase de diagnóstico pretende ser la identificación de problemáticas y amenazas al agua subterránea; una de ellas a la calidad, esta última derivada de la existencia de fuentes potenciales de contaminación referidas según Foster et al. (2002) a actividades socioeconómicas generalmente relacionadas con: desarrollo urbano, actividad industrial, producción agropecuaria, extracción minera y accidentes ambientales. Resaltando que, dichas actividades desarrolladas en superficie y subsuperficie pueden incorporar sustancias indeseadas que provocan una alteración en la calidad del agua y/o suelo, pudiendo afectar la salud del hombre, la calidad de vida o el funcionamiento natural del ecosistema.

Conforme a ello, existe la necesidad de implementar una visión proactiva, para proteger la calidad de este recurso promisorio ante el deterioro y para lograrlo se requiere, además de conocer el sistema hidrogeológico de estudio, identificar las fuentes potenciales de contaminación que sobre el existan. Atendiendo a esta necesidad, este proyecto busca –soportado en evaluación de información y trabajo de campo– documentar las actividades potencialmente contaminantes sobre el sistema acuífero Cartama, según la definición que de ellas han sido adelantadas en la metodología propuesta por Foster et al. (2002) adaptada y validada en Gaviria & Betancur (2005).

Este trabajo de investigación fue realizado en el marco del convenio 040 – COV2211 – 104 entre la Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA, el cual tiene como objeto "Aunar esfuerzos para la Actualización de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos de Occidente y Magdalena

Medio y la Formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos del Sistema Acuífero Cartama".

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Documentar las actividades antrópicas con potencial de generar cargas contaminantes, que, alteren la calidad natural de las aguas subterráneas del sistema acuífero Cartama; a fin de proporcionar conocimiento útil para la definición de medidas de control, que permitan prevenir y reducir la contaminación del recurso subterráneo.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar, en campo, la presencia de actividades potencialmente contaminantes para el sistema Cartama.
- Sistematizar, según la metodología de carga contaminante, las fuentes potenciales de contaminación reconocidas.
- Identificar las áreas con mayor potencial de afectación a la calidad del recurso subterráneo por la presencia de cargas contaminantes.

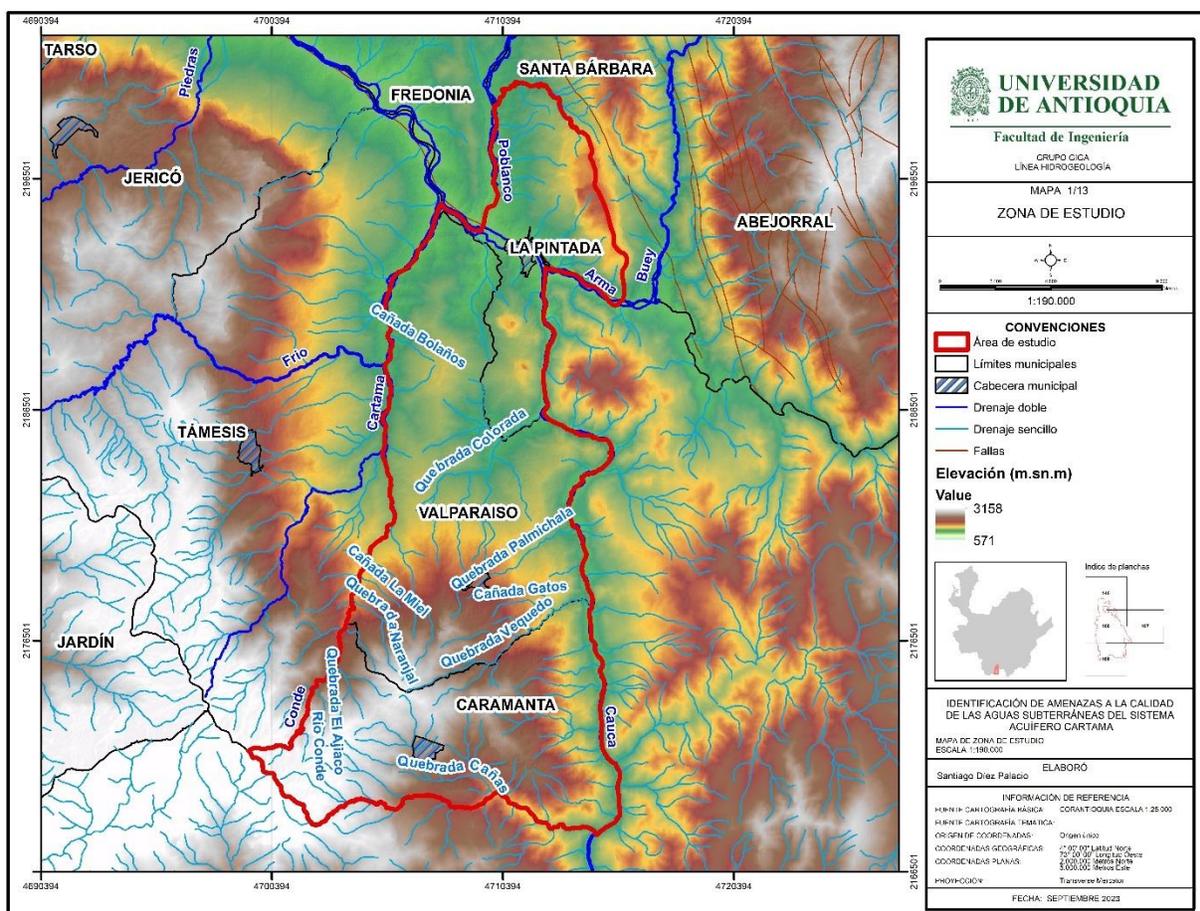
3 Zona de estudio

3.1 Localización geográfica

La zona de estudio se localiza en la subregión del Suroeste del departamento de Antioquia, abarcando los municipios de La Pintada, Valparaíso y Caramanta (**Figura 1**), con una extensión geográfica total de 274 km². Con respecto a dicha extensión, el municipio de Valparaíso representa la mayor área con 132 km², seguido por Caramanta (87 km²) y La Pintada (55 km²). Estos municipios están enmarcados por un notable gradiente altitudinal, iniciando a una elevación media de 600 msnm en la cabecera municipal de La Pintada y aumentando en dirección sur, hacia el municipio de Valparaíso (1.375 msnm) y Caramanta (2.050 msnm) (Gobernación de Antioquia, 2020).

Como se observa en la **Figura 1**, el municipio de La Pintada está cruzado por el río Cauca; el cual también hace parte de las fuentes hídricas de mayor relevancia del municipio de Valparaíso, junto al río Cartama. Es importante mencionar que, este último río, además de los ríos Arma y Poblancó tributan al efluente nombrado en un inicio. De igual modo, el relieve de Caramanta es regado por el río Cauca, además de las quebradas Vequedo, Chirapato, el río Conde, el río Arquía, entre otras corrientes superficiales.

Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio



Nota. Elaboración propia a partir de Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2023).

3.2 Caracterización sociodemográfica

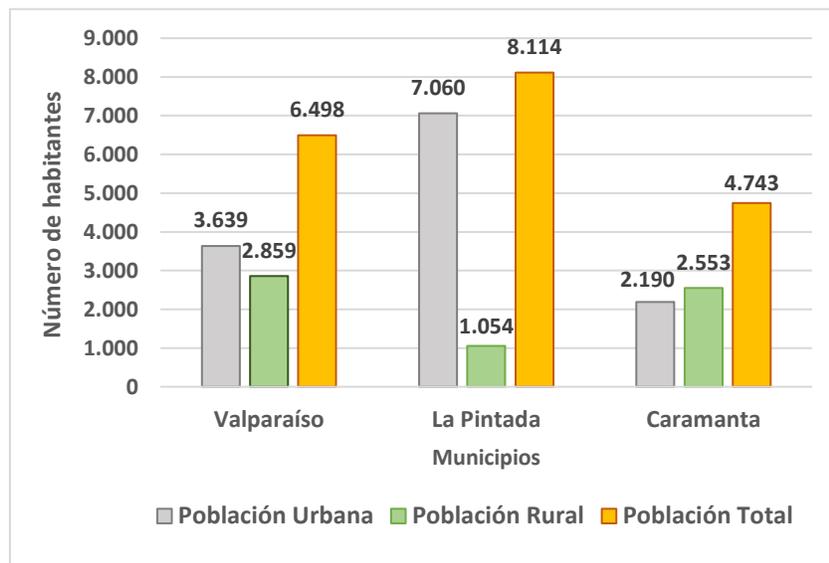
3.2.1 Aspectos demográficos

De acuerdo con el Censo Nacional de Población y Vivienda – CNVP (DANE, 2018) de los tres (3) municipios de estudio, La Pintada contaba para el año 2018, con el mayor número de habitantes

totales (8.114 habitantes). Adicionalmente, cabe destacar que, La Pintada es el único municipio que presenta una marcada tendencia de la población urbana en contraste con la rural, traducido a su vez, en una alta urbanización.

Lo anteriormente mencionado, se puede evidenciar en la **Figura 2**, donde se presenta la población desagregada por sectores para cada uno de los municipios de interés.

Figura 2. Distribución de la población por sectores para cada uno de los tres municipios de estudio



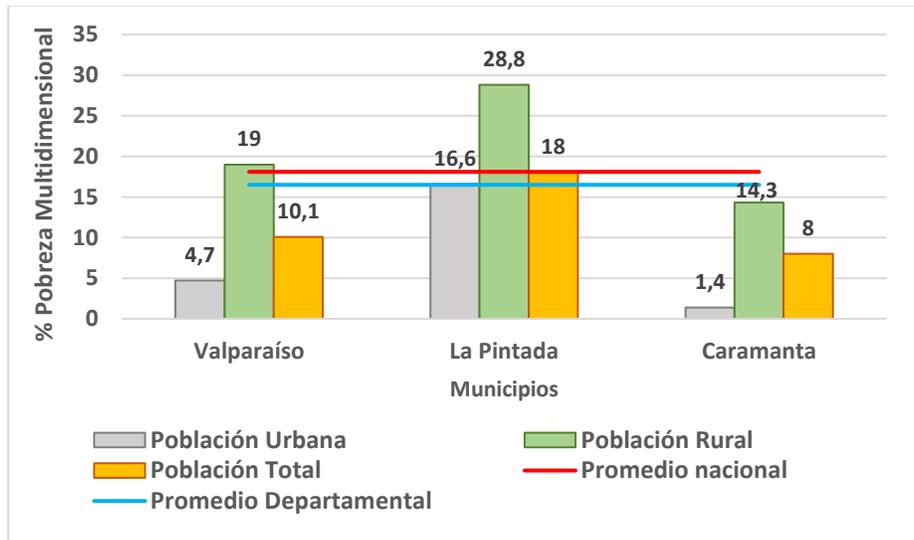
Nota. Adaptado del DANE (2018).

3.2.2 Condiciones de vida

Según el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM), estimado mediante los datos del CNPV (DANE, 2018), el municipio que registra mayor porcentaje de pobreza tanto en zona rural (29%) como urbana (17%) es La Pintada, llegando a sobrepasar el promedio departamental en ambos casos. Igualmente, en Valparaíso, la pobreza multidimensional en suelo rural es crítica, al superar cada uno de los promedios de análisis (ver **Figura 3**).

Por otra parte, Caramanta presenta los menores porcentajes de pobreza en cada sector. Esto último, permite afirmar que la población rural y urbana del mencionado municipio, presenta mejores condiciones de vida en relación con la de los otros dos (La Pintada y Valparaíso).

Figura 3. Índice de pobreza multidimensional – IPM por sector – subregión Suroeste antioqueño



Nota. Adaptado del DANE (2018).

3.2.3 Cobertura en los servicios de acueducto y alcantarillado

Las bajas coberturas de servicios de acueducto y alcantarillado hacen parte de las necesidades básicas insatisfechas, que repercuten en la calidad de vida de los habitantes de los municipios de estudio; específicamente los del sector rural.

Conforme la **Tabla 1**, se observa cierta similitud respecto a ambas coberturas, ya que los valores disminuyen en zona rural de cada municipio, si se comparan con los respectivos valores de la zona urbana. Resaltando que, la cobertura de alcantarillado en la ruralidad no supera el 50% en ninguno de los casos. Si bien La Pintada es el municipio que menor valor asociado tiene (18%), se considera también lo ocurrido en Valparaíso (35%), donde se han instalado pozos sépticos como solución para tratar las aguas residuales domésticas – ARD (Alcaldía Municipal de Valparaíso, 2022).

Por otro lado, las cabeceras urbanas municipales presentan cubrimientos de alcantarillado superiores al 70%, siendo de nuevo La Pintada el municipio con menor cobertura asociada (78%). Esto último, es consistente con lo identificado en el Plan de Desarrollo de dicho municipio (2020 – 2023), dado que allí se menciona el uso de colectores independientes en algunas zonas del área urbana, como solución parcial a la necesidad de evacuar ARD que súbitamente han causado problemas (Alcaldía de La Pintada, 2020).

Tabla 1. Cobertura de los servicios de acueducto y alcantarillado por municipio y sector – subregión Suroeste antioqueño

Municipio	Cobertura servicio de acueducto (%) - CNPV 2018			Cobertura servicio de alcantarillado (%) - CNPV 2018		
	Zona urbana	Zona rural	Total municipio	Zona urbana	Zona rural	Total municipio
La Pintada	98,34	72,60	95,46	77,71	17,79	71,01
Valparaíso	97,86	77,90	90,11	96,58	35,18	72,74
Caramanta	99,73	61,53	80,15	96,87	45,60	70,58

Nota. Adaptado del DANE (2018).

3.2.4 Cobertura en los servicios de salud y educación

La cobertura del Sistema General de Seguridad Social de Salud – SGSSS se acerca al 94% de la población en los municipios de Caramanta y La Pintada, mientras que, en Valparaíso, es del 74,3% de su población. De los tres (3) municipios ninguno cuenta con Unidad de Cuidados Intensivos – UCI. Adicionalmente, según la Gobernación de Antioquia (2020), la tasa de mortalidad de estos municipios oscila entre las 5,9 y 6,4 muertes por cada 1.000 habitantes, siendo la mayor en La Pintada.

Con relación a la educación, el municipio de La Pintada, Valparaíso y Caramanta cuentan aproximadamente con 5, 17 y 21 instituciones educativas respectivamente, distribuidas tanto en zona rural como urbana (Gobernación de Antioquia, 2020). Actualmente, Caramanta y Valparaíso no cuentan con instituciones de educación complementaria. No obstante, el municipio de La Pintada hace parte de los 85 municipios de Antioquia, que permite el acceso a programas de educación técnica profesional (Alcaldía de La Pintada, 2020).

3.3 Aspectos económicos

La estructura productiva de los municipios de Caramanta y Valparaíso está basada fundamentalmente en el sector agropecuario. Adicionalmente, el sector minero es relevante en los tres (3) municipios de estudio. Se precisa que, del área total de Caramanta y Valparaíso, el 98% (85 km²) y el 82% (104 km²) respectivamente, corresponden a zona rural.

3.3.4 Actividad agrícola

Con respecto a la agricultura en Caramanta, se hace referencia a los cultivos de caña, plátano, banano y tabaco ocupando una superficie de 127,10 ha, que equivalen al 1,4% del área total. Los cultivos de café en asocio con plátano y/o banano se encuentra dispersos en el territorio (781,40 ha). Por otro lado, los cultivos cítricos y de tomate de árbol presentan una extensión de 37,20 ha correspondiente al 0,4% del municipio (Alcaldía Municipal de Caramanta, 2022).

En Valparaíso, las plantaciones cítricas y de café ocupan el primer y segundo lugar en importancia económica. El café es representado por un área de 478 ha y los cultivos frutales mediante 1.211 ha. El cultivo de caña ocupa el tercer lugar con 40 ha asociadas. Actualmente, el cultivo de aguacate ha llamado la atención por su avance particular –también registrado en Caramanta–, con el establecimiento de diversas productoras y comercializadoras de aguacate tipo Hass (Alcaldía Municipal de Valparaíso, 2022).

En el municipio de La Pintada, el 96% (52,8 km²) del área total es representada por suelo rural, la cual también se apoya en la actividad agrícola, con la producción de cítricos y en menor escala de otros frutales, plátano y yuca. Estos cultivos ocupan aproximadamente 160 ha que equivalen al 2,3% del municipio (Alcaldía de La Pintada, 2020).

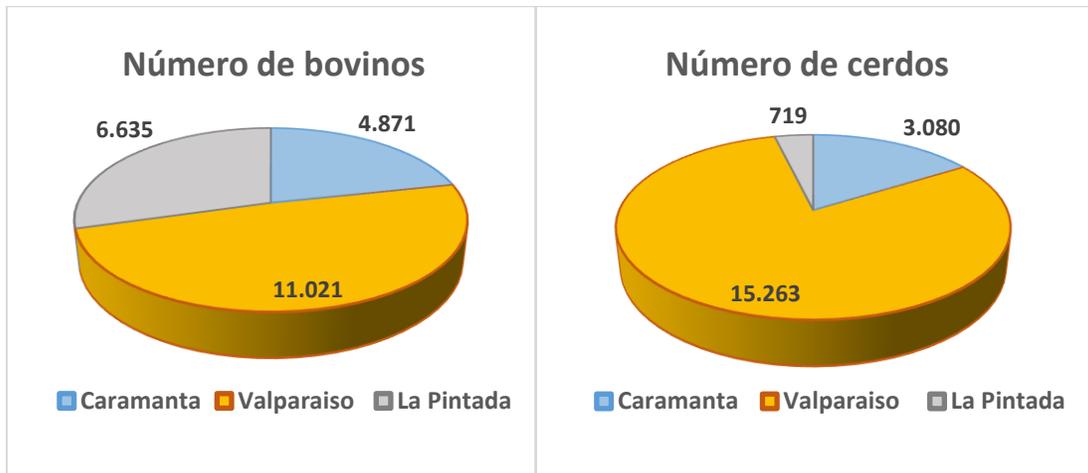
3.3.2 Producción pecuaria

En los tres municipios la extensión destinada a actividades ganaderas de corte extensivo es significativamente superior a la cobertura constituida por cultivos. En el municipio de Caramanta y Valparaíso los pastos de pastoreo, específicamente los pastos limpios, representan un total de 2.592,83 ha (28,17%) y 9.608,71 ha (75,95%) respectivamente (Alcaldía Municipal de Caramanta, 2022; Alcaldía Municipal de Valparaíso, 2022).

El municipio de La Pintada cuenta con 79 productores ganaderos, ejerciendo sus actividades en más de 6.200 ha en ganadería. La comercialización del ganado se hace a través de la subasta Asogans, propia del municipio (Alcaldía de La Pintada, 2020).

En la **Figura 4**, se presenta para cada uno de los municipios de estudio el número de bovinos y cerdos reportados por el Instituto Colombiano Agropecuario – ICA para el presente año (ICA, 2023).

Figura 4. Cantidad de ganado bovino (lado izquierdo) y porcino (lado derecho) en cada uno de los municipios que conforman el sistema acuífero Cartama



Nota. Adaptado del ICA (2023).

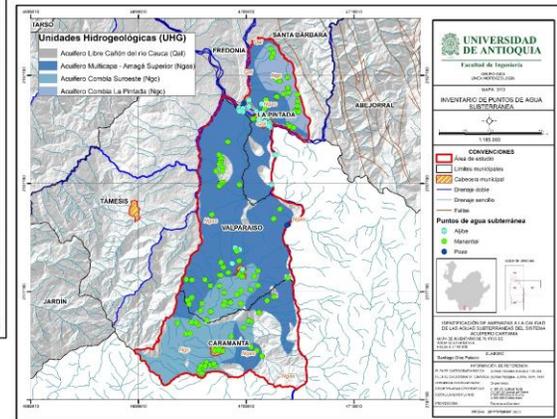
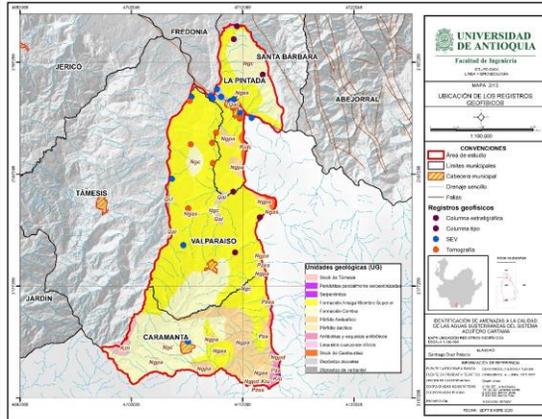
Finalmente, se puede concluir que la ganadería de tipo bovina y porcina es más representativa en Valparaiso en comparación con Caramanta y La Pintada y con otros municipios del departamento de Antioquia.

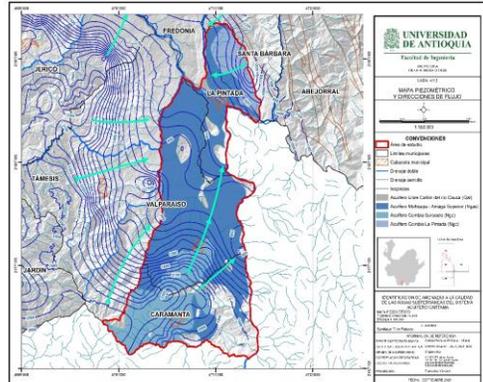
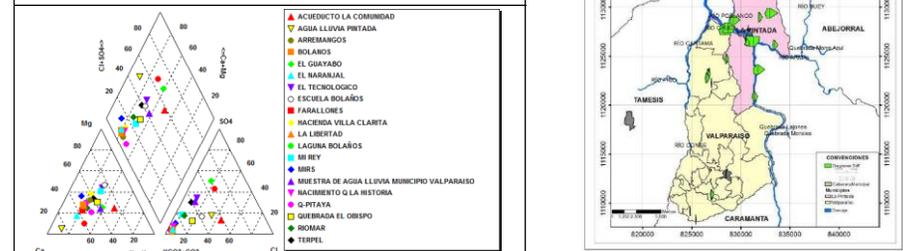
3.4 Sistema hidrogeológico

En la **Figura 5**, se presenta la ficha que integra la información general que caracteriza el sistema acuífero Cartama, considerando los diversos estudios hidrogeológicos existentes para la zona de estudio (SHI S.A.S y CORANTIOQUIA, 2014; GOTTA INGENIERIA S.A.S y CORANTIOQUIA, 2017; Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, 2021; Bastidas et al., 2022; Palacio, Díaz, Vela y Ossa, 2022; Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, 2022; Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, 2023).

Figura 5. Ficha de información del sistema acuífero Cartama

1. Ubicación y generalidades		2. Caracterización geológica							
Área hidrográfica	Magdalena - Cauca (2)	Unidades geológicas (UG)	Rocas ígneas (ultramafitas serpentizadas, stock de Támesis, andesitas y dacitas), rocas metamórficas del Paleozoico (Complejo Cajamarca y Grupo Ayurá-Montebello), sedimentarias (Formación Amagá - Miembro Superior), volcano - sedimentarias (Formación Combia) y depósitos cuaternarios (depósitos aluviales, de terraza y coluviales). Notable predominio en superficie de rocas sedimentarias de la Formación Amagá - Miembro superior (55%) y Formación Combia (28%). Se priorizan las unidades sedimentarias y volcano - sedimentarias del terciario y cuaternario.						
Zona hidrográfica	Cauca (26)								
Subzona hidrográfica	Río Frío y Otros Directos al Cauca (2617), Directos río Cauca entre río San Juan y Pto Valdivia - margen derecha (2620) y río Arma (2618)	Condiciones geomorfológicas y estructurales	La Pintada se caracteriza por un contraste geomorfológico marcado, entre relieves montañosos fuertemente disectados y relieves bajos de carácter colinado. Igualmente ocurre en Valparaíso, con presencia de laderas, filos y vertientes en su mayoría de pendientes fuertes. Localmente, la zona es dividida en dos porciones (La Pintada y Valparaíso - Caramanta) por una falla cubierta paralela al eje del río Cauca, en dirección SE - NW.						
Provincia hidrogeológica	Otros sistemas acuíferos en región Cordillera Occidental - Central (6)	Exploración geofísica (directa e indirecta)	En total son 13 sondeos eléctricos verticales (SEV), 10 tomografías de resistividad eléctrica (TRE) y seis (6) perforaciones. La mayoría de estos registros se encuentran en el municipio de Valparaíso, y se concentran principalmente en la Formación Amagá - Ngas (21), seguido de los Depósitos Aluviales - Qal (5) y la Formación Combia - Ngc (3).						
Sistema hidrogeológico	Incluye al SAM 6.8: La Pintada - Valparaíso	Modelo geológico - geofísico	Se presentan perfiles geoelectrónicos y geológicos en SHI S.A.S (2014) y se modelan espesores de las unidades acuíferas Amagá - Miembro superior, Formación Combia y depósitos cuaternarios utilizando geostatística en Udea (2022).						
Municipios que abarca	La Pintada, Valparaíso y Caramanta								
Entidad que elaboró el PMAA	En elaboración por Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA								
3. Unidades y características hidrogeológicas									
<p>Las unidades acuíferas priorizadas por Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA (2022), comprenden extensiones de los complejos hidrogeológicos Cartama y Poblancó, donde se destacan los siguientes acuíferos que conforman el sistema Cartama:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Acuífero Multicapa Amagá superior (Ngas): está conformado por la intercalación de capas de areniscas, lodolitas y arcillas de diferente espesor asociadas a la Formación Amagá - Miembro superior (Ngas), en la zona de Cartama constituye hasta tres capas intercaladas y en la zona de Poblancó constituye hasta 8 capas intercaladas. Los espesores varían espacialmente entre 40 y 272 m. La extensión en superficie es de 149,9 km² (55% de la zona de estudio). - Acuífero Combia Suroeste y La Pintada (Ngc): conformado por las secuencias volcano-sedimentarias de la Formación Combia (Ngc), a escala regional, Combia podría tener al menos dos niveles significativos con potencial acuífero, el primero de carácter libre y el otro, por debajo normalmente de niveles de ceniza y/o tobas, confinado, en el sector Cartama. En el sector Poblancó se identifican dos capas con potencial acuífero. Los espesores del acuífero Combia Suroeste es de 54,2 km² (20% de la zona de estudio), mientras que en La Pintada es de 17,9 km² (6,6% de la zona de estudio). - Acuífero libre Cañón del río Cauca (Qal): asociados a los depósitos cuaternarios de los ríos Cauca y Poblancó. Los espesores mínimos aproximados varían especialmente entre 59 y 65 m. La extensión en superficie es de 4,4 km² (1,6% de la zona de estudio). <p>Área de interés para PMAA de 272 km². Área previamente estudiada por SHI S.A.S & CORANTIOQUIA (2014) de 184 km² (La Pintada y Valparaíso).</p>									
Criterio para definir UHG		Criterio de potencial socio-hidrogeológico (uso y necesidad del recurso por parte de las comunidades, productividad de las unidades).							
4. Caracterización hidrológica		5. Caracterización hidráulica							
Puntos de agua subterránea inventariados en la zona de estudio		Reporte valores de parámetros obtenidos:							
Municipio	Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA Fase I (2021)	Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA Fase II (2022)	Número de puntos	Fecha	Formación geológica	Método	Promedio k (m/d)	T (m ² /d)	S
La Pintada	3 aljibes y 2 manantiales (primaria) ; 43 aljibes, 23 manantiales y 1 pozo (secundaria)	4 aljibes (primaria)	Pruebas de bombeo (Slug Test) en 7 aljibes - La Pintada	18 de julio de 2014	5 en Depósitos aluviales (Qal)	Cooper - Bredehoeft - Papadopulus	1,96	110,10	1,10E-04
Valparaíso	13 manantiales y 4 aljibes (primaria) ; 34 manantiales y 1 pozo (secundaria)	8 manantiales (primaria)		2 en Formación Amagá (Ngas)				0,27	21,35
Caramanta	10 manantiales (primaria) y 5 man. (secundaria)	17 manantiales (primaria)	Pruebas de bombeo (Slug Test) en 5 aljibes + 1 aljibe - La Pintada	18 de julio 2014 y 13 de junio de 2022	6 Depósitos aluviales (Qal)	Método Hvorslev	7,39	-	-



Total	168 (112 manantiales, 54 aljibes y 2 pozos)	6. Hidrogeoquímica, calidad e isotopía													
De los 168 puntos, 54 son productivos, 3 están en reserva y 1 abandonado. Para el resto de puntos no se cuenta con información acerca de su condición. De las 168 captaciones, 68 se destinan principalmente para el consumo humano y doméstico, 18 para el abastecimiento público y 11 con fines agropecuarios (UdeA & CORANTIOQUIA, 2022).		Red de monitoreo hidrogeoquímica													
 <p>La Pintada 1 Manantial, 25 Aljibe, 50 Pozo</p>	 <p>Valparaiso 4 Manantial, 1 Aljibe, 55 Pozo</p>	 <p>Caramanta 32 Manantial, 0 Aljibe, 0 Pozo</p>	<table border="1"> <tr> <td>Puntos de agua lluvia</td> <td>P. de agua superficial</td> <td>P. de agua subterránea</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>29 (1 pozo, 1 manantial y 27 aljibes)</td> </tr> </table>	Puntos de agua lluvia	P. de agua superficial	P. de agua subterránea	0	0	29 (1 pozo, 1 manantial y 27 aljibes)						
Puntos de agua lluvia	P. de agua superficial	P. de agua subterránea													
0	0	29 (1 pozo, 1 manantial y 27 aljibes)													
Puntos para superficie piezométrica		<table border="1"> <tr> <td>Fechas de campañas</td> <td colspan="2">Dos campañas por CORANTIOQUIA entre los años 2012 y 2013</td> </tr> <tr> <td>Fechas de campañas</td> <td>2</td> <td>1 (laguna)</td> </tr> <tr> <td>Fechas de campañas</td> <td colspan="2">Una campaña por SHI S.A.S & CORANTIOQUIA en abril, mayo y julio de 2014</td> </tr> </table>		Fechas de campañas	Dos campañas por CORANTIOQUIA entre los años 2012 y 2013		Fechas de campañas	2	1 (laguna)	Fechas de campañas	Una campaña por SHI S.A.S & CORANTIOQUIA en abril, mayo y julio de 2014				
Fechas de campañas	Dos campañas por CORANTIOQUIA entre los años 2012 y 2013														
Fechas de campañas	2	1 (laguna)													
Fechas de campañas	Una campaña por SHI S.A.S & CORANTIOQUIA en abril, mayo y julio de 2014														
Direcciones principales de flujo		<table border="1"> <tr> <td colspan="3">Red de monitoreo hidrogeoquímica y de calidad</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Conjunto HG Cartama</td> <td>Conjunto HG Poblano</td> </tr> <tr> <td>Puntos de agua subterránea</td> <td>P. de agua superficial</td> <td>P. de agua subterránea</td> </tr> <tr> <td>8 (6 manantiales y 2 aljibes)</td> <td>1 (rio)</td> <td>6 (3 man., 1 galería y 1 pozo)</td> </tr> </table>		Red de monitoreo hidrogeoquímica y de calidad			Conjunto HG Cartama		Conjunto HG Poblano	Puntos de agua subterránea	P. de agua superficial	P. de agua subterránea	8 (6 manantiales y 2 aljibes)	1 (rio)	6 (3 man., 1 galería y 1 pozo)
Red de monitoreo hidrogeoquímica y de calidad															
Conjunto HG Cartama		Conjunto HG Poblano													
Puntos de agua subterránea	P. de agua superficial	P. de agua subterránea													
8 (6 manantiales y 2 aljibes)	1 (rio)	6 (3 man., 1 galería y 1 pozo)													
Profundidad del nivel freático		<table border="1"> <tr> <td colspan="3">Red de monitoreo Isotópica</td> </tr> <tr> <td>Puntos de agua lluvia (totalizadores)</td> <td>N° de campañas</td> <td>Periodicidad</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>4</td> <td>Mensual</td> </tr> </table>		Red de monitoreo Isotópica			Puntos de agua lluvia (totalizadores)	N° de campañas	Periodicidad	6	4	Mensual			
Red de monitoreo Isotópica															
Puntos de agua lluvia (totalizadores)	N° de campañas	Periodicidad													
6	4	Mensual													
Resultados y clasificación hidrogeoquímica		<p>El tipo de agua predominante, en los 20 puntos analizados y distribuidos en los municipios de La Pintada y Valparaiso (SHI & CORANTIOQUIA, 2014), es bicarbonatada cálcica en mayor medida y bicarbonatada magnésica.</p>													
															
Fuentes de recarga: Recarga directa por precipitación para las unidades libres y recarga interacuífero y por precipitación para las unidades multicapa.		Resultados de la calidad del agua													
Zona de recarga: Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA en 2021 aplicaron una metodología basada en la ponderación espacial de parámetros para la zona de estudio, diferenciando entre zonas de recarga directa (87,3%) e indirecta (12,3%). Las primeras se dividen en zonas de mayor importancia (42,6%) y de menor importancia (45%).		<p>Teniendo en cuenta los valores reportados en la red de monitoreo hidrogeoquímico y de calidad descrita anteriormente, la Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA aplicaron de acuerdo a la normativa de calidad para aguas en Colombia (R2115 de 2007 y D1594 de 1984) el índice de calidad para las aguas subterráneas – ICG-As propuesto por Vélez (2017). Según a los resultados del ICG-As, tanto para el Conjunto HG Cartama como Poblano el agua subterránea posee condiciones adecuadas para uso agrícola, no así para consumo humano e industrial, lo cual implica la necesidad de realizar un tratamiento previo a su utilización. Respecto a los valores obtenidos de las coliformes fecales en estos dos conjuntos se encontró presencia de este parámetro, reflejando así una probable contaminación por desechos orgánicos.</p>													
Resultados isotópicos		<p>Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA (2022) obtuvieron una versión preliminar de la Línea Meteorica Local (LML) descrita por la ecuación $S^2H = 8,08 S^{18}O + 10,17$. Comparando esta línea con los valores de la Línea Meteorica Mundial (LMG), se evidencian valores muy cercanos, con una desviación de 0,08 para el $S^{18}O$ y de 0,17 para el S^2H.</p>													
7. Zonas de interés hidrogeológico															

<p>Magnitud de la recarga: Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA en 2021 aplicaron un modelo de balance de humedad en el suelo. Mediante este ejercicio se estimó una recarga promedio espacial variable entre 9,13 y 406,95 mm/año para un año seco (2015) y húmedo (2018) respectivamente, representando entre 0,7% y 17,8% de la precipitación. La recarga promedio multianual es de 226,68 mm/año, equivalente al 11% de la precipitación promedio multianual (2065,5 mm/año).</p>	<p>Vulnerabilidad intrínseca (GOD)</p>	<p>Función de recarga</p>	<p>Bosque seco tropical (bs-T)</p>
<p>Reservas de agua: Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA en 2023 realizaron una primera estimación de las reservas promedio del sistema acuífero Cartama, obteniendo un valor aproximado total de 1.521,65 millones de metros cúbicos (Mm³). El acuífero conformado por la Formación Combia es el que tiene mayor potencial de almacenamiento (799,10 Mm³) y el acuífero libre del Cañón del río Cauca es el que presenta las menores reservas (21,95 Mm³).</p>	<p>The figure consists of three maps of the Cartama aquifer system, each with a legend and a scale bar. The first map, 'Vulnerabilidad intrínseca (GOD)', shows areas of high vulnerability in red and orange. The second map, 'Función de recarga', shows recharge rates with a color scale from green (low) to red (high). The third map, 'Bosque seco tropical (bs-T)', shows the distribution of different types of dry tropical forest, with 'Bosque bs-T' in green and 'Bosque bs-T*' in yellow.</p>		
<p>Zonas de descarga y relaciones río - acuífero</p>	<p>De acuerdo con la pizometría, los ríos Cartama y Poblano son zonas de descarga local y el río Cauca es una zona de descarga regional, constituyendo una frontera hidráulica de gran extensión.</p>		

Nota. Elaboración propia a partir de estudios mencionados.

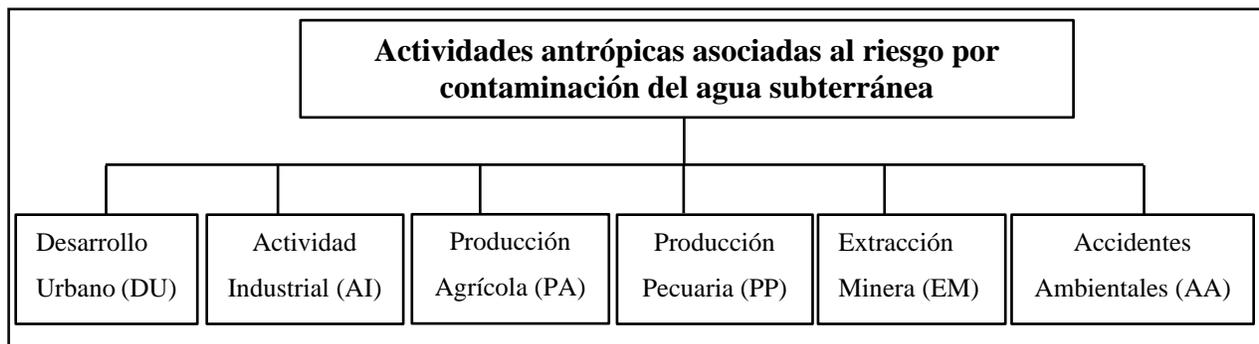
4 Metodología

La entrada de sustancias contaminantes a las aguas subterráneas es un resultado de procesos naturales y del efecto directo o indirecto de las actividades antrópicas. Esta investigación se enfoca principalmente en las actividades humanas que estén generando o puedan generar flujos o lixiviados al medio subterráneo, que alteren la calidad natural de las aguas subterráneas del sistema acuífero Cartama.

Para el desarrollo de este trabajo se adaptó la metodología de carga contaminante al subsuelo propuesta por Foster e Hirata (1991) y ajustada por Foster et al. (2002), la cual fue aplicada y validada por Universidad de Antioquia mediante un ejercicio académico realizado en el sistema hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño (Gaviria J. , 2005).

En el esquema de la **Figura 6**, se presenta una síntesis del tipo de actividades, que, permitirán clasificar por categorías las fuentes potenciales de contaminación y, que a su vez, guiarán la ejecución de las tareas a realizar –detalladas más adelante–, para dar satisfactorio cumplimiento de los objetivos de este estudio.

Figura 6. Resumen de las actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al medio subterráneo



Nota. Adaptado de Foster et al. (2002).

Es de resaltar que, la forma de clasificar las categorías como resultado de la combinación de actividad contaminante y subclase, tal como se muestra en la **Tabla 2**, fue propuesta por Gaviria & Betancur en 2005. Allí se puede observar que para cada categoría resultante se asigna un código conformado por las letras iniciales de la actividad, seguida por un número consecutivo de dos dígitos.

Tabla 2 . Subclases y categorías de actividades potencialmente contaminantes

Tipo de actividad	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría
Desarrollo Urbano (DU)	Saneamiento básico	Agua residual	Zona Urbana	Alcantarillado		DU01
				Lagunas de oxidación		DU02
				Plantas de tratamiento	Corriente	DU03
					Terreno	DU04
				Descarga AR	Corriente	DU05
					Terreno	DU06
					Laguna	DU07
			Zona Rural	Alcantarillado		DU08
				Lagunas de oxidación		DU09
				Plantas de tratamiento	Corriente	DU10
					Terreno	DU11
				Descarga AR	Corriente	DU12
					Campo de infiltración	DU12,5
					Terreno	DU13
		Zona Urbana/ Rural	Pozo séptico		DU15	
			Letrina		DU16	
			Zanjas		DU17	
		Residuos sólidos	Zona Urbana/ Rural	Relleno sanitario		DU18
				Botadero a cielo abierto		DU19
				Excavación		DU20
				Corriente superficial		DU21
				Aljibes abandonados		DU22
			En superficie			

Tipo de actividad	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría
	Almacenamiento de combustibles	Enterrados				DU24
	Sumideros de carretera					DU25
	Cementerio					DU26
Actividad Industrial (AI)	Vertimiento al alcantarillado	Tratamiento	Descarga a corriente			AI01
			Descarga al terreno			AI02
			Descarga a laguna			AI03
		Sin tratamiento	Descarga a corriente			AI04
			Descarga directa a fosa séptica			AI4,5
			Descarga al terreno			AI05
	Descarga a laguna				AI06	
	Sistema de recolección de AR	Con fugas				AI07
		Sin fugas				AI08
	Derrames accidentales	Derrame a corriente				AI09
		Derrame al terreno				AI10
		Derrame a laguna				AI11
	Disposición de residuos sólidos	Relleno sanitario				AI12
		Botadero a cielo abierto				AI13
		Corriente superficial				AI14
Precipitación aérea de sustancias					AI15	
Producción Agrícola (PA)	Cultivo extensivo	Plaguicida	Aspersión			PA01
			Irrigación			PA02
	Fertilizantes		Aspersión			PA03
			Irrigación			PA04

Tipo de actividad	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría	
Cultivo de pancoger	Agua residual	Aspersión				PA05	
		Irrigación				PA06	
	Plaguicida	Aspersión				PA07	
		Irrigación				PA08	
		Fertilizantes	Aspersión				PA09
			Irrigación				PA10
	Agua residual	Aspersión				PA11	
		Irrigación				PA12	
	Producción Pecuaria (PP)	Actividad ganadera	Extensiva	Efluentes a laguna			PP01
				Efluentes al terreno			PP02
				Efluentes a corriente			PP03
			Pocas cabezas	Efluentes a laguna			PP04
Efluentes al terreno						PP05	
Efluentes a corriente						PP06	
Excremento como abono					PP07		
Actividad avícola		Industrial				PP08	
		Casera				PP09	
		Excremento como abono				PP10	
Actividad porcícola		Industrial				PP11	
		Casera				PP12	
		Excremento como abono				PP13	
Actividad piscícola		Industrial				PP14	
		Casera				PP15	
		Excremento como abono				PP16	
Extracción Minera (EM)	Actividad minera metales	Cielo abierto				EM01	
		Subterránea				EM02	
	Actividad minera cantera					EM03	
	Actividad minera carbón					EM04	
	Actividad minera petróleo					EM05	
Derrames	Laguna					AA01	
	Suelo					AA02	
	Corriente					AA03	

Tipo de actividad	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría
Accidentes Ambientales (AA)	Animales	Vivos				AA04
		Muertos				AA05
	Materiales extraños					AA06

Donde: DU12,5 y AI4,5 son nuevas categorías propuestas mediante este trabajo.

Nota. Adaptado de Gaviria & Betancur (2005).

Desde un punto de vista metodológico, se necesitan establecer cuatro (4) características semindependientes de la carga contaminante asociada a cada categoría de actividad contaminante, las cuales dependen de dos o más factores y cuya magnitud se califica de 0 a 1, como se describe a continuación:

La *clase de contaminante* involucrado, definido por su persistencia probable en el ambiente subterráneo y por su coeficiente de retardo relacionado con el flujo de agua subterránea y los procesos de intercambio catiónico, sorción, entre otros (ver **Tabla 3**).

Tabla 3. Resumen de las guías para la calidad de agua potable y del comportamiento de contaminantes seleccionados en el subsuelo

	RECOMENDACION OMS (ECC*)		TRANSFORMACION		REACCION		RETARDACION	
	Guía (µg/l)	Criterio	BIOQUIMICA		QUIMICA		FISICOQUIMICA	
			Aeróbic	Anaeróbic	Acid	Alcalin	Acida	Alcalina
Metales Pesados								
cadmio (Cd)	5	HS	o	o	o	**	o	*
cromo (Cr)	50	HS	o	o	*	o	**	o
cobre (Cu)	1000	OG	o	o	*	**	**	*
plomo (Pb)	50	HS	o	o	*	**	*	**
mercurio (Hg)	1	HS	*	o	*	**	*	**
plata (Ag)	-	-	o	o	*	**	*	**
cinc (Zn)	5000	OG	o	o	o	**	o	**
Metales No Inorgánicos								
amonio (NH ₄)	10	OG	**	o	o	o	o	**
nitrato (NO ₃)	45000	HS	o	**	o	o	o	o
sodio (Na)	200000	OG	o	o	o	o	o	*
sulfato (SO ₄)	400000	OG	o	**	o	*	o	o
fluoro (F)	1500	HS	o	o	*	*	**	o
cloro (Cl)	250000	OG	o	o	o	o	o	o
arsénico (As)	50	HS	o	o	*	o	*	**
selenio (Se)	10	HS	o	o	**	*	**	o
cianuro (CN)	100	HS	o	o	o	o	**	o
Compuestos Orgánicos								
hidrocarburo ali- fático	10	OG	**	o	o	o	**	**
fenoles	0.5	OG	**	*	o	o	*	*
benceno	10	HS	**	o	o	o	**	**
tolueno	-	-	**	o	o	o	**	**
poliaromáticos	0.1	HS	*	o	o	o	*	*
Compuestos Orgánicos Halogenados								
tricloroetileno	30	HS	o	*	o	o	o	o
tetracloroetileno	10	HS	o	*	o	o	*	*
1.1.1 tricloroetano	10	HS	o	*	o	o	*	*
tetracloro de carbono	3	HS	o	*	o	o	*	*
cloroformo	30	HS	o	*	o	o	o	o
clorometileno	-	-	*	*	o	o	o	o
clorobenceno	0.1	OG(HS)	**	o	o	o	**	**
clorofenoles	0.1	OG(HS)	**	*	o	o	*	*
Organismos Fecales								
coliformes fecales	1/100 ml	HS	o	o	o	o	*	*
bacteria patogénica	-	-	o	o	o	o	*	*
virus patogénicos	-	-	o	o	**	*	*	**

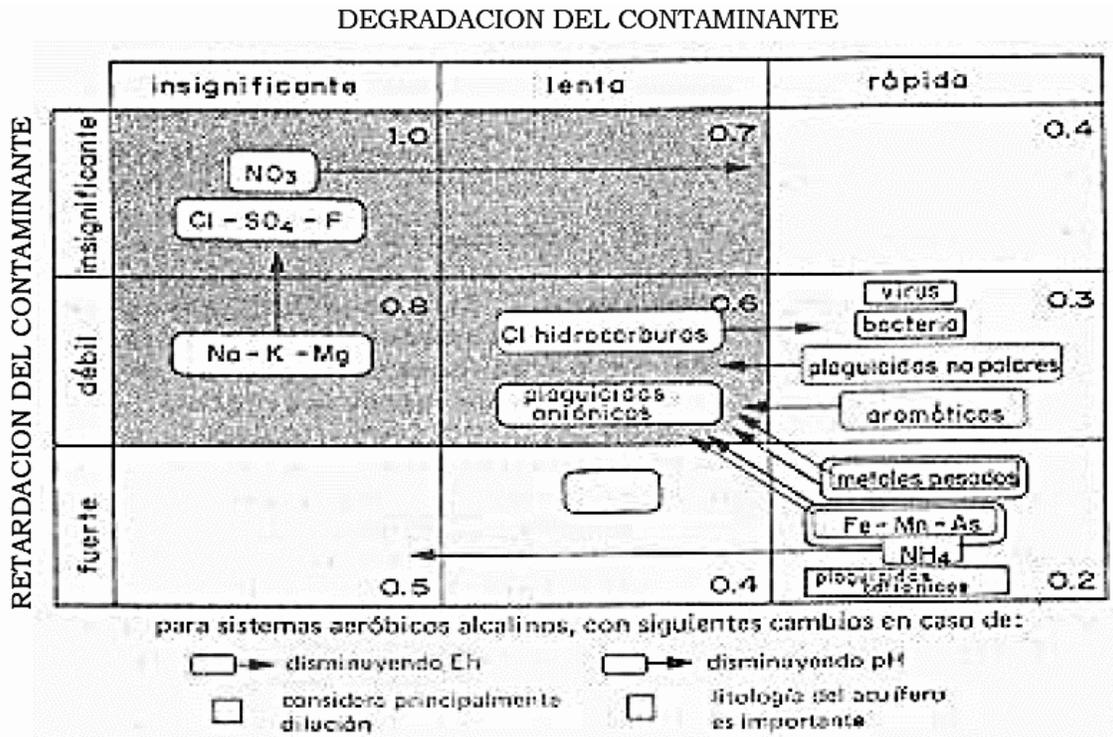
HS importancia para la salud
OG consideración organoléptica

o probablemente no ocurra
* puede ocurrir
** sí ocurre

Nota. Tomado de Foster e Hirata (1991).

En la **Figura 7**, se observa que entre más persistente y móvil sea el contaminante su valor relativo se aproximará a 1. En otras palabras, entre más lenta sea la degradación y más insignificante es el retardo, el contaminante será más peligroso.

Figura 7. Gráfica alusiva al tipo o clase de contaminante



Nota. Tomado de Foster e Hirata (1991).

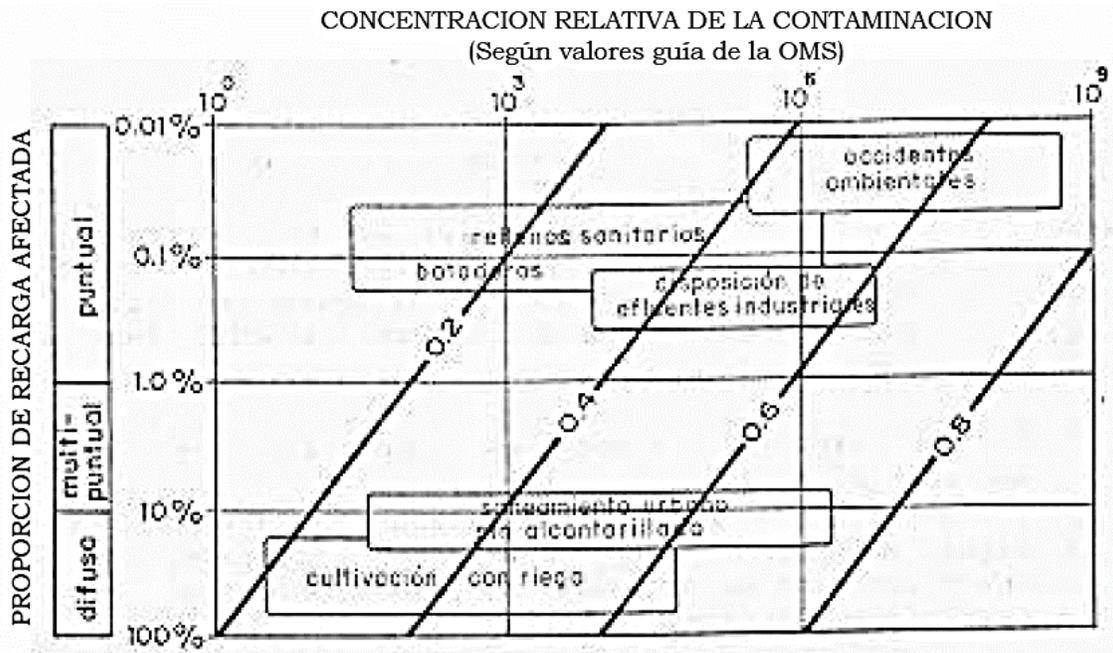
La *intensidad* de la contaminación, definida por la concentración relativa del contaminante en el efluente o lixiviado, en relación con los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud – OMS para la calidad de agua potable y por la proporción de la recarga local afectada por la contaminación.

En la **Figura 8**, se muestra que la posición relativa con el mayor calificativo estará en condiciones de concentración entre 10^6 y 10^9 , para una proporción de la recarga afectada mayor del 10%. Para este factor, es fundamental hacer la distinción entre las actividades potencialmente contaminantes según su distribución espacial, destacando que las más comunes son las de tipo puntual y difuso. Estas primeras proveen una impresión visual de que son fáciles de identificar y posiblemente en algunos casos de controlar; mientras que, para las fuentes de contaminación difusa ocurre totalmente lo contrario.

Algunas de las actividades asociadas al Desarrollo Urbano de tipo puntual, son las siguientes: vertidos a cauces superficiales o al suelo de efluentes urbanos con o sin tratamiento previo, efluentes de lagunas y tanques sépticos y disposición de residuos sólidos urbanos en botaderos o

en rellenos sanitarios sin control en áreas excavadas. Por otra parte, están las fuentes difusas asociadas a las actividades de origen agrario, fundamentalmente por el empleo excesivo de fertilizantes y las explotaciones ganaderas.

Figura 8. Gráfica de intensidad de la contaminación

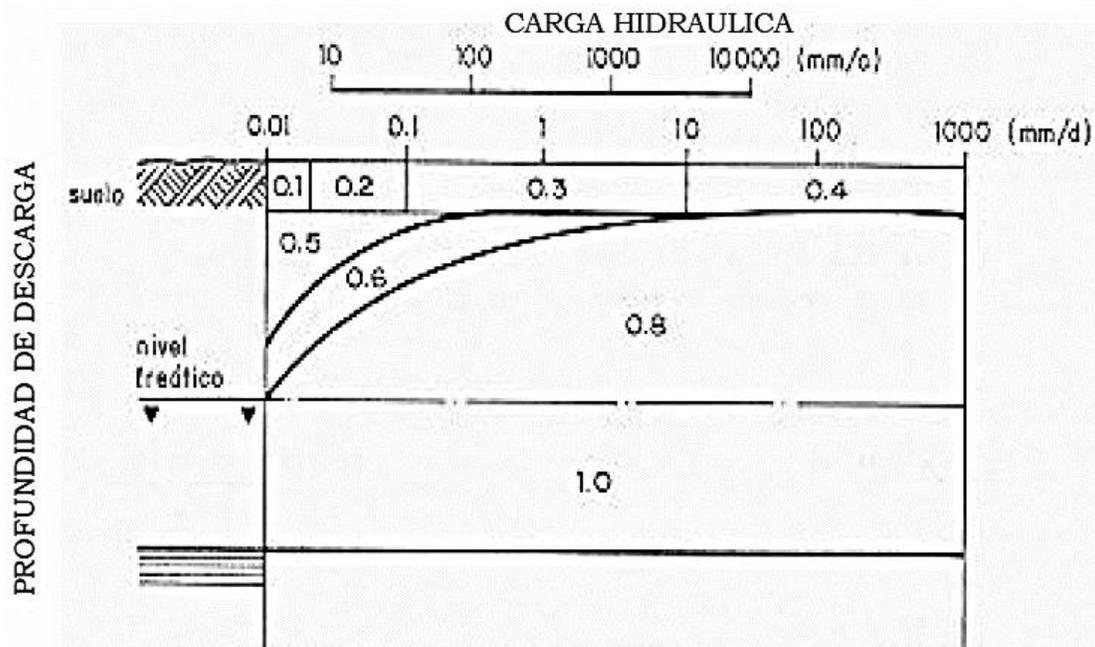


Nota. Tomado de Foster e Hirata (1991).

El *modo de disposición* en el subsuelo, definido por la carga hidráulica asociada con la descarga del contaminante y la profundidad bajo superficie en la cual el efluente o lixiviado es descargado o generado.

En la **Figura 9**, se tiene que cuando el contaminante es descargado en la superficie entra a jugar en importancia la carga hidráulica asociada a la descarga, pero a medida que esta se profundiza el valor relativo aumenta, hasta llegar al nivel freático donde se tiene mayor efecto sobre la calidad del recurso, por lo tanto, el valor es 1.

Figura 9. Gráfica de modo de disposición del contaminante

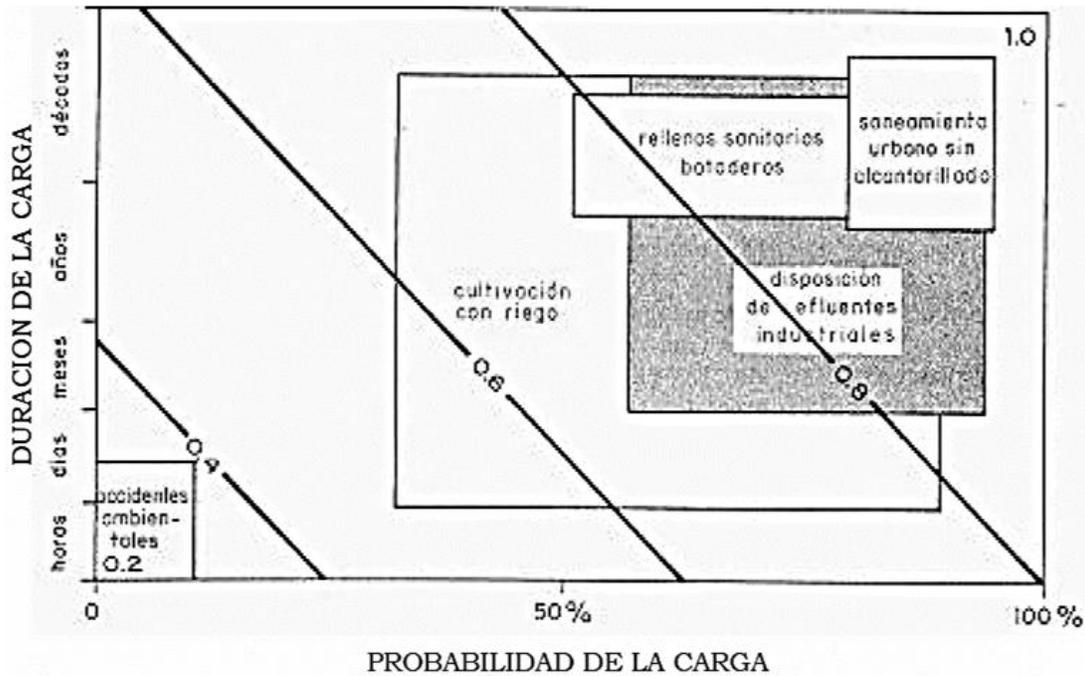


Nota. Tomado de Foster e Hirata (1991).

El *tiempo de aplicación* de la carga contaminante, definida por la probabilidad de descarga del contaminante al subsuelo (ya sea intencional, incidental o accidentalmente) y por el periodo durante el cual se aplica la carga contaminante.

En la **Figura 10**, se visualiza que el periodo de aplicación varía entre horas y décadas, siendo la combinación de décadas de duración con la mayor probabilidad de descarga (100%) la condición más crítica, a la cual se le asigna un valor relativo de 1.

Figura 10. Gráfica alusiva al factor tiempo de aplicación del contaminante



Nota. Tomado de Foster e Hirata (1991).

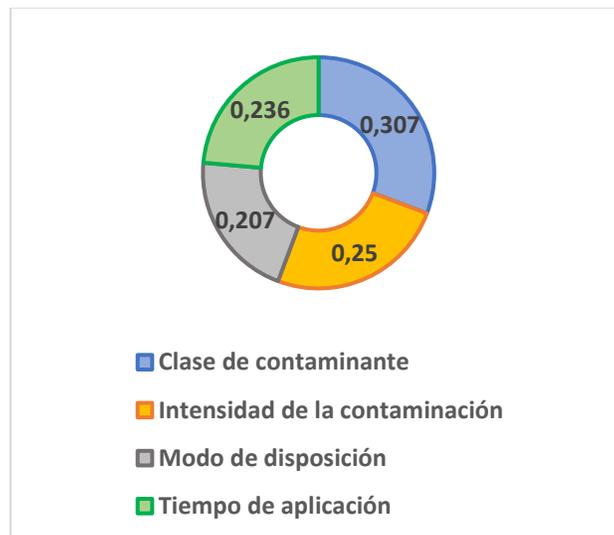
Luego de ubicar las categorías en cada una de las cuatro (4) gráficas anteriormente mostradas y, por tanto, de caracterizar conceptualmente la carga contaminante asociada a cada actividad, se transita a la última etapa del proceso metodológico que es determinar el Índice potencial de generación de Carga Contaminante – ICC. Esto a partir, de relacionar matemáticamente en la ecuación (1) propuesta por Rueda & Ángel (2004), los valores relativos obtenidos para cada una de las características de la carga contaminante según el sistema de clasificación y los coeficientes de importancia respectivos (ver **Figura 11**).

$$ICC = (VRC * CIFC) + (VRI * CIFI) + (VRM * CIFM) + (VRT * CIFT) \quad (1)$$

*Donde: VRC, VRI, VRM y VRT son los valores relativos obtenidos para las características clase, intensidad, modo y tiempo, respectivamente.

CIFC, CIFI, CIFM y CIFT son los coeficientes de importancia asignados para la clase, intensidad, modo y tiempo, respectivamente.

Figura 11 . Valores de ponderación para las cuatro características de la carga contaminante



Nota. Adaptado de Rueda & Ángel (2004).

Finalmente, el valor de ICC estará en un rango que oscila entre 0 y 1, siendo calificado como *reducido* si está en el intervalo de 0 a 0,30, *moderado* en el rango de 0,31 a 0,60 y *elevado* en el intervalo de 0,61 a 1.

4.1 Materiales y métodos

Teniendo en cuenta que los **objetivos específicos** fueron **definidos de manera secuencial**, a continuación, se describen las **actividades**, igualmente ordenadas y divididas por fases, que permitieron alcanzar dichos objetivos. En conjunto ellas aportan al **cumplimiento del objetivo general** de la investigación.

- **Fase 1 (Objetivo específico 1: Verificar, en campo, la presencia de actividades potencialmente contaminantes para el sistema Cartama).**

Inicialmente, la identificación de fuentes potenciales de contaminación sobre el Sistema Hidrogeológico Cartama, se realizó a partir de una **revisión bibliográfica y búsqueda documental**, que posteriormente **fue verificada en campo**, para por último **ser consolidada y ratificada** mediante un ejercicio participativo con los **actores claves del territorio** (ver **Fotografía 1**). A continuación, se resumen y listan las principales fuentes de información utilizadas:

- a. Recorridos y/o testimonios de campo.
- b. Documentos oficiales de CORANTIOQUIA (**eSirena**, **FUNIAS** y otros estudios).

- c. Estudios técnicos municipales (Esquemas de Ordenamiento Territorial – **EOT**, Plan de Desarrollo – **PDD**, Reglamentos técnicos).
- d. Taller **práctico** identificación de amenazas en el territorio (**diagnóstico participativo** con actores).

Fotografía 1. Participantes del taller de identificación de amenazas, impactos y problemáticas asociadas al sistema hidrogeológico Cartama



Nota. Tomado de Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2023).

Luego de recopilar y depurar la información levantada tanto en oficina como en campo, se continúa con el procesamiento de los datos mediante la creación de una tabla en la herramienta ofimática Excel, la cual permitió con mayor facilidad ordenar y clasificar las posibles actividades contaminantes, conforme la clasificación de categorías definida anteriormente.

Posteriormente a este ejercicio, la georreferenciación dispuesta sobre un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitió representar espacialmente el conjunto de fuentes potenciales de contaminación identificadas. Esto fue posible, mediante el uso del software ArcGIS – versión 10.8, que actualmente está disponible bajo licencia académica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Adicionalmente, se utilizó información cartográfica

básica suministrada por CORANTIOQUIA a escala 1: 25.000 y el Modelo Digital del Terreno – MDT Alos Palsar descargado con resolución de 12,5 metros, logrando así localizar la zona de estudio, los límites y cabeceras municipales y las corrientes de agua continuas.

Por otro lado, cabe anotar que en esta investigación se utilizó el **mapa de coberturas de la tierra y usos del suelo** del departamento de Antioquia para el año 2017, el cual fue obtenido como producto del Plan de Ordenamiento Territorial Agropecuario – POTA (Gobernación de Antioquia, 2018). Esta capa fue actualizada y levantada de imágenes Landsat de los años 2014, 2015 y 2016, de acuerdo con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia – CLCC a escala 1: 100.000 (IDEAM, 2010). Por medio de este mapa, se pudo extender a polígonos las actividades agropecuarias de tipo difuso, que inicialmente estaban asociadas a un único punto georreferenciado en campo. Las coordenadas relacionadas específicamente a cultivos de aguacate Hass, se extendieron a sus áreas respectivas, con base en los predios y la cantidad de hectáreas correspondientes según lo registra la empresa aguacatera Cartama en su página oficial (<https://cartama.com/tablas/>).

- **Fase 2 (Objetivo específico 2: Sistematizar, según la metodología de carga contaminante, las fuentes potenciales de contaminación identificadas).**

La base de datos espacial construida en la fase anterior, se complementó con la **elección de la principal sustancia** contaminante de la actividad asociada, así como con la **caracterización conceptual de la carga contaminante** en términos de los factores **clase, intensidad, modo y duración**; que permitió obtener los **valores relativos**, para finalmente **estimar y clasificar** el Índice potencial de generación de Carga Contaminante (**ICC**) correspondiente a cada categoría resultante.

El desarrollo de esta fase se apoya fundamentalmente en la ruta de trabajo implementada por Gaviria (2005) en su trabajo de grado.

- **Fase 3 (Objetivo específico 3: Identificar las áreas con mayor potencial de afectación a la calidad del recurso subterráneo por la presencia de cargas contaminantes).**

Finalmente, la base de datos con la calificación del Índice de carga contaminante de cada categoría, permitió obtener una distribución espacial representada en mapas, que se superpone con las tres (3) zonas de interés hidrogeológico; definidas y priorizadas de acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual y los elementos del diagnóstico (Universidad de Antioquia y

CORANTIOQUIA, 2023), como: i) zonas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación: las calificadas en las categorías extremadamente alta y alta; ii) zonas con función de recarga: aquellas en los rangos muy alta y alta y iii) polígono del ecosistema bosque seco tropical (Bs-T).

Conforme este cruce espacial y conceptual se reconocieron unas zonas con mayor potencial de afectación a la calidad del agua subterránea del sistema acuífero Cartama. Este proceso fue posible mediante la recopilación de información cartográfica temática generada por Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA en los estudios hidrogeológicos realizados en los años 2021 y 2022, además, de las salidas cartográficas generadas en la formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos del sistema Cartama (Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, 2023).

5 Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos específicos planteados y materializados con la ejecución de las actividades descritas en el apartado anterior.

• **Objetivo específico 1: Verificar, en campo, la presencia de actividades potencialmente contaminantes para el sistema Cartama.**

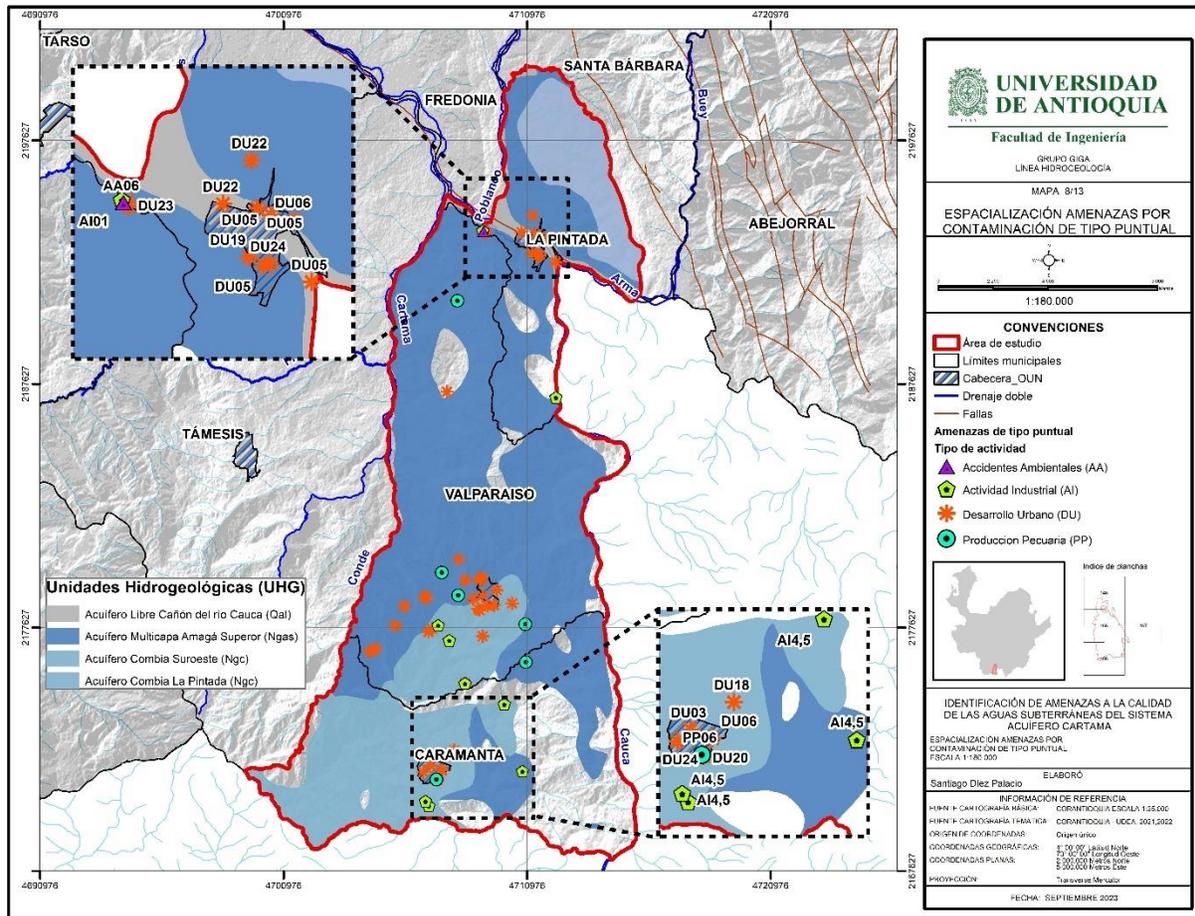
Teniendo en cuenta las diferentes fuentes de información utilizadas para el desarrollo de este estudio, se identificaron en total 22 categorías de actividades potencialmente contaminantes para las aguas subterráneas del sistema acuífero Cartama. En el *Documento Soporte: Identificación de amenazas por contaminación*, se detalla para cada una de estas la(s) fuentes que la proporcionaron; además de las fichas de campo respectivas.

En la **Figura 12**, se observa la especialización de 78 puntos, asociados a 19 de las 22 categorías referidas exclusivamente a fuentes potenciales de contaminación de tipo puntual. Las otras tres (3) categorías correspondientes a fuentes de tipo difuso se nombran más adelante en este mismo informe. De los 78 puntos, 62 (80%) se asocian al Desarrollo Urbano – DU, esta mayor cantidad de puntos es consistente con lo encontrado para dicha actividad, ya que es la que mayor número de categorías definidas tiene relacionada (12 de las 19 categorías), seguido por la producción pecuaria – PP (4), actividad industrial – AI (2) y accidentes ambientales – AA (1).

Dentro de las actividades de DU y AI hay un nuevo aporte a considerar en cada una, que corresponden a las categorías con código DU12,5 y AI4,5 denominadas descarga de aguas residuales domésticas tratadas de pozos sépticos hacia campo de infiltración y descarga de aguas mieles sin tratamiento en fosa séptica, respectivamente. Ambas reconocidas a través de la revisión de expedientes consultados en el Sistema de Información de Recursos Naturales – eSirena.

De los 78 puntos espacializados, 39 se localizan sobre el acuífero multicapa Amagá superior (Ngas), 31 en el acuífero Combia Suroeste (Ngc), cuatro (4) en el acuífero libre del Cañón del río Cauca (Qal) y otros cuatro (4) que no se superponen con ninguno de los acuíferos, los cuales son descritos detalladamente en la ficha de información del sistema Cartama (ver **Figura 5**).

Figura 12. Espacialización de las actividades potencialmente contaminantes de tipo puntual sobre el acuífero Cartama

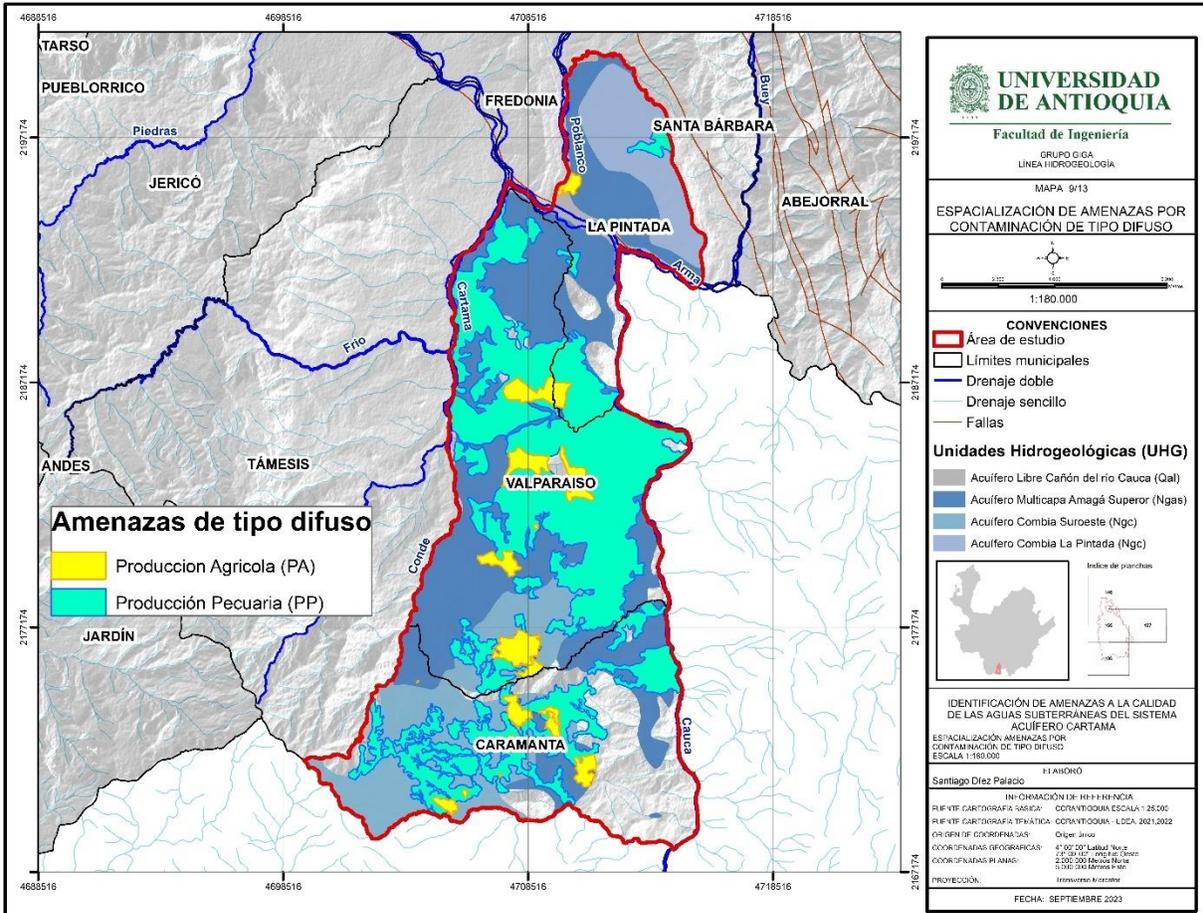


Nota. Elaboración propia a partir de Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2023).

En la **Figura 13** se espacializan las áreas donde se desarrolla la producción agrícola – PA y pecuaria – PP, que para este contexto se asocian a las siguientes tres (3) categorías de actividades potencialmente contaminantes de tipo difuso: PA03 (aspersión con urea en diversos cultivos), PP02 (deposición de excrementos al terreno producto de la ganadería extensiva) y PP07 (excremento como abono para pastos proveniente del ganado bovino).

De estas tres categorías, la PP02 es la que abarca mayor extensión en la zona de estudio (9.626,7 ha), con 6.559,0 ha localizadas específicamente sobre el acuífero multicapa Amagá superior (Ngas). Seguido por la categoría PA03, con 1.038,4 ha relacionadas a cultivos de café, plátano, cítricos y aguacate, de los cuales 626,0 ha se extienden sobre el acuífero multicapa Amagá superior (Ngas), 399,0 ha sobre el acuífero Combia Suroestes (Ngc) y una última fracción de 13,4 ha en el acuífero libre del cañón del río Cauca.

Figura 13. Espacialización de las actividades potencialmente contaminantes de tipo difuso sobre el acuífero Cartama



Nota. Elaboración propia a partir de Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2023).

Como resultado de confrontar las actividades agropecuarias registradas en campo –asociadas a una única coordenada–, con el mapa de coberturas y usos del suelo del año 2017, se encontró correspondencia en la mayoría de los casos. Sin embargo, para los cultivos de aguacate Hass no ocurre lo mismo; ya que donde actualmente se localizan dichas plantaciones, en 2017 correspondían a áreas con fines pecuarios (pastos limpios). En este sentido, se reconoce que la cartografía utilizada presenta ciertas variaciones en relación con lo encontrado en campo.

Otra de las limitaciones para tener en cuenta, hace referencia a que en las zonas donde no se espacializan potenciales amenazas –tanto de tipo puntual como difuso–, no quiere decir necesariamente que no existan; más bien esto responde a un registro de información limitado en

campo, considerando que los recorridos se efectuaron de manera paralela a la ejecución de otras tareas relacionadas con la formulación del PMAA.

Por otra parte, es importante mencionar que algunas de las actividades potencialmente contaminantes aquí caracterizadas, se reconocieron tras la revisión realizada en el Formato Único Nacional de Inventario de Agua Subterránea – FUNIAS (Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, 2021: 2022). Por lo tanto, dichas actividades quedaron georreferenciadas con las coordenadas de la captación destinada a suplir sus requerimientos de agua, lo cual no representa ningún error, puesto que estos puntos no fueron objeto de una nivelación de precisión; además es posible inferir que la actividad se desarrolla en cercanía de la fuente de agua que la abastece.

• **Objetivo específico 2: Sistematizar, según la metodología de carga contaminante, las fuentes potenciales de contaminación identificadas.**

De las 22 categorías resultantes, 16 se relacionan exclusivamente con nitratos y cuatro (4) con hidrocarburos. Las otras dos (2) categorías restantes (DU05 y DU06) se caracterizaron con ambos tipos de contaminantes. Esta notable diferencia, se debe a que en la zona existe un mayor número de fuentes que introducen en el medio compuestos nitrogenados, los cuales, bajo sistemas aeróbicos de aguas subterráneas, se transforman en la forma más oxidada del nitrógeno, es decir, en nitratos.

Como fue mencionado en los resultados del primer objetivo específico, 19 categorías presentan una distribución espacial de tipo puntual y tres (3) de tipo difuso. Por otro lado, respecto a las concentraciones relativas de la carga contaminante, se ha trabajado con las aproximaciones de la metodología propuesta por Foster et al. (2002) y lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS); teniendo en cuenta que, dentro de los alcances de este estudio, no se contempló una campaña de muestreo que permitiera obtener las concentraciones reales.

La carga hidráulica o el caudal con el que llegan los contaminantes al medio subterráneo, se asimila en todos los casos con la magnitud de la recarga esperada para la zona en un año húmedo – condición más crítica–, o sea, con los 406,95 mm/año que equivalen a 1,1 mm/día (más detalle en ficha de información del sistema acuífero Cartama, ver **Figura 5**).

La probabilidad de descarga del contaminante al subsuelo para la mayoría de las categorías es del 100% (18 de las 22 categorías), exceptuando cuatro (4) a las que se le asignó un valor del 5%,

dadas las condiciones encontradas y los requisitos obligatorios a cumplir para su debida operación. El periodo de aplicación de las cargas contaminantes presentó variaciones entre años y décadas.

La ubicación de las 22 categorías en cada una de las gráficas de clase, intensidad, modo y duración se presenta en el *Documento Soporte: Identificación de amenazas por contaminación*, donde adicionalmente se describe con mayor detalle el fundamento conceptual –descrito de manera general en lo anteriores párrafos–, que sustenta los valores relativos obtenidos y, a su vez, el ICC estimado para cada categoría. En la **Tabla 4** se sintetizan dichos valores que resultan en el ICC.

Tabla 4. Valores relativos y clasificación del ICC de cada una de las categorías de actividades contaminantes para el sistema Cartama

Tipo de actividad	Categoría	Contaminante	Clase	Intensidad	Modo	Duración	Valor ICC	Clasificación ICC
Desarrollo Urbano (DU)	DU03	Nitratos	1,00	0,15	0,60	1,00	0,70	Elevado
	DU10	Nitratos	1,00	0,15	0,60	1,00	0,70	Elevado
	DU05	Nitratos	1,00	0,15	0,60	1,00	0,70	Elevado
	DU05*	Hidrocarburos	0,60	0,15	0,60	1,00	0,58	Moderado
	DU06	Nitratos	1,00	0,15	0,30	1,00	0,64	Elevado
	DU06*	Hidrocarburos	0,60	0,15	0,30	1,00	0,52	Moderado
	DU15	Nitratos	1,00	0,15	0,60	1,00	0,70	Elevado
	DU12,5	Nitratos	1,00	0,15	0,60	1,00	0,70	Elevado
	DU18	Nitratos	1,00	0,30	0,80	0,55	0,68	Elevado
	DU19	Nitratos	1,00	0,30	0,30	1,00	0,68	Elevado
	DU20	Nitratos	1,00	0,30	0,80	1,00	0,78	Elevado
	DU22	Nitratos	1,00	0,30	1,00	1,00	0,83	Elevado
	DU23	Hidrocarburos	0,60	0,40	0,30	0,55	0,48	Moderado
DU24	Hidrocarburos	0,60	0,40	0,80	0,55	0,58	Moderado	
Producción Agrícola (PA)	PA03	Nitratos	1,00	0,40	0,30	1,00	0,71	Elevado
Producción Pecuaria (PP)	PP02	Nitratos	1,00	0,50	0,30	1,00	0,73	Elevado
	PP06	Nitratos	1,00	0,35	0,60	1,00	0,75	Elevado
	PP07	Nitratos	1,00	0,50	0,30	1,00	0,73	Elevado
	PP08	Nitratos	1,00	0,50	0,30	1,00	0,73	Elevado
	PP11	Nitratos	1,00	0,50	0,30	1,00	0,73	Elevado
	PP14	Nitratos	1,00	0,50	0,30	1,00	0,73	Elevado
Actividad Industrial (AI)	AI01	Hidrocarburos	0,60	0,50	0,60	0,55	0,56	Moderado
	AI4,5	Nitratos	1,00	0,50	0,80	1,00	0,83	Elevado
Accidentes Ambientales (AA)	AA06	Hidrocarburos	0,60	0,50	1,00	1,00	0,75	Elevado

En primer lugar, se resalta que ninguna de las categorías se calificó con un ICC *reducido*. Por otra parte, todas las categorías de actividades potencialmente contaminantes relacionadas con hidrocarburos obtuvieron un ICC *moderado* –exceptuando la AA06 que resultó con un ICC *elevado*–. Dentro de estas categorías se destaca la DU23, DU24 y AI01, a las cuales se le asignó junto con DU18 el menor valor relativo en relación con el factor duración (ver **Tabla 4**). Esto tiene que ver principalmente con el 5% asignado a la probabilidad de descarga del contaminante, conforme los requisitos a cumplir para poder operar según lo establecido en el Reglamento Técnico para estaciones de servicio – EDS y plantas de almacenamiento de combustibles (Resolución 40450 del 2020, Ministerio de Minas y Energía).

Cada una de las categorías asociadas a los nitratos dieron un ICC *elevado*, destacando la AI4,5 y DU22, al obtener en simultáneo el mayor valor de ICC de todas las categorías caracterizadas (ICC = 0,83). Cabe precisar que, ambas actividades contaminantes hacen parte del grupo de categorías que se califican de forma más severa respecto al factor modo de disposición, ya que su incidencia se da cerca y en el nivel freático, respectivamente.

Finalmente, las categorías DU05 y DU06 se caracterizaron tanto para los nitratos como para los hidrocarburos. Estas dos (2) categorías asociadas al primer contaminante dieron calificaciones del ICC *elevado*, mientras que las mismas dos categorías relacionadas con el segundo contaminante resultaron ser *moderados*. La diferencia en los valores y en la calificación del ICC de estas categorías, radica únicamente en la clase de contaminante evaluado y sus valores relativos asignados (ver **Tabla 4**); esto al considerar que los nitratos son más persistentes y móviles en comparación con los hidrocarburos, a los cuales si se le asocian procesos de transformación bioquímica y retardación fisicoquímica en ambientes subterráneos (ver Tabla 3, comportamiento de contaminantes en el subsuelo).

• **Objetivo específico 3: Identificar las áreas con mayor potencial de afectación a la calidad del recurso subterráneo por la presencia de cargas contaminantes.**

A partir de los resultados de la fase de diagnóstico del PMAA del sistema Cartama, Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2023) definieron las zonas de interés hidrogeológico que

corresponden según la normativa colombiana a las zonas estratégicas para la protección del recurso hídrico subterráneo y de sus servicios ecosistémicos.

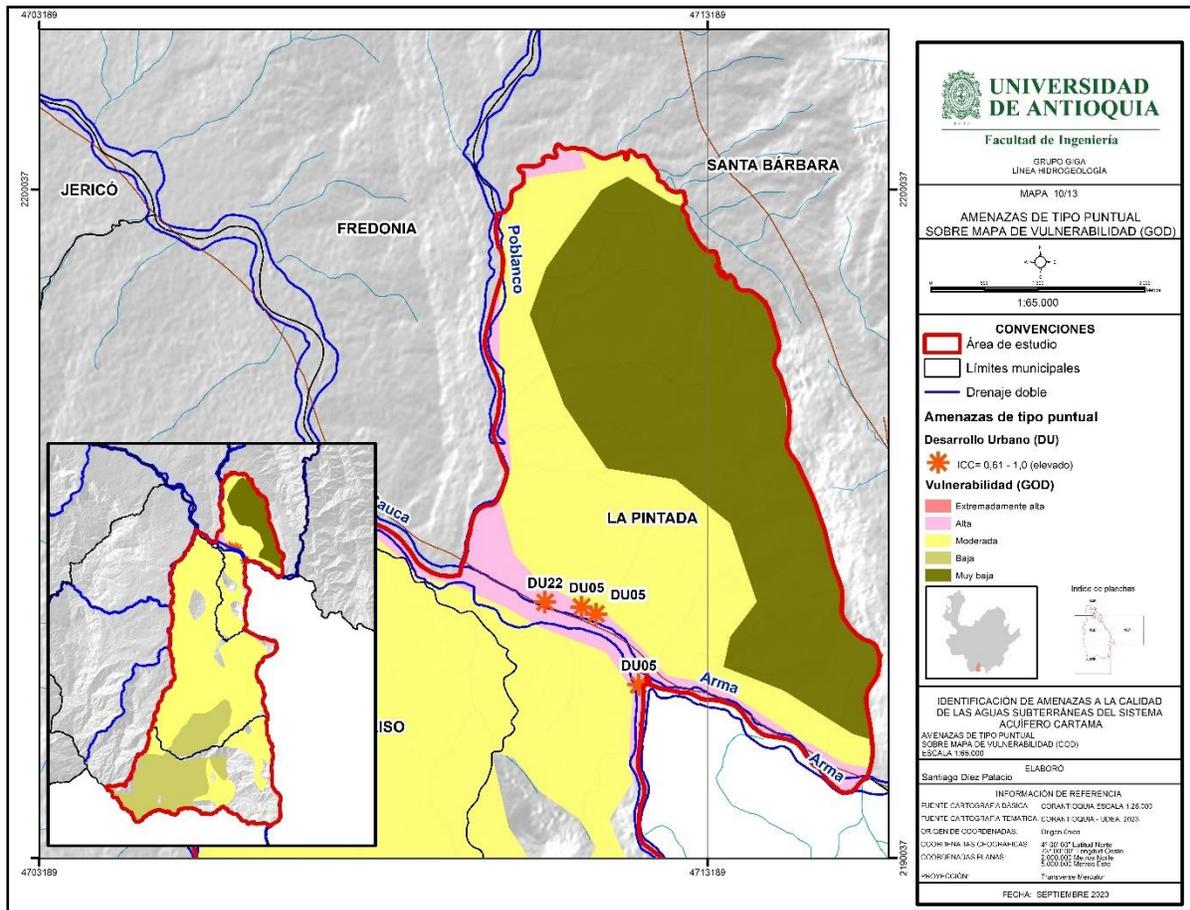
A continuación, se presentan los resultados obtenidos del contraste realizado entre la carga contaminante asociada a cada una de las categorías identificadas en este estudio y las zonas estratégicas que, en resumen, corresponden a:

i) Zona de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos extremadamente alta y alta, extraídas del mapa de vulnerabilidad realizado mediante el método GOD.

En la **Figura 14**, se reconocen las descargas de aguas residuales domésticas – ARD al río Cauca (DU05) y la inadecuada disposición de residuos sólidos en aljibes abandonados (DU22), como las categorías de actividades potencialmente contaminantes de tipo puntual que se traslapan con el acuífero libre del Cañón del río Cauca, que corresponde a la zona más susceptible de todo el sistema a ser adversamente afectada ante la presencia de una carga contaminante externa. Esto último es coherente, al ser un acuífero de carácter libre (G), formado de partículas sueltas a las que se les asocia naturalmente porosidad y permeabilidad (O) y por la proximidad del nivel freático a la superficie (D).

Adicionalmente, es de resaltar que estas dos (2) categorías obtuvieron un ICC *elevado*, lo que se traduce en una mayor probabilidad en la generación efectiva de la carga contaminante y, por consiguiente, de una mayor afectación potencial de las aguas subterráneas.

Figura 14. Espacialización de las categorías de actividades potencialmente contaminantes de tipo puntual sobre el mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del sistema acuífero Cartama



Nota. Elaboración propia a partir de Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2023).

ii) Zonas con función de recarga muy alta y alta, obtenidas al conjugar las zonas de recarga – ZR y la magnitud de la recarga –MR proveniente por precipitación.

En la zona de interés predominan las áreas con función de recarga alta (16.879,6 ha), debido al afloramiento de los acuíferos que favorecen la generación de recarga directa (ver **Figura 15**). De igual manera, se evidencia que dichas áreas son las que abarcan mayores extensiones del suelo rural en los municipios de estudio; lo que tiene sentido, al considerar que los dos factores superpuestos (ZR y MR) incorporan la influencia de las coberturas terrestres, como una condición en superficie que favorece en este caso el proceso de infiltración y posterior recarga.

Conforme a ello, es importante mencionar que de los 78 puntos asociados a actividades contaminantes de tipo puntual, 57 (73%) se localizan exclusivamente en suelo rural. Esto quiere

decir que el restante, es decir, 21 fuentes potenciales de contaminación se establecen en suelo urbano (27%).

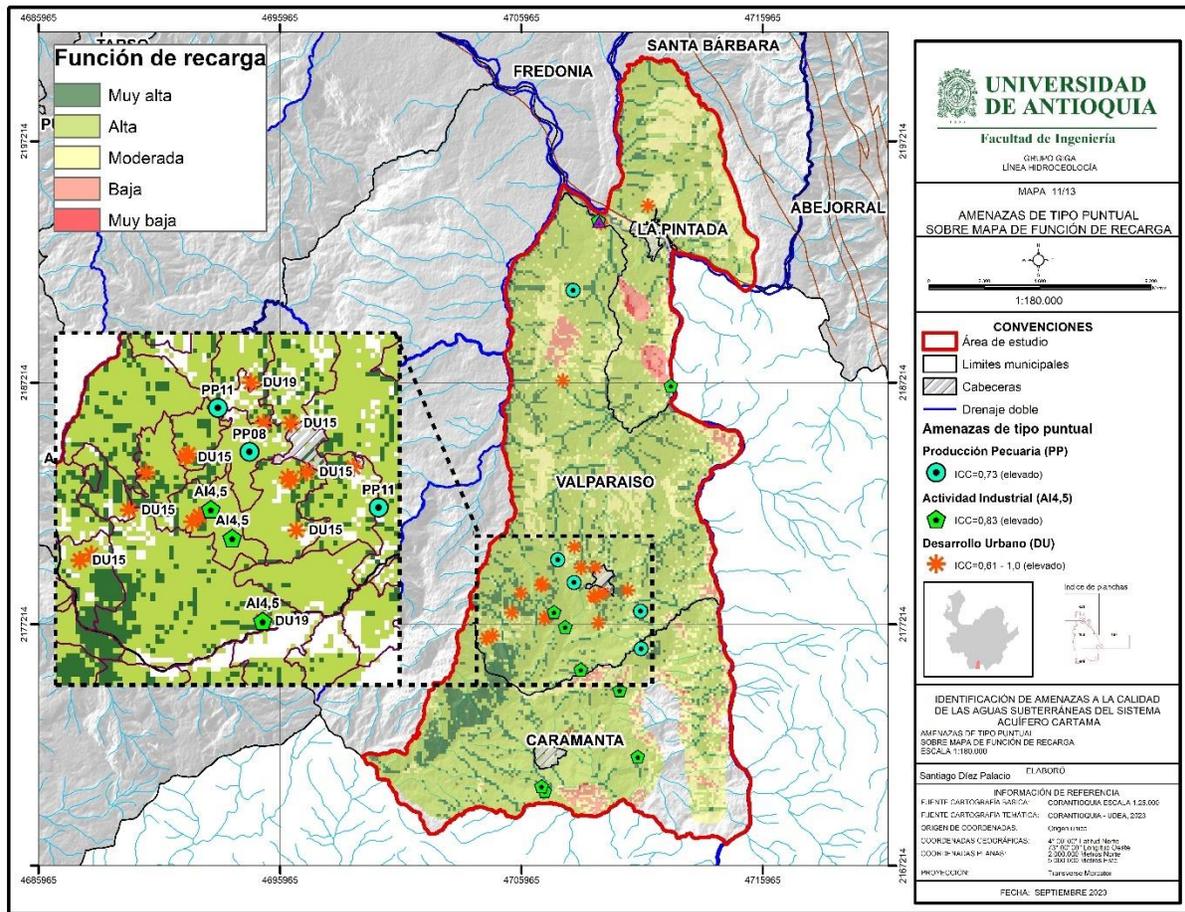
A nivel espacial, Valparaíso es el municipio que cuenta en su ruralidad con la mayor cantidad de estos puntos, 42 del total; de los cuales, 36 se cruzan espacialmente con zonas con función de recarga alta.

En el recuadro izquierdo de la **Figura 15**, se agrupan 34 de estos últimos puntos mencionados, destacando que en 13 de ellos coinciden dos categorías en simultaneo (DU12,5 y DU15), resultando por separado en 26 fuentes potenciales de contaminación, que sumadas a las otras 8 pueden terminar por equivaler a una fuente de contaminación esencialmente difusa de nitratos en lo que respecta a su identificación y control. A esto se adiciona, una calificación del ICC *elevado* para cada uno de los puntos. En la **Tabla 5**, se nombran las veredas asociadas, en las que se puede estar generando un gran impacto en la calidad del agua subterránea.

Tabla 5. Veredas con un mayor potencial afectación a las aguas subterráneas del sistema Cartama

Municipio	Vereda
Valparaíso	El Guayabo
	Mallarino
	La Placita
	Potrerrillo
	El Bosque
	La Meseta
	Las Sardinias
	La Machonta
	Playa Rica

Figura 15. Espacialización de las categorías de actividades potencialmente contaminantes de tipo puntual sobre el mapa de función de recarga del sistema acuífero Cartama

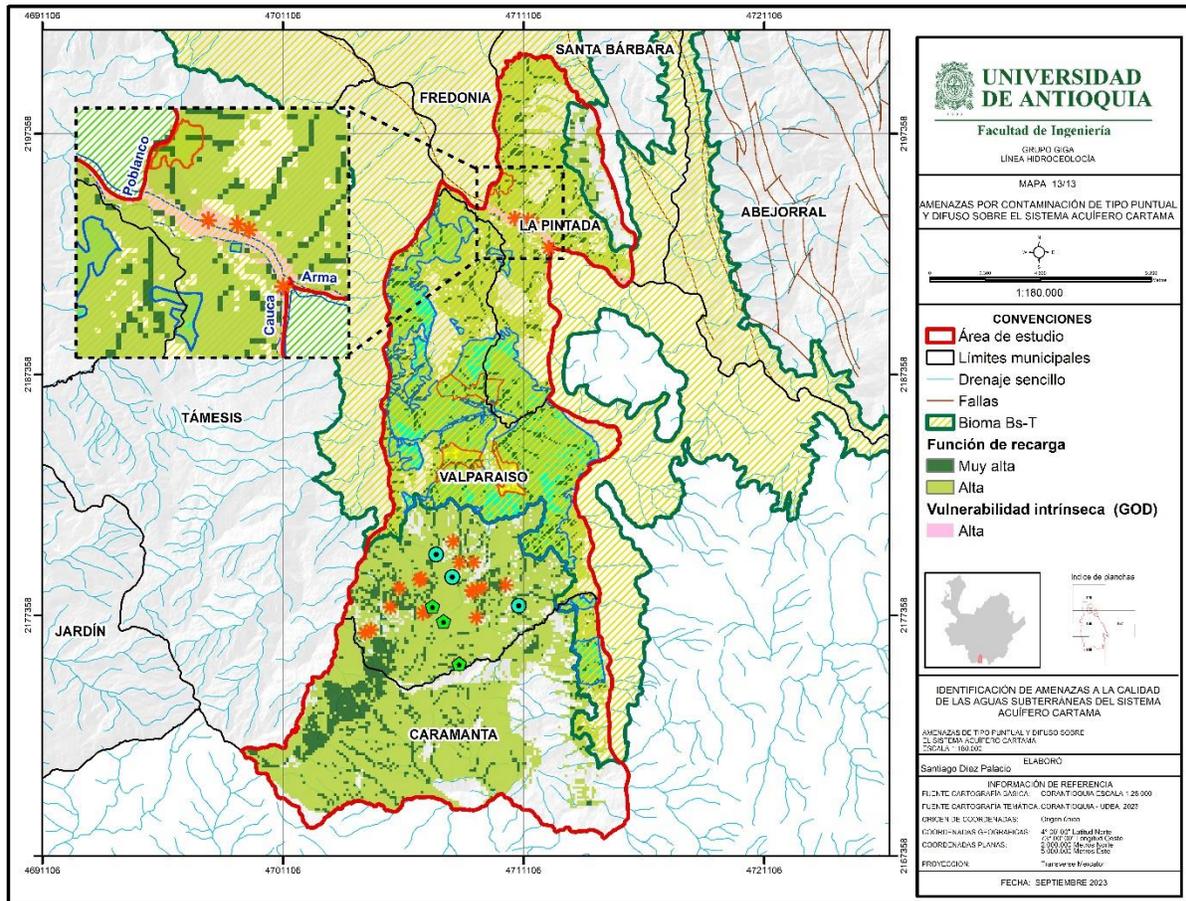


Nota. Elaboración propia a partir de Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2023).

iii) Bosque seco tropical (Bs-T).

Como se observa en la **Figura 16**, los municipios de La Pintada, Valparaíso y Caramanta cuentan con un ecosistema de Bs-T, representado en un área total de 13.203,7 ha.

En el municipio de La Pintada, se espacializan amenazas por contaminación de tipo difuso cerca al río Cauca (PP07) y Poblano (PA03), en áreas donde se traslapan tanto zonas de vulnerabilidad y función de recarga alta como el bioma del Bs-T (ver recuadro izquierdo de **Figura 16**). Asimismo, ocurre hacia el sur de La Pintada y parte central - baja de Valparaíso, donde se visualizan áreas de pastizales (PP02) y cultivos (PA03) que suman en conjunto una extensión de 4.688 ha y 425,7 ha respectivamente, que se superpone mayormente con zonas con función de recarga alta y el Bs-T.



Nota. Elaboración propia a partir de Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA (2023).

6 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se concluye para el sistema acuífero Cartama la existencia de cinco (5) principales actividades potencialmente contaminantes relacionadas con: Desarrollo Urbano (DU), producción agrícola (PA) y pecuaria (PP), accidentes ambientales (AA) y actividad industrial (AI). Esta última actividad, fue caracterizada en la zona de interés mediante dos categorías, constituyendo así un nuevo aporte en relación con el trabajo realizado por Gaviria (2005). Adicionalmente, el número de categorías clasificadas por el mismo autor asciende a 82, ya que en el marco del presente estudio se reconocieron dos nuevas categorías (DU12,5 y AI4,5) de las 22 identificadas; lo cual permitirá ampliar el panorama y obtener inventarios más robustos en futuros estudios de este tipo.

Cabe señalar que, en términos de la distribución espacial de las 22 categorías de amenazas por contaminación, 19 son de tipo puntual y tres (3) de tipo difuso. Por otro lado, 16 de estas categorías se asocian únicamente con nitratos, cuatro (4) con hidrocarburos y otras dos (2) con ambos tipos de contaminantes. **La selección del principal contaminante para cada categoría, se basó fundamentalmente en las implicaciones que supone para la salud de los seres vivos su presencia en el agua subterránea; destacando la amplia distribución de los nitratos y sus efectos tóxicos, como un tópico común en la evaluación de la calidad del agua.**

En cuanto a la aplicación de la metodología de carga contaminante, se obtiene que la mayoría de las categorías relacionadas con hidrocarburos registraron un ICC *moderado*, mientras que todas las categorías analizadas con el ión nitrato se calificaron con un ICC *elevado*. Es evidente que la diferencia en los valores y la calificación del ICC de este conjunto de categorías, está influenciada en gran medida por la selección del tipo de contaminante y su valor relativo asignado –sin desconocer el aporte de los otros tres (3) factores que caracterizan la carga contaminante–, reconociendo además que al ser el factor de mayor peso, logra sumar más en el promedio ponderado y aumentar así la diferencia entre los valores dados.

Mediante este trabajo de investigación se logró relacionar el mapa de vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero Cartama, con la carga contaminante vinculada a cada una de las 22 categorías existentes en la zona de estudio. Si bien, sobre el acuífero multicapa Amagá superior (Ngas) se ubica el mayor número de fuentes potenciales de contaminación de tipo puntual, se centra la

atención en los puntos pertenecientes a las categorías DU05 y DU22 que se espacializan sobre el acuífero libre del cañón del río Cauca (Qal); debido a las condiciones propias de este medio, que posibilitan con mayor facilidad la infiltración y el movimiento de los contaminantes asociados (nitratos).

Igualmente, se precisa que ambas categorías obtuvieron una calificación del ICC *elevado*, siendo la categoría DU22 (residuos en aljibes abandonados) la que obtuvo el mayor valor de ICC de todas las categorías –junto a la AI4,5–; lo que representa una situación de riesgo, que prenden aún más las alarmas en términos de que la probabilidad de generación de la carga contaminante se haga efectiva, sumadas a las condiciones de vulnerabilidad alta encontradas para el acuífero donde se localizan.

Conforme a lo anterior, se reconoce que la existencia de captaciones abandonadas sobre el acuífero libre del cañón del río Cauca, pueden constituir un foco de contaminación de las aguas subterráneas. Es así como la implementación de acciones de carácter preventivo (seguimiento de su estado, sellamiento adecuado, etc.) cumplen un rol muy importante para evitar reducir la calidad del agua y, a su vez, la calidad de vida de los seres humanos que, para este caso, dependen del recurso subterráneo; demostrado con 23 captaciones (21 aljibes, un pozo y un manantial) todas ellas localizadas en el municipio de La Pintada sobre la formación geológica de análisis (depósitos aluviales –Qal–), que indica la importancia hidrogeológica y socio-hidrogeológica en términos de una necesidad de la población más vulnerable que se satisface con el uso del agua subterránea.

Hacia el suroeste del municipio de Valparaíso (afloramiento Formación Combia Suroeste y Formación Amagá Superior) se reconocieron nueve (9) veredas vecinas donde se concentran espacialmente 34 fuentes potenciales de contaminación de tipo puntual, relacionadas a las categorías DU12,5 (13), DU15 (13), AI4,5 (3), DU19 (2), PP11(2) y PP08 (1); todas con un ICC *elevado* y ubicadas precisamente en zonas con función de recarga alta, es decir, sobre áreas específicas en las que coinciden condiciones físicas del medio y aspectos meteorológicos, que favorecen la migración del agua al subsuelo al igual que los posibles lixiviados o flujos con contaminantes.

Como consecuencia de lo anteriormente mencionado, se sugiere en estas zonas una mayor posibilidad de afectación a la calidad de las aguas subterráneas, alertando además de su potencial

transformación a una fuente contaminante de tipo difusa –de nitratos– en lo que respecta a su identificación y control.

Por otra parte, se concluye que sobre el acuífero multicapa Amagá Miembro Superior (Ngas) también se localiza la mayor extensión en superficie, respecto a dos (2) de las tres categorías de amenazas por contaminación de tipo difuso; representada en un total de 6.559,0 ha de pastos limpios (PP02) y 626,0 ha de zonas de cultivo (PA03). En este sentido, se destaca el municipio de Valparaíso, por su mayor aporte en área a ambas categorías, con un total de 5.218 ha y 446,6 ha respectivamente; lo cual es congruente con lo descrito en los aspectos económicos de los municipios de interés y en la caracterización del sistema acuífero Cartama, donde se confirma que este es el municipio de mayor representatividad agrícola y en el que mayormente aflora el acuífero mencionado inicialmente.

Adicionalmente, se resalta que la mayor parte de estas áreas registradas en Valparaíso, se traslapan con zonas con función de recarga alta y el bioma del Bs-T; lo que agrava la situación, pudiendo resultar en efectos más severos sobre la calidad de las aguas subterráneas y, a su vez, de los ecosistemas interdependientes como lo es el Bosque Seco Tropical.

Finalmente, en el municipio de La Pintada –cerca al río Cauca–, se distribuye espacialmente la fuente potencial de contaminación de tipo difuso relacionada con la categoría PP07, localizada particularmente sobre las áreas priorizadas de las tres (3) zonas de interés hidrogeológico consideradas en este estudio (función de recarga alta, vulnerabilidad alta y Bs-T); sugiriendo allí una mayor fragilidad ambiental, traducida en una mayor afectación potencial de las aguas subterráneas.

7 Referencias

- Alcaldía de La Pintada. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal de La Pintada 2020 - 2023*.
- Alcaldía Municipal de Caramanta. (2022). *Revisión general al Esquema de Ordenamiento Territorial*. Documento diagnóstico .
- Alcaldía Municipal de Valparaíso. (2022). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Documento diagnóstico .
- Bastidas, B., Ossa, J., Martínez , C., Vela, M., Betancur, T., & Osorio, A. (2022). *Region-scale estimation of potential groundwater recharge in soft and hard rock formations through a distributed water balance in the area of influence of the tropical dry forest in the Cauca River canyon, Antioquia, Colombia*. *Boletín Geológico*, 49 (1), 77 - 101. doi:<https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.1.2022.625>
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Obtenido de <http://systema59.dane.gov.co/bincol/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CNPVBASE4V2&lang=esp>
- Foster, S., & Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS). Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/riesgo7645.pdf>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea*. Guía para empresas de agua, autoridades ambientales y agencias ambientales. Obtenido de <https://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>
- Gaviria , J., & Betancur , T. (2005). *Una caracterización de carga contaminante a los acuíferos libres del Bajo Cauca Antioqueño*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169421174007.pdf>
- Gaviria, J. (2005). *Identificación y clasificación de fuentes potenciales de contaminación del acuífero libre del Bajo Cauca Antioqueño*. Trabajo de grado Ingeniería Sanitaria, Universidad de Antioquia. Obtenido de <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/7722>

-
- Gobernación de Antioquia. (2018). *PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL AGROPECUARIO - POTA*. DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.
- Gobernación de Antioquia. (2020). *Fichas municipales 2020 - 2021*. Antioquia. Obtenido de <https://www.antioquiadatos.gov.co/index.php/fichas-municipales-2020-2021/>
- GOTTA INGENIERIA S.A.S y CORANTIOQUIA. (2017). *Evaluación Regional del Agua en jurisdicción de CORANTIOQUIA*. Medellín: GOTTA INGENIERIA S.A.S.
- ICA. (2023). *Instituto Colombiano Agropecuario*.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá D.C.
- Jhonson, E. (1975). *El agua subterránea y los pozos*.
- MADS. (2014). *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos*. Bogotá .
- Palacio, P., Díaz , R., Vela, M., & Ossa, J. (2022). *Hydrogeological potential in soft formations and hard rocks: A case study in the Cauca River Canyon, Antioquia, Colombia*.
- Rueda, O. M., & Angel, J. (2004). *Propuesta metodológica preliminar para calificar la carga contaminante al subsuelo en un acuífero libre*. IV Seminario-taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación.
- SHI S.A.S y CORANTIOQUIA. (2014). *Evaluación hidrogeológica en los municipios de La Pintada y Valparaíso jurisdicción de la territorial Cartama de Corantioquia*. Medellín: Servicios Hidrogeológicos Integrales.
- Universidad de Antioquia y AMVA. (2015). *Plan de manejo ambiental del sistema acuífero de la cuenca del río Aburrá*.
- Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA. (2021). *Fase I Aunar esfuerzos para la exploración del potencial hidrogeológico en zonas de bosque seco en el cañón del río Cauca en la jurisdicción de Corantioquia*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA. (2022). *Fase II El agua subterránea en la región del Suroeste Antioqueño. Potencial de un recurso esencial invisible*. Medellín: Universidad de Antioquia.

Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA. (2023). *Aunar esfuerzos para la Actualización de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos de Occidente y Magdalena Medio y la Formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos del Sistema Acuífero Cartama*. En elaboración, Medellín: Universidad de Antioquia.