

**EVALUACIÓN DEL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO
ALUVIAL DEL RÍO CAUCA EN EL ÁREA HIDROGEOLÓGICA AFERENTE AL
RÍO BOLO**

Presentado por:

Ing. Mónica Lucía Burgos

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Gestión Integral del Recurso Hídrico

Ph.D, M.Sc, Ing. María Fernanda Jaramillo
Directora

Ph.D, M.Sc, Ing Alberto Galvis
Codirector

UNIVERSIDAD DEL VALLE
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente
Programa de Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
Cali, Colombia, 2023

DEDICATORIA

A mis seres más amados,
Lucía, Jenny, Anita, Armando, Tony y Canela
Sin ustedes no sería posible.

AGRADECIMIENTOS

A Dios...

A la Ingeniera MSc. PhD. María Fernanda Jaramillo por brindarme su apoyo, el enriquecer este proceso por medio de su conocimiento, el tiempo y dedicación hacia la dirección de este trabajo investigativo y el ingeniero MSc. PhD. Alberto Galvis por la codirección y asesoramiento de este proyecto.

Al grupo de investigación Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) del Instituto Cinara de la Universidad del Valle, por brindarme los espacios físicos para el desarrollo de esta investigación.

Al ingeniero MSc. PhD. Andrés Echeverri por las observaciones realizadas y estar presto a contribuir en este proceso tanto académica como humanamente.

A la Ingeniera Valentina Urrea por el valioso tiempo y conocimiento compartido, que me permitió cumplir con el segundo objetivo de este proyecto de investigación.

A la MSc. Gabriela Guerrero, quien me ha acompañado desde mi formación académica en el pre grado y fue un apoyo muy importante para el desarrollo de la investigación, por medio de la asesoría para el uso de sistemas de información geográfica aplicados en el desarrollo de los objetivos.

A mis padres, Lucía y Armando, por su apoyo, amor incondicional, por ayudarme a crecer, mejorar como persona y nunca dejar de creer en mí, aun cuando las cosas se han complicado. A mi hermana, quien siempre me ha brindado una sonrisa y su apoyo en los días grises.

A Jenny, por su apoyo, su amor, su constancia y compañía incondicional en el desarrollo de este proceso investigativo. Gracias por tener siempre la palabra de aliento, el mensaje adecuado y las palabras indicadas que me motivaron a seguir adelante.

A la Universidad del Valle, por haberme permitido formar profesional y personalmente. A todos los profesores y compañeros, que hicieron parte de mi formación académica, por sus enseñanzas y compañía.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	15
4.1 Objetivo General	15
4.2 Objetivos Específicos.....	15
5. MARCO TEÓRICO	16
5.1 Sistema Acuífero	16
5.2 Gestión del riesgo.....	18
5.3 Contaminación al sistema acuífero	18
5.4 Gestión del riesgo a la contaminación del agua subterránea.....	19
5.4.1 Vulnerabilidad del acuífero	19
5.4.2 Amenaza de contaminación al acuífero	23
5.4.3 Riesgo de contaminación al acuífero	26
5.5 Construcción de escenarios en la planificación de los recursos hídricos	28
5.5.1 Tipos de escenarios	28
5.5.2 Métodos para la elaboración de escenarios	28
6. METODOLOGÍA	31
6.1 Clasificación de la investigación y esquema metodológico	31
6.2 Zona de estudio	32
6.2 Evaluación de las amenazas al sistema acuífero	34
6.3 Vulnerabilidad a la contaminación.....	39
6.4 Riesgo a la contaminación.....	42
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
7.1 Evaluación de las amenazas al sistema acuífero	44
7.1.1 Inventario de fuentes contaminantes	44
7.1.2 Potencial contaminante (PCC) de las amenazas al sistema acuífero	46
7.2 Vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero.....	50
7.3 Riesgo de contaminación al sistema acuífero	54

7.4 Análisis de riesgo por escenarios	56
8. CONCLUSIONES	64
9. RECOMENDACIONES	64
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de problemas.....	12
Figura 2. Tipos de acuíferos.....	16
Figura 3. Acuífero libre	16
Figura 4. Acuífero confinado	17
Figura 5. Acuífero semiconfinado.....	17
Figura 6. Método GOD para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos	22
Figura 7. Clase de contaminante involucrado.	24
Figura 8. La intensidad de la contaminación.....	25
Figura 9. El modo en que el contaminante es descargado al subsuelo.....	25
Figura 10. La duración de la aplicación de la carga contaminante	26
Figura 11. Método de ocho pasos propuesto por Schwartz (1991).	30
Figura 12. Esquema metodológico de la investigación.....	31
Figura 13. Ubicación de la zona de estudio	33
Figura 14. Tipología del grado de confinamiento hidráulico.....	41
Figura 15. Área de influencia y su representatividad para fuentes difusas de contaminación (km ²).	45
Figura 16. Número de fuentes y su representatividad por fuente puntual de contaminación. .	45
Figura 17. Fuentes de contaminación identificadas en la zona de estudio.....	46
Figura 18. Número de fuentes y representatividad de los potenciales contaminantes de las fuentes puntuales de contaminación.....	48
Figura 19. Mapa de potencial contaminante (PCC) de acuerdo a las fuentes de contaminación difusa y puntual de la zona de estudio.....	49
Figura 20. Parámetro profundidad del nivel estático (D).....	51
Figura 21. Litología de la zona no saturada en el área de estudio.....	52
Figura 22. Grado de confinamiento hidráulico en la zona de estudio.....	53
Figura 23. Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en la zona de estudio.....	54
Figura 24. Riesgo por fuentes difusas de contaminación.....	55
Figura 25. Riesgo por fuentes puntuales de contaminación.....	56
Figura 26. Análisis tendencial para escenarios de vulnerabilidad	58
Figura 27. Escenarios de riesgo para fuentes difusas de contaminación.	60
Figura 28. Análisis tendencial de escenarios de riesgo para fuentes de contaminación difusa.	61
Figura 29. Escenarios de riesgo para fuentes puntuales de contaminación.	62
Figura 30. Análisis tendencial de escenarios de riesgo para fuentes de contaminación puntual.	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Contaminantes y fuentes de contaminación más comunes	19
Tabla 2 Clases de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero	21
Tabla 3. Actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo	27
Tabla 4 Metodologías desarrolladas para la construcción de escenarios.	29
Tabla 5 Indicadores de gestión del agua subterránea en la zona de estudio.	33
Tabla 6 Clasificación y categorización de fuentes de contaminación difusa.	35
Tabla 7 Clasificación y categorización de fuentes puntuales de contaminación.	37
Tabla 8 Leyenda para el mapeo de la carga contaminante al subsuelo.	39
Tabla 9. Valores para profundidad al nivel estático (D)	40
Tabla 10 Valores para litología de la ZNS (O)	41
Tabla 11 Valores para grado de confinamiento hidráulico (G).	42
Tabla 12 Valores para el índice GOD.	42
Tabla 13 Matriz de riesgo.	42
Tabla 14 Inventario de las fuentes contaminantes de la zona de estudio.	44
Tabla 15 Potencial de carga contaminante de las fuentes de contaminación identificadas	47
Tabla 16. Indexación del nivel estático en la zona de estudio	51
Tabla 17. Indexación de la litología de la zona no saturada.	52
Tabla 18. Indexación del nivel estático en la zona de estudio	53
Tabla 19. Índices de vulnerabilidad GOD en la zona de estudio	54
Tabla 20. Riesgo de contaminación por fuentes difusas.	55
Tabla 21. Riesgo de contaminación por fuentes puntuales.	55
Tabla 22 Escenarios construidos para el riesgo en fenómenos de variabilidad climática.	56

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Inventario de Fuentes de contaminación difusa en la zona de estudio.	70
ANEXO 2. Inventario de Fuentes de contaminación puntual en la zona de estudio.	71
ANEXO 3. Selección de periodos ENSO.	75
ANEXO 4. Análisis de la profundidad al nivel freático por condición climática.	76

LISTA DE ABREVIATURAS

CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
FAO	Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación (por sus siglas en inglés)
GIRH	Gestión Integrada del Recurso Hídrico
SIG	Sistemas de Información Geográfica
GWP	Global Water Partnership
IDEAM	Instituto Nacional de Estudios del Medio Ambiente y Meteorológicos
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MAVTD	Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
OMS	Organización Mundial para la Salud
ICA	Índice de calidad del agua
IUA	Índice del uso del agua
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
CENICAÑA	Centro de investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
GOD	G: ground water occurrence O: overall aquifer class D: depth to groundwater
DRASTIC	D: depth. Profundidad del agua subterránea. R: recharge. Recarga neta. A: aquifer. Litología del acuífero. S: soil. Tipo de suelo. T: topography. Topografía. I: impact. Naturaleza de la zona no saturada. C: hydraulic conductivity. Conductividad hidráulica del acuífero.
SINTACS	S (soggiacenza – profundidad del agua) I (infiltrazione - infiltración) N (non saturo - sección subsaturada) T (tipologia della copertura – tipo de suelo) A (acuífero – características hidrogeológicas del acuífero) C (conducibilità – conductividad hidráulica) S (superficie topografica – pendiente topográfica).
EPIK	E (Epikarst), P (Protective cover), I (Infiltration conditions), K (Karst network development)
ENSO	El Niño Southern Oscillation – El Niño Oscilación del Sur
POSH	PO: Pollutant Origin SH: Surcharge Hydraulically

RESUMEN

El agua subterránea constituye más de un 95% de las reservas de agua dulce con potencial de extracción, lo que la hace un recurso estratégico necesario proteger. En Colombia las aguas subterráneas constituyen un recurso que día a día adquiere mayor importancia, ya que son fuente potencial principal, complementaria o alterna de aprovechamiento por parte de las poblaciones localizadas en cuencas con acceso limitado de aguas superficiales, además son esenciales para muchos sectores socioeconómicos.

El departamento del Valle del Cauca, considerado rico hídricamente por sus reservas de agua subterránea, cuenta con un sistema acuífero denominado Sistema Acuífero Valle del Cauca, de carácter aluvial, donde la buena producción y la excelente calidad del agua subterránea, la convierte en una importante fuente con potencial para el abastecimiento público. En cuanto al consumo, la extracción del agua subterránea se realiza principalmente mediante pozos profundos y es el sector agrícola el mayor usuario con un aprovechamiento aproximadamente del 90%.

Con el creciente desarrollo económico del departamento del Valle del Cauca, es necesario entonces evaluar el riesgo de contaminación y los peligros potenciales para asegurar la calidad natural del agua subterránea, siendo para ello necesario evaluar las amenazas y la vulnerabilidad al sistema acuífero. De esta manera, el objetivo de esta investigación consistió en evaluar el riesgo a la contaminación del acuífero aluvial del río Cauca en el área hidrogeológicamente aferente al río Bolo, en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, mediante un análisis de amenazas y vulnerabilidad en la zona de estudio, procesado a través de herramientas SIG.

Palabras clave: Riesgo a la contaminación, amenazas al acuífero, vulnerabilidad del acuífero.

1. INTRODUCCIÓN

El agua en la corteza terrestre se divide en un 97% para océanos y mares y un 3% agua dulce. Del total de agua dulce en el planeta aproximadamente un 69% se encuentra en los polos en forma sólida, un 1% escurre por las cuencas hidrográficas y un 30% se ubica en la humedad del suelo y acuíferos, brindando al agua subterránea un importante papel a nivel natural, ya que actúa como almacén que mantiene las corrientes fluviales durante periodos de sequía y haciendo de esta una fuente vital para la vida humana (Barragan & Leyva, 2008).

En este sentido, el agua subterránea constituye más de un 95% de las reservas de agua dulce con potencial de extracción, lo que la hace un recurso estratégico necesario proteger, con importancia a nivel natural, social y económico, que además se ha convertido en el suministro de agua potable para habitantes de áreas urbanas y rurales. Sin embargo, las aguas subterráneas han sido subvaloradas y con exigencias crecientes de demanda por parte de las diferentes actividades económicas y productivas (Vélez, Ortiz, & Vargas, 2011), que a su vez pueden representar una amenaza para la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

En Colombia las aguas subterráneas constituyen un recurso que día a día adquiere mayor importancia, ya que son fuente principal, complementaria o alterna de aprovechamiento por parte de las poblaciones localizadas en cuencas con acceso limitado de aguas superficiales, además son esenciales para muchos sectores socioeconómicos (Ministerio de Ambiente, 2020). El departamento del Valle del Cauca, considerado rico hídricamente por sus reservas de agua subterránea (IDEAM, 2019), cuenta con un sistema acuífero denominado Sistema Acuífero del Valle del Cauca (M3.1), de carácter aluvial, con una recarga natural del 20% de la precipitación media, es decir 3500 Mm³/año, con una capacidad almacenada de 40.000 Mm³ (CVC, 2000). La buena producción y la excelente calidad del agua subterránea, la convierte en una importante fuente de agua para el abastecimiento público de las poblaciones localizadas en la zona plana del Valle del Cauca.

En función de la demanda, la extracción del agua subterránea se realiza principalmente mediante pozos profundos. El volumen de agua extraído anualmente oscila entre 400 Mm³ y 600 Mm³ al año, siendo el sector agrícola el mayor usuario del agua subterránea con un aprovechamiento aproximadamente del 90%, el sector industrial un 7% y el sector doméstico un 3% (CVC, 2017).

Con el creciente desarrollo económico del departamento del Valle del Cauca, es necesario entonces evaluar el riesgo de contaminación y los peligros potenciales para asegurar la calidad natural del agua subterránea, siendo necesario para esto estudiar las amenazas del sistema, su grado de vulnerabilidad y peligro a la contaminación (Tuinhof *et al.*, 2002). El objetivo de esta investigación consistió en evaluar el riesgo a la contaminación del acuífero aluvial del río Cauca en el área hidrogeológicamente aferente al río Bolo, en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, mediante un análisis de amenazas y vulnerabilidad en la zona de estudio, procesado a través de herramientas SIG. Esta investigación se realizó con la base de información del recurso hídrico subterráneo de la Autoridad Ambiental, que realiza el monitoreo del acuífero desde el año 1969 hasta la fecha.

Como producto de la realización del análisis de riesgo en la zona de estudio, se obtuvieron diferentes niveles con una variación espacial y temporal a lo largo del área de estudio, con mayor representatividad para la tipificación de riesgo medio y un inexistente riesgo despreciable a que el acuífero de estudio sea contaminado, es decir, se tiene un riesgo latente a que pueda existir una contaminación. Además, se identificó una relación entre la existencia de fuentes de potencial con carga contaminantes de fuentes difusas, como lo es el cultivo de caña de azúcar, con un porcentaje mayor al 80% de que el acuífero sea contaminado bajo la tipificación de un riesgo extremo y/o alto.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Con base en el desarrollo del árbol del problema presentado en la Figura 1, el problema que motivó la investigación correspondió a: “Aumento del riesgo asociado a posibles procesos de contaminación del acuífero aluvial del río Cauca, que limita el desarrollo y la calidad de vida”. De acuerdo con la definición del problema, la pregunta que pretende resolver en esta investigación corresponde a: ¿Cuál es el nivel de riesgo asociado a diferentes fuentes de contaminación del acuífero aluvial del río Cauca en el área hidrogeológica aferente al río Bolo?

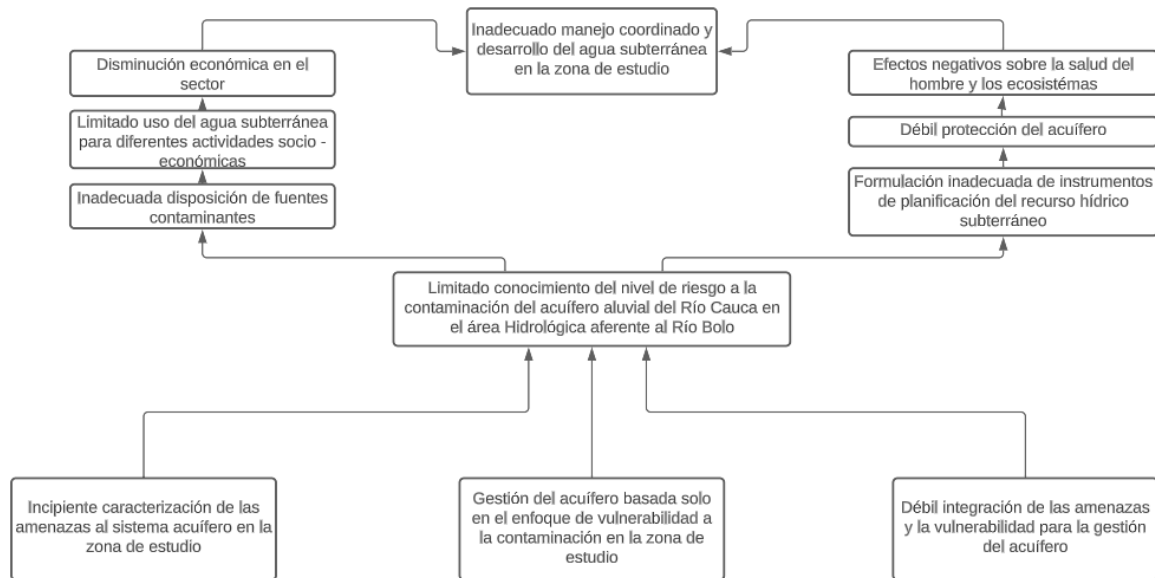


Figura 1. Árbol de problemas

De acuerdo a Agudelo *et al.* (2020), la hipótesis que surge es de tipo explicativa. En este sentido, la hipótesis correspondió a: “el acuífero aluvial del río Cauca en el área hidrogeológica aferente al río Bolo presenta diferentes niveles de riesgo a la contaminación, que son variables espacial y temporalmente”.

En una reciente evaluación regional del agua desarrollada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC, 2017), respecto al recurso hídrico subterráneo, se presentaron estudios en cuanto a la calidad, oferta, demanda y vulnerabilidad del acuífero, sin embargo, no se evidenció un mapa de riesgo que permita conocer la integración entre la vulnerabilidad y la amenaza del acuífero. De esta manera, para el sistema acuífero Valle del Cauca (codificado por el IDEAM como SAM 3.1), no se ha evidenciado el desarrollo de un estudio de riesgo a la contaminación, en donde se considere un análisis de riesgo multitemporal.

3. JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial el agua subterránea es la mayor fuente de agua dulce disponible, por lo que más de la mitad de la población la utiliza para consumo humano, por tener una excelente calidad natural con escasa cantidad de patógenos comparada con otras fuentes (Rengifo, 2020). En este sentido, las aguas subterráneas como recurso vital para el suministro de agua de habitantes de áreas urbanas y rurales, se ve amenazado progresivamente por la contaminación, donde el recurso hídrico subterráneo contaminado posee a una baja probabilidad de recuperación, debido a la inviabilidad técnica y económica de su tratamiento (Baez, 2017; Ruepert *et al.*, 2005; Schmoll *et al.*, 2006). De esta manera se puede entender que el riesgo de contaminación, sea fundamental para realizar acciones preventivas que permitan evitar una contaminación futura y realizar acciones correctivas para controlar la amenaza de contaminación por actividades presentes o pasadas (Báez *et al.*, 2017; Jarrín *et al.*, 2017).

Colombia presenta un gran potencial de aguas subterráneas (IDEAM, 2019), sin embargo, existen bajos niveles de conocimiento, preparación técnica y académica, así como un escaso trabajo articulado, sinérgico y permanente en los diferentes sistemas, que permita contar con información y soporte institucional suficiente para la planificación y manejo integral del recurso hídrico subterráneo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Debe señalarse que el sistema acuífero del Valle del Cauca, manejado por la CVC, es el sistema acuífero más conocido de Colombia (IDEAM, 2015). Su sostenibilidad es estratégica para el desarrollo del Valle del Cauca, pues de él depende la agroindustria, principal renglón de la economía de esa región. (IDEAM, 2015) mencionó que el uso de agua subterránea más extendido en el sector agrícola se da en el Valle del Cauca, que consume el 58% del total consumido por el sector en todo el país.

La CVC (2017) reportó que el promedio anual de consumo de este acuífero fue aproximadamente de 400 Mm³/ año, donde el sector agrícola es el mayor usuario del agua subterránea (90%), seguido por el sector industrial (7%) y el domestico (3%). Además, mencionó que este recurso permite la atención del alrededor de 106 comunidades, equivalente a aproximadamente 1.000.000 de habitantes, 122 industrias, y 84.286 ha de riego, lo que brinda una idea de la importancia del agua subterránea para este departamento.

En relación, la cuenca del río Bolo, es una de las cuencas con mayor presión sobre el recurso hídrico en el Valle del Cauca. De acuerdo con el Balance Oferta – Demanda de agua elaborado por CVC (2017), el índice de Uso del Agua (IUA) en la cuenca del Valle geográfico corresponde a 103%, categorizado como crítico e indica que la presión de la demanda supera la oferta (CVC, 2017). Es así que la importancia de la cuenca del río Bolo, sumada al crecimiento económico, al crecimiento de las actividades industriales, agrícolas y desarrollo de urbanización, puede aumentar la generación de cargas contaminantes por actividades antrópicas, poniendo en riesgo al sistema acuífero por la ubicación de las actividades económicas y la disposición inadecuada de sus residuos.

Es entonces que realizar una evaluación de riesgo, que abarca la vulnerabilidad, amenazas y peligros obtenidos en una zona de estudio, es un elemento clave para la protección de los recursos hídricos subterráneos, debido a que se pueden identificar las actividades humanas

que tienen mayor probabilidad de generar impactos negativos sobre los acuíferos y los sitios que presentan estos problemas.

De este modo, la evaluación del riesgo a la contaminación del agua subterránea, puede indicar la necesidad de medidas de control y mitigación, que son una herramienta a utilizar en tomas de decisiones relacionadas con el uso del suelo en el territorio para proteger las aguas subterráneas, que no solo ayudaría a la zona de estudio, sino que puede ayudar en la conservación y ejecución de acciones de control en una cuenca para la cual el agua subterránea representa gran importancia en el desarrollo económico de la región y, al ser estratégica, evitará afectar la calidad de vida de pobladores que hacen uso de este importante recurso subterráneo.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el nivel de riesgo a la contaminación del acuífero aluvial del río Cauca en el área hidrogeológica aferente al río Bolo.

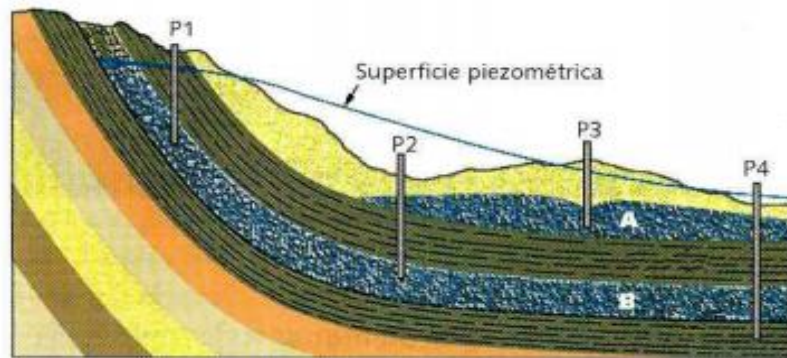
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las amenazas al sistema acuífero aluvial del río Cauca en el área hidrogeológica aferente al río Bolo.
- Estimar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación en la zona de estudio.
- Integrar la vulnerabilidad y las amenazas para la estimación del riesgo del acuífero aluvial del río Cauca en la zona de estudio.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 SISTEMA ACUÍFERO

Los acuíferos son formaciones geológicas que almacenan el agua subterránea y que a su vez permiten su movimiento bajo la acción de las fuerzas de la gravedad, de tal manera que puede explotarse en cantidades relativamente apreciables. Existen diferentes tipos de acuíferos como se puede apreciar en la Figura 2.



A: Acuífero libre, freático o no confinado; B: Acuífero confinado, cautivo o a presión; P1: Pozo en acuífero cautivo o no surgente; P2: Pozo en acuífero cautivo o surgente; P3: Pozo en acuífero libre; P4: Pozo en acuífero libre y cautivo surgente.

Figura 2. Tipos de acuíferos
Fuente: Tarbuck & Lutgens (2005).

Los acuíferos pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua almacenada por ellos, condiciones que varían según la posición estructural de las rocas y estratos del suelo. Entre los tipos de acuíferos se tiene:

Acuíferos libres o no confinados: aquellos que presentan una superficie libre de agua que está en contacto directo con la atmósfera, sometida por consiguiente a la presión atmosférica. Dicha superficie se denomina superficie freática, nivel freático o tabla de agua (Figura 3). En el caso de los acuíferos libres, el espesor saturado varía en forma muy directa con el comportamiento temporal de la precipitación, por lo que el espesor no saturado es considerado variable.

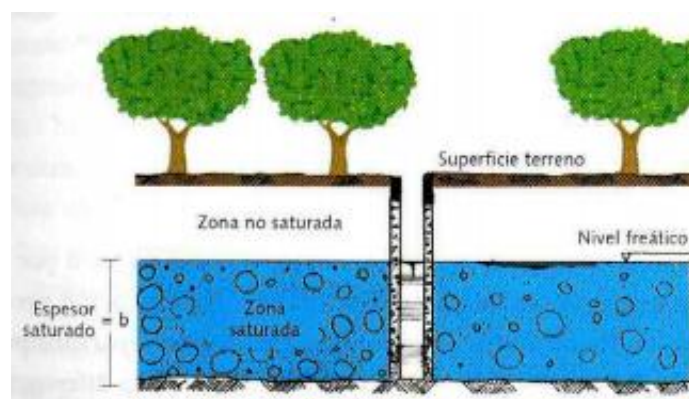


Figura 3. Acuífero libre
Fuente: Veloza (2009).

Acuíferos cautivos, a presión, confinados o artesianos: en estos acuíferos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica y ocupa totalmente los poros de la formación geológica. No existe una superficie libre del agua, pero sí una superficie piezométrica, que es una superficie imaginaria que coincide con el nivel hidrostático del agua en el acuífero (Figura 4). Este tipo de acuíferos pueden presentar los llamados pozos de agua saltante, cuando se producen cabezas piezométricas mayores que la superficie del terreno.

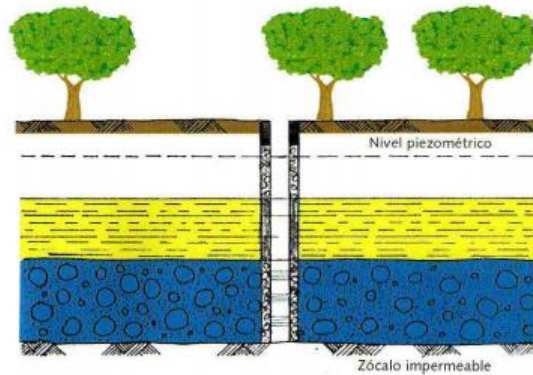


Figura 4. Acuífero confinado
Fuente: Veloza (2009).

Acuíferos semiconfinados: son acuíferos limitados, ya sea por su base o por el techo, o por ambos, por una capa de baja permeabilidad llamada acuitardo. Esta situación permite que haya un flujo entre acuíferos que se encuentren separados por el acuitardo, flujo que puede efectuarse en dirección de la diferencia de niveles piezométricos existente entre éstos (Figura 5). Por tanto, los acuíferos semiconfinados pueden recibir una cierta recarga, también llamada goteo, a través de las capas semipermeables que lo confina (Pérez, 2016).

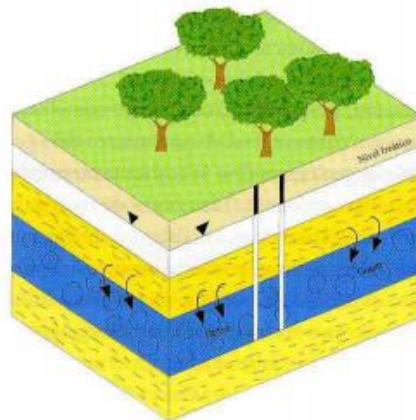


Figura 5. Acuífero semiconfinado
Fuente: Veloza (2009).

Acuífero aluvial: es de naturaleza sedimentaria, susceptible a la contaminación y la polución, con niveles de agua que a menudo fluctúan debido a las variaciones en las tasas de recarga y bombeo (Australian Government, 2013). Es importante mencionar a los acuíferos aluviales, los cuales se recargan aproximadamente en un 50 % por la infiltración de la lluvia y otro tanto por las entradas laterales (flujo superficial y subterráneo) a lo largo del contacto con las formaciones adyacentes (Ayora *et al.*, 2001).

5.2 GESTIÓN DEL RIESGO

De acuerdo con (Lavell, 2004) el riesgo se define como la relación entre las amenazas y la vulnerabilidad, refiriéndose a un contexto caracterizado por la probabilidad de pérdidas y daños en el futuro, que van desde físicas hasta psicosociales y culturales. El riesgo es visto como una posibilidad y una probabilidad de daños relacionados con la existencia de determinadas condiciones en el medio, siendo así el riesgo una condición latente que capta una posibilidad de pérdidas hacia el futuro. Esa posibilidad está sujeta a análisis y medición en términos cualitativos y cuantitativos (Agudelo *et al.*, 2020; Lavell, 2004).

La existencia de riesgo y sus características particulares, es explicada por la presencia de determinados factores de riesgo. Estos son clasificados, en general, en: factores de amenaza y factores de vulnerabilidad. Una amenaza se refiere a la posibilidad de la ocurrencia de un evento físico que puede causar algún tipo de daño a la sociedad y la vulnerabilidad a una serie de características diferenciadas de la sociedad, o subconjuntos de la misma, que le predisponen a sufrir daños frente al impacto de un evento físico externo y que dificultan su posterior recuperación (Lavell, 2004).

Así, la magnitud del riesgo siempre está en función de la magnitud de las amenazas y la vulnerabilidad, las cuales, que de igual manera que el riesgo, constituyen condiciones latentes en un sistema. Por lo tanto, el riesgo puede ser de carácter geológico, hidrológico, atmosférico, tecnológico, entre otros, ya que depende de la naturaleza de la amenaza a la cual está referido (Andrew, 1993; Lavell, 2004).

De esta forma, la gestión del riesgo es un factor clave que permite la prevención, reducción y control constante de los factores de riesgo en la sociedad, integrados al desarrollo humano, económico, ambiental y territorial sostenible. La gestión del riesgo se basa en la identificación de factores de riesgo (amenaza, objeto de contaminar y vulnerabilidad) y sus procesos de conformación, incluyendo los actores sociales involucrados en la configuración este conocimiento, lo cual permite la construcción de escenarios de riesgo, que pueden ser de mayor o menor complejidad, incorporando atributos sobre la percepción del impacto (alto, moderado, bajo) o sobre su temporalidad (inminente, mediado, o largo plazo) (Agudelo *et al.*, 2020).

5.3 CONTAMINACIÓN AL SISTEMA ACUÍFERO

Los acuíferos son susceptibles a contaminarse debido a ciertas actividades humanas como la minería y la agricultura, que han aumentado en forma considerable la descarga de partículas, elementos y compuestos químicos sobre los recursos hídricos. Desde la revolución industrial los efluentes descargados sobre cursos hídricos constituyen otro importante factor de contaminación. Los insumos agrícolas, la irrigación han aumentan la concentración, en las aguas subterráneas, de: sales, nitratos, amonio, pesticidas, organismos fecales, entre otros (Vélez, Ortiz, & C, 2011). (Foster *et al.*, 2002) menciona que existen una gran cantidad de actividades antrópicas que son potencialmente capaces de generar importantes cargas contaminantes, aunque solo algunas son generalmente responsables de la mayoría de los casos importantes de contaminación del agua subterránea, como las presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1 Contaminantes y fuentes de contaminación más comunes

ACTIVIDAD /FUENTE DE CONTAMINACIÓN	TIPO DE CONTAMINANTE
Actividad agrícola	Nitratos, amonio, pesticidas, organismos fecales.
Gasolineras	Hidrocarburos, bencenos, fenoles.
Rellenos sanitarios y botaderos de residuos sólidos	Amonio, hidrocarburos, metales pesados, salinidad.
Industrias metalúrgicas	Hidrocarburos, cianuro, metales pesados, fenoles.
Pintura y esmaltes	Hidrocarburos, metales.
Industria maderera	Hidrocarburos.
Tintorerías	Cloroetileno.
Manufactura de pesticidas	Hidrocarburos, arsénico, fenoles.
Curtiembres	Cromo, hidrocarburos, fenoles.
Exploración / extracción de gas y petróleo	Hidrocarburos y cloruro de sodio.
Minería	Hierro, metales pesados, sulfatos, aumento de acidez.

Fuente: Foster *et al.*, (2002).

La clasificación de las actividades potencialmente contaminantes de acuerdo a su distribución espacial provee una impresión directa y visual del tipo de peligro de contaminación del agua subterránea que ellas plantean y las medidas de control que puedan requerirse. Con base en la distribución espacial las fuentes de contaminación pueden ser: i) Difusas, las cuales no generan plumas de contaminación del agua subterránea claramente definidas, sino que normalmente impactan en un área y por lo tanto su volumen es mucho mayor, y ii) Puntuales, que normalmente producen plumas claramente definidas y más concentradas, las cuales facilitan su identificación (y en algunos casos el control) (Foster *et al.*, 2002; Lavell, 2004) . Sin embargo, cuando estas actividades, que producen fuentes de contaminación puntual, son pequeñas y múltiples, terminan por equivaler a una fuente esencialmente difusa en lo que respecta a su identificación y control (Gaviria & Betancur, 2005).

Otra consideración importante para la caracterización de cargas contaminantes al sistema acuífero, corresponde a si la generación de la carga contaminante al subsuelo es una parte inevitable o integral del diseño de una actividad antrópica (por ejemplo: implementación de tanques sépticos) o si la carga contaminante generada es considera incidental o accidental.

Otra manera útil de clasificar las actividades contaminantes es sobre la base de su perspectiva histórica, que también ejerce una mayor influencia en el procedimiento para su control. Así, las fuentes contaminantes se pueden clasificar en: i) Fuentes pasadas (o heredadas) de contaminación: donde los procesos contaminantes o la actividad completa cesó, pero, aún existe peligro de generación de carga contaminante al subsuelo por el lixiviado de los terrenos contaminados, ii) Fuentes existentes de contaminación: las cuales continúan siendo activas en el área de un inventario y iii) Fuentes potenciales futuras de contaminación: relacionados con actividades identificadas en la etapa de planificación (Foster *et al.*, 2002; Ministerio de Ambiente, 2020).

5.4 GESTIÓN DEL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

5.4.1 Vulnerabilidad del acuífero

En hidrogeología el término vulnerabilidad comenzó a utilizarse intuitivamente a partir de la década de los años 70 en Francia (Albinet & Margat, 1970) y más ampliamente en la década

de los 80s (Foster & Hirata, 1988; A. Gómez *et al.*, 2019). Inicialmente el término fue usado sin definición formal alguna, aunque hacía referencia a la susceptibilidad del acuífero a ser afectado por la contaminación antrópica. Posteriormente, se definió la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie (Foster, 1987a). Así, la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero sería función de la accesibilidad de la zona saturada del acuífero a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada resultantes de la retención o reacción físico-química de los contaminantes.

La evaluación de la vulnerabilidad es un proceso el cual combina la valoración de algunas características del sistema acuífero para producir un mapa en el que se diferencian áreas de mayor y menor vulnerabilidad (Rueda & Betancur, 2006). De acuerdo con National Academy Council (1993) existen tres enfoques generales que pueden ser utilizados para evaluar la vulnerabilidad de un sistema acuífero (El-Zein & Tonmoy, 2015):

- Métodos que emplean modelos de simulación o analógicos: consisten en la utilización de modelos matemáticos que simulan procesos de escorrentía y transporte de contaminantes, utilizando parámetros claves como el tiempo de tránsito promedio en la zona no saturada. Esto contribuye indirectamente a la evaluación del grado de vulnerabilidad de los sistemas acuíferos. Son muy apropiados para analizar situaciones puntuales o con poca extensión espacial, sin embargo, debido a la gran cantidad de información que se requiere son de gran dificultad para aplicar.
- Métodos estadísticos o de monitoreo: los cuales, mediante la utilización de los métodos estadísticos o geo-estadísticos, calculan la probabilidad de que un determinado acontecimiento ocurra y evalúa la posible dispersión de un contaminante, también determina la correlación entre factores intrínsecos y las concentraciones observadas de dicho contaminante. Su problema yace en que no permiten determinar directamente la vulnerabilidad.
- Métodos de índices y superposición o paramétricos: utilizan parámetros convenientemente seleccionados para representar la vulnerabilidad, a los cuales se les asignan distintos rangos e interacciones para generar un índice de vulnerabilidad absoluta (vulnerabilidad intrínseca) o relativa (vulnerabilidad específica) (El-Zein & Tonmoy, 2015). De esta manera, para el cálculo del índice de vulnerabilidad se utilizan modelos de asignación directa o modelos matemáticos sencillos, en los que se combinan procedimientos de sumatoria y/o ponderación de los diferentes parámetros que intervienen en la valoración (Polemio *et al.*, 2009)

Los métodos intrínsecos más difundidos para estimar la vulnerabilidad son EPPNA, DRASTRIC, SINTACS, GOD, AVI, EKv, PATHS, BGR y hT' y los métodos más usados son DRASTIC, SINTACS, GOD, IPN, IS, EPIK, VULFRAC, SEA-Gindex y SEA-Dindex (Agudelo *et al.*, 2020; El-Zein & Tonmoy, 2015). Algunos de estos procedimientos pueden aplicarse a cualquier tipo de sistema acuífero, otros son exclusivos para acuíferos costeros,

medios kársticos, acuíferos en medios porosos o para acuíferos en medios fracturados (El-Zein & Tonmoy, 2015).

En el desarrollo de índices, se debe tener en cuenta que estos pueden ser desarrollados siempre y cuando cada clase de vulnerabilidad esté definida de forma clara y concreta, con el fin de superar algunas objeciones al uso indiscriminado de índices para evaluar la vulnerabilidad. En la Tabla 2, se presenta un ejemplo de la clasificación del grado de vulnerabilidad propuesta por (Foster *et al.*, 2002).

Tabla 2 Clases de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero

CLASE DE VULNERABILIDAD	DEFINICIÓN CORRESPONDIENTE
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son comúnmente descargados o lixiviados
Baja	Sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo
Despreciable	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Fuente: Foster *et al.*, (2002).

Es importante mencionar que los índices más utilizados son: GOD y DRASTIC, ya que consideran las características físicas propias del marco natural hidrogeológico que afectan a la potencial contaminación del agua subterránea (Diaz *et al.*, 2009).

5.4.1.1 Método paramétrico GOD

Este método es útil para mapear con altos contrastes de vulnerabilidad y escalas pequeñas (1:100.000 – 200.000) (Diaz *et al.*, 2013). Es empleado en áreas con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de los mismos (INGEOMINAS, 2003). El método GOD permite una rápida valoración a escala regional y presentando una menor sensibilidad como respuesta (Brito, 2006). Este método establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad y a la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada, como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Foster, 1987b). Se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a tres parámetros principales que son los que forman su nombre (Foster & Hirata, 1988).

G: Grado de confinamiento hidráulico. refiere al tipo acuífero que se está investigando. Varía desde acuíferos libres hasta confinados. Siendo más vulnerables aquellos acuíferos que están expuestos de forma directa con la superficie (libres) o están cubiertos por pequeñas capas menos permeables (Libres – cubiertos).

O: Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinante). refiere a las características lito-estratigráficas que se encuentran encima del acuífero estudiado, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes. Siendo más vulnerables aquellos acuíferos que están suprayacidas por texturas más granulares.

D: Profundidad al nivel freático. refiere a la distancia del agua determinada como la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad del techo de acuíferos confinados. La vulnerabilidad se calcula como el producto de estos factores:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = G * O * D \quad (\text{Ecuación 1})$$

De esta manera, se han establecido valores numéricos para cada uno de los parámetros anteriores. Las escalas de valores presentan una graduación entre cero y uno, siendo menor en cuanto más contribuyan las características del parámetro en la atenuación de contaminantes (Díaz *et al.*, 2009).

Para la estimación del índice de vulnerabilidad GOD se debe realizar una serie de etapas:

- i) Identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0 a 1
- ii) Especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del acuífero en términos de:
 - Grado de consolidación.
 - Tipo de litología y asignar un índice en una escala de 0,4 a 1
- iii) Estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad al techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0,6 a 1.

En la Figura 6 se presenta la matriz para estimar el grado de vulnerabilidad, siendo el producto de los valores asignados a cada parámetro.

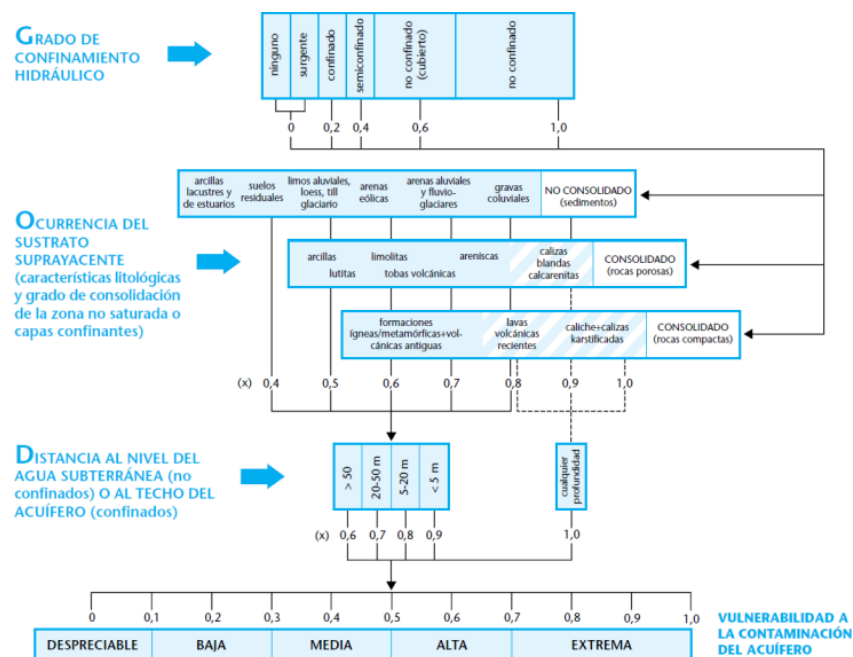


Figura 6. Método GOD para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

Fuente: Foster *et al.*, (2002).

5.4.1.2 La variabilidad climática en la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos

Las fluctuaciones del clima durante determinados periodos de tiempo se denominan variabilidad climática. Durante un año en particular, se registran valores por encima o por debajo de lo normal en cualquier variable meteorológica (Montealegre, 2009).

En la escala interanual, corresponden las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. Normalmente se percibe que la precipitación de la estación lluviosa en un determinado lugar no siempre es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o por debajo de lo normal. Existen dos tipos de variabilidad climática interanual; la primera corresponde a los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño, La Niña - Oscilación del Sur – ENSO, y la segunda corresponden a la Oscilación Cuasibienal, la cual corresponde a una oscilación de largo plazo en la dirección del viento zonal de la baja y media estratosfera ecuatorial, con un período irregular que varía entre 20 y 35 meses (IDEAM-UNAL, 2018; Montealegre, 2012).

Cualquier variación en el régimen y cantidad de la precipitación, junto con variaciones en la temperatura y evapotranspiración, pueden afectar la recarga, almacenamiento, descarga y calidad de las aguas subterráneas (Dragoni & Sukhija, 2008). El nivel freático cambia con las lluvias y períodos secos, de forma muy marcada en las formaciones permeables y un poco menos fuerte en las impermeables, estas diferencias en algunos casos, puede ser hasta de más de un metro (Suarez, 2009).

El aumento de la temperatura podría ocasionar una disminución del agua en el acuífero, lo cual generaría colapsos o subsidencias en el terreno y problemas geotécnicos (Pernía & Fornés, 2008). En función de la presión hidrostática, los acuíferos libres son especialmente sensibles a las variaciones climáticas, puesto que su recarga depende directamente de la infiltración de la precipitación a través del suelo, o por infiltración de agua de ríos o lagos. Por el contrario, los acuíferos confinados son poco sensibles a la variabilidad climática y los efectos se verían en un lapso prolongado (López *et al.*, 2009).

Las variaciones en la recarga y profundidad al nivel freático probablemente cambiarán la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (Van Vliet, 2007). Cuando la precipitación aumenta, los contaminantes (pesticidas, materia orgánica, metales pesados, etc.) son lavados del suelo y depositados a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos (IPCC, 2007). La recarga relacionada a eventos de fuertes lluvias también se asocia con contaminación microbiana de las aguas subterráneas poco profundas (Taylor *et al.*, 2013). Cuando ocurre la recarga por medio de los cuerpos de agua superficiales, la calidad del agua subterránea es más vulnerable.

5.4.2 Amenaza de contaminación al acuífero

Este apartado alude a todas aquellas actividades antrópicas que producen sustancias capaces de incorporarse al acuífero y alterar la calidad del agua subterránea, afectando la salud del hombre, la calidad de vida o el funcionamiento natural del ecosistema.

La amenaza o carga contaminante está presente en cada una de las actividades generadoras de contaminación y se expresa como un índice de carga contaminante (Gómez *et al.*, 2011). Entre los contaminantes más comunes de las aguas subterráneas están los patógenos, originados por la presencia de heces humanas o animales, la materia orgánica y los nutrientes producidos por aguas residuales, la agricultura y la ganadería, los vertidos sólidos y las sustancias tóxicas procedentes de vertidos industriales, actividades mineras y la agricultura intensiva, las sales disueltas como consecuencia de la intrusión salina, los elevados tiempos de residencia de las aguas subterráneas y las actividades mineras (Instituto Geológico y Minero de España, 2017).

El movimiento del agua y transporte de contaminantes desde la superficie del suelo a los acuíferos puede ser, en muchos casos, un proceso muy lento, aumentando así la probabilidad de penetración de contaminantes persistentes en el medio y haciendo que pasen años o décadas antes que el impacto de un episodio de contaminación resulte evidente en un suministro de agua, especialmente en casos de pozos profundos (Candela, 2002; Foster *et al.*, 2002). De este modo, el conocimiento de las fuentes potenciales de contaminación es esencial para proteger la calidad del agua subterránea, ya que son ellas las que generan emisiones de contaminantes en el ambiente subterráneo (Foster *et al.*, 2002).

En este marco, es presentado el método POSH para identificar las amenazas a un sistema hídrico subterráneo. Mediante el método POSH se realiza un inventario de cargas contaminantes de acuerdo a las fuentes (fuentes difusas y puntuales). Para la identificación, geo-referenciación y caracterización de cada fuente de contaminación que suelen llevar a cabo campañas de campo, empleando técnicas de muestreo, búsqueda y entrevista.

Las siglas POSH se refieren a PO (pollutant origin) origen del contaminante, asumiendo que este sea persistente y móvil en el subsuelo y que su presencia se asocie al tipo de actividad antrópica de la que proviene; SH (Surcharge Hydraulically) incremento de la recarga de agua natural al acuífero, en base al uso que se haga de este. Desde el punto de vista teórico, la carga contaminante al subsuelo generada por una actividad antrópica dada tiene cuatro características fundamentales y semi-independientes (Foster & Hirata, 1988). La clase del contaminante está definida por su persistencia probable en el ambiente subterráneo y por su coeficiente de retardo relacionado con el flujo de agua subterránea (Figura 7).

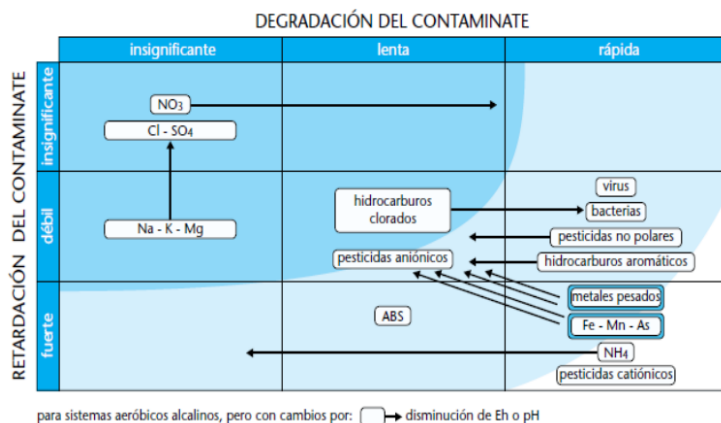


Figura 7. Clase de contaminante involucrado.
Fuente: Foster *et al.*, (2002).

La intensidad de la contaminación es definida por la concentración probable del contaminante en el efluente o lixiviado, en relación con los valores guía recomendados por la OMS (Foster, 1987a) para la calidad de agua potable y por la proporción de la recarga del acuífero involucrada en el proceso de contaminación (Figura 8).

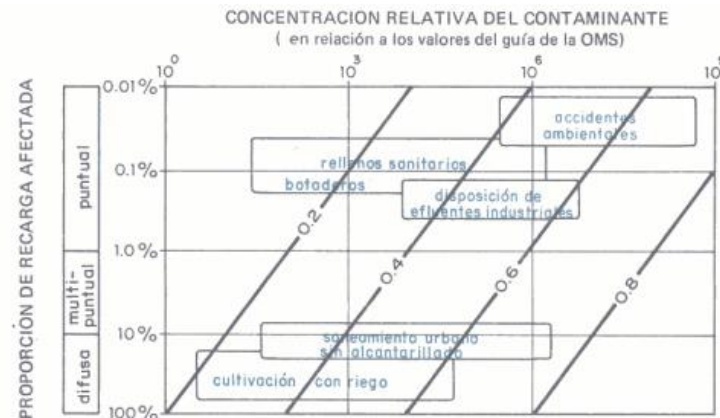


Figura 8. La intensidad de la contaminación.

Fuente: Foster *et al.*, 2002.

El modo de disposición del contaminante es definido por la carga hidráulica (incremento sobre la tasa de recarga natural o sobrecarga hidráulica) asociada con la descarga del contaminante y la profundidad debajo de la superficie del terreno, en la cual el efluente o lixiviado contaminando que ingresa es descargado o generado (Figura 9).

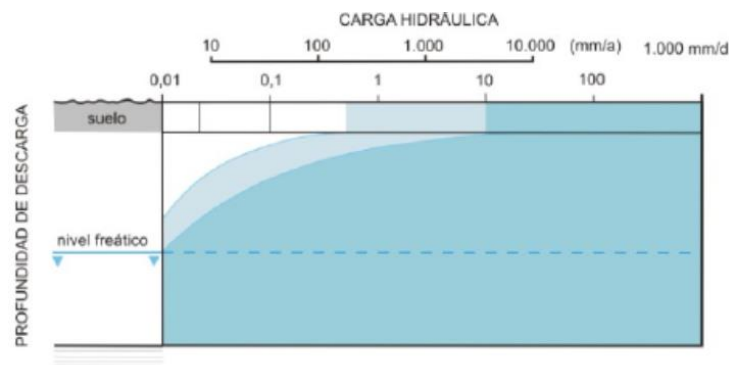


Figura 9. El modo en que el contaminante es descargado al subsuelo

Fuente: Foster *et al.*, 2002.

La duración de aplicación de la carga contaminante se encuentra definida por la probabilidad de descarga del contaminante al subsuelo (ya sea intencional, incidental o accidentalmente) y por el periodo el cual la carga contaminante será aplicada (Figura 10). La clasificación y estimación de la carga contaminante al subsuelo, es de acuerdo a la distribución espacial de las amenazas. Para ello es conveniente caracterizar las fuentes potenciales de cargas contaminantes al subsuelo con base de dos características: i) la posibilidad de presencia de contaminantes que se conoce, o se espera, sean persistentes y móviles en el subsuelo y ii) la existencia de una carga hidráulica (sobrecarga o incremento en la tasa de recarga natural) asociada capaz de generar el transporte advectivo de contaminantes hacia los sistemas acuíferos.

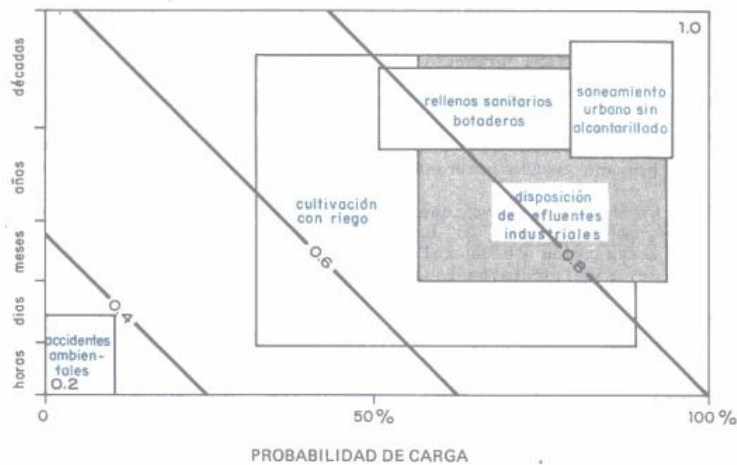


Figura 10. La duración de la aplicación de la carga contaminante
Fuente: Foster *et al.*, 2002.

Dado que esta información no está fácilmente disponible, es generalmente necesario realizar las siguientes hipótesis de acuerdo a (Foster *et al.*, 2002): i) Asociar la posibilidad de presencia de una sustancia contaminante del agua subterránea con el tipo de actividad antrópica y ii) Estimar la sobrecarga hidráulica probable sobre la base del uso del agua en la actividad relacionada (Tabla 3).

5.4.3 Riesgo de contaminación al acuífero

De forma general el riesgo se refiere a la probabilidad de que un evento adverso ocurra durante un periodo de tiempo determinado o como el resultado de un cambio en particular en un área hidrogeológica específica (González *et al.*, 2018). Cuando se realiza una evaluación de riesgo, se reconocen las circunstancias ambientales y los factores económicos y sociales que varían significativamente para cada acuífero, por lo tanto, establece una lógica coherente y transparente para la gestión de las aguas subterráneas, mientras permite diferentes políticas y prioridades dependiendo de las circunstancias de cada sistema (Foster *et al.*, 2002; González *et al.*, 2018). Así, el riesgo es la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad.

Morris & Foster (2000) definieron el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas como “la probabilidad de que las aguas subterráneas de un acuífero se contaminaran hasta un nivel inaceptable por las actividades en la superficie terrestre inmediatamente suprayacente”. Por otro lado, (Foster & Hirata, 1988) definieron el riesgo a la contaminación de un acuífero, como el peligro de deterioro de la calidad de un acuífero debido a la existencia real o potencial de sustancias contaminantes a su alrededor. (Nguyet & Goldscheider, 2006) consideraron que el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas incluye varios aspectos como: presencia y ocurrencia de amenaza, vulnerabilidad y en algunos casos, importancia o valor (costo) de las aguas subterráneas.

Para los acuíferos, siendo este el sistema con algún grado de vulnerabilidad a evaluar, el riesgo es la probabilidad de que un contaminante determinado (amenaza) alcance el área saturada. La categorización del tipo de riesgo puede realizarse con el uso de una matriz o ser construida con base a los criterios del evaluador y puede obedecer a concesos entre un grupo de expertos.

Tabla 3. Actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo

ACTIVIDAD	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA CONTAMINANTE				
	CATEGORÍA DE DISTRIBUCIÓN	DE	PRINCIPALES TIPOS DE CONTAMINANTES	SOBRECARGA HIDRÁULICA	APLICADA DEBAJO DE LA CAPA DE SUELO
				(+ Indica que aumenta la importancia)	
URBANIZACIÓN					
Saneamiento sin alcantarillado	u/r	P-D	n f o t	+	+
Fugas de desagües (a)	u	P-L	o f n t	+	
Lagunas de oxidación de desagües (a)	u/r	P	o f n t	++	+
Aplicación de desagües al suelo	u/r	P-D	n s o f t	+	
Descarga de desagües al río	u/r	P-L	n o f t	++	++
Lixiviación de rellenos / botaderos (a)	u/r	P	o s h t		+
Almacenamiento de combustibles	u/r	P-D	t		
Drenaje por sumideros	u/r	P-D	s t	+	++
INDUSTRIAL					
Fugas de tanques/ tuberías (b)	u	P-D	t h		
Derrames accidentales	u	P-D	t h	+	
Lagunas de efluentes	u	P	t o h s	++	+
Aplicación de efluentes al suelo	u	P-D	t o h s	+	
Descarga de efluentes al río	u	P-L	t o h s	++	++
Lixiviación de botaderos	u/r	P	o h s t		
Drenaje por sumideros	u/r	P	t h	++	++
Precipitaciones aéreas	u/r	D	s t		
AGRÍCOLA					
a. Cultivo del suelo					
- Con químicos agrícolas	r	D	n t		
- Irrigación	r	D	n t s	+	
- Con lodos	r	D	n t s o		
- Irrigación de aguas residuales	r	D	n t o s f	+	
b. Cría de ganado / procesos de cosechas					
- Lagunas de efluentes	r	P	f o n t	++	+
- Descarga de efluentes al suelo	r	P-D	n s o f t		
- Descarga de efluentes al río	r	P-L	o n f t	++	++
EXTRACCIÓN DE MINERALES					
Modificación de régimen hidráulico	r/u	P-D	s h		
Descarga de agua del drenaje	r/u	P-D	h s	++	++
Lagunas de lodos	r/u	P	h s	+	+
Lixiviación de botaderos	r/u	P	s h		

n: compuestos de nutrientes; f: patógenos fecales; o: carga orgánica general; s: salinidad; h: metales pesados; t: microorganismos tóxicos; P: puntual; D: difusa; L: lineal; u: urbano; r: rural; (a): puede incluir componentes industriales; (b): puede ocurrir también en áreas no industriales; (c): la intensificación representa el mayor peligro de contaminación.

Fuente: Foster *et al.*, 2002.

5.5 CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS EN LA PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

5.5.1 Tipos de escenarios

Los escenarios se pueden definir como herramientas de planeación, cuyo fin es visualizar múltiples futuros, algunos de ellos tendenciales (lo que sucederá, si no se realizan cambios en el presente) y otros normativos (el futuro que debe ser: un futuro construido) (Ramírez, 2021)

Considerando una perspectiva general, de acuerdo con Rasmussen (2011) es recomendable el uso de escenarios en la planeación hídrica cuando presenten las siguientes condiciones: complejidad, incertidumbre, necesidad de combinar perspectivas de corto y largo plazo, disponibilidad de recursos, responsabilidad y compromiso para la transformación de los sistemas por parte de los actores (Ramírez, 2021).

Por otra parte, las Naciones Unidas, recomiendan puntualmente que aplique un enfoque de escenarios en la planeación hídrica, debido a) a la necesidad de una visión de largo plazo, b) la existencia de gran incertidumbre acerca del desarrollo de los sistemas hídricos, c) el requerimiento de incluir aspectos no cuantificables, ya que los sistemas hídricos están influidos por elementos difíciles de cuantificar y modelar, d) facilitar la toma de decisiones, y e) permitir la creación de un campo para la interacción e intervención de diferentes actores (Ramírez, 2021; Urrea, 2019).

5.5.2 Métodos para la elaboración de escenarios

En la literatura existen varias metodologías para la construcción de escenarios (Mejía Argueta *et al.*, 2016). La primera propuesta fue desarrollada por Kahn & Wiener (1967), se caracterizaba por ser un esquema totalmente cualitativo basado más en la intuición y juicios de valor, que en un soporte científico (Chermack *et al.*, 2001). El primero en elaborar una metodología procedimental basada en una serie de pasos bien estructurados fue Wack (1985), donde admite métodos cualitativos - basado en la concepción de Kahn - y de tipo cuantitativos. Porter (1985), introdujo el término “industry scenarios”, afirmando que construir escenarios centrados en el sector industrial (bajo un enfoque macroeconómico) equivale a prever cómo será el mundo en el futuro. Esta afirmación fue criticada por (Wack, 1985) al limitar los escenarios a una sola área, perdiendo dimensiones claves (Urrea, 2019).

Existe una gran variedad de métodos para la construcción de escenarios, cuya importancia no radica en acertar los acontecimientos futuros, sino señalar las fuerzas que impulsan el futuro en varias direcciones. De esta manera, independientemente del método que se use, no debe esperarse que describa el futuro y menos certeramente, pues este es incierto e imprevisto. El método de escenarios puede fácilmente ayudar a una reflexión constructiva sobre el futuro y a elegir la mejor estrategia, entre toda clase de restricciones (Guerra, 2010). La Tabla 4, presenta un listado cronológico de algunas metodologías desarrolladas para la construcción de escenarios (Vergara *et al.*, 2010).

Tabla 4 Metodologías desarrolladas para la construcción de escenarios.

METODOLOGÍA	AUTOR (ES)	CARACTERÍSTICAS
Future – Now	Herman Kahn, 1967	Emplea juicios razonados y la intuición. Método cualitativo.
Procedimiento para la construcción de escenarios	Millet y Randles	Emplea técnicas intuitivas y cuantitativas. Relaciona métodos cualitativos y cuantitativos.
Industry Scenarios	Michael Porter	Parte de que el análisis de la industria permite prever cómo será el mundo en el futuro.
Análisis de escenarios para la planeación estratégica. Procedimiento para la construcción de escenarios en tres fases.	Jutta Brauers y Martin Weber	Incluye métodos creativos cualitativos en la fase de análisis
Metodología general de ocho pasos propuesto por Schwartz	Peter Schwartz	Método procedimental para desarrollar escenarios
Metodología para la construcción de escenarios	Michel Godet	Uso de la perspectiva para el diseño de escenarios
Metodología para la construcción de escenarios en tres fases	The Future Group	Enfatiza en centrar en los puntos críticos de la organización
Metodología para la construcción de escenarios en nueve pasos	Paul Schoemaker	Incluye en el paso 9 la posibilidad de reexaminar los escenarios después de realizar investigaciones posteriores
Metodología para el desarrollo de escenarios	Kees Van Der Heijden	Método estructurado para el desarrollo de escenarios
Método de la doble variable	John Galtung	Identifica las dos mayores incertidumbre y crea escenarios para estas
Teoría general para la planeación de escenarios basado en el método de ocho pasos de Dubin	Thomas J. Chermack	Aplicación teórica para la construcción y prueba de escenarios
Desarrollo de escenarios perspectivas	Iver B. Neumann y Erik F. Verland	Los escenarios pueden provenir directamente de datos del pasado, del presente o de ambos.
Transition management Model	Saartje Sondejker, Jac Geurts, Jan Rotmans y Arnold Tukker	Modelo para la transición de escenarios hacia los procesos gerenciales

Fuente: Adaptado de Vergara *et al.* (2010)

Dentro de la variedad de métodos se resalta el propuesto por Schwartz (1991), del cual dependen otros modelos posteriores, quien define una metodología robusta de ocho pasos, como se puede observar en la Figura 11. El proceso de construcción de escenarios propuesto por (Schwartz, 1991), tiene los siguientes pasos:

Paso 1. Identificación de un problema o decisión focal, es el tema central del proyecto de creación o planificación de escenarios.

Paso 2. Se estudia la situación actual y se identifican los factores claves. De acuerdo con Godet (1982), la importancia de este paso se destaca en la observación de que el futuro se

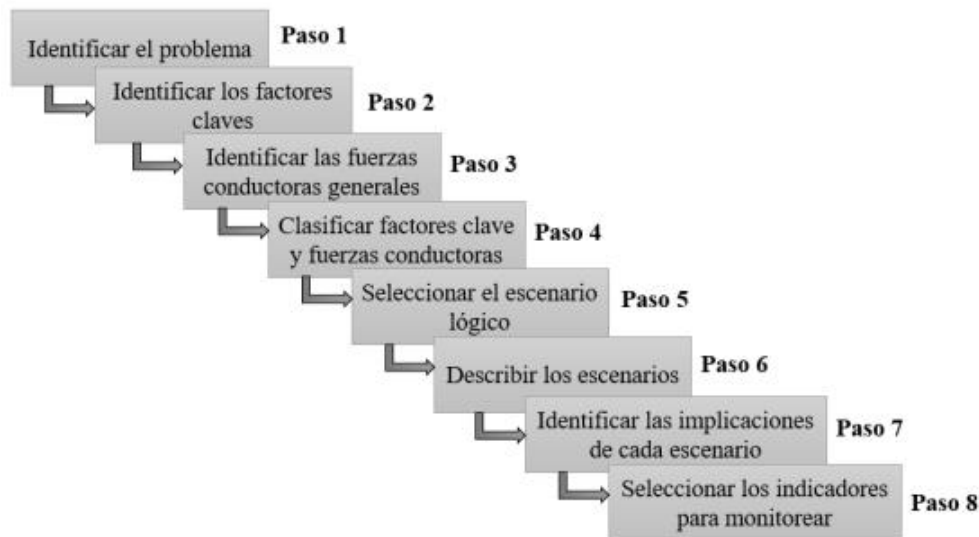


Figura 11. Método de ocho pasos propuesto por Schwartz (1991).

origina en el presente y se concreta a través de complejas interacciones entre muchas decisiones y acciones realizadas.

Paso 3. Identifican las fuerzas conductoras en el entorno macro que influyen en los factores claves identificados en el paso anterior. Schwartz (1991), define las fuerzas conductoras como los elementos que mueven la trama de un escenario, que determinan el resultado de la historia, constituyen la estructura básica de cada línea de trama del escenario en el proceso de creación de escenarios. Una vez identificados los factores claves y las fuerzas conductoras, se proceden a clasificar

Paso 4. Clasifican según dos criterios: primero, por la importancia del éxito de la cuestión / decisión focal, y luego por el grado de incertidumbre que lo rodea. El objetivo es identificar factores o fuerzas que son los más importantes e inciertos, los cuales forman la base de la lógica del escenario elegido en el siguiente paso (Schwartz, 1991).

Paso 5. La lógica del escenario, es el conjunto de ejes a lo largo de los cuales los escenarios eventuales serán diferentes. Schwartz (1991), argumenta que la determinación de estos ejes es uno de los pasos más importantes en todo el proceso de generación de los escenarios. La lógica del escenario podría consistir en uno, dos o tres factores o fuerzas elegidos en el paso anterior.

Paso 6. Comienza a medida que se seleccionan los factores y fuerzas del factor más importante y más incierto, para los escenarios y termina con describir los escenarios.

Paso 7. Examinan las implicaciones de los escenarios contruidos para la decisión o problema focal. El objetivo de este paso es contemplar si las estrategias para tratar el problema focal son sólidas en todos los escenarios del conjunto (Schwartz, 1991; Urrea, 2019).

Paso 8. En el último paso, se generan los indicadores principales, los cuales son pequeñas señales específicas que pueden indicar el cambio en un escenario particular (Schwartz, 1991; Urrea, 2019).

6. METODOLOGÍA

6.1 CLASIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN Y ESQUEMA METODOLOGICO

De acuerdo a la clasificación realizada por Garcia (2011), la presente investigación corresponde a un estudio de tipo descriptivo, dado que su finalidad consistió en caracterizar el comportamiento del riesgo a la contaminación de un sistema acuífero, por efecto combinado de las fuentes potenciales de contaminación y la vulnerabilidad del mismo sistema, sin ser necesario el planteamiento de una hipótesis a comprobar. Según el control de la investigación es de tipo observacional, dado que los datos no fueron obtenidos experimentalmente en el horizonte del estudio, sino a través de recopilación de información secundaria obtenida previamente. Según el seguimiento corresponde a un estudio transversal debido a que se realizó un análisis del sistema acuífero sin realizar un seguimiento controlado y cronológico a las variables que en él intervienen, por lo tanto, tampoco pretendió buscara relacionales de causa-efecto. Según el inicio en relación a la cronología es de tipo retrospectivo, debido a que las variables analizadas fueron en un rango de tiempo del previo a la investigación (2000 al 2017). Según la unidad de análisis corresponde a uno ecológico, dado que se analizaron múltiples variables y parámetros interrelacionadas del sistema acuífero. Por todo lo anterior, este estudio no requirió de diseño experimental. En la Figura 12 se presenta el esquema metodológico de la investigación.

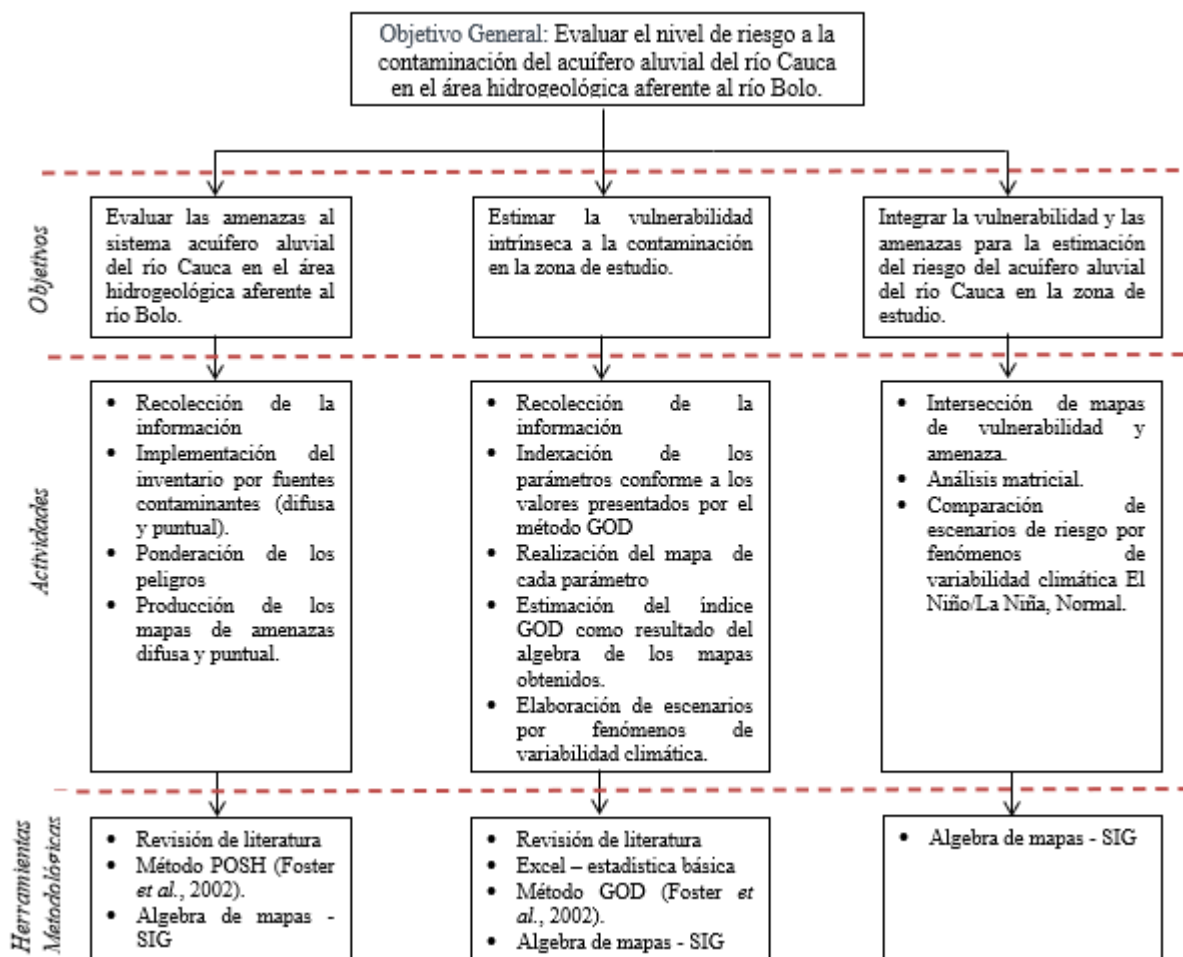


Figura 12. Esquema metodológico de la investigación

Con el fin de cumplir con el desarrollo del objetivo general, se trazaron tres objetivos específicos, para los cuales se requirió el uso de las siguientes herramientas transversales: revisión de literatura con un periodo de análisis del año 1970 al 2022 entre artículos científicos, libros y guías; para lo cual se emplearon los motores de búsqueda acuífero, amenazas, cargas contaminantes, vulnerabilidad y riesgo; revisión de información documental referente a 707 columnas litográficas suministradas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) con un periodo de registro desde el año 2000 hasta el año 2017; herramientas digitales como Microsoft Excel y un sistema de información geográfica - software ArcGis V.10.5, con coordenadas Magna Colombia Oeste.

Respecto a la ubicación de las fuentes potenciales de contaminación, los datos fueron obtenidos del Geovisor de CVC (CVC, 2023) y de la plataforma virtual del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2020). Para aquellas fuentes potenciales de contaminación sin información espacial, se empleó el software Google Earth, V.6, con imágenes satelitales Ikonos. Estos datos fueron ubicados y geo-procesados en el software ArcGis V.10.5.

Para la generación de los mapas asociados a la caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero, se realizaron procesos de interpolación a través del método de Topo-to-raster, incluido en el software ArcGIS V.10.5, para cada uno de los indicadores del método GOD. La interpolación espacial realizada es una técnica de diferencia finita iterativa y su principal ventaja, respecto a otros métodos de interpolación, es la correlación de los datos con la superficie topográfica (Hutchinson, 1989; Rengifo, 2020). El tamaño de pixel empleado en todos los procesos de interpolación fue de 90 x 90.

Una vez obtenidos los mapas de fuentes potenciales de contaminación (Amenaza) y Vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero, en formato vectorial, se realizó la intercepción cartográfica entre ambos parámetros para el análisis del riesgo, empleando para esto el software ArcGis V.10.5 a través de la herramienta de superposición Intersectar.

6.2 ZONA DE ESTUDIO

El acuífero del valle geográfico del río Cauca es un acuífero aluvial, con un volumen total de agua almacenada en todo el sistema acuífero estimado de alrededor de 40.000 Mm³. La recarga natural anual promedia que recibe este sistema acuífero es de aproximadamente 325 mm, que equivale al 20% de la precipitación promedia anual de toda la cuenca de 1.550 mm, para un volumen anual de recarga de 3.500 Mm³. El volumen promedio anual bombeado en los últimos 10 años ha oscilado entre 400 Mm³ y 600 Mm³ que representan entre el 11% y el 18 % de la recarga total anual, que garantiza a nivel regional, mantener el sistema acuífero en equilibrio (CVC, 2017).

Para el caso del agua subterránea en el departamento del Valle del Cauca, se ha definido el sistema acuífero denominado Sistema Acuífero Valle del Cauca, correspondiente a la Provincia Hidrogeológica Intramontana Cauca Patía (CVC, 2017). Para esta investigación, se consideró el área hidrogeológica delimitada por Rengifo (2020) considerando como criterios la geología (Ingeominas & CVC, 1971) y la red de drenaje superficial (CVC, 2009), en el área hidrogeológica aferente al río Bolo en Colombia.

La zona de estudio se localiza en el suroriente del departamento del Valle del Cauca, entre las coordenadas 860.000N - 1.065.000E y 885.000N - 1.100.000E (sistema de referencia Magna-Colombia-Oeste). Los límites físicos de esta área hidrogeológica corresponden a: al norte, el río Palmira (cuenca del río Amaine); al sur, con el río Párraga; por el occidente, con el río Cauca y por el oriente, la línea de piedemonte donde afloran formaciones volcánicas (Rengifo, 2020), como se puede evidenciar en la Figura 13.

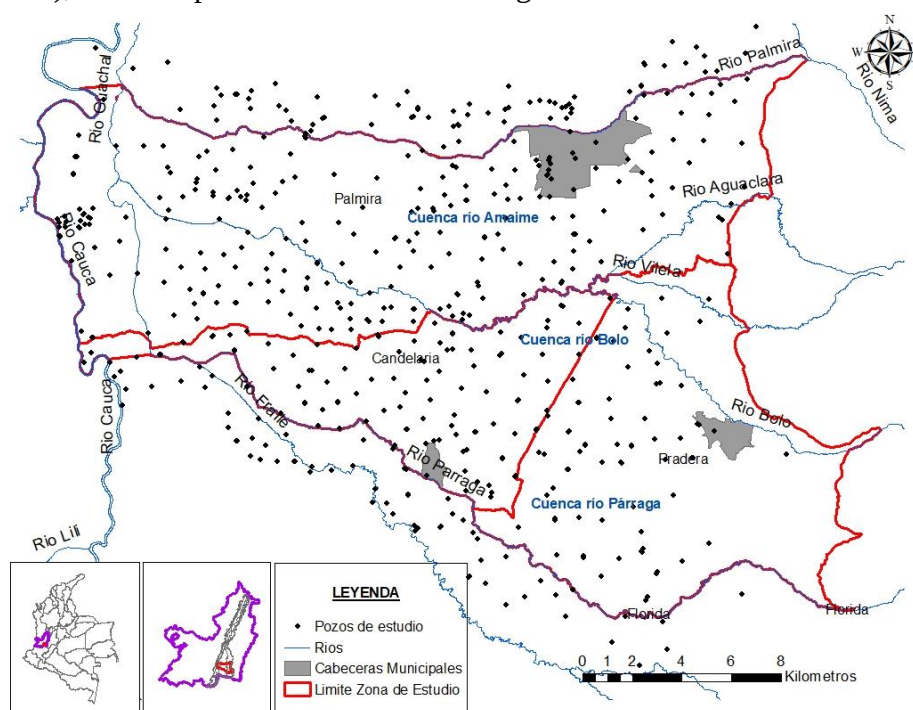


Figura 13. Ubicación de la zona de estudio

En cuanto a la gestión del agua subterránea, la zona de estudio tiene un inventario de 450 pozos existentes, de los cuales 333 (74%) están activos y 117 (26%) entre abandonados e inactivos (CVC, 2018; Rengifo, 2020). Además, se tienen 265 pozos en el área de influencia indirecta para fines del presente estudio. Los caudales y volúmenes de agua concesionada para los diferentes usos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5 Indicadores de gestión del agua subterránea en la zona de estudio.

INDICADORES DE GESTIÓN	TOTAL	USOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA			
		INDUSTRIAL	DOMESTICO	AGRÍCOLA	OTROS
Cantidad de pozos	333	45	21	207	60
Porcentaje de pozos	100	13,5	6,3	62,2	18
Caudal concesionado (l/s)	18.807	694,79	100	15.719	2.293
Porcentaje de caudal	100	4	0,5	83,6	12,2
Volumen concesionado (mm ³ /año)	312,77	11,62	1,24	267,28	32,63
Porcentaje de volumen	100	4	0,4	85,5	10,4

Fuente: CVC, 2018; Rengifo, 2020.

En esta zona se tienen concesionados 18,8 m³ /s que equivalen al 20% del caudal total concesionado en el departamento del Valle del Cauca (94,3 m³ /s). El número de pozos en la zona corresponde a 17% (333 pozos) del total pozos de producción en el departamento del Valle del Cauca. El 83,6% del agua concesionada es utilizada para el riego de cultivos,

mientras que el 0,5% se destina para el abastecimiento de agua potable y para el uso doméstico (Rengifo, 2020).

En cuanto al servicio de alcantarillado, es de manera homogénea hacia las cabeceras municipales, sin embargo, hacia la zona rural se tienen problemas en la prestación del servicio, debido a una deficiente capacidad de conducción, evidenciando una falta de gestión por parte de administraciones municipales para ofrecer a las poblaciones soluciones que tiendan al mejoramiento de la calidad de vida. Las comunidades que no cuentan con una red de alcantarillado realizan las descargas directamente sobre cuerpos de agua cercanos, sobre el suelo o cuentan con sistemas individuales de tratamiento, que en la mayoría de los casos no cumple con parámetros establecidos por la normatividad vigente (CVC, 2012).

En lo correspondiente al manejo y disposición de residuos sólidos domiciliarios y especiales, se han formulado Planes de Gestión Integral de los Residuos Sólidos – PGIRS. Sin embargo, en las zonas donde no existe el servicio las personas han optado por disponer las basuras a cielo abierto o en las orillas de los cauces, a través del entierro, quema y en muy pocos casos se hace aprovechamiento, llevando así a una proliferación de vectores, contaminación del recurso hídrico, impacto visual relacionado con el paisaje, entre otros (CVC, 2012).

6.2 EVALUACIÓN DE LAS AMENAZAS AL SISTEMA ACUÍFERO

La evaluación de las amenazas fue realizada con el método POSH (Foster *et al.*, 2002) a través del diseño e implementación de un inventario de fuentes potenciales de cargas contaminantes, que requirió la identificación, localización espacial y la caracterización de las fuentes de contaminación al sistema acuífero en la zona de estudio por medio de información secundaria.

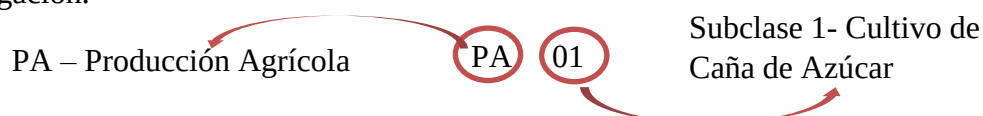
A partir de la identificación de actividades potencialmente contaminantes en la zona de estudio y de la información disponible, se diseñó el inventario considerando las siguientes actividades: prácticas agrícolas (cultivo de caña de azúcar y cultivos menores donde se tienen cultivos de: piña, maíz, cítricos, soya, habichuela, café, árboles frutales, tomate, plátano, yuca, frijol, cacao, mango, zapote, limón, pepino y cultivos de invernadero), prácticas pecuarias (ganadería y pocas cabezas donde se tienen actividades porcícolas, piscícolas y la avicultura), recolección de aguas residuales (red de alcantarillado), disposición de residuos sólidos, sitios industriales, vertimientos, gasolineras, cursos de agua, rutas de transporte terrestre, cementerios y exploración minera.

Para el inventario se contó con diferentes fuentes de información. Los datos de prácticas agrícolas, vertimientos a fuentes hídricas superficiales, cursos de agua, minería y prácticas pecuarias fueron obtenidos de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) (CVC, 2018); la información sobre disposición de residuos sólidos y rutas de transporte terrestre fueron obtenidos de la plataforma virtual “Colombia en Mapas” del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2020); la información de alcantarillados se obtuvo de las empresas prestadoras de servicio de acueducto y alcantarillado (Acuavalle, 2021) y la información de actividades cuya localización no se pudo obtener como es el caso de las estaciones de servicio (gasolineras), los cementerios y la actividad industrial, fueron ubicadas mediante Google Earth (2022). Además, de acuerdo con el método POSH, las industrias

fueron tipificadas así: Industrias tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos; Industrias tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones e Industrias tipo 3: talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal

Una vez obtenida la localización espacial y la caracterización sistemática de las fuentes identificadas como potenciales de carga contaminante, se procedió a realizar una base de datos con la actividad potencialmente contaminante, su sub-clasificación y un código con el fin de que cada actividad pueda tener una rápida consideración de la interacción de los datos y mejor comprensión para el lector de los mapas.

Respecto al código asignado, las dos primeras letras corresponden a la actividad económica y los dos dígitos siguientes a qué tipo de subclase corresponde dentro de esa actividad. Un ejemplo de ello es el código PA01, donde, en las primeras dos letras se representan la actividad Producción Agrícola (PA) y los dígitos 01, se representa la sub-clasificación a la que hace corresponde, en este caso la primera sub-clasificación equivalente al cultivo de caña de azúcar. En la Tabla 8, se presentan todas las actividades que fueron consideradas en la investigación.



Una vez organizada la base de datos por actividad, subclase y código, se procedió a realizar una distinción de las amenazas de acuerdo a la posible fuente principal de contaminación, que puede ser una fuente de contaminación difusa o puntual. Para ello, se identificó el área de influencia (420 km²) de las actividades potencialmente contaminantes para las fuentes de contaminación difusas y el número de fuentes para las actividades potencialmente contaminantes de fuentes puntuales de contaminación.

A partir del diseño del inventario de las fuentes potencialmente contaminantes, se procedió a dar la asignación del potencial de carga contaminante (PCC) para cada actividad y sub-clase identificada, para lo que el método brinda tres (3) niveles cualitativos de potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo, que son: Reducido, Moderado y Elevado. En la Tabla 6, presenta la clasificación y categorización de las fuentes difusas de contaminación de acuerdo con el método POSH utilizado

Tabla 6 Clasificación y categorización de fuentes de contaminación difusa.

Potencial de Carga Contaminante (PCC) al subsuelo	Fuente de contaminación	
	Saneamiento <i>in situ</i>	Prácticas Agrícolas
Elevado	Cobertura de alcantarillado es menor al 25%, y la densidad de población es mayor a 100 personas/ha	Cultivos intensivos, la mayoría monocultivos, en suelos bien drenados en climas húmedos, o con baja eficiencia de irrigación, cría de ganado intensa-
Moderado	Cobertura de alcantarillado entre 25% y 75%	
Reducido	Cobertura de alcantarillado mayor a 75% y densidad de población menor a 50 personas/ha	Cultivos tradicionales rotativos, extensas tierras de pastoreo para animales, sistemas eco-granjas, alta eficiencia de irrigación en zonas áridas.

Fuente: Foster *et al.*, 2002.

En cuanto a la fuente de contaminación denominada “prácticas agrícolas”, fueron identificadas dos sub-clasificaciones que son: (1) cultivo de caña de azúcar y (2) cultivos menores. Respecto al cultivo de caña de azúcar, el método considera que los tipos de actividades agrícolas que generan la más seria contaminación difusa del agua subterránea son los relacionados con monocultivos en áreas extensas, por lo tanto, para la asignación de su potencial de carga contaminante se tuvo en cuenta el área ocupada por los campos de cultivos, los tipos de sistemas de riego, la aplicación de fertilizantes, madurantes, y pesticidas que pueden considerar posibles efectos adversos al suelo como son: la salinización y compactación de los suelos (CENICAÑA, 1995), por lo que le fue asignado un PCC “Elevado”. Respecto a los cultivos menores, se tuvo en cuenta que los cultivos de tipo rotativo junto con grandes áreas de pastoreo, y sistemas de granjas ecológicas normalmente tienen menor probabilidad de producir una carga contaminante en la superficie (Espinoza, 2010), por tanto, se asignó un PCC “Reducido”.

Respecto a la fuente de contaminación “Saneamiento in situ”, se nombró recolección de aguas residuales para el presente estudio, ya que se tuvo en cuenta la recolección de aguas residuales en la zona rural y urbana, por lo que contó con dos sub-clasificaciones, la primera es cobertura de alcantarillado y la segunda saneamiento in situ. Para la primera sub-clasificación, la ponderación brindada se dio teniendo en cuenta la posibilidad de filtraciones en el sistema alcantarillado en las cabeceras municipales de la zona de estudio (Palmira, Pradera y Candelaria) por lo que se asignó un PCC “Reducido” y para la segunda sub-clasificación se tuvo en cuenta las coberturas de servicio de alcantarillado y el tipo de saneamiento que se realiza en las zonas rurales, por lo que fue asignado un potencial de carga contaminante (PCC) “Moderado”.

Debido a identificación de las actividades potencialmente contaminantes en la zona, se consideró de manera adicional la actividad “pecuaria” con las subclases de ganadería extensiva y de pocas cabezas. Respecto a la primera subclase, su potencial de carga contaminante fue considerado como un PCC “Moderado”, dado que las actividades de ganadería conllevan a una gran generación de residuos tanto líquidos como sólidos, con productos químicos usados para la cría y baño de ganado, que generalmente son inadecuadamente almacenados y/o manejados, que por acción de las lluvias pueden ser arrastrados hacia fuentes superficiales y la lixiviación de los componentes puede llevarlos hacia las aguas subterráneas, convirtiendo esta actividad en una amenaza para la contaminación del acuífero (CENICAÑA, 1995).

Para la segunda sub-clase “pocas cabezas” que consideran las actividades de granjas avícolas (galpones de engorde, pollitas ponedoras, incubadoras), de piscícolas (pesca deportiva y estanques de engorde) y porcícolas (granjas de cría, levante y engorde de cerdo), el potencial de carga contaminante se asignó con base al área ocupada por estas actividades que conlleva a un bajo uso de productos químicos, por lo que fue asignado un PCC “Reducida”.

Por otro lado, respecto a las fuentes de contaminación puntual, la metodología permite asignar el potencial de carga contaminante (PCC) a fuente contaminante como se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7 Clasificación y categorización de fuentes puntuales de contaminación.

PCC al subsuelo	Fuente de contaminación				
	Disposición de residuos sólidos	Sitios industriales*	Lagunas de efluentes	Urbanas varias	Explotación minera y petrolera
Elevado	Residuos de industrias tipo 3, residuos de origen desconocido	Industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje <100kg/d de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales residenciales) si el área >5ha	Vertimientos	Operación de campos de petróleo, minas metalíferas.
Moderado	Precipitación >500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/ agroindustriales, todos los otros casos	Industrias tipo 2	Agua residual residencial si el área >5ha, otros casos que no figuran arriba o abajo	Gasolineras, rutas terrestres con tráfico de sustancias químicas peligrosas	Algunas minas/canteras de materiales inertes
Reducido	Precipitación <500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/ agroindustriales	Industrias tipo 1	Efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial y minero no metalífero si el área <1 ha	Cementerios	

*Los terrenos contaminados por industrias abandonadas deberán tener la misma categoría que las propias industrias.

Industrias tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos.

Industrias tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones.

Industrias tipo 3: talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal.

Fuente: Foster *et al.*, 2002.

En cuanto a la fuente de contaminación puntual residuos sólidos, contó con la subclasificación de “Domésticos Urbanos” debido a la información espacial disponible. Para la asignación de su potencial de carga contaminante se tuvo en cuenta la existencia de acciones encaminadas hacia la recolección de residuos domiciliarios en el casco urbano, corregimientos o sectores próximos a los centros urbanos hacia el sitio de disposición final el Relleno Sanitario Regional Presidente ubicado en el Municipio de San Pedro (CVC, 2012), además de la impermeabilización al suelo debido a la existencia de asfalto. De esta manera, se ha asignado un PCC “Reducido” a esta fuente puntual de contaminación.

Para los sitios industriales se tuvo en cuenta la clasificación brindada por el método presentado en la Tabla 7, asignando un potencial de carga contaminante (PCC) “Elevado” para las industrias tipo 3, donde están presentes: talleres mecánicos, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos y procesamiento de metal; un PCC “Moderado” para industrias tipo 2 donde se tienen: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones y se asignó un PCC “Reducido” para las industrias tipo 1 con: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos.

Respecto a las fuentes de contaminación que hacen parte de la categoría urbanas varias, la asignación de su potencial de carga contaminante (PCC) se realizó de acuerdo a la categorización presentada en la Tabla 7. En esta categoría se encuentran los cementerios, las gasolineras, las rutas de transporte terrestre y los vertimientos a cuerpos superficiales de agua,

Para el caso de cementerios se asignó un PCC “Reducido” ya que el método considera que la sepultura de restos humanos genera solo cargas contaminantes microbiológicas en un área restringida (Foster *et al.*, 2002). Para las gasolineras se tuvo un PCC “Moderado” debido a que se considera que cualquiera que sea el volumen de combustible almacenado en una estación, un posible accidente que ocurriera, como fugas desde los tanques de almacenamiento por corrosión o desde las cañerías, tendría un efecto muy perjudicial en las aguas subterráneas. Las rutas de transporte terrestre presentaron un PCC “Reducido” por los accidentes que ocurren en ellas y que involucran el transporte de sustancias peligrosas, con lo que constituyen una amenaza para la calidad de las aguas de algunos acuíferos (Espinoza, 2010). Para los vertimientos se tuvo un PCC “Elevado” ya que en general presentan un peligro considerable de contaminación del agua subterránea, debido a la posible generación de cargas contaminantes significativas para el subsuelo (Foster *et al.*, 2002).

Respecto a la fuente de contaminación denominada explotación minera, se hizo el análisis del potencial de carga contaminante (PCC) con base a la información disponible, en la cual se encuentran datos de extracción minera a cielo abierto de arenas que no poseen licencia ambiental. El PCC asignado fue de “Moderado” debido a que las actividades mineras pueden causar importantes impactos en la calidad del agua subterránea como resultado de modificaciones hidráulicas de los sistemas de flujo de agua subterránea, directa o indirectamente como resultado de la construcción y operación de excavaciones sub-superficiales y minas a cielo abierto, además de la infiltración de lixiviados provenientes de cúmulos de escombros de minas y la disposición de residuos sólidos y efluentes líquidos en excavaciones mineras (Foster *et al.*, 2002).

En cuanto a los cursos de agua, en la zona de estudio se encontraron ríos, quebradas, acequias, zanjones y canales, para los cuales se generaron tres (3) sub-clasificaciones de acuerdo al potencial de carga contaminante que posea el cuerpo hídrico, que puede ser “Elevado”, “Moderado” y “Reducido”. La asignación del potencial de carga contaminante (PCC) de los ríos se hizo empleando la estimación del índice ICA (o ICOMO) realizada y espacializada por la CVC (2006). Se asignó un PCC Elevado, moderado o Reducido, según la categorización del ICA así: para un ICA catalogado como bajo el PCC correspondió a Elevado; para un ICA medio el PCC asignado fue Moderado y para ICAs catalogados como altos el PCC fue asignado como reducido.

Respecto a los canales y acequias, pese a que son concebidos para riego y transporte de agua de los ríos, su valoración consideró la ubicación en la que se encontraba, ya que al estar en la parte plana después de los municipios el riesgo fue categorizado como “Elevado” debido a que un gran porcentaje de las aguas residuales domésticas que son vertidas sin ningún tipo de tratamiento a los cauces que atraviesan los diferentes asentamientos, contaminándolos y por lo tanto, limitando su uso aguas abajo. En cuanto a los zanjones fueron clasificados con un PCC “Elevado” debido a que estos se están utilizando para el transporte de aguas residuales.

A partir de la categorización del inventario de fuentes contaminantes con su potencial de carga contaminante, se procedió a realizar una geo-referenciación e interpretación gráfica de las fuentes contaminantes donde se muestra su localización, extensión (tamaño, forma) e información descriptiva (subclase), ejecutado mediante el software ArcGis V.10.5, por medio del cual se obtuvieron mapas en formato vector.

De esta manera, en la Tabla 8 se presentan las convenciones usadas para la presentación de los mapas con el potencial de carga contaminante (PCC) asignado a cada fuente

Tabla 8 Leyenda para el mapeo de la carga contaminante al subsuelo.

Fuente potencialmente generadora de contaminantes				Representación Cartográfica		
Fuente Principal	Cod.	Actividad	Subclase	Reducida	Moderada	Elevada
DIFUSAS	PA01	Producción Agrícola	Cultivo de caña de azúcar			
	PA02		Cultivos menores			
	AR01	Recolección de aguas residuales	Cobertura de alcantarillado			
	AR02		Sanearamiento in situ			
	PP01	Producción Pecuaria	Ganadería Extensiva			
	PP02		Pocas cabezas			
PUNTUAL	RS01	Residuos sólidos	Domésticos urbanos			
	AC01	Almacenamiento de combustibles	Enterrado			
	AM01	Actividad minera	Explotación minera de Arena			
	V01	Vertimientos a fuentes hídricas superficiales				
	CA01	Cursos de agua	Cursos de agua – carga reducida			
	CA02		Cursos de agua – carga moderada			
	CA03		Cursos de agua – carga elevada			
	RT01	Transporte terrestre	Rutas de transporte			
	C01	Cementerios				
	I01	Industria	Tipo 1			
	I02		Tipo 2			
	I03		Tipo 3			

Industrias tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos.

Industrias tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones.

Industrias tipo 3: talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal.

6.3 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN

Para evaluar la vulnerabilidad del acuífero se aplicó la metodología GOD (Foster *et al.*, 2002), dadas las características del acuífero y la información secundaria disponible suministrada por la CVC. La información relacionada con niveles estáticos correspondió al registro histórico de 715 pozos, con un periodo de registro de información entre los años 2000 y 2017. Además, fueron suministradas 708 columnas lito-estratigráficas de pozos presentes en la zona de

estudio. Se realizó un análisis estadístico descriptivo sobre los niveles estáticos. Con las columnas litoestratigráficas se hizo una revisión para cada pozo, en la que se determinó el techo del acuífero con una capa acuífera cuyo espesor sea igual o mayor a 5 m, la litología predominante hasta esa capa y el grado de confinamiento hidráulico en el que se analizó el nivel estático y la profundidad al techo del acuífero.

Obtenida la información, se realizó la indexación de los parámetros conforme a los valores presentados por el método GOD y se realizó el mapa de los indicadores: 1-Techo del acuífero, 2 - Predominio litológico de la ZNS y 3 - Grado de Confinamiento, por medio de un proceso de interpolación a través del método de Topo-to-raster (ArcGIS 10.5), manejando los archivos raster con celdas de tamaño 90 x 90 metros. Se describen a continuación, condiciones metodológicas particulares de cada uno de los parámetros del método GOD:

- **Profundidad al nivel freático (D)**

Este parámetro corresponde a la profundidad a la cual se encuentra el nivel estático del acuífero a estudiar. El nivel de agua del acuífero fue obtenido con la información secundaria de niveles recolectados por la autoridad ambiental de la zona de estudio, en el momento en el cual se realizó la perforación de los pozos.

Para los valores de niveles estáticos de cada pozo, se contó con información desde 2000 hasta 2017, la cual se revisó, se organizó y tuvo un tratamiento estadístico básico (media, máximo, mínimo, desviación). Teniendo en cuenta los fenómenos climáticos (niño, niña y normal), se seleccionó la serie de datos correspondiente a los años en que se tuvieron las variaciones.

A partir del análisis estadístico de los 715 pozos, se trabajó con un total de 597. En la zona de estudio se trabajó con 439 pozos y en el área de influencia a 2 km, 158 pozos. Respecto a la clasificación de este parámetro se usaron los valores brindados por la matriz de Foster *et al.* (2002)(Tabla 9).

Tabla 9. Valores para profundidad al nivel estático (D)

Clasificación (m)	Valor
<5	0,9
5 – 20	0,8
20 - 50	0,7

Fuente: Foster *et al.*, 2002.

- **Litología de la zona no saturada (O)**

La litología de la zona no saturada se estimó, teniendo en cuenta la existencia de una capa permeable cuyo espesor fuera mayor o igual a 5 m, esto en base a la recomendación de expertos, dado que un espesor mayor permite garantizar un techo del acuífero sobre el cual exista una zona en la que haya una mayor proporción de poros con aire que con agua y bajo una capa de este espesor una zona saturada donde hay una saturación de agua.

A partir de la revisión realizada a las 708 columnas de manera individual, se emplearon 545 que contaron con información completa a la profundidad requerida, de los cuales 409 se ubican en la zona de estudio y 136 en el área de influencia a 2 km. La clasificación de este

parámetro se realizó con base en las clases texturales reportadas en los pozos perforados y la composición litológica predominante presente en la zona a la capa permeable cuyo espesor es representativo (es mayor o igual a 5 m). Una vez caracterizada la textura predominante en cada pozo (arcillas, arenas, gravas, Ar-G-A, limos, limos arcillosos y limos arenosos) se indexó el parámetro con base en la Tabla 10.

Tabla 10 Valores para litología de la ZNS (O)

Clasificación	Valor
Arcillas	0,4
Arenas	0,8
Gravas	0,9
Intercalaciones Ar-G-A	0,6
Limos	0,5
Limos arcillosos	0,45
Limos arenosos	0,7

Fuente: Foster *et al.*, 2002.

- Grado de confinamiento hidráulico (G)

La caracterización del grado de confinamiento de cada pozo, se realizó con base al posicionamiento del nivel estático frente a la profundidad del techo del acuífero (Rengifo, 2002) tal como se presenta en la Figura 14.

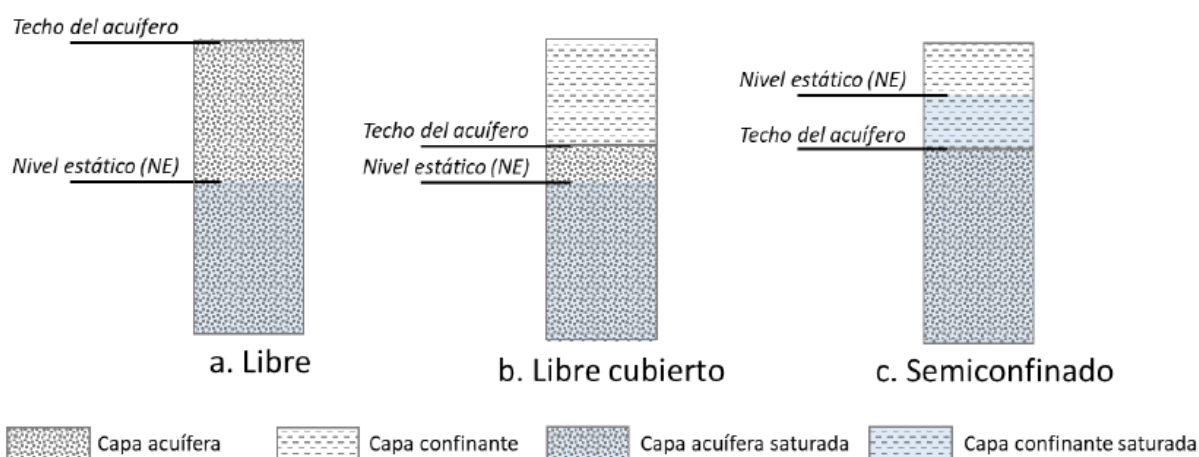


Figura 14. Tipología del grado de confinamiento hidráulico.

Fuente: Rengifo, 2020.

De esta manera, a cada pozo le fue asignada una tipología de grado de confinamiento según el caso en: libre, libre – cubierto, semiconfinado o confinado. Así mismo, fue asignado un valor según la categorización de Foster *et al.* (2002) (Tabla 11). Para ello se analizó el comportamiento de las columnas litológicas y el comportamiento del techo del acuífero para cada uno de los pozos existentes en la zona de estudio. Los acuíferos que tienen mayor peso dentro del análisis de vulnerabilidad son aquellos de tipo no confinado, dado que son más propensos a ser contaminados (Foster *et al.*, 2002; Urrea, 2019). Para el cálculo de este parámetro se utilizaron 484 pozos, de los cuales 365 se encuentran sobre la zona de estudio y 119 en un área de influencia de 2 km.

Tabla 11 Valores para grado de confinamiento hidráulico (G)

Clasificación	Valor
Libre	1
Libre – Cubierto	0,6
Semi - confinado	0,4

Fuente: Foster *et al.*, 2002.

- Índice GOD

La metodología GOD permite asignar un puntaje a cada parámetro de acuerdo con su capacidad de atenuación. Una vez se ha valorado cada parámetro, se calculó el índice de vulnerabilidad total, multiplicando los valores asignados a cada uno de estos, obteniéndose valores entre 0 y 1. Un índice cero “0” indica una vulnerabilidad muy baja, y un índice “1” una vulnerabilidad extrema a la contaminación (Foster *et al.*, 2002). Para esto se empleó algebra de mapas con el uso del software Arcgis v.10.5. En la Tabla 12, se presenta la indexación de los valores para el índice GOD.

Tabla 12 Valores para el índice GOD.

Clasificación	Valor	Descripción
Despreciable	0 – 0,1	En estos acuíferos las capas confinantes representan un obstáculo que dificulta en alto grado (sin que esto signifique imposible), un flujo significativo de los contaminantes hacia el acuífero.
Baja	0,1 – 0,3	Acuíferos vulnerables a contaminantes muy móviles y persistentes a eventos de contaminación continuos durante largos periodos de tiempo. El impacto causado en el acuífero se caracteriza por ser de efecto a largo plazo y sus manifestaciones sobre la calidad del agua son tan débiles que suelen pasar inadvertidas durante mucho tiempo.
Media	0,3 – 0,5	Acuíferos vulnerables a muchos contaminantes excepto a aquellos que son rápidos y fácilmente biodegradables.
Alta	0,5 – 0,7	Acuíferos vulnerables a muchos contaminantes excepto a aquellos que son rápidos y fácilmente biodegradables.
Extrema	0,7 - 1	Acuíferos vulnerables a la mayoría de los contaminantes y con un impacto relativamente rápido a casi todos los escenarios de contaminación.

Fuente: Foster *et al.*, 2002; Urrea, 2019.

6.4 RIESGO A LA CONTAMINACIÓN

Después de obtener el mapa de vulnerabilidad y los mapas de carga contaminante (difusa y puntual), por medio de la herramienta intersectar (ArcGis V.10.5), se obtuvo un listado de datos con la vulnerabilidad y la amenaza por cada polígono en común, la cual fue ponderada de acuerdo a la Tabla 13.

Tabla 13 Matriz de riesgo

Amenaza	Vulnerabilidad				
	Extrema	Alta	Media	Baja	Despreciable
ELEVADA	Extremo	Extremo	Alto	Medio	Medio
MEDIA	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo
BAJA	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo

Fuente: Adaptado de Montoya & Gaviria (2011).

Adicionalmente, fue realizado un análisis de escenarios de riesgo, con base en los fenómenos de variabilidad climática que influyen en la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. La construcción de los escenarios se realizó teniendo en cuenta que los fenómenos de variabilidad climática dinamizan el comportamiento del nivel estático. Seguido a ello, se realizaron mapas de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de acuerdo a cada escenario, con el propósito de poder compararlos y analizarlos. Los escenarios propuestos consideraron la variación del mapa de niveles estáticos en las condiciones climatológicas asociadas a los fenómenos ENSO (año niña y año niño) según lo reportado por el IDEAM-UNAL (2018).

Una vez se obtuvieron los mapas de los escenarios de vulnerabilidad, se realizaron mapas de riesgo, dado que el riesgo depende de la vulnerabilidad y las amenazas del sistema. La información recopilada fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), de niveles estáticos de los pozos de agua subterránea (2000 – 2017), columnas estratigráficas de los pozos, mapa de suelos, mapa de geología, los cuales fueron recopilados, organizados mediante el programa Excel y geoprocesados por medio del software ArcGis V.10.5 para la obtención de mapas en un sistema de Información Geográfica con coordenadas MAGNA Colombia Oeste.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 EVALUACIÓN DE LAS AMENAZAS AL SISTEMA ACUÍFERO

7.1.1 Inventario de fuentes contaminantes

Con base en el inventario realizado, se identificaron once (11) actividades potencialmente contaminantes al acuífero, de las cuales tres (3) de ellas corresponden a fuentes difusas y ocho (8) a fuentes puntuales (Tabla 14).

Tabla 14 Inventario de las fuentes contaminantes de la zona de estudio.

Fuente	Actividad	Número de. Fuentes identificadas / Área de influencia (km ²)	Porcentaje respecto al total (área / número de fuentes) (%)
DIFUSA	Producción Agrícola	344,44	82
	Recolección de aguas residuales	57,87	14
	Producción Pecuaria	17,69	4
	Total	420,00	100
PUNTUALES	Industria	99	46
	Cursos de agua	66	31
	Almacenamiento de combustibles	12	6
	Residuos sólidos	9	4
	Transporte terrestre	9	4
	Vertimientos a fuentes hídricas superficiales	8	4
	Cementerios	7	3
	Actividad minera	6	3
	Total	216	100

Respecto al área de influencia de las fuentes de contaminación difusa, se identificó que el 100% del área de estudio representa una amenaza al sistema acuífero, dado que en los 420 km² de la zona de estudio se realizan tres actividades categorizadas como fuentes de contaminación difusa que corresponden a producción agrícola, pecuaria y recolección de aguas residuales (Tabla 14). Respecto al número de fuentes de contaminación puntual, se identificaron 216 fuentes clasificadas en ocho actividades y diez subclases. Las actividades correspondieron a: residuos sólidos, almacenamiento de combustibles, actividad minera, vertimientos a fuentes hídricas superficiales, cursos de agua, transporte terrestre, cementerios e industria (Tabla 14). En los Anexos 1 y 2 se presenta el detalle del inventario realizado.

Respecto a la representatividad de las fuentes de contaminación, para las fuentes de difusas se observó que el 82% (344,44 km²) correspondió a actividades de producción agrícola, seguido de la actividad de recolección de aguas residuales con un 14% (57,87 km²) y la producción pecuaria con un 4% (17,69 km²) (Figura 15).

La actividad agrícola representa el mayor porcentaje de área de las fuentes difusas, siendo el cultivo de caña de azúcar el de mayor representatividad en este grupo con un 98% (338,40 km²) del área, y los cultivos menores en 2% (6,03 km²). Los cultivos menores incluyen cultivos de: piña, maíz, cítricos, soya, habichuela, café, árboles frutales, tomate, plátano, yuca, frijol, cacao, mango, zapote, limón, pepino y cultivos de invernadero.

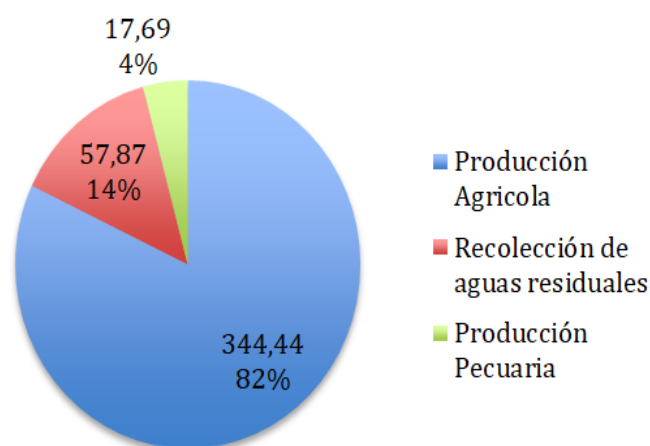


Figura 15. Área de influencia y su representatividad para fuentes difusas de contaminación (km²).

Respecto a la actividad de recolección de aguas residuales, se aclara que el método POSH considera dos sub clases. La primera subclase, la cual fue incluida en la estadística de la Tabla 14, corresponde a la amenaza que representa la recolección del agua residual por posibles infiltraciones del alcantarillado al sistema acuífero. La segunda subclase considera la amenaza que representa el saneamiento *in situ* dada por la población dispersa. Esta segunda subclase no fue incluida en la estadística presentada en la Tabla 14 para no generar duplicidad con áreas donde existen fuentes contaminantes catalogadas en actividades agrícolas (o pecuarias), dado que ambas actividades pueden suceder de forma simultánea en el territorio. En este sentido, para la primera subclase se identificó un área de 57,87 km² (14%) que corresponde al área con alcantarillado de los municipios de Pradera, Palmira y Candelaria, además de sus corregimientos y para la segunda subclase un área de 362,13 km² (86%).

Respecto a la representatividad de las fuentes contaminantes de tipo puntual se observó que el 46% corresponde a actividades de tipo industrial, que equivale a 99 fuentes puntuales; seguido de un 31% (66 fuentes) que corresponde a cursos de agua y un 23% (51 fuentes) clasificado como otras actividades (Figura 16).

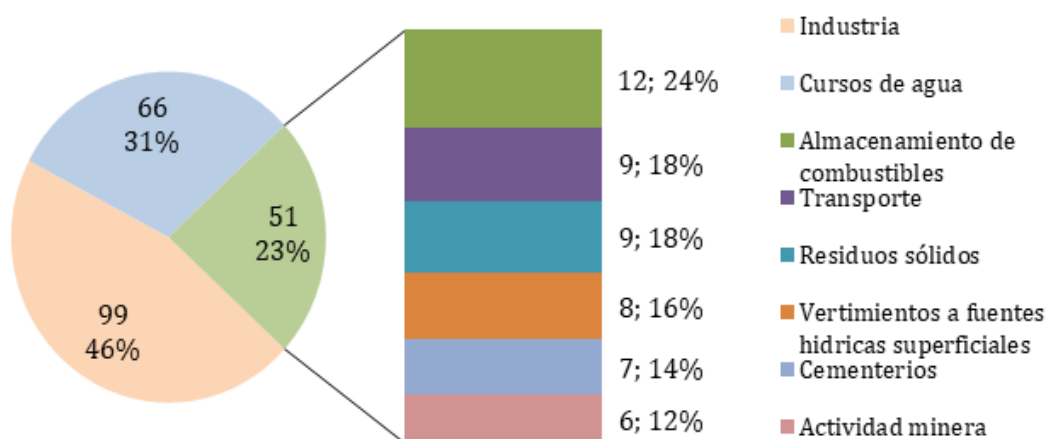


Figura 16. Número de fuentes y su representatividad por fuente puntual de contaminación.

Considerando que las actividades industriales representan el mayor porcentaje de fuentes puntuales contaminantes, se resalta que dentro de este grupo existen tres tipologías de acuerdo a la carga contaminante de sustancias químicas que emplea cada industria. Así, se identificó que de las industrias presentes en la zona de estudio, 43 de ellas (44%) corresponden a industrias Tipo 3 (talleres mecánicos, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, procesamiento de metal); 32 industrias (32%) corresponde a industrias Tipo 1 (carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos) y 24 industrias (24%) a industrias Tipo 2 (fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, fertilizantes, detergentes y jabones). En el Anexo 2 se presenta el detalle del inventario desarrollado.

Respecto a la actividad cursos de agua, se aclara que el método POSH empleado asume que todo cauce (natural o artificial) presenta un potencial de amenaza a los acuíferos, así se identificaron en la zona de estudio 66 fuentes de contaminación en este grupo y su representatividad es la siguiente: 42% (28) en zanjones, 20% (13) en acequias, 20% (13) quebradas, 12% (8) en ríos y 6% (4) canales.

De la clasificación correspondiente a otras actividades, un 24% (12) corresponde a almacenamiento de combustibles, un 18% (9) en transporte terrestre, un 18% (9) a residuos sólidos, un 16% (8) a vertimientos a fuentes hídricas superficiales, un 14% (7) a cementerios y un 12% (6) a actividad minera.

Las fuentes contaminantes identificadas fueron espacializadas y su resultado se presenta en la Figura 17. Se observó que las actividades puntuales se ubican principalmente en los centros poblados y en inmediaciones de las vías terrestres.

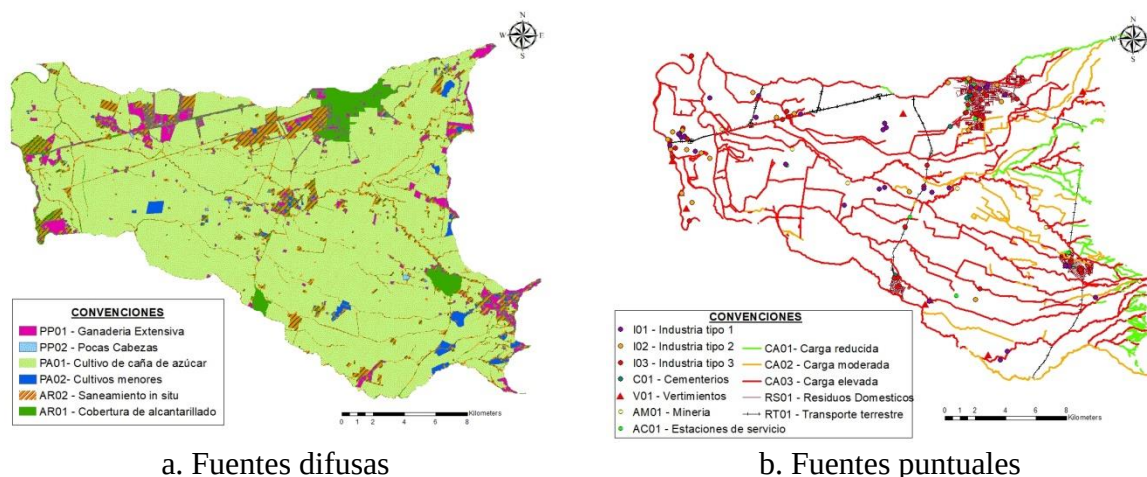


Figura 17. Fuentes de contaminación identificadas en la zona de estudio.

7.1.2 Potencial contaminante (PCC) de las amenazas al sistema acuífero

Con base en el inventario de fuentes contaminantes, se estimó el potencial de carga contaminante (PCC) el cual se categoriza en: i) Reducido, ii) Moderado y iii) Elevado. Los resultados de la caracterización de las fuentes contaminantes se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15 Potencial de carga contaminante de las fuentes de contaminación identificadas

Fuente				Potencial de carga contaminante (PCC)		
Fuente	Código	Actividad	Subclase	Reducida	Moderada	Elevada
DIFUSA	PA01	Producción Agrícola	Cultivo de caña de azúcar			338,40
	PA02		Cultivos menores	6,03		
	AR01	Recolección de aguas residuales	Cobertura de alcantarillado	57,87		
	PP01	Producción Pecuaria	Ganadería extensiva		17,22	
	PP02		Pocas cabezas	0,48		
Total				64,38	17,22	338,40
PUNTUAL	I01	Industria	Tipo 1	32		
	I02		Tipo 2		24	
	I03		Tipo 3			43
	CA01	Cursos de agua	Cursos de agua – carga reducida	1		
	CA02		Cursos de agua – carga moderada		13	
	CA03		Cursos de agua – carga elevada			52
	AC01	Almacenamiento de combustibles	Enterrado		12	
	RS01	Residuos sólidos	Domésticos urbanos	9		
	RT01	Transporte terrestre	Rutas de transporte	9		
	V01	Vertimientos a fuentes hídricas superficiales				8
	C01	Cementerios		7		
	AM01	Actividad minera	Explotación minera de arena		6	
Total				58	55	103

En cuanto a la representatividad del potencial de carga contaminante (PCC) de las fuentes de contaminación difusa, se identificó que el 81% (338,40 km²) del área presenta un potencial de carga contaminante “Elevado”, el cual está representado en un 100% por la actividad agrícola de cultivo de caña de azúcar. El 15% (64,38 km²) del área de estudio se encuentra categorizada en potencial “Reducido”, en el cual un 90% (57,87 km²) corresponde a posible infiltración de las aguas residuales municipales recolectadas en los sistemas de alcantarillado, un 9% (6,03 km²) a la actividad de producción agrícola de cultivos menores y un 1% (0,48 km²) a la actividad de producción pecuaria menor (pocas cabezas, según la categorización del método POSH). El 4% (17,22 km²) del área de estudio fue categorizado en un potencial “Moderado”, donde el 100% corresponde a la actividad de producción pecuaria de ganadería extensiva.

Respecto a la representatividad del potencial contaminante de las fuentes de tipo puntual, se observó que el 48% (103 fuentes) poseen un potencial contaminante “Elevado”, el 27% (58 fuentes) tienen un potencial contaminante “Reducido” y un 25% (55 fuentes) tiene un potencial contaminante “Moderado” (Tabla 15). En la

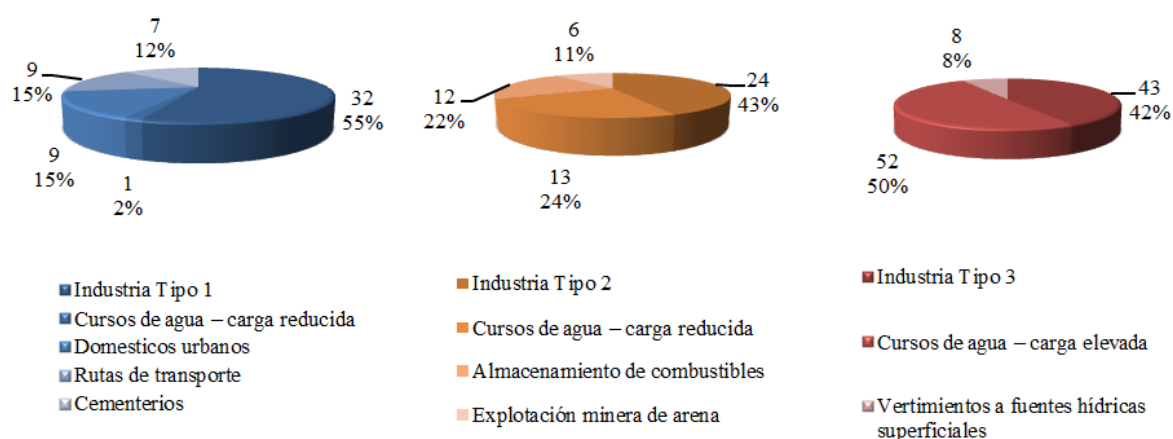


Figura 18 se presenta la categorización del potencial de carga contaminante (PCC) y la representatividad de las sub-clases de contaminación puntual en cada categoría.

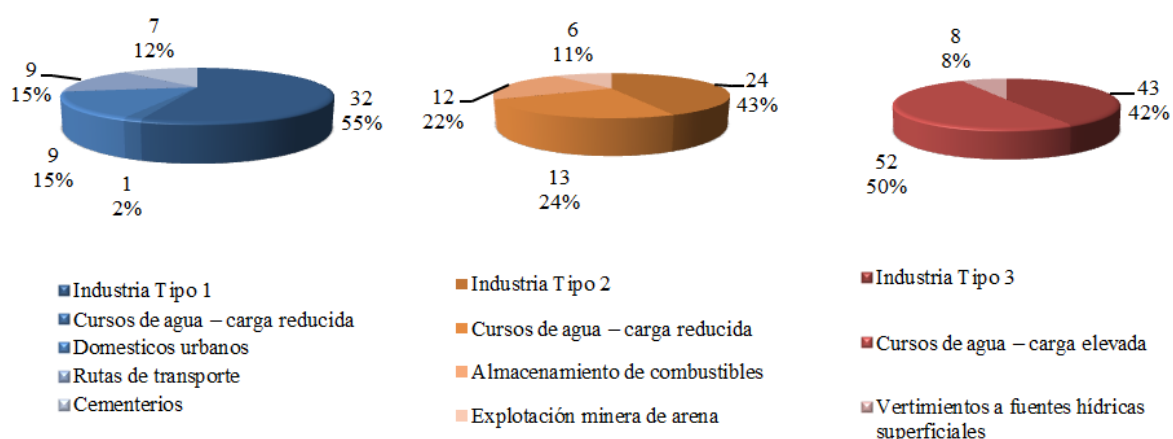


Figura 18. Número de fuentes y representatividad de los potenciales contaminantes de las fuentes puntuales de contaminación.

Con el fin de presentar la distribución y ubicación de los diferentes potenciales contaminantes a lo largo de la zona de estudio, se presenta la Figura 19.

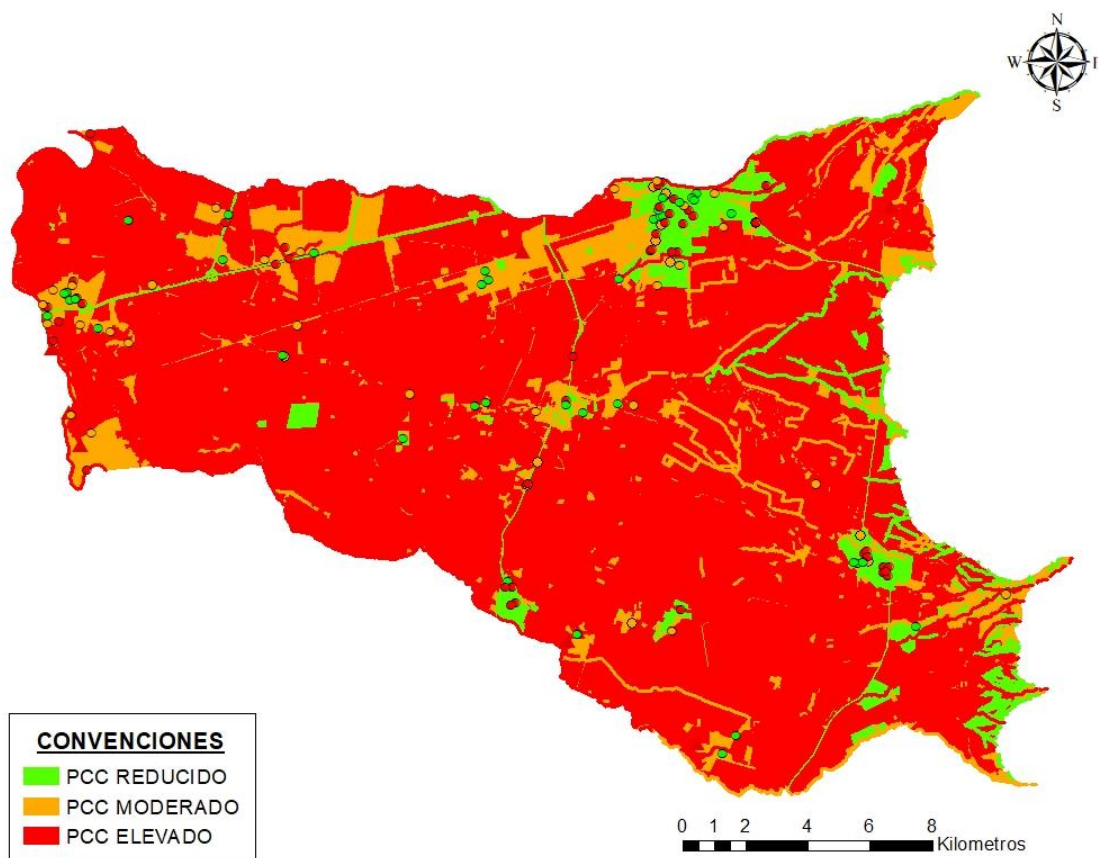


Figura 19. Mapa de potencial contaminante (PCC) de acuerdo a las fuentes de contaminación difusa y puntual de la zona de estudio.

Se resalta que, de las fuentes de contaminación identificadas y caracterizadas en la zona de estudio, la práctica de manejo del monocultivo de caña de azúcar es la mayor fuente de potencial de carga contaminante “Elevado” para fuentes difusas de contaminación en el área, lo que se debe a que para el desarrollo de esta actividad se requieren diferentes tipos de agroquímicos como: fertilizantes, pesticidas, madurantes, herbicidas, fungicidas, entre otros, que posibilitan una contaminación del agua por agroquímicos producido principalmente por la lixiviación de nutrientes que facilitan su infiltración en aguas subterráneas (Espinoza, 2010; Foster *et al.*, 2002; González *et al.*, 2018; Madrigal *et al.*, 2014). Es importante mencionar, que algunos de los químicos implicados en los cultivos agrícolas pueden llegar al agua subterránea y permanecer en ella durante largos periodos de tiempo, lo que la convierte también en potencial contaminante para la salud de las personas (Orta, 2002).

Respecto al saneamiento *in situ*, el municipio de Palmira tiene una ocupación del 52% del área de estudio donde la cobertura de alcantarillado para la zona rural es de un 54%, el municipio de pradera hace parte del 30% de la zona de estudio con una cobertura del 57% del servicio de alcantarillado en la zona rural y el municipio de Candelaria con un 18% en la zona de estudio, no dispone de una información detallada de la cobertura del servicio de alcantarillado en la zona rural. En los tres casos, aquellas comunidades que no cuentan con red de alcantarillado realizan las descargas directamente sobre cuerpos de agua cercanos (quebradas, ríos, acequias, zanjones y otros sistemas de drenaje), sobre el suelo o cuentan con

sistemas individuales de tratamiento, que en la mayoría de los casos no cumple con los parámetros establecidos ni las especificaciones técnicas para su diseño y construcción (para el municipio de Palmira se cuenta con aproximadamente 6100 pozos sépticos construidos o instalados) (Acuavalle, 2021; CVC, 2012)

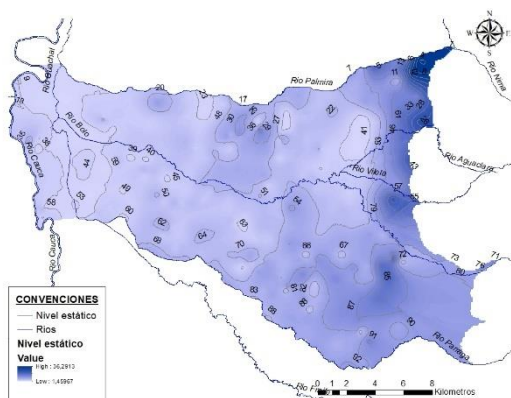
En cuanto a los cuerpos de agua presentes en la zona de estudio, el 78% corresponde a la clasificación de potencial de carga contaminante “Elevado”, lo que se presenta como resultado de las dinámicas poblacionales, donde las aguas residuales domésticas son vertidas sin ningún tipo de tratamiento a los cauces que atraviesan los diferentes asentamientos, contaminándolos y por lo tanto, limitando su uso aguas abajo (CVC, 2012). En lo que corresponde a la red hídrica del río Guachal constituida por los ríos Bolo, Fraile y Palmira, cuyas cuencas se encuentran en jurisdicción de los municipios de Florida, Pradera, Candelaria, y Palmira se ven altamente afectadas en su calidad por los vertimientos puntuales generados en los centros poblados, en las industria y en las plantas alcohoquímicas, presentando una alta presión por los vertidos generados en los centros poblados, en el beneficio del café y en actividades pecuarias (Vallecaucana de aguas S.A E.S.P, 2013). Además, las corrientes que drenan hacia el río Bolo, son las principales receptoras de la contaminación aportada por los asentamientos humanos y las actividades productivas que se desarrollan, por lo que el río recibe aguas contaminadas de diferentes asentamientos, los cuales a pesar de poseer redes de alcantarillado para la conducción de las aguas servidas, no dan solución al principal problema de contaminación hídrica por el vertimiento de aguas residuales domesticas sin tratamiento (CVC, 2012).

En cuanto a las fuentes de contaminación puntual con diferentes potenciales de carga contaminante, es importante mencionar que la intensidad de la contaminación de un acuífero no es normalmente función directa del tamaño de la actividad potencialmente contaminante en la superficie de terreno, sino que muchas veces pequeñas actividades pueden causar gran impacto en la calidad del agua subterránea debido a las sustancias químicas que son usadas, tal es el caso de los talleres mecánicos que obtuvo 28 puntos con un potencial de carga contaminante “Elevado” a lo largo de la zona de estudio, donde se usan frecuentemente cantidades apreciables de sustancias toxicas y muchas veces estas locaciones operan sin registro por lo que no están sujetos a controles ambientales y/o de salud pública.

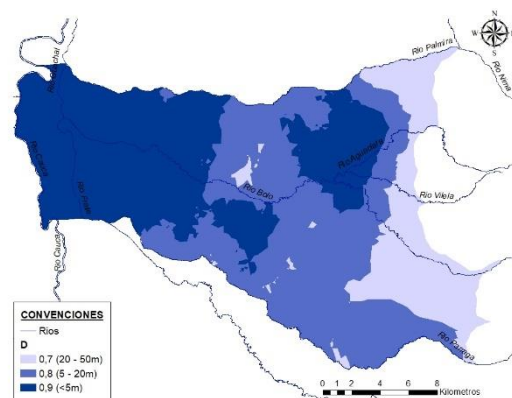
7.2 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO

A continuación, se presentan los resultados de la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero en el área hidrogeológica aferente al río Bolo, mediante la implementación del método GOD.

Respecto al parámetro profundidad del nivel estático (D), la zona de estudio presenta valores en un rango de 1,46 m hasta los 36,29 m. Los niveles estáticos descienden hacia cercanías al río Cauca, en dirección Este-Oeste (Figura 20a). Respecto a la indexación de la profundidad del nivel estático, se identificó el 41,72% (175,22 km²) del área de estudio presenta niveles inferiores a los 5 m de profundidad, seguido de un 40,77% (171,24 km²) del área de estudio con niveles entre 5 m a 20 m de profundidad y un 17,46% (73,34 km²) del área de estudio con niveles estáticos entre 20 m y 50 m de profundidad (Figura 20b) (Tabla 16).



a. Profundidad al nivel freático en la zona de estudio



b. Indexación de la Profundidad al nivel freático según el método GOD

Figura 20. Parámetro profundidad del nivel estático (D)

Tabla 16. Indexación del nivel estático en la zona de estudio

Profundidad del Nivel Estático (m)	Indexación GOD		Área (km ²)	Porcentaje de área respecto al área total (%)
< 5	1 – 0,7	Extrema	175,22	41,72
5 – 20			171,24	40,77
20 - 50	0,7-0,5	Alta	73,54	17,51

Considerando solo la indexación del nivel estático, la zona de estudio puede presentar una vulnerabilidad a la contaminación catalogada entre Alta a Extrema, donde un 82% (346,46 km²) del territorio presenta Extrema vulnerabilidad y un 18% Alta vulnerabilidad (Tabla 16). Esto debido a la caracterización de los niveles estáticos entre 1,36 m y 20 m de profundidad respecto a la superficie del terreno o bien a los índices de indexación entre 0,7 y 0,9.

Respecto a la litología predominante de la zona no saturada (O), la representatividad de las texturas correspondió a textura de tipo limosa en un 49,82 % (209,26 km²) del área de estudio, seguido de intercalaciones de Arena – Grava – Arcilla con una representatividad del 34,61 % (145,37 km²), textura limo-arenosos con un 9,62% (40,40 km²), texturas arcillosas con un 5,85 % (24,57 km²) y texturas arenosas con un 0,1% (0,4 km²) (Figura 21) (Tabla 17).

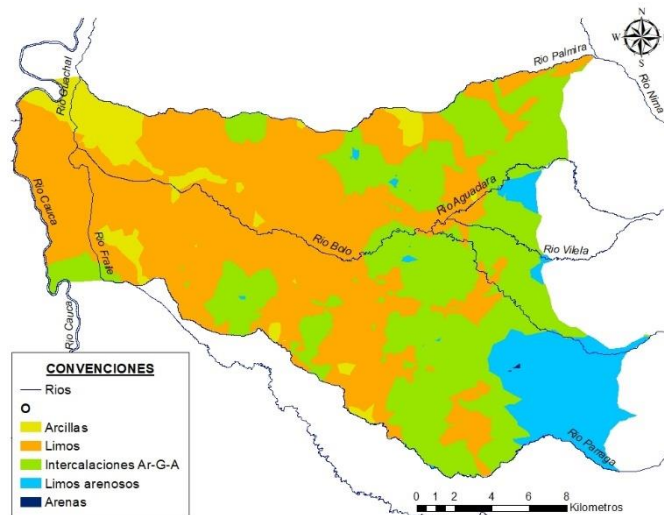


Figura 21. Litología de la zona no saturada en el área de estudio.

Tabla 17. Indexación de la litología de la zona no saturada.

Litología de la zona (O)	Indexación GOD		Área (km ²)	Porcentaje de área respecto al área total (%)
Gravas	1 – 0,7	Extrema	-	-
Arenas			0,40	0,10
Limos arenosos	0,7-0,5	Alta	40,40	9,62
Intercalaciones Ar-G-A			145,37	34,61
Limos	0,5–0,3	Media	209,26	49,82
Limos arcillosos			-	-
Arcillas			24,57	5,85

A partir de los resultados de la representatividad de la indexación de la litología, la zona de estudio puede presentar una vulnerabilidad a la contaminación catalogada entre Extrema, Alta y Media, donde un 55,67% (233,83 km²) del territorio presenta vulnerabilidad Media, un 44,23% (185,77 km²) del territorio presenta una vulnerabilidad Alta y un 0,1% (0,4 km²) presenta una vulnerabilidad extrema (Tabla 17). Lo anterior debido a que en el área de estudio existe una predominancia de sedimentos impermeables como los limos.

En cuanto al grado de confinamiento hidráulico del acuífero en la zona de estudio, se presentó una representatividad del 37,79 % (158,63 km²) para acuífero libre, seguido de una representatividad del 36,79 % (154,42 km²) para acuífero libre – cubierto, y una representatividad del 25,43 % (106,73 km²) para acuífero semi-confinado (Figura 22).



Grado de confinamiento (G)	Indexación GOD		Área (km ²)	Porcentaje de área respecto al área total (%)
Libre	1	Extrema	158,63	37,77
Libre – Cubierto	0,6	Alta	154,64	36,82
Semi-confinado	0,4	Media	106,73	25,41

Respecto al índice GOD obtenido del cruce del producto de los parámetros anteriormente presentados, se obtuvo una representatividad del 49,47% (207,79 km²) para el índice de vulnerabilidad Bajo en la zona de estudio, seguido de una representatividad del 32,95 % (138,41 km²) para el índice de vulnerabilidad Media y una representatividad del 13,48% (56,63 km²) para el índice de vulnerabilidad Alta.

Es importante resaltar que, para la geología tipificada como depósito aluvial, la vulnerabilidad es catalogada como extrema, lo anterior debido a que el agua circula por un cauce asentado sobre un terreno permeable no consolidado, una parte del caudal rellena los poros de este terreno, originando un río subterráneo que fluye a la par del río superficial, pero con menor

velocidad. Este tipo de geología representó el 4,09% (17,17 km²) del territorio en condición de vulnerabilidad extrema (Figura 23) (Tabla 19).

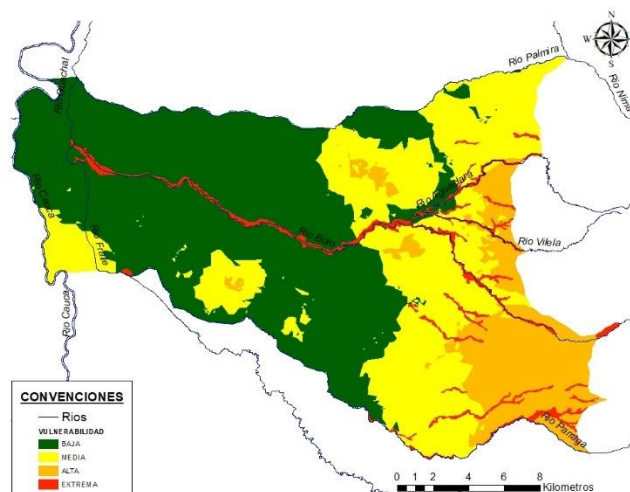


Figura 23. Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en la zona de estudio.

Tabla 19. Índices de vulnerabilidad GOD en la zona de estudio

Índice de vulnerabilidad GOD		Área (km ²)	Porcentaje de área respecto al área total (%)
0,7 - 1	Extrema	17,17	4,09
0,5 – 0,7	Alta	56,63	13,48
0,3 – 0,5	Media	138,41	32,95
0,1 – 0,3	Baja	207,79	49,47
0 – 0,1	Despreciable	0	0

En cuanto a los índices de vulnerabilidad en la zona de estudio, se observa que el acuífero presenta una fragilidad a la contaminación debido a la inexistencia de una vulnerabilidad despreciable, sin embargo, se presenta una mayor representatividad para los índices de vulnerabilidad Baja y Media, donde, las capas confinantes representan un obstáculo que dificulta el flujo de algunos contaminantes (excepto a aquellos que son rápidos y fácilmente biodegradables) excepto los que son muy móviles y persistentes a eventos de contaminación continuos durante largos periodos de tiempo, con efectos a largo plazo y cuyas manifestaciones sobre la calidad del agua son tan débiles que suelen pasar inadvertidas durante mucho tiempo.

7.3 RIESGO DE CONTAMINACIÓN AL SISTEMA ACUÍFERO

Respecto a la representatividad del riesgo de contaminación por fuentes de contaminación de tipo difusa, se identificó que el 55,30% (232,26km²) del territorio posee un riesgo medio a la contaminación, el 31,78% (133,47km²) del territorio posee un riesgo alto, el 12,49% (52,45km²) del territorio posee un riesgo extremo y un 0,43% (1,82km²) posee un riesgo bajo (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Respecto a la espacialización del riesgo, se puede observar que el riesgo categorizado como alto a extremo se localizó principalmente hacia el cono aluvial del río Bolo y río Aguaclara (Figura 24), con pequeños focos hacia la llanura aluvial.

Tabla 20. Riesgo de contaminación por fuentes difusas.

RIESGO	Área (km ²)	Porcentaje de área respecto al área total (%)
Extrema	52,45	12,49
Alta	133,47	31,78
Media	232,26	55,30
Baja	1,82	0,43
Despreciable	0	0

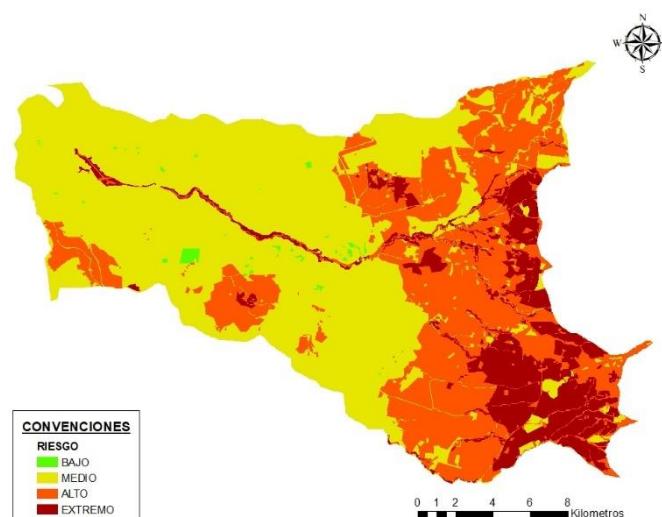


Figura 24. Riesgo por fuentes difusas de contaminación.

Así mismo se observó esta categorización de riesgo en el cauce del río Bolo. Hacia la llanura aluvial, la Categorización del riesgo fue principalmente Media, con focos tipificados en riesgo bajo. Se identificó que la zona de estudio presenta inexistencia de un riesgo Despreciable y predominancia de un riesgo Medio a ser contaminado, relacionado con la existencia de cultivos agrícolas y saneamiento *in situ* catalogados como de amenaza alta, en zonas donde el acuífero tiene baja a media vulnerabilidad.

En cuanto a la representatividad del riesgo de contaminación por fuentes de contaminación de tipo puntual, se identificó que un 53,24% (115 fuentes) presenta un riesgo medio, un 18,52% (40 fuentes) un riesgo alto, un 16,67% (36 fuentes) tiene un riesgo bajo y un 11,57% posee un riesgo extremo (25 fuentes) (Tabla 21). La Figura 25. Riesgo por fuentes puntuales de contaminación. Figura 25, presenta la espacialización del riesgo asociado a fuentes puntuales de contaminación.

Tabla 21. Riesgo de contaminación por fuentes puntuales.

RIESGO	No. Fuentes	Porcentaje de fuentes respecto al número total (%)
Extrema	25	11,57
Alta	40	18,52

Media	115	53,24
Baja	36	16,67
Despreciable	0	0

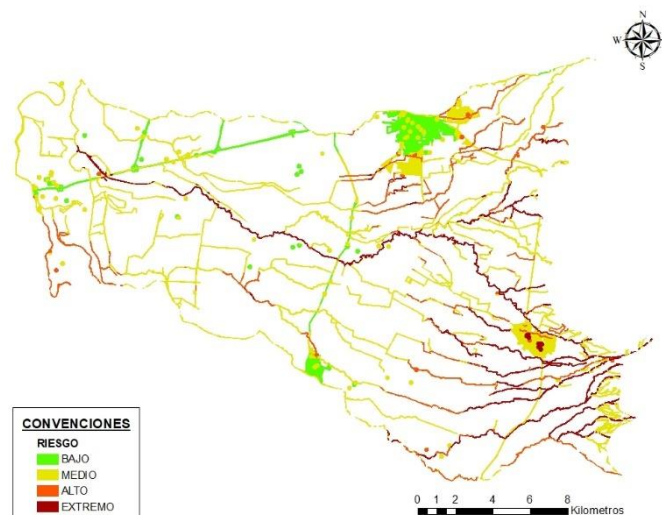


Figura 25. Riesgo por fuentes puntuales de contaminación.

Fue posible identificar que el riesgo de contaminación por fuentes puntuales hacia los centros poblados de los municipios de Palmira y Candelaria presenta un nivel de riesgo tipificado como bajo y medio, y para el municipio de Pradera el riesgo toma valores cualitativos entre medio y extremo. Se observó que las fuentes ubicadas en la zona alta del área de estudio, presentan valores de riesgo entre extremo, alto y/o medio. Considerando el efecto combinado del potencial de carga contaminante y la vulnerabilidad, se puede inferir que en el caso de las fuentes puntuales de contaminación, la tipificación de la vulnerabilidad es el parámetro crítico que limita la localización de las fuentes potencialmente contaminantes en el territorio.

7.4 ANÁLISIS DE RIESGO POR ESCENARIOS

Escenarios de vulnerabilidad

Para la construcción de los escenarios se determinaron como factores claves a los parámetros involucrados en el método de vulnerabilidad GOD (Foster *et al.*, 2002), identificando la precipitación como fuerza conductora. De esta manera, se generaron los escenarios considerando la combinación de cada Factor y Fuerza; en el fenómeno ENSO son posibles tres condiciones: El Niño, La Niña y la condición normal, por lo que se construyeron tres (3) escenarios para calcular el riesgo de acuerdo a cada índice de vulnerabilidad (Tabla 22) y las fuentes principales de riesgo, como riesgo por fuentes difusas de contaminación y riesgo por fuentes puntuales de contaminación.

Tabla 22 Escenarios construidos para el riesgo en fenómenos de variabilidad climática.

FACTOR(ES)	FUERZA	ESCENARIOS
Profundidad al nivel freático.	Normal	1. Determinación del riesgo en periodo normal.
	Niño	2. Determinación del riesgo en periodo niño.
	Niña	3. Determinación del riesgo en periodo niña.

Debido a que la fuerza conductora considerada para la construcción de escenarios de variabilidad climática es la precipitación, se realizó un análisis para la selección de los periodos ENSO (niño y niña). Los periodos fueron seleccionados con base en la serie de datos de niveles estáticos en el periodo 2000 a 2017, suministrados por la (CVC, 2018), con un registro semestral multianual. Una vez seleccionada la serie, se realizó la media aritmética de los niveles estáticos de los pozos de la zona de estudio y del área de influencia. Con el análisis realizado a la variación de los niveles estáticos, se estableció como año Niño el 2015, como año Niña el 2011 y como condición normal la media aritmética semestral multianual de los años no seleccionados como ENSO (ver ANEXO 4 y ANEXO 5), siendo estos resultados coincidentes con los datos reportados por IDEAM-UNAL (2018) para los años con fenómenos ENSO (año niña – 2011 y año niño - 2015).

A partir de las series de datos usadas para el cálculo del índice de vulnerabilidad, se identificó que la vulnerabilidad Baja presentó una representatividad del 48,76% (204,80 km²) del territorio para los tres periodos de variabilidad climática (niño, niña y normal). La vulnerabilidad Media, presentó valores del 34,86% (146,42 km²) del territorio para el periodo niño, un 32,95% (138,41 km²) para el periodo normal y un 31,79% (133,53 km²) para el periodo normal. La vulnerabilidad Alta presentó una representatividad del 14,05% (59,03 km²) para el periodo niña, un 13,48% (56,63 km²) para periodo normal y un 12,77% (53,62 km²) para el periodo niño. La vulnerabilidad Extrema presentó un valor del 5,65% (23,71 km²) en el territorio para periodo niña, un 4,09% (17,17 km²) para el periodo normal y un 4,06% (17,07 km²) para el periodo niño. En la Figura 27a, se presentan el resultado de los escenarios de vulnerabilidad descritos anteriormente.

Espacialmente, se observó que, en todos los escenarios construidos para el análisis de vulnerabilidad, que se presentan una mayor valoración hacia los conos aluviales y menores valoraciones hacia la llanura aluvial. En el escenario asociado a la condición de año Niña, la vulnerabilidad se intensificó en dos focos, uno localizado en el municipio de Palmira y otro localizado en el municipio de Candelaria.

Con base en los escenarios realizados, se pudo observar la relación entre la precipitación y la vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero analizado, relación que induce variación en las áreas tipificadas con vulnerabilidad en ciertos puntos focales. Sin embargo, un análisis tendencial, permitió observar que los rangos de fluctuación entre escenarios, porcentaje de área en una categoría de vulnerabilidad, en relación con una condición climática determinada, no son significativos, encontrando probabilidades estadísticas de entre el 48,31% y el 49,47% para la tipificación de la vulnerabilidad como Baja; entre el 31,79% y un 34,86 para la vulnerabilidad Media; entre el 12,77% y el 14,05% para la condición de vulnerabilidad Alta y entre el 4,06% y el 5,65 en la condición de vulnerabilidad extrema (Figura 26).

De análisis tendencial de la vulnerabilidad fue posible identificar el efecto esperado de la precipitación en el comportamiento de los niveles estáticos y su relación con la susceptibilidad de la contaminación, así cuando se presenta un escenario en condición de “año niña”, existe mayor probabilidad aumentar las área tipificadas en condición de alta a extrema vulnerabilidad y reducción del área tipificada en baja a media vulnerabilidad (Figura 26),

donde se muestra el análisis de incremento o decremento en una misma categoría de vulnerabilidad.

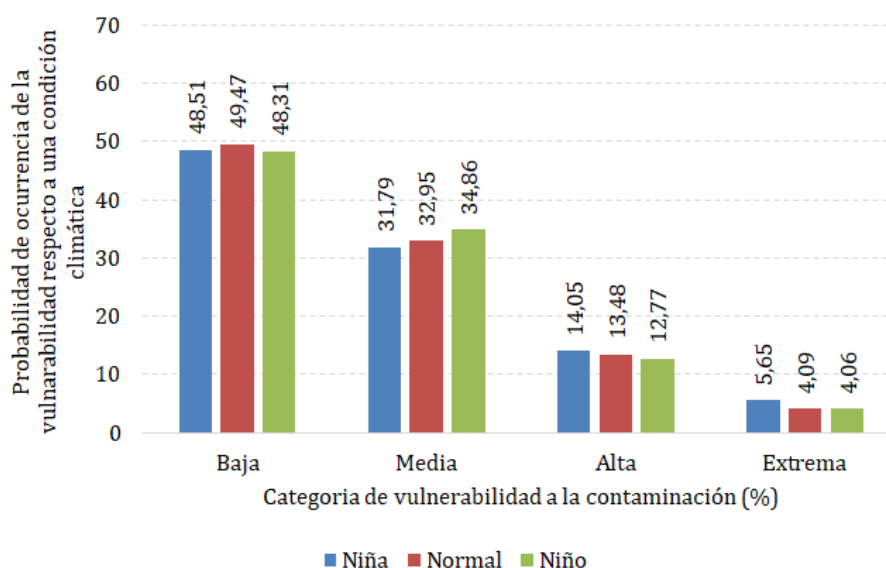


Figura 26. Análisis tendencial para escenarios de vulnerabilidad

Análisis de riesgo por escenarios para fuentes difusas

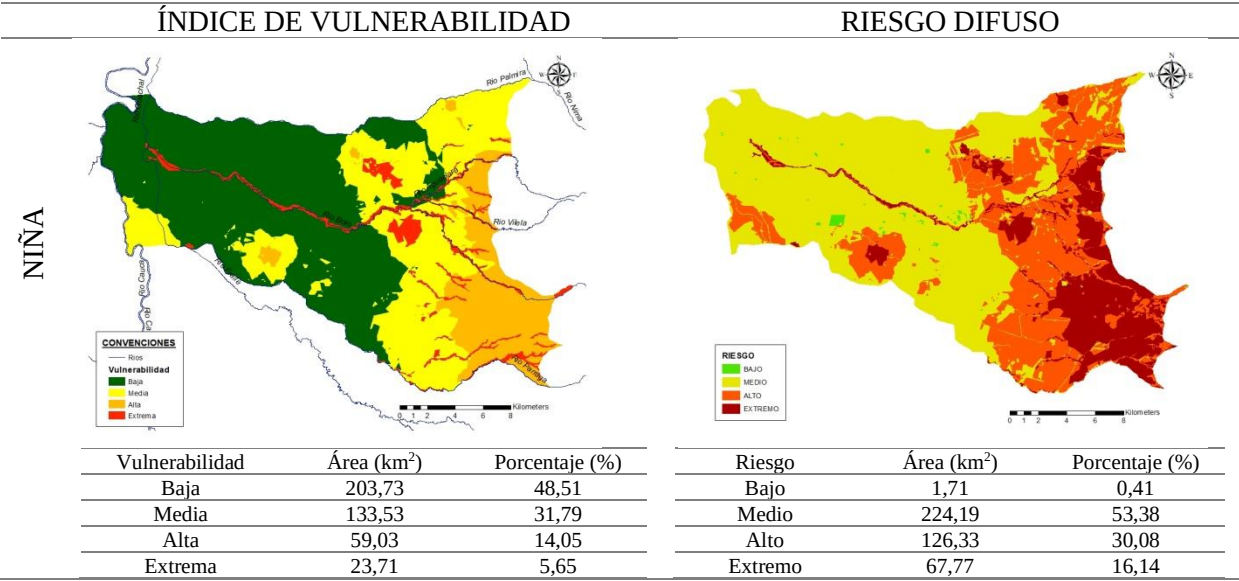
En cuanto a la representatividad del riesgo a la contaminación del acuífero por fuentes de contaminación difusa para el periodo niño, el 54,76% (230 km²) del territorio correspondió a un riesgo medio, el 33,05% (138,81 km²) del territorio presentó un riesgo alto a la contaminación del acuífero, un 11,78% (49,46 km²) del territorio presentó un riesgo extremo y un 0,41% (1,73km²) presentó un riesgo bajo. En cuanto al periodo niña, se presenta un 53,38% (224,19 km²) con un riesgo medio a la contaminación en la zona de estudio, un 30,08% (126,33 km²) presentó un riesgo alto, un 16,14% (67,77 km²) presenta un riesgo extremo y un 0,41% (1,71km²) presentó un riesgo bajo a la contaminación (Figura 27b).

Espacialmente, se observó que, en todos los escenarios contruidos de riesgo presentan mayor valoración hacia los conos aluviales y menores valoraciones hacia la llanura aluvial. En el escenario asociado a la condición de “año niña”, el nivel de riesgo se intensificó en tres focos, localizados en los municipios de: Palmira Candelaria y Pradera.

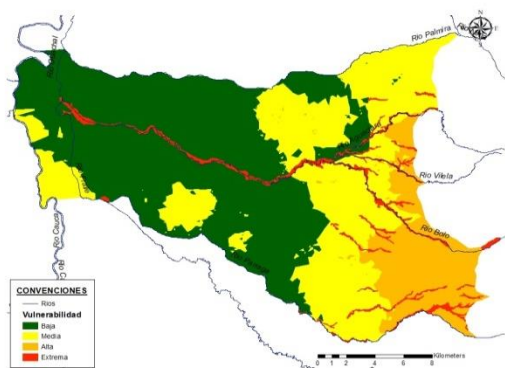
Existe un porcentaje representativo correspondiente al riesgo catalogado como medio para los tres periodos (niño, niña y normal), relacionado con los mayores índices de vulnerabilidad tipificada como Baja, en zonas con amenazas catalogadas como Extrema, como es el caso de la producción agrícola en la región. Respecto al riesgo Extremo, posee la mayor representatividad en el periodo niña, donde se destacó un mayor porcentaje de índice de vulnerabilidad Media y la presencia de amenazas catalogadas como Extremas a lo largo de la zona de estudio.

Del análisis tendencial de los escenarios de riesgo estimados, en la Figura 28 se observa que para todos los escenarios la mayor tipificación se encuentra en la categoría a riesgo Medio,

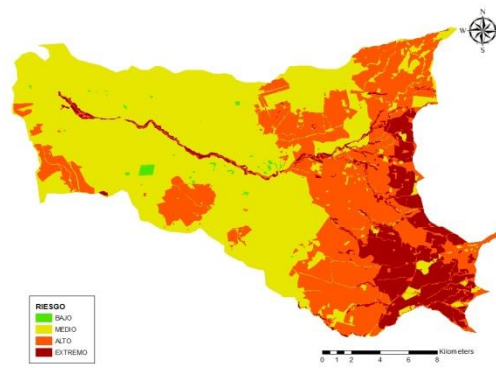
seguido de la categoría Alta, Extrema y Baja. Sin embargo, la incidencia de la variación de la precipitación permitió observar como en la categoría asociada a riesgo Alto, existe una relación inversa entre la precipitación esperada y la probabilidad de que se presente un riesgo alto.



NIÑO

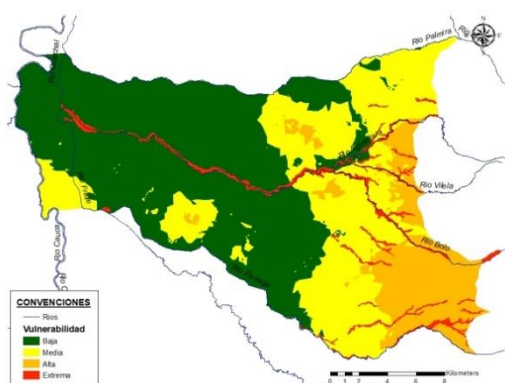


Vulnerabilidad	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Baja	202,89	48,31
Media	146,42	34,86
Alta	53,62	12,77
Extrema	17,07	4,06

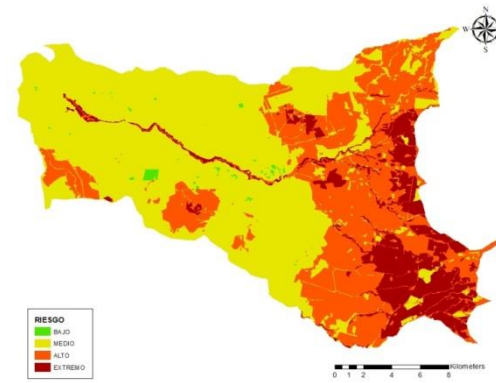


Riesgo	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Bajo	1,73	0,41
Medio	230	54,76
Alto	138,81	33,05
Extremo	49,46	11,78

NORMAL



Vulnerabilidad	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Baja	207,79	49,47
Media	138,41	32,95
Alta	56,63	13,48
Extrema	17,17	4,09



Riesgo	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Bajo	1,82	0,43
Medio	232,26	55,30
Alto	133,47	31,78
Extremo	52,45	12,49

a. Vulnerabilidad a la contaminación en escenarios de variabilidad climática.

b. Riesgo a la contaminación en escenarios de variabilidad climática por fuentes difusas.

Figura 27. Escenarios de riesgo para fuentes difusas de contaminación. Así para valores de menor precipitación (año niño), se espera una mayor área de la categoría asociada al riesgo alto, aproximadamente un incremento de tres puntos porcentuales respecto a la condición de año catalogado como niña.

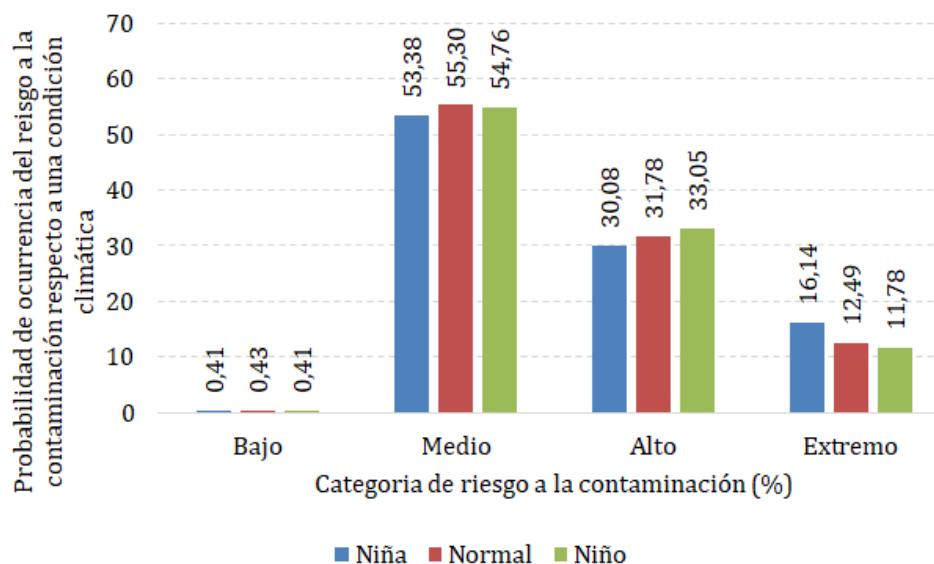


Figura 28. Análisis tendencial de escenarios de riesgo para fuentes de contaminación difusa.

En la categoría asociada a riesgo Extremo, la relación entre la probabilidad de ocurrencia y la precipitación presenta un comportamiento lineal y directo. Con incrementos de la precipitación, aumenta la probabilidad de un riesgo Extremo en 4,36 puntos porcentuales entre las condiciones de año niño y año niña.

Análisis de riesgo por escenarios para fuentes puntuales

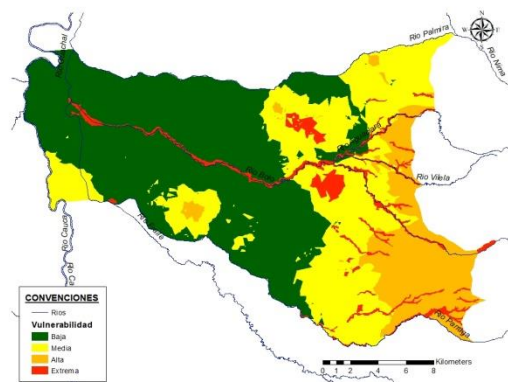
En cuanto a la representatividad del riesgo a la contaminación del acuífero por fuentes de contaminación puntual para el periodo niño, el 50,46% (109 fuentes) del territorio correspondió a riesgo medio, el 18,98% (41 fuentes) del territorio presentó un riesgo bajo, el 18,52% (40 fuentes) del territorio presentó un riesgo alto y el 12,04% (26 fuentes) del territorio presentó un riesgo extremo de contaminación al acuífero (Figura 29b).

En cuanto al periodo Niña, se presentó una representatividad del 48,15% (104 fuentes) del territorio para el riesgo medio, un 20,83% (45 fuentes) del territorio para el riesgo alto, un 17,13% (37 fuentes) del territorio para el riesgo bajo y un 13,89% (30 fuentes) para el riesgo extremo en la zona de estudio (Figura 29b).

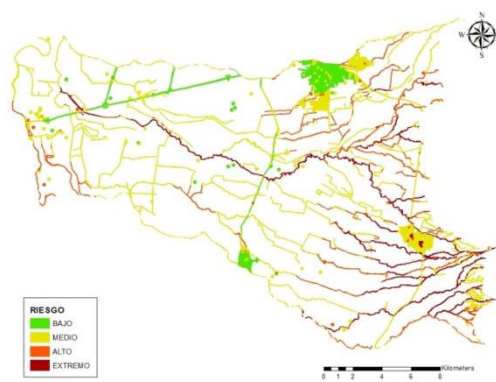
Espacialmente, se observó que, en todos los escenarios construidos el riesgo extremo se presentó hacia los conos aluviales y menores valoraciones hacia la llanura aluvial. Además, se identificó que existe una mayor representatividad del riesgo tipificado como medio para los tres periodos (niño, niña y normal). En cuanto al riesgo catalogado como alto y extremo, la mayor representatividad se presentó en el periodo niña, donde se obtuvo una mayor representatividad de índices de vulnerabilidad alta y media y la presencia de amenazas catalogadas como Extremas a lo largo del área de estudio.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	RIESGO PUNTUAL
--------------------------	----------------

NIÑA

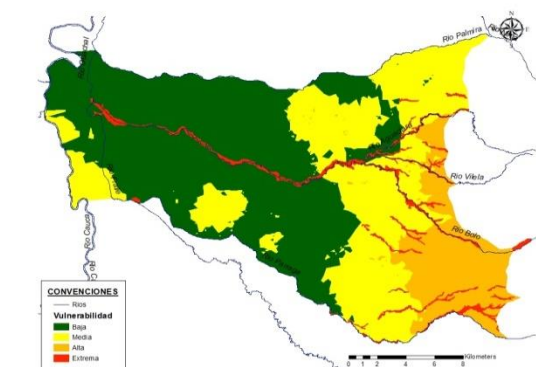


Vulnerabilidad	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Baja	203,73	48,51
Media	133,53	31,79
Alta	59,03	14,05
Extrema	23,71	5,65

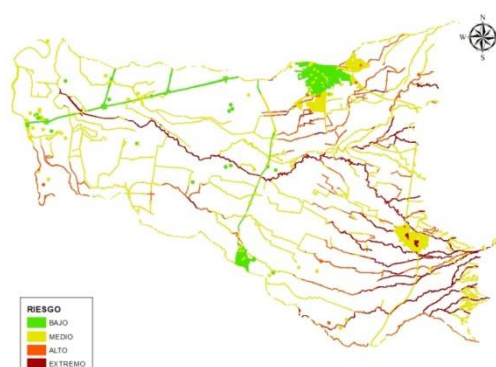


Riesgo	No. Fuentes	Porcentaje (%)
Bajo	37	17,13
Medio	104	48,15
Alto	45	20,83
Extremo	30	13,89

NIÑO

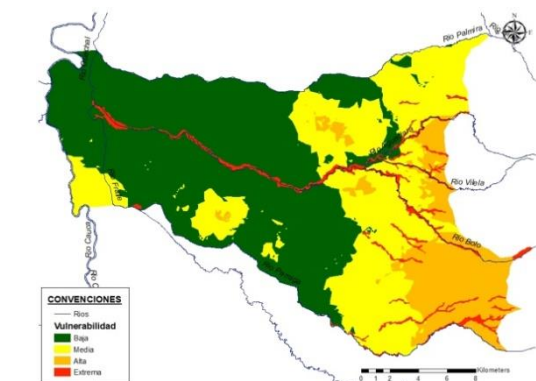


Vulnerabilidad	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Baja	202,89	48,31
Media	146,42	34,86
Alta	53,62	12,77
Extrema	17,07	4,06

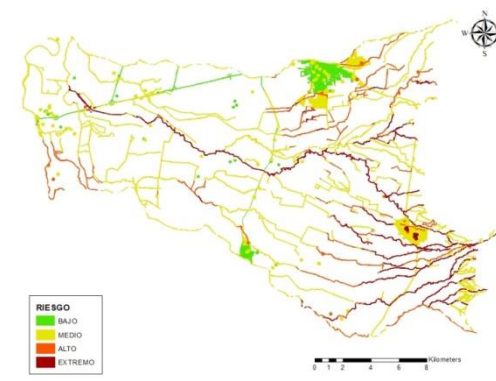


Riesgo	No. Fuentes	Porcentaje (%)
Bajo	41	18,98
Medio	109	50,46
Alto	40	18,52
Extremo	26	12,04

NORMAL



Vulnerabilidad	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Baja	207,79	49,47
Media	138,41	32,95
Alta	56,63	13,48
Extrema	17,17	4,09



Riesgo	No. Fuentes	Porcentaje (%)
Bajo	36	16,67
Medio	115	53,24
Alto	40	18,52
Extremo	25	11,57

a. Vulnerabilidad a la contaminación en escenarios de variabilidad climática.

b. Riesgo a la contaminación en escenarios de variabilidad climática por fuentes puntuales.

Figura 29. Escenarios de riesgo para fuentes puntuales de contaminación.

Del análisis tendencial de los escenarios de riesgo estimados, en la Figura 30, se observa que para todos los escenarios la mayor tipificación se encuentra en la categoría de riesgo Medio, seguido de la categoría Alta, Baja y Extrema. Sin embargo, la incidencia de la variación de la precipitación permitió observar como en la categoría asociadas al riesgo Alto, presenta un comportamiento lineal entre la precipitación esperada y la probabilidad de que se presente un mayor porcentaje de riesgo alto o extremo. Así para valores de menor precipitación (año niño), se presenta un menor porcentaje en esta categoría, con una diferencia de 2,51 puntos porcentuales respecto a la condición de año catalogado como niña.

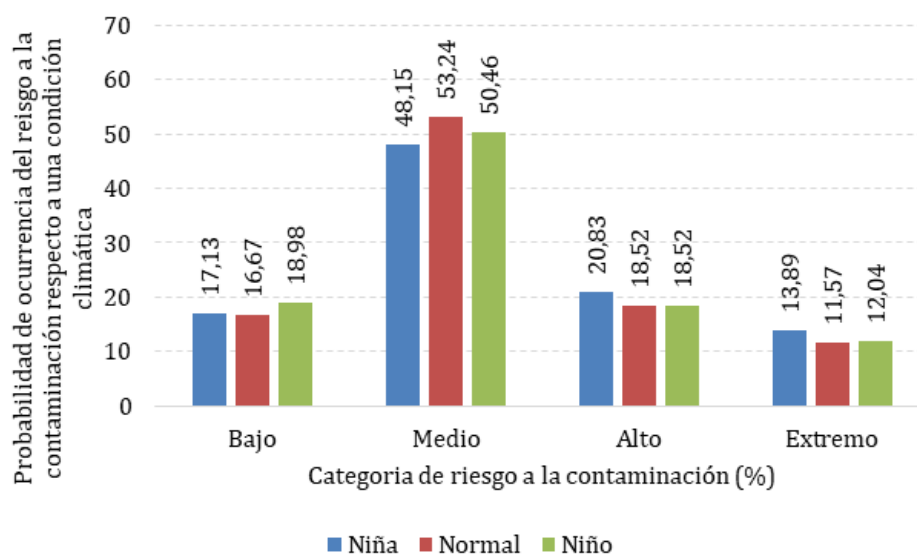


Figura 30. Análisis tendencial de escenarios de riesgo para fuentes de contaminación puntual.

En la categoría asociada a riesgo Extremo, la relación entre la probabilidad de ocurrencia y la precipitación presenta un comportamiento lineal y directo. Con incrementos de la precipitación, aumenta la probabilidad de un riesgo Extremo en 1,85 puntos porcentuales entre las condiciones de año niño y año niña.

8. CONCLUSIONES

En esta investigación fue posible estimar el riesgo a la contaminación del sistema acuífero en una zona de estudio y se identificó que presenta variaciones espaciales y temporales.

La evaluación de las amenazas al sistema acuífero permitió identificar potenciales de carga contaminante que van desde el reducido hasta el elevado, identificando que las dinámicas poblacionales influyen en la asignación de los potenciales de carga contaminante.

La vulnerabilidad a la contaminación, presentó las categorías desde bajo hasta elevado en la zona de estudio, donde más del 50% del área en el territorio presenta índices de vulnerabilidad baja y media, siendo los que poseen el mayor porcentaje de representatividad.

Se identificó que el riesgo presenta diferentes niveles a ser contaminado, existiendo una predominancia del riesgo medio tanto para fuentes difusas como puntuales de contaminación.

Un estudio como el desarrollado para el análisis de riesgo a la contaminación permite tomar decisiones importantes para la gestión del territorio.

9. RECOMENDACIONES

A la universidad promover la relación con la autoridad ambiental del Valle del Cauca, con el fin de dar continuidad al proceso de gestión de aguas subterráneas, que por medio del trabajo mancomunado permite indicar la necesidad de medidas de control y mitigación en una zona.

A los diferentes grupos de investigación, mantener la relación con la autoridad ambiental reconociendo la importancia de la rigurosidad de la información que se puede obtener por medio de ellos.

A la academia, los resultados obtenidos se deben tomar como un primer referente, el cual debe ser validado con el levantamiento de información primaria, en escalas de trabajo menores y con la participación, de ser posible, de un panel de expertos de cada sector.

Para futuros trabajos investigativos desarrollados entorno a la evaluación de las amenazas de contaminación a un sistema acuífero, se recomienda explorar la aplicación y validación de datos por medio de información primaria, como es la toma de muestras en un área determinada.

A la academia, se recomienda aplicar esta metodología para estimar el riesgo a la contaminación del acuífero en otras zonas de estudio con el fin de dar continuidad a este tipo de procesos investigativos que son una herramienta a utilizar en posibles tomas de decisiones relacionadas con el uso del suelo en el territorio.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuavalle. (2021). *Prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado en las áreas de cobertura de la sociedad de acueducto y alcantarillado Acuavalle S.A E.S.P.*
- Agudelo, L., Del Socorro, D., Lasso, J., Sepúlveda, L., & Paredes, 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. *Elsevier*, 1. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100298>
- Albinet, M., & Margat, J. (1970). Contamination vulnerability mapping of groundwater. *Bulletin de La Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 2do, 13– 22.
- Andrew, M. (1993). *Los desastres no son naturales*.
- Australian Government. (2013). Australian Geological Provinces. In *Australian Government* (First edit).
- Ayora, C., Bernet, O., Bolzicco, J., Carrera, J., Domènech, C., Cerón, J. C., Fernández, I., Gómez, P., Jaén, M., Mantecón, R., Manzano, M., Martín Machuca, M., Mediavilla, C., Moreno, L., Navarrete, P., & Salvany, J. M. (2001). Hidrogeología del Valle del Guadamar y zonas colindantes. Funcionamiento del sistema acuífero. *Boletín Geológico y Minero, Especial*, 69–92.
- Baez, L. (2017). Análisis del riesgo de contaminación del acuífero Patiño. In *Biblioteca central de la UNA* (Vol. 1).
- Báez, L., Juan, Nogués., & Villalba, C. (2017). Hacia un monitoreo in-situ de calidad de agua subterránea: revisión de parámetros. *CAI- Congreso Argentino de Agroinformática*, 343.
- Barragan, E., & Leyva, G. (2008). *Distribución de agua en el planeta*. Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán. <https://goo.gl/mDcC0o>
- Brito, A. (2006). *Evaluación de la aplicabilidad de tres métodos para estimar vulnerabilidad de aguas subterráneas a escala predial y regional* [Doctoral dissertation]. Universidad de Concepcion.
- Candela, L. (2002). *Contaminación de las aguas subterráneas: Tipo doméstico e industrial: Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*. 1, 472.
- CENICAÑA. (1995). *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (C. Cassalet, J. Torres, & C. Isaacs, Eds.; Vol. 1).
- Chermack, T., Lynham, S., & Ruona, W. (2001). *A Review of Scenario Planning Literature. Future Research Quarterly*. 7(2), 7–31.
- CVC. (2000). *Plan de manejo para la protección de las aguas subterráneas en el departamento del Valle del Cauca*.
- CVC. (2009). *Plan de manejo para la protección de las aguas subterráneas en el departamento del Valle del Cauca*.
- CVC. (2012). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica de la cuenca del Río Bolo*.
- CVC. (2017). *Evaluación regional del Valle del Cauca* (p. 397).
- CVC. (2018). *Bases de datos. Gestión del recurso hídrico subterráneo. Grupo de Recursos Hídricos*.
- (CVC) Corporación Autonoma Regional del Valle del Cauca. (2023). *GeoCVC* (Visor Geográfico Avanzado).
- Diaz, E., Boschetti, N., & Duarte, O. (2009). Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo Feliciano. In *Boletín Geológico y Minero* (Vol. 120).

- Díaz, J., Rivera, C., & Figueroa, J. (2013). Estudio de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca. *Ingeniería y Región*, 10, 15–22.
- Dragoni, W., & Sukhija, B. (2008). *Climate change and groundwater: a short review*. *Climate Change and Groundwater Geological Society*. 288, 1–12.
- El-Zein, A., & Tonmoy, F. (2015). Assessment of vulnerability to climate change using a multi-criteria outranking approach with application to heat stress in Sydney. *Elsevier*, 48, 207–217. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.012>
- Espinoza, C. (2010). *Dinámica de aguas subterráneas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación. Aplicación al acuífero de Santiago Norte*.
- Foster, S. (1987a). Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. *Proc. Interl Conf. "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants" Noordwijk, The Netherlands*.
- Foster, S. (1987b). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy* (pp. 38:69–86).
- Foster, S., & Hirata, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. *WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual*, 81.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la calidad del Agua Subterránea* (GW-MATE, WHO, PAHO, CEPIS, & UNESCO, Eds.).
- García, L. (2011). Introducción a la metodología de la investigación (II) Tipos de diseños de investigación. In *Centre Cochrane Iberoamericano*.
- Gaviria, J., & Betancur, T. (2005). Una caracterización de carga contaminante a los acuíferos libres del Bajo Cauca Antioqueño. *Gestión y Ambiente*, 8, 85–102.
- Godet, M. (1982). *From forecasting to 'la prospective' a new way of looking at futures*.
- Gómez, A., Madrigal, H., Núñez, C., Calderón, H., & Jiménez, P. (2019). Hydrogeological vulnerability in Jacó coastal aquifers, Central Pacific, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2, 141–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.15359/rgac.63-2.5>
- Gómez, S., Gutierrez, F., & Torres, C. (2011). Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga. *UIS Ingenierías*, 10, 53–64.
- González, R., Iztaccíhuatl, B., Sánchez, I., & Osorio, J. (2018). El acuífero Yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica. In *Contaminación Ambiental* (Vol. 34). <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.09>
- Google. (2022). *Google Earth*.
- Guerra, A. (2010). *Metodología para la elaboración de escenarios en las Empresas Integrales y de Tabaco de la provincia Pinar del Río*. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca."
- Hutchinson, M. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106, 211–232.
- IDEAM. (2015). *Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas - Contenidos del Taller de Formación*.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua*.
- IDEAM-UNAL. (2018). *La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia*. 1–28.
- IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020). *Colombia en Mapas* (No. 1). IGAC.
- Ingeominas, & CVC. (1971). *Hidrogeología del Valle del río Cauca entre Santander de Quilichao y el río Sonso*.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS. (2003). *Leyenda de Vulnerabilidad*.

- Instituto Geológico y Minero de España. (2017). La importancia de las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos: aplicaciones prácticas en proyectos de cooperación internacional para el desarrollo. *Informe Del Centro de Formación de La Cooperación Española En La Antigua Guatemala*, J21, 1389–1392. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jarrín, A., Salazar, J., & Martínez-Fresneda, M. (2017). Evaluación del riesgo a la contaminación de los acuíferos de la Reserva Biológica de Limoncocha, Amazonía Ecuatoriana. *Universidad Internacional SEK, Quito Pichincha, Ecuador*, 1. <https://doi.org/10.4136>
- Kahn, H. , & Wiener, A. (1967). The year 2000, a framework for speculation on the next thirty-tree years. *Washington: The Hudson Institue*.
- Lavell, A. (2004). *Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacia una Definición*.
- López, J., Fornés, J., Ramos, G., & Villarroja, F. (2009). *Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. 4 edición.
- Madrigal, H., Fonseca, A., Núñez, C., & Gómez, A. (2014). Amenaza de contaminación del agua subterránea en el sector norte del acuífero Barva, Heredia, Costa Rica. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6, 108–113.
- Mejía Argueta, C. , Agudelo, I. , & Soto Cardona, O. C. (2016). Planeación por escenarios: un caso de estudio en una empresa de consultoría logística en Colombia. *Estudios Gerenciales*, 32(138), 96–107.
- Ministerio de Ambiente. (2020). *Aguas subterráneas y acuíferos*. <https://bit.ly/3x5sS18>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Guía metodológica para formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos*.
- Montealegre, E. (2012). Análisis de la variabilidad climática inter-anual (El Niño y La Niña) en la Región Capital, Bogotá-Cundinamarca. *Plan Regional Integral de Cambio Climático*, 24–25.
- Montealegre, J. (2009). *Estudio De La Variabilidad Climática De La Precipitación En Colombia Asociada A Procesos Oceanicos Y Atmosféricos De Meso Y Gran Escala*. .
- Montoya, D., & Gaviria, J. (2011). Aguas subterráneas un recurso vital para la sostenibilidad. *Corporación Autónoma Regional Del Centro de Antioquia – Corantioquia*, 304.
- Morris, B., & Foster, S. (2000). Cryptosporidium contamination hazard assessment and risk management for British groundwater sources. *Water Science and Technology*, 41, 67–77.
- Nguyet, V., & Goldscheider, N. (2006). A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. *Hydrogeology*, 14, 1666–1675. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0069-5>
- Orta, L. (2002). Contaminación de las aguas por plaguicidas químicos. *Fitosanidad. Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal*, 6(3), 55–62.
- Pérez, W. (2016). *Clasificación de acuíferos mediante la determinación de parámetros hidráulicos en el abanico aluvial de Ibagué Tolima*. Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia Escuela De Ingeniería Geológica.
- Pernía, J., & Fornés, J. (2008). *Cambio climático y agua subterránea. Visión para los próximos decenios*. Instituto Geológico y Minero de España. 79.

- Polemio, M., Casarano, D., & Limoni, P. P. (2009). Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 9, 1461–1470. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/nhess-9-1461-2009>,
- Porter, M. (1985). *Competitive advantage: creating and sustaining superior performance*. The Free Press. New York.
- Ramirez, A. (2021). *Escenarios tendencial y estratégico considerando variables socioambientales* (pp. 133–158). Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario del Noroeste.
- Rasmussen, L. (2011). *Facilitating Change: Using Interactive Methods in Organizations, Communities and Networks*. KongensLyngby, Polyteknisk.
- Rengifo, R. (2020). *Evaluación de zonas potenciales de recarga del acuífero aluvial del Río Cauca en el área aferente al Río Bolo*. Universidad del Valle. Cali. Colombia.
- Rueda, M., & Betancur, T. (2006). No Title. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 13, 71–88. <https://doi.org/0121-5701>
- Ruepert, C., Castillo, L., Bravo, V., & Fallas, J. (2005). *Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35300.99205>
- Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J., & Chorus, I. (2006). *Protecting Groundwater for Health: managing the quality of drinking-water sources* (p. 678).
- Schwartz, P. (1991). *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. Currency Doubleday. New York.
- Suarez, J. (2009). Deslizamientos: Análisis Geotécnico - Capítulo 6: Efectos del agua sobre el suelo. In *U. Industrial de Santander*.
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra* (Pearson Educación S. A, Ed.; 8va ed.).
- Taylor, R., Scanlon, B., & Döll, P. (2013). Groundwater and climate change. *National Climate Change*, 4, 322–329.
- Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., & Nanni, M. (2002). *Requerimientos de monitoreo del agua subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua* (p. 9). Banco Mundial: Serie de notas informativas.
- Urrea, V. (2019). *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero aluvial del río cauca en la cuenca del río Bolo* [Tesis de pregrado]. Universidad del Valle.
- Vallecaucana de aguas S.A E.S.P. (2013). Programa agua y saneamiento para la prosperidad - Plan Departamental para el manejo empresarial de los servicios públicos de agua y saneamiento básico - PAP - PDA del Valle del Cauca. *Santiago de Cali*.
- Van Vliet, M. (2007). Impact of climate change on groundwater review. *IGRAC Report for TNO Bouw En Ondergrond*.
- Vélez, M., Ortiz, C., & C, Vargas. (2011). Las aguas subterráneas un enfoque práctico. In *Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas* (Vol. 1).
- Vélez, M., Ortiz, C., & Vargas, C. (2011). *Las aguas subterráneas un enfoque práctico* (Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas, Ed.; 1ra ed.).
- Veloza, F. (2009). *Informe hidrogeoquímico del macizo de Santander Bogotá*.
- Vergara, J., Fontalvo, T., & Maza, F. (2010). Scenario Planning: Review of concepts and methodological proposals. *Prospect*, 8(2), 21–29.
- Wack, P. (1985). *Scenarios: Uncharted Water Ahead*. 63(5), 73–89.

ANEXOS

ANEXO 1. Inventario de Fuentes de contaminación difusa en la zona de estudio.

COD	TIPO DE ACTIVIDAD	SUBCLASE 1	SUBCLASE 2	ZONA	ÁREA (km2)	% EN ZONA	PCC
DU01	Desarrollo Urbano	Saneamiento	Urbana	Candelaria	1,02	0,24	Reducido
				Pradera	2,29	0,55	Reducido
				Palmira	8,97	2,14	Reducido
DU02			Rural	Florida	0,01	0,00	Reducido
				Candelaria	72,37	17,23	Moderado
				Pradera	23,95	29,51	Moderado
				Palmira	33,10	50,19	Moderado
PA01		Cultivo de caña de azúcar	Caña de azúcar	Rural	338,40	80,69	Elevado
PA02	Producción Agrícola	Cultivos menores	Piña		2,97	0,71	Reducido
			Maíz		1,87	0,45	Reducido
			Cítricos		0,46	0,11	Reducido
			Soya		0,14	0,03	Reducido
			Habichuela		0,13	0,03	Reducido
			Café		0,08	0,02	Reducido
			Árboles Frutales		0,06	0,01	Reducido
			Tomate		0,06	0,01	Reducido
			Plátano		0,06	0,01	Reducido
			Yuca		0,04	0,01	Reducido
			Fríjol		0,04	0,01	Reducido
			Cacao		0,02	0,00	Reducido
			Mango		0,02	0,01	Reducido
			Zapote		0,01	0,00	Reducido
			Limón		0,03	0,01	Reducido
			Pepino		0,01	0,00	Reducido
			Cultivos de invernadero	Urbana/ Rural	0,03	0,01	Reducido
PP01	Producción Pecuaria	Extensiva	Ganadera	Urbana/ Rural	17,22	4,10	Moderado
PP02		Pocas cabezas	Avícola		0,45	0,11	Reducido
			Porcicola		0,00	0,00	Reducido
			Piscicola		0,03	0,01	Reducido

ANEXO 2. Inventario de Fuentes de contaminación puntual en la zona de estudio.

COD	TIPO DE ACTIVIDAD	SUBCLASE 1	SUBCLASE 2	ZONA	CANT	PCC
RS01	Residuos sólidos	Residuos domésticos urbanos	Transporte a Relleno sanitario regional Presidente	Palmira	5	Reducido
				Palmira		Reducido
				Palmira		Reducido
				Palmira		Reducido
				Candelaria		Reducido
				Pradera	2	Reducido
RS02		Residuos domésticos rurales	Transporte a Relleno sanitario Colomba – El Guabal	Pradera		Reducido
				El Cerrito	2	Reducido
				El Cerrito		Reducido
AC01	Almacenamiento de combustibles	Enterrado	Estación De Servicio Terpel Paraiso	Palmira	7	Moderado
			Estación De Servicio Texaco Centro Palmira			Moderado
			Estación De Servicio Terpel Palmira			Moderado
			Estación De Servicio			Moderado
			Estación De Servicio Terpel Las Victorias			Moderado
			Estación De Servicio Santa Barbara Palmira	Candelaria	2	Moderado
			Estación De Servicio Texaco La Ceiba Llano Grande			Moderado
			Estación De Servicio Terpel			Moderado
			Estación De Servicio Terpel - San Antonio			Moderado
			Biomax - Gasolina	Pradera	3	Moderado
			Estación De Servicio Zeus			Moderado
			Estación De Servicio Terpel			Moderado
			Estación De Servicio Terpel			Moderado
AM01	Actividad minera	Arena/ Cielo Abierto	Peña Alta	Palmira	3	Moderado
			Guanabanal			Moderado
			Puente Pradera Aguas Arriba			Moderado
			Puente Pradesa Aguas Abajo	Pradera	2	Moderado
			Barrio Nuevo			Moderado
			Yerba Buena	Candelaria	1	Moderado
AR01	Aguas residuales	Vertimientos	Residual Industrial	Palmira	4	Elevado
				Candelaria	3	Elevado
				Pradera	1	Elevado
CA01	Cursos de agua	Cursos superficiales reducida carga	Acequia Bolito Danielito	Guachal	25	Reducido
			Acequia Bolito Montealegre			Reducido
			Acequia La Bodega			Reducido
			Acequia La Comunidad			Reducido
			Acequia Lucerna			Reducido
			Acequia San José			Reducido
			Canal de Riego			Reducido
			Quebrada Canaveral			Reducido
			Quebrada Candelillo			Reducido
			Quebrada Flores Amarillas			Reducido
			Quebrada Grande			Reducido

CA02	Cursos superficiales moderada carga	Quebrada La Granera	Guachal	13	Reducido
		Quebrada La Leona	Guachal		Reducido
		Quebrada La Magdalena	Guachal		Reducido
		Rio Aguaclara	Guachal		Reducido
		Rio Vilela	Guachal		Reducido
		Zanjón Agua Clara	Guachal		Reducido
		Zanjón Aguaverde	Amaime		Reducido
		Zanjón Azcarate	Amaime		Reducido
		Zanjón Beringuito	Amaime		Reducido
		Zanjón Bolito	Guachal		Reducido
		Zanjón Cantaro Hondo	Guachal		Reducido
		Zanjón Chaverra	Guachal		Reducido
		Zanjón Chicharra	Guachal		Reducido
		Zanjón Chumbun	Guachal		Reducido
		Acequia Azcarate	Amaime		Moderado
		Zanjón Cucarron Seco	Amaime		Moderado
		Zanjón Flores Amarillas	Guachal		Moderado
		Zanjón Guabina	Guachal		Moderado
		Zanjón La Comunidad	Guachal		Moderado
		Zanjón San Jose	Guachal		Moderado
		Zanjón Seca	Guachal		Moderado
		Zanjón Tamboral	Guachal		Moderado
		Zanjón Tamborero	Amaime		Moderado
		Zanjón Timbiqui	Guachal		Moderado
		Zanjón Varela	Guachal		Moderado
		Zanjón Zainera	Guachal		Moderado
		Zanjón Zainerita	Guachal		Moderado
CA03	Cursos superficiales elevada carga	Canal Interceptor	Guachal	28	Elevado
		Acequia Arriba	Guachal		Elevado
		Acequia Barrancas	Amaime		Elevado
		Acequia Bolito	Guachal		Elevado
		Acequia El Salado	Amaime		Elevado
		Acequia Madre Vieja	Guachal		Elevado
		Acequia Potoco	Guachal		Elevado
		Canal colector Cucarachas	Guachal		Elevado
		Canal Sesquicentenario	Amaime		Elevado
		Quebrada El Cairo	Guachal		Elevado
		Quebrada El Guavito	Guachal		Elevado
		Quebrada La Alacranera	Guachal		Elevado
		Quebrada La Honda	Guachal		Elevado
		Zanjón Beringo	Amaime		Elevado
		Zanjón Curiche	Guachal		Elevado
		Zanjón El Muerto	Guachal		Elevado
		Zanjón Tortugas	Guachal		Elevado
		Rio Cauca	Guachal		Elevado
		Zanjón Romero	Amaime		Elevado
		Zanjón Chimiqui o Zumbaculo	Amaime		Elevado
		Zanjón Chontaduro	Guachal		Elevado
		Rio Fraile	Guachal		Elevado
		Rio Guachal	Guachal		Elevado
		Rio Palmira	Amaime		Elevado
		Rio Parraga	Guachal		Elevado

			Rio Bolo	Guachal		Elevado
			Quebrada Salsipuedes	Guachal		Elevado
			Quebrada Chontaduro	Guachal		Elevado
RT01	Transporte	Rutas de transporte	Alternas a la Troncal de Occidente	Palmira	5	Reducido
			Troncal de Occidente	Palmira		Reducido
			Alternas a la Troncal de Occidente	Palmira		Reducido
			Alternas a la Troncal de Occidente	Palmira		Reducido
			Alternas a la Troncal de Occidente	Palmira		Reducido
			Circuito Cali - Palmira	Aeropuerto	2	Reducido
			Circuito Cali - Palmira	Aeropuerto		Reducido
			Alternas a la Troncal de Occidente	El Cerrito	2	Reducido
			Alternas a la Troncal de Occidente	El Cerrito		Reducido
DU03	Desarrollo Urbano	Cementerios	Cementerio Jardines Del Palmar	Palmira	5	Reducido
			Jardin Parque Cementerio Los Olivos			Reducido
			Cementerio Central			Reducido
			Cementerio Libre			Reducido
			Parque Cementerio Jardines Del Palmar S.A			Reducido
			Cementerio De Candelaria	Candelaria	1	Reducido
			Cementerio Pradera	Pradera	1	Reducido
I01	Industria	Tipo 1	Industrias Carnicas De Colombia Sas	Zona de estudio	32	Reducido
			Artmodulares - Carpinteria			
			Carpinteria Arquitectonica			
			Made Ind - Carpinteria			
			Industria De Licores Del Valle			
			Cemex			
			Cajascol			
			El Forraje			
			Gramma Natural Gsa Especialistas			
			Esencias Cali - Aceites De Plantas Medicinales			
			Madepal			
			Comercializadora Unievrsl Ordoã'Ez			
			Ingenio De Mayaguez			
			Castilla Agrícola SA			
			Bengala Agrícola SAS			
			Castilla Agrícola - Potrerillo			
			Pulpas Zucco Colombia			
			Microorganismos Eficientes			
			Planta Del Alba			
			Planta El Bolo San Marino			
			Casa Frutal La Rita			
			Planta De Sacrificio Bovino			
			Carnes Frias Berna			
			Empacadora Palmaliños			
			Alimentos La Cali S.A.S			
			Italcol De Occidente SA			
			Banco De Germoplasma			
			Semillas Del Futuro			
			CCATS - América Latina			
			La Gitana Fabrica Panificadora			
			Carnes Frías Berna - Punto De Fabrica			
			Espejos SA			
I02		Tipo 2	Madera Y Diseño Juan Camaho		24	Moderado
			Industria Mana			
			Textiles Y Manufacturas Del Valle SAS			
			Textiles Del Pacífico			
			Papelera Ata			
			Productos J y C SAS			
			Centro De Cuadernos Norma			
			Incolpa LTDA			
			Grupo Textil Del Valle SAS			
			Kimel De Colombia SA			
			Cauchos Industriales Del Pacifico SAS			

I03	Tipo 3	Palmipulpas SA	43	Elevado
		Condimentos Todo Rico		
		Eliecer Fabrica Muebles		
		D House Factory		
		Fabrica De Colchones		
		Fabrica De Muebles J.M		
		Fabrica De Dotaciones Industriales		
		Tierra		
		Metalarco Fabrica		
		Balaustres Y Molduras Palmira		
		Cocinas Integrales		
		Vanguardia Muebles		
		Katto Muebles		
		Fabrica De Materas La Tupia		
		Fabrica De Materas La Tupia		
		Industrias Ruvaleg		
		Industria Madehav		
		Planta San Martin Cali Praxair		
		Ekux - Tecnoempaques De Occidente		
		Fabrica		
		Empaques Industriales De Colombia		
		Postecsa De Colombia SAS		
		Imecol SA		
		Estrumetal SA Palmaseca		
		Estrumetal SA		
		Centro Experimental La Tupia		
		Metales Y Aleaciones Especiales SAS		
		Plastiempaques Y Desechables Jireh		
		Taller Mecánico El Zarco		
		Taller Mecánico Multiservicios		
		Mecanica Especializada Goodyear		
		Servicartier - Taller Mecanico		
		Taller Mecanico		
		Torque Motors - Taller Mecanico		
		Renovaciones Mecánicas		
		CDA Motos Certiya		
		CDA Llano Grande Sas		
		CDA Serviberna Sas		
		CDA Sur		
		CDA Paraiso		
		Taller Mecanico De Motos		
		Taller Mecanico Sos 51		
		Taller Mecanico Sur Motos		
		Taller Mecanico Laverde		
		Taller Mecanico El Vene		
		Taller Mecanico Auto Franco		
		Taller Tecnoindustrial Lozada		
		Taller Mecanico J Y M		
		Taller Mecanico Racing Club Candelaria		
		Servimoto Honda		
		Taller Mecanico J Y D		
		Taller Mecanico Pist Motos		
		Taller Mecanico Carlos Mosquera		
		Taller Mecanico Montenegro		
		Taller Montenegro Tm		
		Taller Mecanico Motorbike Eracing		
		Metalicas Davila Sas		
		PVC Y Acabados Comapny Hdez		

ANEXO 3. Selección de periodos ENSO.

Los periodos ENSO fueron seleccionados con base en la serie de datos de niveles estáticos en el periodo 2000 a 2017, con un registro semestral multianual. Con ayuda de la Figura A1, se identificó el año 2011 como periodo Niña, además, de acuerdo con IDEAM (2021), todo el 2011 el territorio colombiano presentó el fenómeno La Niña, cuya repercusión en el clima fue bastante notoria, generando emergencias asociadas a inundaciones y crecientes súbitas.

En cuanto al periodo Niño se identificó el año 2015, dado a que es el más reciente y uno de los más fuertes. No obstante, la región del Valle del Cauca se vio afectada por el fenómeno de El Niño más reciente (2015), las descargas de los ríos se redujeron significativamente, debido a los efectos del clima y la derivación del agua para las redes de riego en la llanura aluvial, además, se observó una disminución progresiva de los niveles de agua subterránea (Tecnicaña, 2019; Urrea, 2019).

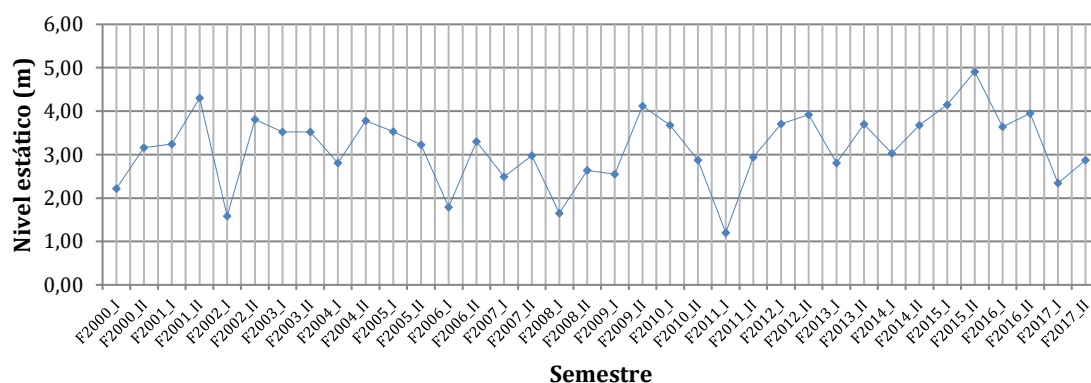


Figura A 1. Promedio de niveles estáticos por semestre para el periodo 2000 a 2017 de todos los pozos utilizados en la zona de estudio.

Fuente: CVC (2018).

ANEXO 4. Análisis de la profundidad al nivel freático por condición climática.

Con el propósito de conocer el grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero aluvial, en periodos de variabilidad climática interanual correspondientes a los fenómenos ENSO. Los escenarios se construyeron dada las influencias en los cambios en la precipitación pluvial. Estos se realizaron variando el parámetro Profundidad al nivel freático (D). Los niveles estáticos para las tres condiciones climáticas se muestran en la Figura A1.

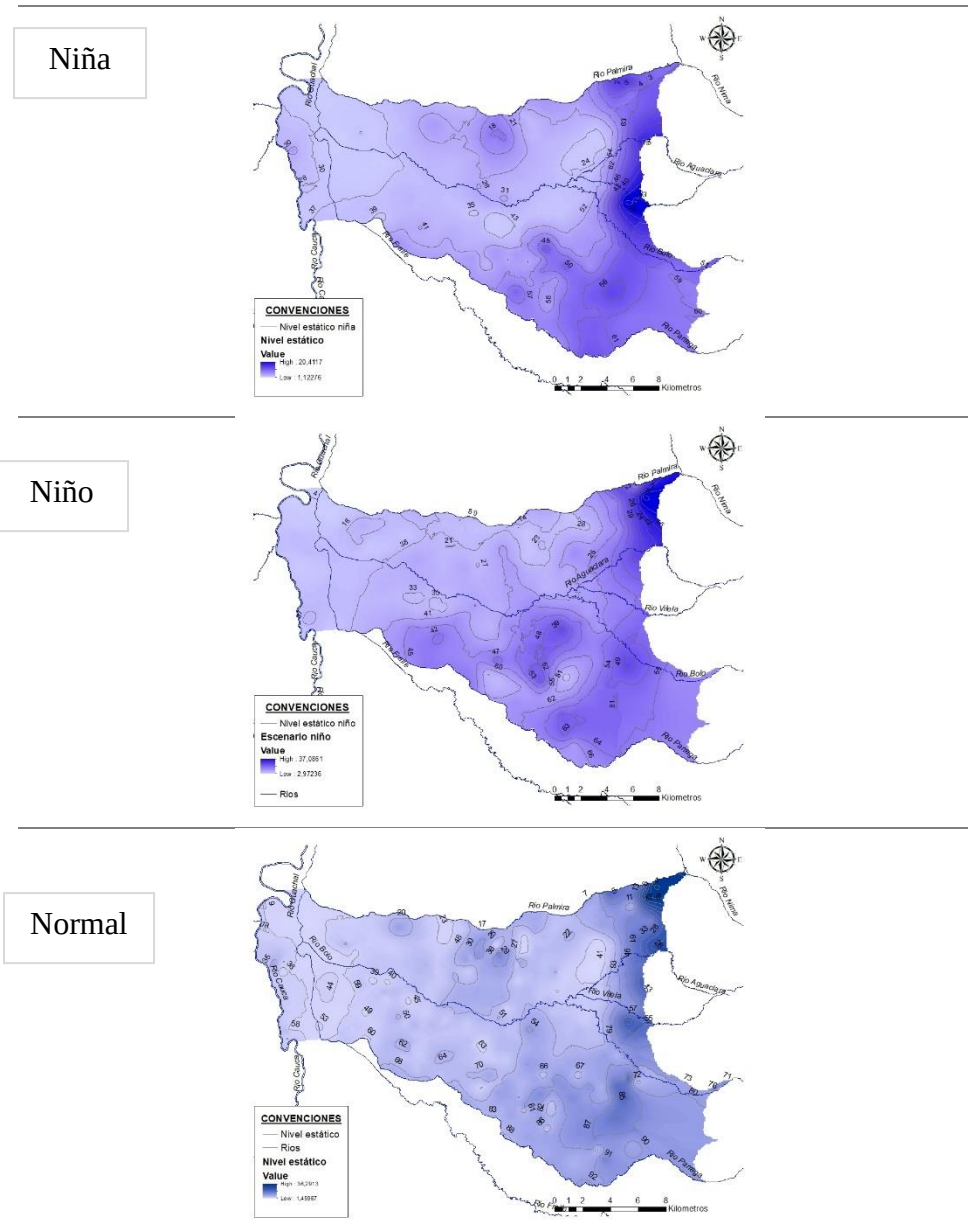


Figura A 2. Profundidad al nivel freático en las condiciones climáticas

Para el periodo normal se tomó la serie de datos correspondiente a los años 2000 a 2017, excluyendo los años 2011 y 2015, los cuales fueron utilizados para evaluar este parámetro en periodo Niña y Niño, respectivamente.

Los niveles estáticos presentaron una variación de: para periodo niño desde los 2,97 m hasta los 37,09 m; periodo normal desde los 1,46 hasta los 36,29 y periodo niña desde 1,12m hasta

20,41 m. De esta manera se pudo observar que en el periodo niña donde existe un incremento de lluvias, los niveles estáticos también se presentaron más superficialmente, con un nivel cercano a la superficie equivalente a 1,12 m

Ahora bien, respecto a la indexación de los datos por el método GOD se presenta en la figura A3. Para el periodo niña el índice 0,7 (20 – 50m) tiene 25,30%; 0,8 (5-20m) un 17,35% y 0,9 (<5m) un 57,30%. Por otro lado, para periodo niño el índice 0,7 (20 – 50m) tiene 10,84%; 0,8 (5-20m) un 64,70% y 0,9 (<5m) un 24,42%. De esta manera, para el periodo niña el índice 0,9 es mayor, sobretodo en toda la llanura aluvial y parte de los conos aluviales. Para periodos del fenómeno la Niña, el acuífero presenta un elevado riesgo de contaminación ocasionado por el incremento del nivel freático, lo que implica la reducción de la zona no saturada, donde ocurren los principales procesos de atenuación natural de la contaminación (Hernández, 2003).

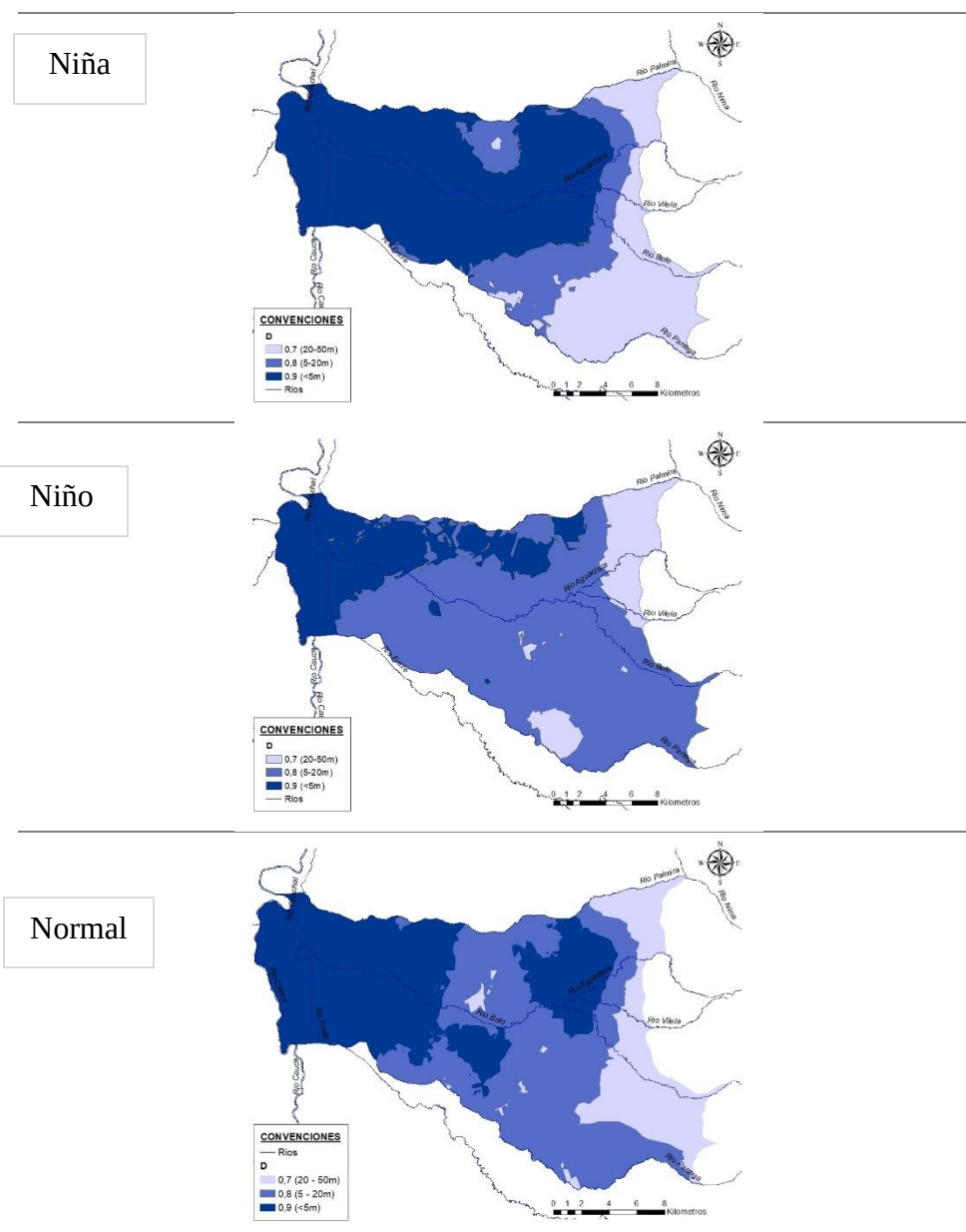


Figura A 3. Profundidad al nivel freático por condición climática.