

# VULNERABILIDAD, AMENAZA Y PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA REGIÓN DE BUCARAMANGA

---

**SULLY GÓMEZ ISIDRO**

*Doctora en Ingeniería*

*Directora Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático, GPH*

*Universidad Industrial de Santander*

*sgomez@uis.edu.co*

**FEISAN JOSÉ GUTIÉRREZ LOZANO**

*Ingeniero Civil*

*Ingeniero Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático, GPH*

*Universidad Industrial de Santander*

*fejogulo@hotmail.com*

**CARLOS MAURICIO TORRES**

*Ingeniero Civil*

*Especialista en Preservación Recursos Hídricos*

*Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga*

*carlos.torres@cdmb.gov.co*

*Fecha de recibido: 11/01/2011*

*Fecha de aprobación: 15/06/2011*

## RESUMEN

Se realizó el estudio de vulnerabilidad, amenaza y peligro en la contaminación del agua subterránea ubicada en los depósitos aluviales y formaciones sedimentarias, sobre las cuales se encuentra localizada la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, investigando las condiciones locales presentes tanto en hidrogeología, como en cargas contaminantes. La vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea presenta rangos que varían entre extremo y bajo, la amenaza se encontró entre rango alto a bajo, y el peligro a la contaminación se encontró entre extremo y bajo, lo cual permite llamar la atención sobre medidas correctivas y preventivas en las zonas identificadas como de alto peligro. Se utiliza sistemas de información para manejar los parámetros anteriores, los respectivos mapas y obtener mediante operaciones numéricas el mapa final de peligro. Los productos obtenidos pueden ser utilizados por las entidades territoriales en planes de manejo y toma de decisiones para preservar este recurso subterráneo.

**PALABRAS CLAVES:** Acuíferos, Amenaza, Peligro, Vulnerabilidad, Hidrogeología.

## ABSTRACT

Contamination hazard, risk and vulnerability assessment in alluvial deposits and sedimentary rock formation was carried out, where Bucaramanga city and its metropolitan area are located, researching on present local conditions, either hydrogeology as in contaminant charges. Groundwater has been identified as alternative research in this region. The information needed for applying methodologies in assessment of vulnerability, hazard and risk, was given by region's territorial entities. This information was used to make an inventory of every potentially contaminant charges generating sources to the groundwater, which come to generate a range from low to high hazard and risk between low and extreme for groundwater. As final result vulnerability, hazard and risk maps will be obtained. It is wanted to apply the results for making decisions.

**KEYWORDS:** Groundwater, Hazard, Underwater, Vulnerability, Risk.

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad del recurso hídrico subterráneo en Bucaramanga es de interés para los diferentes entes gubernamentales de la región, debido al incremento en el uso de este recurso durante los últimos años, especialmente en actividades industriales, lavaderos de carros, estaciones de servicios y otros. En este trabajo se estudia la vulnerabilidad, amenaza y peligro en la contaminación de las aguas subterráneas, con el fin de identificar sitios y actividades que se convierten en posibles fuentes de contaminación. Los mapas de vulnerabilidad, amenaza y peligro obtenidos en la zona de estudio, son requisitos esenciales para la protección de los recursos hídricos subterráneos debido a que pueden identificar las actividades humanas que tienen mayor probabilidad de generar impactos negativos sobre los acuíferos y los sitios que presentan estos problemas. Estos productos pueden indicar la necesidad de medidas de control y mitigación, por lo tanto ser una herramienta a utilizar por la autoridad ambiental en tomas de decisiones.

La zona de estudio se observa en la Figura 1 y se conoce como la zona aluvial y sedimentaria de Bucaramanga, la cual se define como el área comprendida por la divisoria Sur-occidental y Nor-occidental de la Cuenca Superior del Río Lebrija; se encuentra contenida la mesa de Ruitoque y municipios de Girón, Floridablanca y Piedecuesta. Además se incluye una pequeña parte del Macizo de Santander, al Oriente de Bucaramanga, donde se localizan algunos barrios de la ciudad, de los cuales proviene parte de la recarga a los acuíferos aluviales [1]. El área de trabajo abarca aproximadamente 400 Km<sup>2</sup>, en la cual se encuentra una población cercana a los 1'300.000 habitantes, esta región hace parte de la Cuenca Superior del Río Lebrija.



**Figura 1.** Localización del área de trabajo enmarcada dentro de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL). Se observan la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, en color negro sólido.

El agua subterránea en la ciudad de Bucaramanga se da a conocer por primera vez en forma técnica, cuando la CDMB (Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga) inicia los estudios de niveles freáticos, con el fin de proteger los taludes de las escarpas norte y occidental de la ciudad hacia la década de los años setenta. Esta entidad ha construido diferentes obras civiles para el abatimiento de los niveles freáticos y ha iniciado proyectos de manejo y control del agua subterránea. Posteriormente se han realizado investigaciones en identificación de recargas y modelos conceptuales de flujo [2] que han permitido el desarrollo del presente trabajo.

Se desarrolla la adaptación de metodologías ampliamente reconocidas a las condiciones locales. En este caso se utiliza la metodología GOD, la cual se aplica para obtener el mapa de vulnerabilidad y la metodología del Índice de Carga Contaminante (ICC) para obtener el mapa de amenaza. El mapa de peligro se obtiene mediante la superposición de los dos productos anteriores. El ajuste de rangos en este mapa se realiza a través de la matriz de interacción Vulnerabilidad-ICC [3].

Los mapas de vulnerabilidad, amenaza y peligro se obtienen mediante el uso de la herramienta computacional ArcGIS 9, el sistema de georeferenciación utilizado fue Magna Sirgas, sistema actualmente utilizado y recomendado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, los resultados se presentan en formato Raster para el cual se utilizaron píxeles de tamaño 30x30 metros [4]. La cartografía utilizada en este trabajo corresponde a la escala 1:25000.

## 2. METODOLOGÍA

Desde que Margat [5] propuso el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”, se han propuesto numerosas definiciones, calificaciones y metodologías sobre el mismo, en muchos casos orientados a su representación cartográfica [6]. En este trabajo el término de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos se utiliza para representar las características intrínsecas que determinan la sensibilidad del acuífero a ser adversamente afectadas por una carga contaminante impuesta [7].

Las metodologías ampliamente conocidas y aplicadas para evaluar la vulnerabilidad mediante factores o índices (llamados sistemas paramétricos), son el Método GOD creado por Foster e Hirata, 1987 y adoptado por la Organización Panamericana de la Salud para enfrentar

los problemas de contaminación de aguas subterráneas que afronta la Región de América Latina y el Caribe, y el Método DRASTIC creado por Aller *et al.* en 1987 y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Ambos métodos han sido ampliamente utilizados en diferentes países [8]. En este trabajo se utiliza el Método GOD debido a que utiliza valores de profundidad de acuíferos más adecuados con los existentes en la zona de estudio.

El termino amenaza o carga contaminante se refiere a todas aquellas actividades antrópicas o generadas por el hombre, las cuales 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 [9]. La amenaza o carga contaminante se encuentra presente en cada una de las actividades generadoras de contaminación y se expresa como un índice de carga contaminante (ICC).

El peligro de contaminación de un acuífero se considera como la probabilidad de que este tenga impactos negativos producidos por una actividad antrópica, hasta un nivel donde la calidad del agua se vuelve inaceptable para el consumo humano. El peligro se puede determinar mediante la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad natural que presenta un acuífero a la contaminación [9]. A continuación se presentan las metodologías utilizadas para obtener la valoración de los conceptos de vulnerabilidad, amenaza y peligro.

## 2.1 VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

Las formaciones geológicas donde se encuentran localizados los acuíferos (formaciones geológicas que almacenan agua), presentan condiciones físicas que defienden y retardan la entrada de un contaminante al suelo, es decir los acuíferos tienen una capacidad de atenuación. La llamada zona no saturada, la cual se extiende desde la superficie del suelo hasta el nivel de agua de los acuíferos, se constituye en una especie de “colchón” a un contaminante, el cual tiene mayor o menor efecto dependiendo de sus condiciones y dimensiones físicas. Los controles a la contaminación se deben realizar de acuerdo con esta capacidad de atenuación, la cual se expresa en forma de índices de vulnerabilidad. Obtener los índices o grados de vulnerabilidad de los acuíferos en una región en forma de mapa, es el primer paso para evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea.

El método GOD [6] establece la vulnerabilidad relativa como la interacción entre la inaccesibilidad hidráulica del acuífero y la capacidad de atenuación del medio. Estos factores no se pueden medir directamente, por lo tanto se trata de hacer una simplificación a partir de la caracterización de tres factores principales, distancia del agua, ocurrencia del agua subterránea y sustrato litológico, [7]

El índice de vulnerabilidad GOD caracteriza a la vulnerabilidad de la contaminación de acuíferos en función de la multiplicación de los siguientes parámetros:

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

G: Grado de confinamiento hidráulico del acuífero. Se refiere a la condición de confinamiento del acuífero y establece las siguientes categorías: no confinado, no confinado-cubierto, semiconfinados, y sin presencia de acuífero. La condición de confinamiento de los acuíferos es una función que interviene directamente en la vulnerabilidad natural del agua subterránea ante una contaminación potencial. En acuíferos confinados, el acceso de contaminantes es más restringido y en acuíferos libres, el acceso se encuentra menos restringido.

O: Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes). Este parámetro considera la zona que suprayace al acuífero en términos de su naturaleza litológica y grado de consolidación, lo cual determina su capacidad de atenuación.

D: Distancia al agua. Corresponde a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad al techo de la capa confinante en acuíferos confinados.

En esta metodología se presentan cinco clases de vulnerabilidad del acuífero [9] con el fin de definir en forma clara y concreta la vulnerabilidad, y contar con un igual nivel de comparación.

1. Vulnerabilidad extrema: El acuífero es vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
2. Vulnerabilidad alta: El acuífero es vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son frecuentemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
3. Vulnerabilidad moderada: El acuífero es vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.

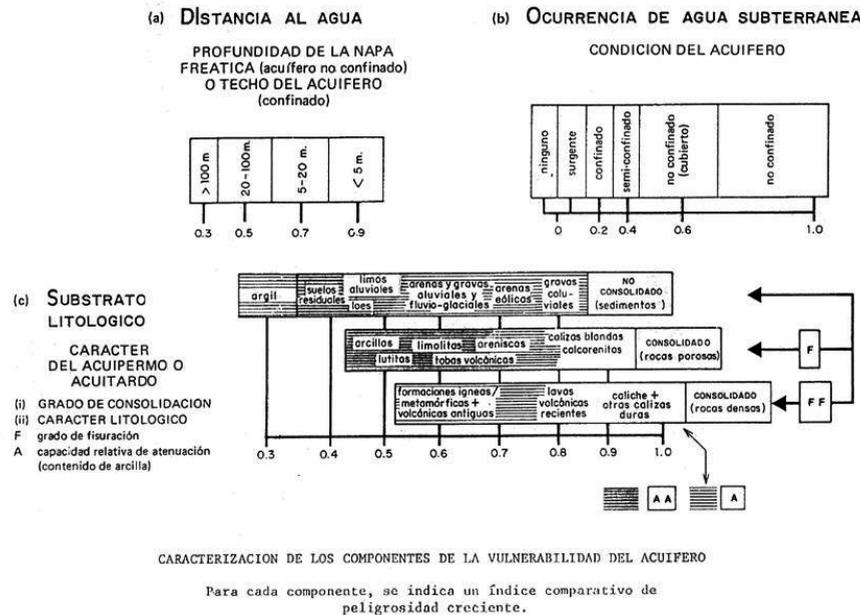
4. Vulnerabilidad baja: Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
5. Vulnerabilidad muy baja: El acuífero tiene presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

La metodología GOD da un puntaje a cada parámetro de acuerdo con su capacidad de atenuación. Una vez se ha valorado cada parámetro, se calcula 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. En la Figura 2 se observan los valores recomendados de los índices para los distintos parámetros.

Una vez se han definido los valores de cada parámetro, se realiza el producto presentado en la ecuación (1) y se obtiene el índice GOD, el cual expresa el grado de vulnerabilidad de los acuíferos. En la tabla 1 se observan las categorías de vulnerabilidad utilizadas por esta metodología, cuyos valores numéricos varían entre 0 y 1.

**Tabla 1.** Categorías de Vulnerabilidad dadas en GOD

GRADO DE VULNERABILIDAD	GOD
Vulnerabilidad Muy baja	0 – 0.1
Vulnerabilidad Baja	0.1 – 0.3
Vulnerabilidad Moderada	0.3 – 0.5
Vulnerabilidad Alta	0.5 – 0.7
Vulnerabilidad Extrema	0.7 - 1



**Figura 2.** Valores de índices en metodología GOD [7].

Los parámetros del grado de confinamiento del acuífero, ocurrencia del sustrato confinante y distancia del agua deben ser estudiados y evaluados en cada uno de los sistemas de acuíferos presentes en una región para aplicar la metodología anterior.

**2.2 EVALUACIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE EN ACUÍFEROS**

El termino contaminación se refiere a la incorporación de sustancias capaces de afectar la calidad del agua subterránea afectando la salud del hombre, la calidad

de vida o el funcionamiento natural del ecosistema. [9]. La mayor sensibilidad a la contaminación de acuíferos, la presentan los acuíferos no confinados o libres, especialmente en regiones donde la zona no saturada es delgada y el nivel freático poco profundo [3].

El peligro de contaminación de los acuíferos ocurre cuando interactúan la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero.

Se considera que la carga contaminante ocurre en el subsuelo y se genera como resultado de las actividades

humanas, (la carga contaminante se obtiene a partir de inventarios y recolección de información de actividades que generan cargas contaminantes al subsuelo). Esta tiene cuatro características fundamentales: La clase de contaminante involucrado, la intensidad de la contaminación, el modo como se descarga el contaminante en el subsuelo y la duración de aplicación de la carga contaminante. La suma de estas características expresa un valor de índice de carga contaminante, cada una de ellas se formulan utilizando valores relativos y coeficientes de importancia, como se puede ver en la ecuación (2).

$$ICC = VRC * CIFIC + VRI * CIFI + VRM * CIFM + VRT * CIFT \quad (2)$$

En donde VRC, VRI, VRM y VRT, son valores relativos que van desde 0 hasta 1, y se obtienen mediante valoración de las características anteriores, según se muestra en las Figuras 3, 4, 5 y 6. Los coeficientes CIFIC, CIFI, CIFM y CIFT, son coeficientes de importancia de las características anteriores.

Los coeficientes de importancia de cada característica utilizados en este trabajo, toman los siguientes valores: 0.30 para la clase contaminante, 0.25 para la intensidad de la contaminación, 0.21 para el modo de disposición y 0.24 para el tiempo de aplicación [10].

El índice de carga contaminante obtenido en (2) toma valores entre 0 y 1, definidos por las siguientes categorías: índice bajo de amenaza, si el rango se encuentra entre 0 y 0.30, índice moderado de amenaza entre 0.31 y 0.60, e índice alto de amenaza valores entre 0.61 y 1.0.

Cada una de las cuatro características anteriores, se encuentra relacionada en función de diversos factores presentes en la carga contaminante, que influyen en su valor relativo:

*La clase de contaminante involucrado:* Está definida por su tendencia hacia la degradación o transformación del contaminante, como resultado de actividades bacteriológicas o reacciones químicas. También expresa su tendencia hacia el retardo, con respecto al flujo de agua subterránea, como resultado de procesos de intercambio de cationes, sorción, etc. [11]. Para definir

la clase de contaminante se utiliza la Figura 3, [7], la cual expresa el valor relativo VRC en la ecuación (2)

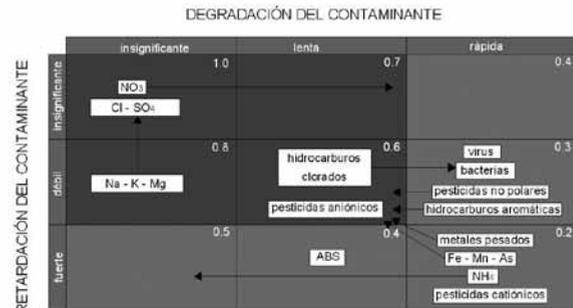


Figura 3. Valoración de la clase de contaminante.

*La intensidad del contaminante:* Se define como la concentración relativa de cada contaminante involucrado, en relación con los valores recomendados por la OMS (Organización Mundial de la Salud) para definir la calidad del agua potable y la proporción de la recarga local del agua subterránea afectada por la contaminación. El valor relativo VRI que aparece en la ecuación (2) se obtiene utilizando la Figura 4.

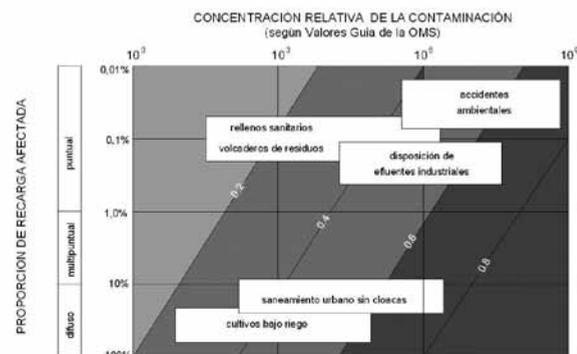
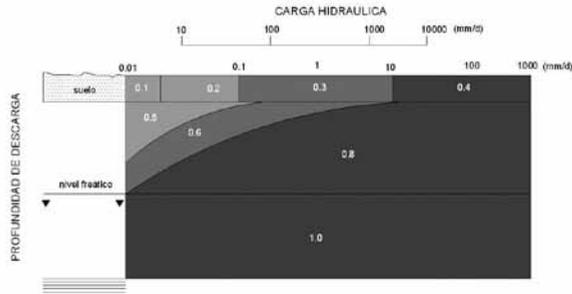


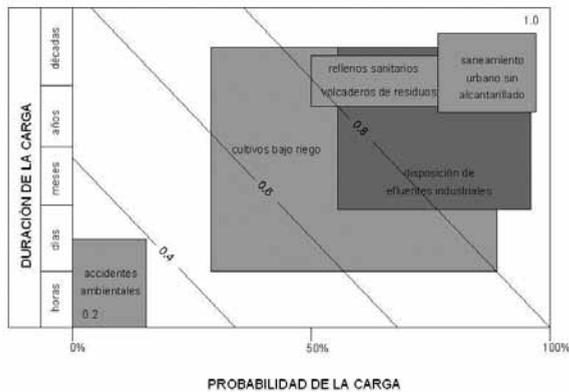
Figura 4. Valoración de Intensidad del contaminante.

*El modo de disposición del contaminante al subsuelo:* Está definido por la carga hidráulica asociada al contaminante, incluyendo infiltración natural de la lluvia y la profundidad bajo superficie a la que el efluente es descargado o donde la lixiviación de residuos sólidos ocurre. Cerca o en el nivel freático la característica toma el valor máximo y va disminuyendo hasta presentar los valores mínimos en la superficie, donde se supone el contaminante está mas alejado del nivel freático. La Figura 5, permite estimar el valor relativo VRM de la ecuación (2).



**Figura 5.** Valoración del modo de disposición del contaminante.

*La duración de aplicación de la carga contaminante:* Se define como la probabilidad de que la carga contaminante sea descargada al subsuelo y el periodo de tiempo durante el cual es aplicada. La Figura 6, permite expresa el valor relativo VRT de la ecuación (2).



**Figura 6.** Valoración de la duración de aplicación de la carga contaminante.

Los índices de carga contaminante se obtienen a partir de las diversas actividades que generan carga contaminante y de las calificaciones que se dan a cada una de las características anteriores. Los índices de las características definen los diferentes valores de amenaza.

**2.3 EVALUACIÓN DEL PELIGRO**

El peligro se calcula realizando la interacción de los productos que se obtienen de vulnerabilidad y amenaza.

En los mapas obtenidos de vulnerabilidad y amenaza, cada pixel tiene un valor, por tanto se puede realizar la superposición y operación de los mapas respectivos. El Índice de Carga Contaminante (ICC) y la vulnerabilidad,

se construye cruzando los diferentes atributos de estas dos variables mediante operación de matrices, como se muestra en la Tabla 2 [3].

**Tabla 2.** Matriz de interacción ICC- Vulnerabilidad.

Amenaza	Vulnerabilidad				
	E	A	M	B	MB
ICC Alto	E	A	A	M	B
ICC Moderado	A	A	M	B	MB
ICC Bajo	A	M	B	B	MB

Donde el peligro se expresa como: E= Extremo; A= Alto; M= Moderado; B=Bajo B y MB= Muy bajo.

El procedimiento realizado en esta matriz se adaptó al software ArcGIS 9.3, logrando con esta herramienta, la superposición de los productos obtenidos entre la vulnerabilidad y la amenaza, dando como resultado el mapa de peligro.

Para que el sistema de información pueda interpretar los valores de esta matriz se asignaron valores, tanto para los diferentes grados de vulnerabilidad como de amenaza y así poder realizar un cálculo numérico dentro del software.

A los grados de vulnerabilidad se le asignaron los siguientes valores; un valor de 500 para Extremo, de 400 para Alto, 300 para Moderado, 200 para Bajo y 100 para Muy Bajo. A los índices de amenaza, un valor de 1 para el índice de Amenaza Baja, un valor de 2 para el índice de Amenaza Moderada, y un valor de 3 para el índice de Amenaza Alta.

Para lograr el ajuste de la matriz, a cada valor de vulnerabilidad dado, se le multiplicó por un factor de ajuste dependiendo de su importancia; Ej. Vulnerabilidad MB (Muy baja) le correspondió 0.5, al B (Baja) 1.0, al M (Moderada) 1.5, el A (Alta) 2 y el E (Extrema) 2.5, luego se procedió a realizar las multiplicaciones de filas por columnas como se muestra en la tabla 3, [12].

**Tabla 3.** Matriz de peligro para referenciar en ArcGIS.

Amenaza	Vulnerabilidad				
	1250 <sup>E</sup>	800 <sup>A</sup>	450 <sup>M</sup>	200 <sup>B</sup>	50 <sup>MB</sup>
3ICC Alto	3750 <sup>E</sup>	2400 <sup>A</sup>	1350 <sup>A</sup>	600 <sup>M</sup>	150 <sup>B</sup>
2ICC Moderado	2500 <sup>A</sup>	1600 <sup>A</sup>	900 <sup>M</sup>	400 <sup>B</sup>	100 <sup>MB</sup>
1ICC Bajo	1250 <sup>A</sup>	800 <sup>M</sup>	450 <sup>B</sup>	200 <sup>B</sup>	50 <sup>MB</sup>

Con estos parámetros obtenidos se definieron los rangos de peligro para la región de estudio como se observa en la tabla 4.

**Tabla 4.** Rangos establecidos para la clasificación del peligro.

ÍNDICE DE PELIGRO	RANGO
Muy Bajo	0-100
Bajo	101-500
Moderado	501-1000
Alto	1001-3000
Extremo	>3000

El mapa de peligro para la zona de estudio se obtuvo finalmente mediante la interpretación de estos rangos y valores manejados en sistemas de información geográfica.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

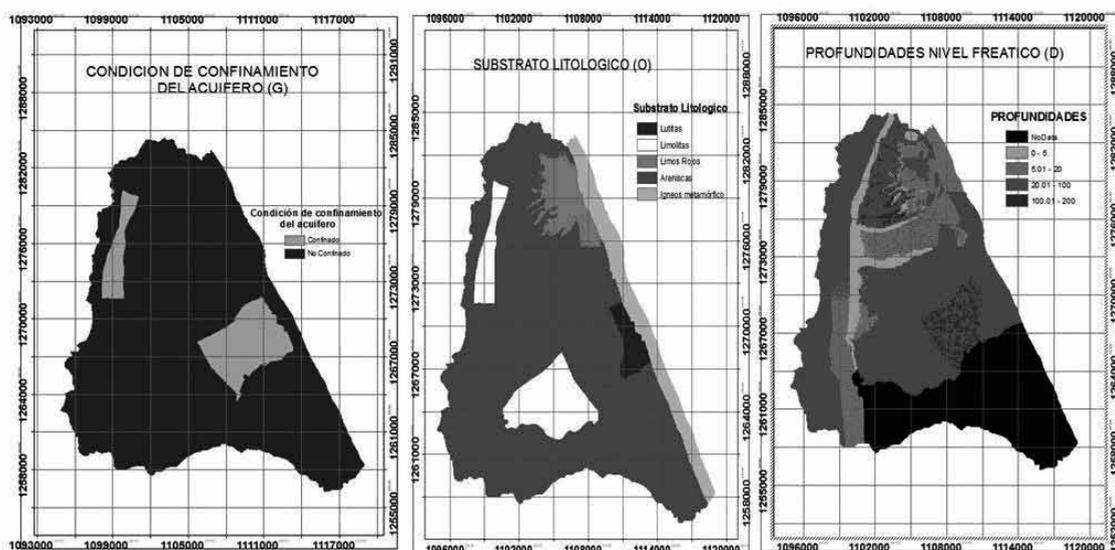
La definición de las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos de la región de Bucaramanga y la identificación de las diversas actividades que son fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea, permiten la aplicación de las metodologías mencionadas en los numerales anteriores, con las cuales se logra obtener los mapas de vulnerabilidad, amenaza y peligro de la contaminación del agua subterránea, exponiendo los sitios en donde el peligro puede llegar a resultar extremo, alto o moderado. Los mapas expresan

la distribución espacial de valores de vulnerabilidad, amenaza y peligro en la región. Los mapas se presentan en formatos digitales de celdas de 30x30 metros, extraídas de modelos digitales del terreno (tipo raster) desde imágenes del satélite Landsat, en las que se apoya el sistema de referencia Magna Sirgas en remplazo del datum clásico Bogotá.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada mapa y la interpretación de los resultados para cada uno de los conceptos que implica la obtención del peligro de la contaminación del agua subterránea en la región de Bucaramanga.

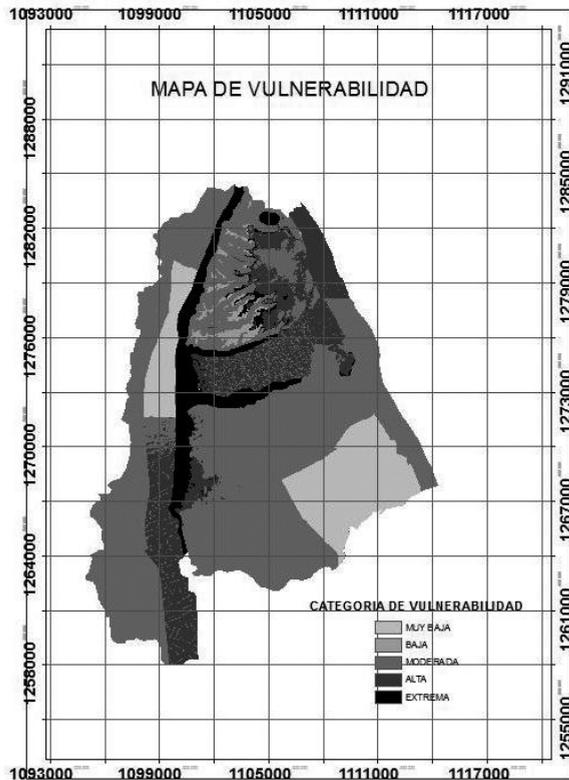
#### 3.1 MAPA DE VULNERABILIDAD

El mapa de vulnerabilidad se obtuvo mediante la aplicación de la metodología GOD, partiendo del conocimiento de las diferentes unidades hidrogeológicas y de un modelo conceptual de flujo que refleja la existencia de acuíferos superficiales y profundos tanto en formaciones aluviales como sedimentarias, [2]. Se incluyeron acuíferos libres en las zonas aluviales y en cuaternarios en contacto con ríos, así como acuíferos confinados en las zonas sedimentarias. La profundidad del nivel freático en acuíferos en contacto con ríos y a lo largo de ellos, fue considerada muy baja. En la zona aluvial y sedimentaria de Bucaramanga se identificaron las condiciones para cada parámetro (condición del acuífero, substrato litológico y profundidad del nivel freático), como se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Caracterización de Parámetros según Metodología GOD.

El Mapa de Vulnerabilidad mostrado en la Figura 8 se obtuvo a partir de la interpretación de los parámetros anteriores. En el área de estudio (incluye Bucaramanga y su área metropolitana) se presentan valores de vulnerabilidad que comprenden las siguientes categorías:



**Figura 8.** Vulnerabilidad en la zona aluvial y sedimentaria de Bucaramanga.

- Vulnerabilidad extrema: Se encuentran en esta categoría, los valles aluviales de los ríos de Oro y Frío, y Quebrada La Iglesia, el acuífero colgado de la escarpa norte y parte de las escarpas occidental y norte de la meseta de Bucaramanga, áreas donde el nivel freático es muy poco profundo (menor a los 5 m), esto corresponde a los sitios de afloramientos de aguas. También se encuentra vulnerabilidad extrema en el acuífero superficial de la Cumbre. Estas zonas corresponden a acuíferos de condición libre, los cuales resultan vulnerables a la mayoría de los contaminantes con un impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
- Vulnerabilidad alta: Se evidencia en zonas con cambio de profundidad del nivel freático a un valor mayor de los asumidos por la vulnerabilidad
- Vulnerabilidad moderada: En la zona de estudio abarca la mayor parte del área, los parámetros de mayor influencia son la condición de acuífero libre y la profundidad del nivel freático (entre 20 y 100 m). Donde el Acuífero Profundo de Bucaramanga se encuentra en contacto directo con la superficie, la profundidad del nivel freático le da una vulnerabilidad moderada a alta. Aquí se incluyen los acuíferos formados en los bloques sedimentarios fracturados, bajos de Ruitoque, Palonegro y Bloque sedimentario Fracturado del Piedemonte, los cuales presentan valores aceptables de permeabilidad secundaria. El acuífero profundo de Bucaramanga en algunas zonas se encuentra protegido medianamente el acuífero superficial, sin embargo la comunicación entre ellos facilita el transporte de contaminantes y este es un tema que debe ser considerado en estudios futuros.
- Vulnerabilidad baja: El factor predominante es la alta profundidad que presenta el agua subterránea en algunas zonas del acuífero profundo de Bucaramanga, lo cual aparentemente la protege de la contaminación, sin embargo, aquí podría estar influyendo también la presencia de algunos paleocanales que pueden facilitar flujos más superficiales, pero que no han sido estudiados con detalle. Estos acuíferos son solo vulnerables a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
- Vulnerabilidad muy baja: El factor que predomina es la condición de acuífero confinado, el cual se presentan en algunas zonas de la formación Girón

extrema y presentan condición de acuíferos libres. Esta vulnerabilidad se observa en las áreas del acuífero superior de Bucaramanga, en el paso de las escarpas norte y occidental, hacia el área central del acuífero (parte central de la ciudad). Igualmente se observa hacia el oriente de la ciudad, los acuíferos de la Cumbre, el Reposo, el área comprendida entre la Quebrada La Iglesia, el Río Frío y hacia la zona meteorizada y fracturada de la Falla de Bucaramanga se incluyen en esta vulnerabilidad, así como una franja localizada hacia el sur occidente, donde se encuentran asentados algunos barrios cercanos a Girón, zona de Palogordo y Llanogrande. Estos acuíferos resultan vulnerables a muchos contaminantes en muchos escenarios de contaminación.

y Jordán. Sector occidental y sector sur oriental. Sin embargo, zonas con esta condición deben ser analizadas con cuidado debido a que cuenta con escasa información.

### 3.2 MAPA DE AMENAZA

Para realizar el mapa de amenaza, se utilizó la metodología propuesta por Foster e Hirata [11], en el cual se propone la identificación de las actividades que pudieran llegar a convertirse en potencial contaminante para la calidad de las aguas subterráneas, posteriormente se realizó una caracterización de cargas contaminantes significativas en la zona de estudio, mediante recolección de información y revisión de inventarios de actividades generadoras de contaminación, obteniendo con esto un índice de carga contaminante, el cual es el indicador de la amenaza.

Según su distribución espacial las fuentes de contaminación se pueden clasificar como puntuales y difusas. Las fuentes de contaminación difusas son aquellas que no presentan plumas de contaminación definidas, sino que afectan un área del acuífero, causando que su identificación y control sea más difícil. En la tabla 5 se presentan las actividades identificadas en la zona de Bucaramanga como fuentes potenciales de contaminación difusa, la información fue suministrada por la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, (CDMB).

**Tabla 5.** Actividades de contaminación difusa en la región de Bucaramanga.

ACTIVIDAD CONTAMINANTE	AREA DE AFECTACION (Has)	FUENTE
Cultivos Agrícolas	10921.5	Plan de ordenamiento ambiental microcuena Rio de Oro (CDMB).
Zonas urbanas con redes de alcantarillado	6696.6	Plan de ordenamiento ambiental microcuena Rio de Oro (CDMB).

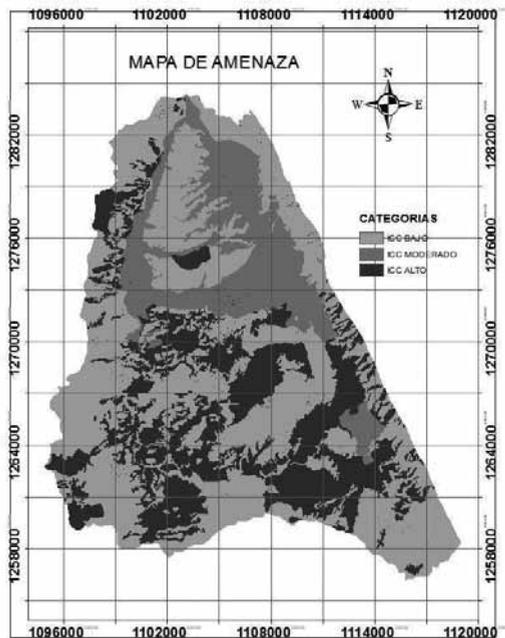
Las fuentes de contaminación puntual, generan plumas de contaminación definida, las cuales permiten que el proceso de identificación y a su vez de control, sea

más fácil. En la tabla 6 se muestran las actividades generadoras de contaminación puntual en la región de Bucaramanga. Información suministrada por la CDMB y la Empresa Pública de Alcantarillado de Santander (EMPAS).

**Tabla 6.** Actividades de contaminación puntual en la región de Bucaramanga.

ACTIVIDAD CONTAMINANTE	NÚMERO DE PUNTOS	FUENTE
Pozos sépticos	740	Listado solicitudes de pozos sépticos (CDMB).
Concesiones de aguas	56	Listado de concesiones de aguas subterráneas (CDMB).
Vertimientos de alcantarillados	31	Puntos de Vertimientos del área metropolitana de Bucaramanga (EMPAS).
Relleno sanitario el Carrasco	1	Relleno Sanitario área Metropolitana de Bucaramanga (CDMB).
Estaciones de Servicio	51	Estaciones de Servicio en el área metropolitana de Bucaramanga (CDMB).
Granjas Avícolas	195	Listado de Granjas Avícolas (CDMB).
Granjas porcícolas	75	Listado de Granjas Porcícolas (CDMB).
Cementerios	4	Cementerios de Bucaramanga, Girón y Piedecuesta. (CDMB).

En la figura 9, se presenta el mapa de amenaza en la zona aluvial y sedimentaria de Bucaramanga, donde se muestran las categorías Bajo, Moderado y Alto del índice de carga contaminante.



**Figura 9.** Mapa de Amenaza a la Contaminación de las Aguas Subterráneas la zona aluvial y sedimentaria de Bucaramanga.

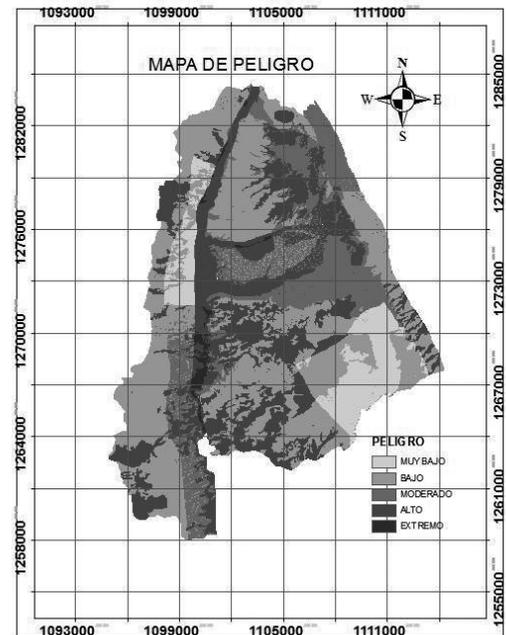
En el mapa de amenaza se observan categorías que van desde una Amenaza Alta, hasta una Amenaza Baja. La zona donde se presenta amenaza alta se observa en forma dispersa, esto se debe a una contaminación difusa generada por las actividades agrícolas capaces de generar cargas de contaminación alta, por la cantidad de fertilizantes poseedores de nitratos, irrigados a lo largo de estas zonas. Por otra parte las zonas urbanas o residenciales presentan una amenaza moderada, que es generada por la infiltración que se crea a partir de fugas causadas por los años de deterioro en los sistemas de alcantarillado.

En estas zonas también se logra observar pequeños puntos de amenaza alta, esto se debe a la presencia de lavaderos de carros y cambios de aceite, ubicados en la zona urbana y que tienen pozos de aguas subterráneas, y los vertimientos se encuentran en contacto directo con el acuífero. Se observan grupos de puntos con amenaza alta, que son generados por el relleno sanitario El Carrasco, las granjas avícolas, porcícolas, sitios de accidentes ambientales y pozos sépticos.

La zona en donde la amenaza se presenta como baja, se debe a que en estos sitios no se identificó ninguna actividad que pudiera generar cargas potencialmente contaminantes.

### 3.3 MAPA DE PELIGRO

El mapa de peligro se realizó mediante la interacción o superposición entre los mapas de vulnerabilidad y amenaza. En la Figura 10, se observa el mapa de peligro de la región de Bucaramanga.



**Figura 10.** Mapa de Peligro a la Contaminación de las Aguas Subterráneas la zona aluvial y sedimentaria de Bucaramanga.

En el mapa de peligro se observan categorías que van desde peligro extremo, hasta peligro muy bajo. El peligro es extremo donde las condiciones hidrogeológicas presentan vulnerabilidad alta (formaciones aluviales sobre la que se localizan los principales ríos de la región). En estas zonas el contaminante que genera el peligro extremo es capaz de trasladarse o difundirse hacia todo el acuífero en contacto con estos puntos, por lo tanto es posible que las zonas de peligro extremo puedan abarcar áreas más extensas dentro del acuífero aluvial.

Las zonas en donde el peligro se presenta como extremo existen cultivos agrícolas, puntos de vertimientos de alcantarillados, vertimientos de industrias en el sector industrial de Chimitá y en el cementerio central ubicado en el casco urbano del municipio de Bucaramanga. También es visible en parte del relleno sanitario el Carrasco, en donde el acuífero es superficial y en algunas estaciones de servicio que tienen pozos de aguas subterráneas y entran en contacto con aceites

y lubricantes. En las zonas lejanas al sector urbano, el peligro extremo se presenta en sectores donde se desarrolla actividad pecuaria (porcícolas y avícola).

Las zonas en donde el peligro se muestra muy bajo corresponden a áreas pequeñas de la región de estudio que corresponden a acuíferos confinados y pocas actividades generadoras de contaminación.

#### 4. CONCLUSIONES

En la región de Bucaramanga, donde el agua subterránea ha llegado a ser un recurso importante, se aplicaron y adaptaron metodologías conocidas de evaluación de vulnerabilidad y valores de rangos de amenaza aplicados en el país a la contaminación de este recurso. Se hizo una adaptación a la matriz de peligro asignando coeficientes de importancia a los valores de vulnerabilidad para manejar los rangos en SIG celda por celda. La vulnerabilidad se estimó mediante la metodología GOD, la amenaza se obtuvo con la metodología de carga contaminante de Foster e Hirata [11] y mediante la operación de las matrices anteriores, celda por celda, se obtuvo el mapa de peligro a la contaminación del agua subterránea, el cual reconoce sitios y actividades generadoras de peligro.

En Bucaramanga la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos presenta todas las categorías, extrema, alta, moderada, baja y muy baja. El área de vulnerabilidad extrema se presenta en un 5.6% de la zona de estudio y la vulnerabilidad alta en un 13.32%, comprendiendo entre las dos una parte representativa de la región.

En el mapa de amenaza se encontraron categorías que van desde una amenaza Alta, hasta una amenaza Baja. Se observa amenaza alta en el 29.1% de la zona, en lugares donde se muestra una contaminación difusa generada por las actividades agrícolas capaces de generar cargas de contaminación altas, por la cantidad de fertilizantes poseedores de nitratos, irrigados a lo largo de estas zonas. Las zonas urbanas o residenciales presentan una amenaza Moderada, que es generada por la infiltración de fugas causadas por los años de deterioro en los sistemas de alcantarillado residuales y algunas pequeñas zonas urbanas presentan amenaza Alta debido al contacto de pozos subterráneos con contaminantes como aceites y lubricantes. Se observan grupos de puntos con amenaza Alta, que son generados por el relleno sanitario, El Carrasco, las granjas tanto avícolas como porcícolas, sitios de accidentes ambientales y la existencia de pozos sépticos.

Las zonas de peligro extremo aparecen en los sectores en donde la vulnerabilidad del acuífero se encontró en

categoría extrema y en estos lugares se encontraban actividades potencialmente contaminantes, entre estas actividades se encontraron con peligro extremo, áreas de cultivos agrícolas, vertimientos de alcantarillados del sector industrial, algunas estaciones de servicios y cementerios de Bucaramanga y área metropolitana. El contaminante que genera este peligro es capaz de trasladarse o difundirse hacia todo el acuífero en contacto con estos puntos, por lo tanto es posible que las zonas de peligro extremo puedan abarcar mayor área.

Los resultados encontrados durante este trabajo pueden ser utilizados como una primera herramienta para la toma de decisiones en planes de conservación y manejo del recurso hídrico subterráneo de la región aluvial y sedimentaria de Bucaramanga. En el futuro se requiere validar estos resultados con modelos de transporte de contaminantes y caracterización detallada de estos. Deben tomarse las medidas necesarias para que la amenaza de contaminación disminuya en zonas de alta vulnerabilidad y el recurso subterráneo sea adecuadamente preservado, considerando que la remediación de acuíferos es un proceso muy costoso. La preservación del recurso hídrico subterráneo debe realizarse en la región para el desarrollo de futuras generaciones.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

A Corporación por la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y a la Dirección de Investigación de la Facultad de Fisicomecánicas (DIEF), por apoyar el desarrollo de esta investigación y a la Empresa Pública de Alcantarillado de Santander (EMPAS), por brindar la información necesaria.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] Gómez, S. y Anaya, A., Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. Revista avances en recursos hidráulicos. No 11, 2004, pp. 37-50.
- [2] Gómez, S. y Colegial, J. D., Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el macizo de Santander e identificación de acuíferos. Informe Colciencias. Bucaramanga, Colombia. 2003.
- [3] Betancur, T., Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: El Bajo Cauca antioqueño. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. 2008.

- [4] Pérez, D. Elaboración de un modelo digital de elevaciones y generación de los mapas de vegetación y tipo de suelos de la cuenca superior del río Lebrija. Trabajo de grado ingeniería civil. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2010.
- [5] Margat, J., Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines á la pollution. Bases de la cartographie. BRGM No 68. SLG 198 HYD. Orleáns. 1968.
- [6] Auge, M., Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos. Universidad de buenos aires. 38p. 2004.
- [7] Foster, S. e Hirata, R., Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente. Lima, Perú. 1991.
- [8] Foster, S. Hirata, R. Gomes, D., et al, Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco mundial. Washington, D.C. 2002.
- [9] Henry, J.G. y Henke, G. W., "Ingeniería Ambiental". 2a ed. Prentice Hall. México. 1996.
- [10] Rueda, M. y Ángel, J., Propuesta metodológica preliminar para calificar la carga contaminante al subsuelo en un acuífero libre. IV Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: Protección de la calidad del agua. Lima, Perú. 2004.
- [11] Foster, S. e Hirata, R., Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas; una metodología basada en datos existentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente. Lima, Perú. 1988.
- [12] Gutiérrez, F. y Gualdrón, J., Amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la zona aluvial de Bucaramanga. Trabajo de grado ingeniería civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2010.
- [13] Gaviria, J. I., Identificación y clasificación de fuentes potenciales de contaminación del acuífero libre del bajo cauca antioqueño. Trabajo de grado ingeniería sanitaria. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2005.
- [14] Fetter, C.W., Contaminant hydrogeology. Prentice Hall. New jersey. 1999.
- [15] Gaviria, J. I. y Betancur, T., Una caracterización de carga contaminante a los acuíferos libres del Bajo cauca antioqueño. Revista gestión y ambiente. Vol. 8, No 2, 2005, pp. 85-102.
- [16] Gaviria, J.I. y Betancur, T., Avances metodológicos para evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Curso gestión del riesgo. Universidad de Antioquia. 2009.
- [17] Domenico, P. y Schwartz, F., Physical and chemical hydrogeology. John wiley and sons. United States of America. 1990.
- [18] Ríos, L. y Vélez, M. V., Vulnerabilidad a la contaminación, zona sur acuífero del valle del cauca, Colombia. Boletín ciencias de la tierra. No. 23. ISSN 0120-3630. 2008.
- [19] Ingeniería de suelos. Modelo hidrogeológico básico de Bucaramanga. 2002.