

DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE UN ACUÍFERO AL UTILIZAR ÁLGEBRA DE MAPAS EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Ethel Carolina Díaz Silva¹, Fabian Leonardo Yory Sanabria²

RESUMEN

En el desarrollo de estudios técnicos en los cuales se involucran variables relacionadas con información geográfica y diversos parámetros cuantitativos implícitos es susceptible el uso de técnicas de geoprocésamiento las cuales facilitan en gran medida la obtención de productos derivados. Para el caso del presente estudio, la obtención del Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación de un Acuífero utiliza la técnica denominada Álgebra de Mapas. En este proceso a cada parámetro cartografiado se le asignan valores numéricos para poder ser utilizado en una ecuación cuya solución será el producto derivado de interés, al final, dicho resultado numérico se reconvierte en polígonos delimitados de acuerdo a los valores resultantes obteniendo así la nueva cartografía.

PALABRAS CLAVE

Álgebra, mapa, vulnerabilidad, sig, acuífero, geoprocésamiento.

ABSTRACT

In the development of technical studies in which variables related with information geographical and diverse implicit quantitative parameters are involved are susceptible of being treated using technical of geoprocessing tools which facilitate in great measure the obtaining of derived products. For the case of the present study, the obtaining of the Map of Vulnerability to the Contamination of an Aquifer uses the technique denominated Algebra of Maps. In this process to each parameter mapped are assigned numeric values to be able to be used in an equation whose solution will be the derived product of interest, at the end, this numeric result is changed in polygons defined according to the resulting values obtaining this way the new cartography.

KEY WORDS

Algebra, map, vulnerability, gis, aquifer, geoprocessing.

Fecha de recepción del artículo: 22 de julio de 2008.

Fecha de aceptación del artículo: 28 de agosto de 2008.

¹ Ingeniera Geóloga UPTC Seccional Sogamoso, Docente Universidad Libre - Socorro. e-mail: ethelkdi@gmail.com

² Ingeniera Geólogo UPTC Seccional Sogamoso, Docente Universidad Libre - Socorro. e-mail: fabianyory@gmail.com

INTRODUCCIÓN

A escala mundial los recursos hídricos subterráneos, proporcionan la mitad del agua de abastecimiento para el consumo humano (UNESCO 1999).

En la región del Valle de Samacá -Cucaita-Sora el agua subterránea constituye no sólo una fuente para consumo humano sino también para riego de cultivos principalmente de cebolla. El Valle en cuestión tiene una extensión aproximada 270.65 km²; allí se presenta déficit hídrico gran parte del año, y los ríos y quebradas son de flujo esporádico, y existen en la zona varios tipos de acuíferos que son aprovechados por los habitantes a través de pozos aljibes y manantiales. De igual manera, en la zona de estudio existe un riesgo potencial de contaminación de las aguas subterráneas debido a la intensa actividad agrícola que se desarrolla, lo cual motivó a CORPOBOYACÁ a la implementación de un plan de protección, el que incluye la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos presentes.

El método utilizado para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, es el desarrollado por FOSTER, en 1987 denominado por las siglas en inglés GOD, que contempla los parámetros siguientes:

- G, Groundwater; Ocurrencia del Agua Subterránea.
- O, Overall; Sustrato Litológico.
- D, Depth; Profundidad del Agua Subterránea.

La Universidad Católica de Chile en 1996 y la C.V.C. en el mismo año y Corpoboyacá en el año 2000, han aplicado otro parámetro denominado por la sigla en inglés S (Soil), el cual tiene en cuenta las características texturales del suelo. Parámetro que también fue tenido en cuenta para la realización del presente estudio.

La vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero depende de factores propios del mismo y externos. De acuerdo a los alcances propuestos, en el presente estudio se evaluó la susceptibilidad a la contaminación teniendo en cuenta características propias de los acuíferos existentes frente a un contaminante universal, y no ante un contaminante o contaminantes específicos.

Los cálculos dispendiosos para la obtención del resultado del estudio se han simplificado mediante el uso de sistemas de información geográfica específicamente técnicas comúnmente denominadas de Álgebra de Mapas. Dicho procedimiento se explicará posteriormente sumado a un resumen de la información del estudio y resultados obtenidos.

1. FUNDAMENTOS DEL ESTUDIO. ANTECEDENTES

En el Valle de Samacá - Sora y Cucaita se presenta déficit hídrico gran parte del año, y los ríos y quebradas son de flujo esporádico, por lo tanto el agua superficial no abastece la demanda requerida para los diferentes usos. Debido a esto los habitantes del sector han tenido que recurrir a diferentes métodos para poder suplir las necesidades de agua como son la construcción de aljibes y pozos profundos.

Según las diferentes características litológicas de terreno como son la presencia de depósitos conformados por niveles permeables de arenas finas y gruesas, por areniscas arcillosas y altamente fracturadas, y arcillolitas y lutitas; se hace posible que se lleve a cabo el proceso de infiltración, determinando así la existencia de acuíferos, que asociados a las actividades agrícolas, generan un riesgo potencial de contaminación. Dentro del programa de protección de acuíferos que adelanta CORPOBOYACÁ, para definir el riesgo se requiere inicialmente conocer el grado de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, por consiguiente se debe contar con esta información que será indispensable para formular el Plan de Protección de los Acuíferos de la zona.

2. OBJETIVOS

2.1 General

Elaborar una evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos del Valle de Samacá -Cucaita-Sora.

2.2 Específicos

- Hacer una caracterización litológica de las diferentes unidades de roca aflorantes en la zona, desde el punto de vista de su composición, grado

de fracturamiento y consolidación de tal manera que sirva como insumo para la técnica a utilizar en el estudio.

- Evaluar las características texturales de los suelos presentes en el área de estudio acorde a la implementación de la técnica GODS.
- Realizar la caracterización hidrogeológica de las diferentes formaciones geológicas presentes y tomar como base la información geológica, hidrogeológica e hidrológica de estudios anteriores y recolectados en campo.
- Realizar el levantamiento de los niveles freáticos y piezométricos de los principales acuíferos existentes en la zona.
- Zonificar los suelos de acuerdo a su textura, a partir de las características de los suelos presentes en la zona de estudio.
- Utilizar la técnica de Algebra de Mapas para determinar la Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos.

3. METODOLOGÍA

- Recopilación de Información Básica: estudios bibliográficos existentes en entidades como CORPOBOYACÁ, Gobernación de Boyacá, U.P.T.C. y Alcaldías.
- Trabajo de Campo y Toma de Datos: levantamiento geológico y de las unidades litoestratigráficas aflorantes; caracterización hidrogeológica considerar características como la composición litológica, grado de consolidación y nivel de fracturamiento para así determinar el tipo de porosidad en el que se clasifican las rocas (primaria o secundaria) y permeabilidad.
- Inventario de los Pozos, Aljibes y Manantiales: haciendo énfasis en la toma de niveles y en el uso actual del agua recopilando la mayor información posible sobre pruebas de bombeo de pozos realizadas en estudios anteriores en la zona (caudal, nivel estático, profundidad y permeabilidad), con el fin de determinar las características hidráulicas de los acuíferos de la zona.

- Levantamiento de los niveles freáticos y piezométricos: mediciones en los diferentes puntos de agua con ayuda de una sonda eléctrica.
- Caracterización o análisis textural de los suelos.
- Implementación de datos primarios en el Sistema de Información Geográfica.
- Elaboración del Algoritmo para aplicación con Algebra de Mapas.
- Presentación de Resultados.

La caracterización hidrogeológica permitió establecer el parámetro "G", que es el de ocurrencia de agua.

El levantamiento de las unidades litoestratigráficas, con sus diferentes características y los datos adquiridos como grado de arcillosidad, de fracturamiento y consolidación determinó "O", que es el parámetro de sustrato litológico.

El levantamiento de los niveles de agua (nivel freático y piezométrico), permitió obtener "D", que es el de profundidad de agua.

La caracterización de los suelos a través del análisis de textura, arrojó como resultado el parámetro "S" del presente estudio.

Se evaluó en forma detallada cada uno de estos parámetros y a partir de la metodología definida basada en FOSTER 1987, y junto con el parámetro del suelo, y procesando cada una de estas variables bajo un SIG se obtuvo el primer mapa de vulnerabilidad.

El SIG procesó los datos de acuerdo a los valores, que se adoptaron de este método y se generó el mapa de vulnerabilidad final; el cual determinó, áreas de vulnerabilidad alta, moderada, baja, muy baja y nula.

4. VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

La vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación se establece por la facilidad, con la cual ingresan las sustancias contaminantes al acuífero mediante infiltración a través del suelo y la zona no saturada (ZNS).

Foster (1987) sugiere que la definición más confiable de la "vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos" debe ser la medida de:

- El grado de inaccesibilidad de los contaminantes a través de la zona no saturada de un acuífero.
- El grado de atenuación a la contaminación que posean los estratos de la zona no saturada (retención o reacción fisicoquímica).

Así, la susceptibilidad de los acuíferos a la contaminación, se considera como una función de las propiedades intrínsecas del suelo y del estrato litológico que comprende la zona no saturada³. Estas propiedades son relativas, no medibles y adimensionales, y su evaluación se realiza al admitir que es un proceso dinámico.

La vulnerabilidad es intrínseca de acuerdo a las características hidrogeológicas del terreno y específica si se tienen en cuenta otros factores como la climatología o el propio contaminante en sí; desde otro punto de vista la vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas subterráneos, depende de la sensibilidad de los acuíferos, entender por sensibilidad de acuíferos como la relativa facilidad con que un contaminante (en este caso un plaguicida) aplicado sobre o cerca de la superficie, puede migrar hasta el acuífero de interés. La sensibilidad así entendida, depende de los materiales geológicos en cuestión, no de las prácticas agronómicas o las características de los plaguicidas (USEPA, 1993) y de las acciones del hombre o naturales que alteran sus condiciones de equilibrio.

Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace que unas áreas sean más susceptibles que otras, por esto existen zonas de mayor o menor sensibilidad. Con esto es posible determinar la vulnerabilidad en forma relativa en un área de estudio.

4.1 MÉTODO DEL ÍNDICE "GOD"

La metodología GOD, desarrollada por Foster (1987), aplica los siguientes parámetros evaluados:

- **Groundwater:** Se refiere a la condición de confinamiento del acuífero.
- **Overall:** Este parámetro incluye una caracterización global de la zona que subyace el acuífero, en cuanto a la naturaleza litológica (arcillosidad), al grado de consolidación y el fracturamiento de la roca.
- **Depth:** Profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante, en acuíferos cautivos.

El sistema de indexación de parámetros "GOD", Foster 1987, plantea escalas de valores para los 3 de los principales elementos que condicionan la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, de acuerdo al papel que desempeñan en los procesos de atenuación, transformación y transporte de contaminantes en el subsuelo.

En el método GOD, se han establecido valores numéricos para cada uno de los parámetros anteriores, de acuerdo con su contribución en la defensa de los acuíferos a la contaminación. 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.

El grado de vulnerabilidad, se determina multiplicando los valores asignados a cada parámetro, obteniéndose índices totales entre 0 y 1, donde el cero "0", representa un grado de vulnerabilidad despreciable y el "1" la máxima vulnerabilidad a la contaminación⁴.

4.2 Método de Indexación "GODS"

Este método, utiliza los tres parámetros básicos planteados por FOSTER 1987, para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación; este método fue modificado por la Universidad Católica de Chile 1996 donde introduce el parámetro S que tiene en cuenta las características texturales de los suelos, definidas con criterio agrológico.

³ C.V.C. Determinación del Riesgo de Contaminación de la Aguas Subterráneas en el Valle Geográfico del Río Cauca.

⁴ Ibidem.

El método define escalas numéricas que califican cuantitativamente cada parámetro, de acuerdo con su contribución en la protección de las aguas subterráneas: Estas escalas van del cero al uno, siendo menores los valores, cuanto menor sea la posibilidad de ingreso del contaminante al acuífero.

Para este estudio se determinaron valores de vulnerabilidad de acuerdo a los cambios adoptados por CORPOBOYACÁ (ver Figura 1).

El factor del suelo es un parámetro esencial que considera la capacidad de atenuación y el grado de erosión del suelo. Estableciendo esta ecuación.

$$\text{Grado de Vulnerabilidad} = G \cdot O \cdot D \cdot S$$

Debido a las características de la zona de estudio, se escogió dicho método para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

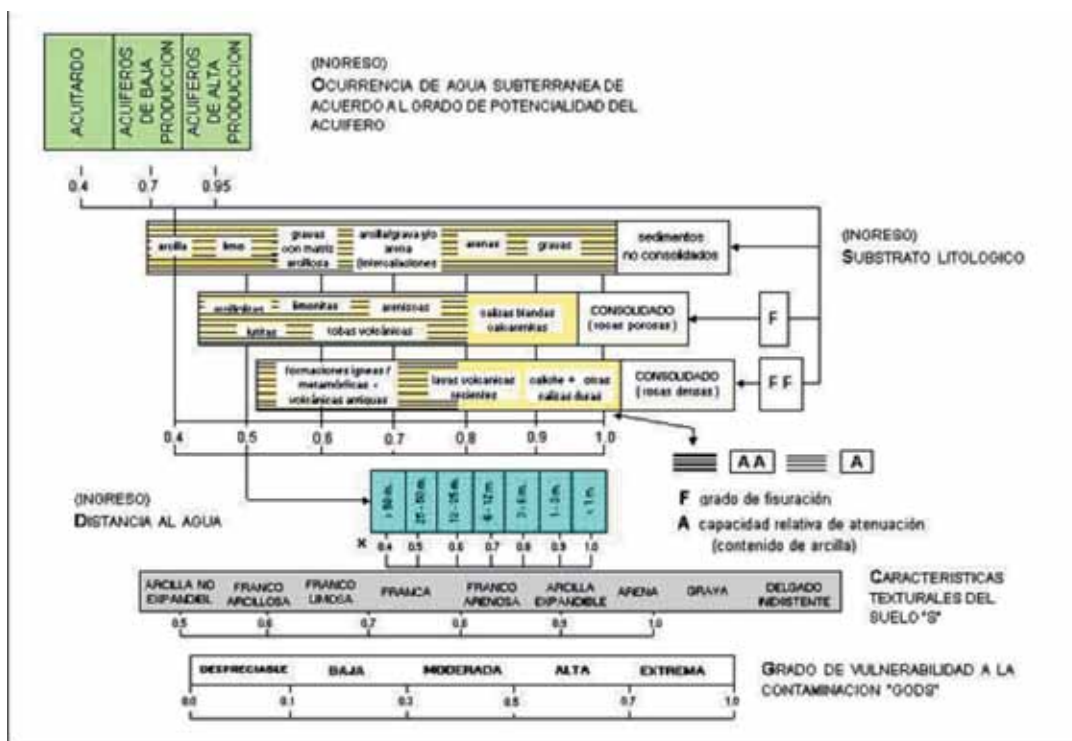
5. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS “GODS” PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS

Como ya se explicó anteriormente la vulnerabilidad definida por Foster 1987, combina varios parámetros que son calificados cuantitativamente. A continuación se describirán cada uno de los parámetros “GODS”.

5.1 Parámetro “G” (ocurrencia de agua subterránea)

Debido a las características físicas y mecánicas de las rocas aflorantes y según el Estudio de Vulnerabilidad a la contaminación de los Acuíferos del Sector Sur del Municipio de Paipa⁵; este parámetro se estableció de acuerdo a los lineamientos establecidos por CORPOBOYACÁ donde se evalúa los acuíferos según su productividad.

Figura 1. Sistema “GODS” para la Evaluación del Índice de Vulnerabilidad del Acuífero.



Fuente: Foster 1987, Universidad Católica de Chile 1996, Modificado por CVC 1996 y CORPOBOYACÁ.

⁵ CORPOBOYACÁ, Estudio de vulnerabilidad a la contaminación de los Acuíferos del Sector sur del Municipio de Paipa 2000.

En la zona de estudio se determinaron varios grados de productividad de los acuíferos, de acuerdo a las características hidrogeológicas, cada uno de los diferentes valores se asignaron de acuerdo a lo expuesto anteriormente, los valores oscilan entre 0.4 y 1. (ver Tabla 1)

- **Acuíferos de Alta Productividad:** Existen en los depósitos más recientes del cuaternario, compuestos por sedimentos no consolidados y rocas de porosidad primaria, ubicados en la parte central

de la zona, presentan valores de transmisividades entre los 1.05 y 31 m²/día. A estos acuíferos se les asignó un índice de vulnerabilidad, "G" entre 0.85 y 1.

- **Acuíferos de baja Productividad:** Se localizan al Occidente del Valle en los alrededores de la Capilla y Escuela El Cerrito, y al Oriente de los municipios de Samacá, Sora y Cucaita donde conforman una amplia estructura anticlinal cuyo eje se extiende paralelo a estos municipios, se

Tabla No 1. Valores asignados por Tipo de Acuífero

FORMACIÓN GEOLOGICA	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA	ESPESOR (m)	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD
Formación Churuvita	Se compone de areniscas cuarzosas de porosidad alta con intercalaciones de arcillolitas y limolitas, bancos calcáreos macizos con cierto grado de fracturamiento que las hace semipermeables, clasificándolo como ACUITARDO.	20.00	0.40
Formación Conejo	Intercalaciones de limolitas, lutitas y areniscas de grano fino de porosidades medias clasificándolo como ACUÍFERO de baja productividad.	19.00	0.70
Formación Labor y Tierna	Roca fracturada que presentan estas unidades originan una permeabilidad secundaria, poseen permeabilidad primaria que se ve reducida por la presencia de cemento silíceo y matriz arcillosa en los niveles detríticos clasificándolo como ACUÍFERO de baja productividad.	30.00	0.70
Formación Guaduas	Arenisca lajosa, de grano fino Arenitas limosa y limolitas, arcillolitas que alternan con limolitas lodosas y varios niveles de areniscas, con una porosidad moderada y de baja permeabilidad. Clasificándolo como un ACUITARDO.	130.00	0.40
Formación Areniscas del Cacho	Constituido por areniscas blancas-amarillentas, cuarzosas de grano grueso, a muy grueso con presencia de óxidos que proporciona niveles finos rojizos, matriz arcillosa, poco fiables, hacia la parte superior. Con permeabilidad de media a alta. Clasificación: ACUÍFERO.	60.00	0.90
Formación Bogotá	Rocas de Composición altamente arcillosa Semipermeables Constituida hacia la parte media por los estratos con algunas intercalaciones de areniscas de grano fino, y limolitas clasificándolo como ACUITARDO.	75.00	0.40
	Rocas predominante arcillosas de permeabilidad y porosidad baja clasificándolo como ACUITARDO.	145.00	0.40
Formación Regadera	Rocas arenosas de permeabilidad alta constituida por rocas de granulometría gruesa a media con pequeñas capas de arcillolitas su composición litológica predominante arenosa además de su permeabilidad secundaria por el intenso plegamiento y fallamiento.	60.00	0.90
Depósitos Glaciares	Sedimentos no consolidados, con flujo Intergranular, de productividad y permeabilidad moderada compuestas por bloques de areniscas cuarzosa de diferente tamaño con predominio de los de 2 a 3 m. no estratificados ni seleccionados, embebidos en una matriz.	3.00	0.95

Nota: No se presentan todos los datos debido a la gran cantidad de información.

encuentran constituidos principalmente por niveles arenosos, lutitas grises y negras, arcillolitas en menor proporción que conforman la Formación Conejo y por las areniscas cuarzosas intercaladas con arcillolitas de la Formación Labor y Tierna. Presentan valores de transmisividades entre los 8.0 y 31 m²/día. A estos acuíferos se les asignó un índice de vulnerabilidad, "G" entre 0.7 y 0.8.

- **Acuitardos:** Constituida hacia la parte media por los estratos arcillosos con intercalaciones importantes de areniscas cuarzosas y limolitas grises y negras, y mantos de carbón, se ubican las areniscas cuarzosas con intercalaciones de arcillolitas y limolitas, bancos calcáreos macizos de la Formación Churuvita. A éstos se les dió valores entre 0.4 y 0.7.

El mapa que representa este parámetro se muestra en la Figura 2.

5.2 Parámetro "O" (predominio litológico zona no saturada)

En el mapa de predominio litológico o Litoestratigráfico (ver Figura 3) se observa la distribución superficial de las diferentes clases litológicas determinadas, como se describe a continuación.

Esta descripción se hizo de acuerdo al grado de arcillosidad, de fracturamiento y consolidación de la roca.

- **Sedimentos arcillosos:** Están en general asociados a depósitos glaciares y a la Formación Churuvita. Se presentan en espesores que van desde 3 a 7 m y se distribuyen en forma más amplia hacia el centro de la zona de estudio, ocupan toda el área del valle. Se les han asignado índices de vulnerabilidad, "O" entre 0,35 y 0,45.
- **Sedimentos limosos:** Se presentan en conjunto formando parte de las Formaciones Plaeners,

Figura 2. Parámetro "G" (Ocurrencia de Agua Subterránea).

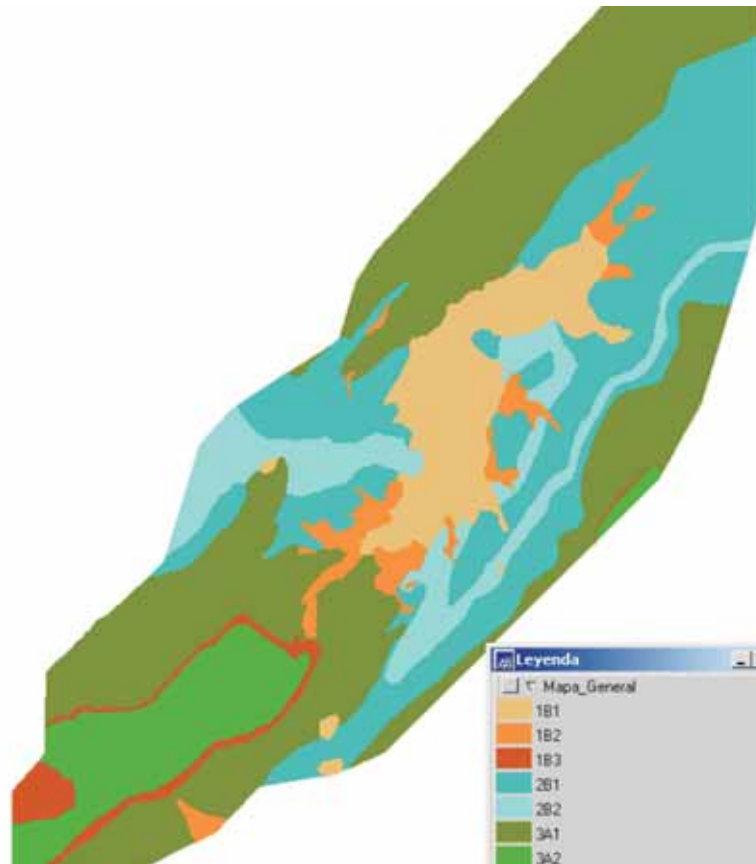
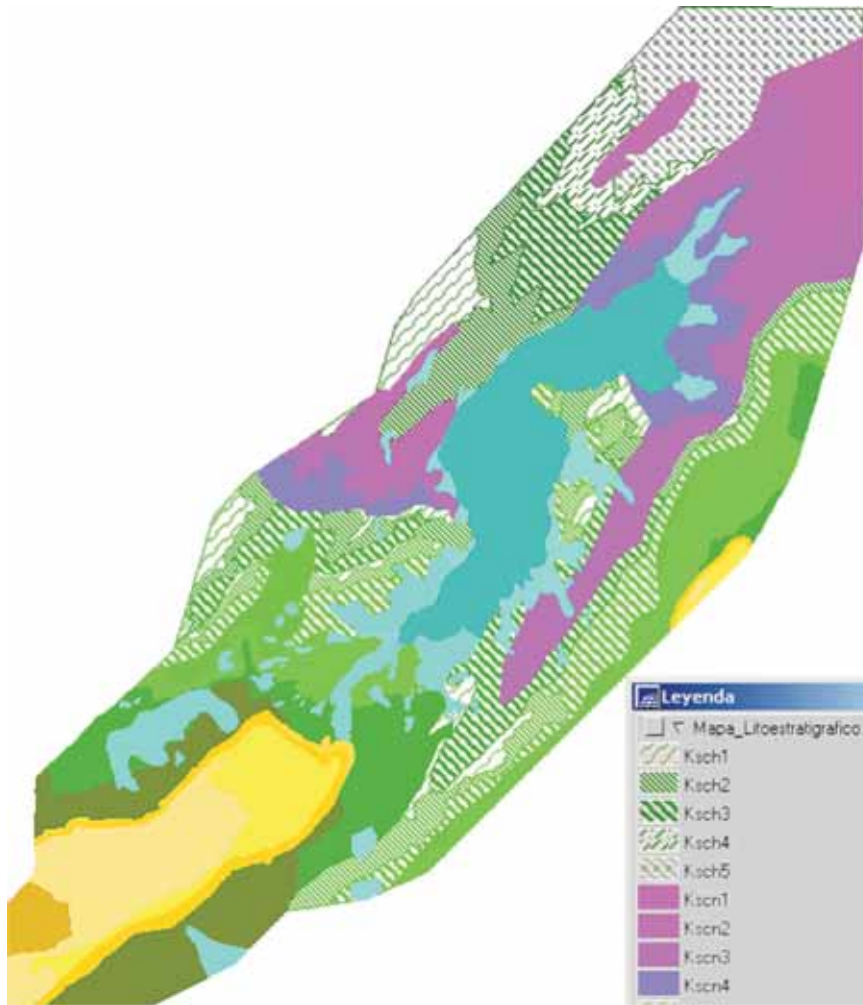


Figura 3. Parámetro "O" (Predominio Litológico Zona No Saturada)



Churuvita, Labor y Tierna. Los índices varían entre 0,65 y 0,75.

- **Gravas con matriz arcillosa:** Están asociados principalmente a depósitos Coluviales y conos aluviales, y los estratos de la formación Regadera. Estos sedimentos se encuentran en pequeños grupos localizados principalmente sobre el borde de las laderas y por su contenido arcilloso son depósitos relativamente impermeables, con índices de vulnerabilidad de 0,55 a 0,65.
- **Intercalaciones de arcilla, gravas y/o arena:** Estos sedimentos se asocian a las Formaciones Bogotá, Labor y Tierna, y Cacho. Se localizan

principalmente en el norte de la zona de estudio y al sur de la misma; a las cuales se asignaron índices de vulnerabilidad de 0,65 a 0,75.

- **Sedimentos arenosos:** Asociados principalmente a las terrazas formadas por los depósitos Coluvio-aluviales y Fluvio-lacustres presentan permeabilidades altas. Se localizan en una amplia zona entre las márgenes de la Quebrada Churuvita-Alcalá. Los índices de vulnerabilidad, se encuentran entre 0,75 y 0,85.
- **Gravas:** Se presentan principalmente asociados a depósitos Coluviales, estas gravas se caracterizan por tener porosidades y permeabilidades altas.

Tabla No 2. Valores Asignados en LitoEstratigrafía

FORMACIÓN GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	ARCILLOSIDAD FRACTURAMIENTO Y CONSOLIDACIÓN	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD
Formación Churuvita	Compuesta por la siguiente litología, dividida en tres conjuntos: inferior compuesto por alternancia de areniscas grises, cuarzosas, moscovíticas, calizas e intercalaciones arcilloliticas y limolíticas.	A= 25 % F= 25 % C= 70 %	0.54
Formación Conejo	Arcillolitas de grano medio con concreciones; Lutitas negras foliadas intercaladas con areniscas de grano fino a medio de color amarillo-gris.	A= 60 % F= 70 % C= 35 %	0.75
Formación Plaeners	Compuesto de varios niveles fosfáticos, por lo general calcáreos, bastante meteorizados, de color amarillo claro a gris, los cuales alternan con arcillolitas y limolitas arcillosas.	A= 25 % F= 85 % C= 25 %	0.80
Formación Labor y Tierna	Areniscas de grano medio a fino con arenitas algo arcil losas. Formado por areniscas cuarzosas, grises claras a blanco-amarillentas, de grano fino, compactas, con intercalaciones delgadas de limolitas silíceas y lutitas negras, Arcillolitas grises; Limolitas.	A= 25 % F= 35 % C= 65 %	0.70
Formación Guaduas	Arcillas grises, laminares con intercalaciones de limolitas grises.	A= 75 % F= 45 % C= 45 %	0.65
Formación Areniscas del Cacho	Rocas arenosas de permeabilidad alta constituida por rocas de granulometría gruesa a media con pequeñas capas de arcillolitas.	A= 45 % F= 40 % C= 25 %	0.78
Depósitos Glaciares	Bloques de areniscas y lutitas afectadas por erosión y proveniente de los escarpes aledaños y depositados en la parte media de la quebrada el Chusque, Cuesta en medio, en estas últimas predomina el material arcilloso y lutítico, han sufrido poco transporte.	A= 15 % C= 10 %	0.95
Depósitos Coluviales	En los alrededores de la quebrada el Chusque los bloques de arenisca alcanzan hasta 1m. de espesor, embebidos en matriz arena - arcillosa de color café	A= 5 % F= 20 % C= 5 %	0.85

Nota: No se presentan todos los datos debido a la gran cantidad de información.

Los índices de vulnerabilidad, asignados están entre 0,85 y 1.

5.3 Parámetro “D” (profundidad de agua)

Para la evaluación de la vulnerabilidad se utilizó la serie de niveles más altos, con el objeto de evaluar el parámetro en la condición más crítica del sistema para el acceso del contaminante del acuífero (ver Figura 4).

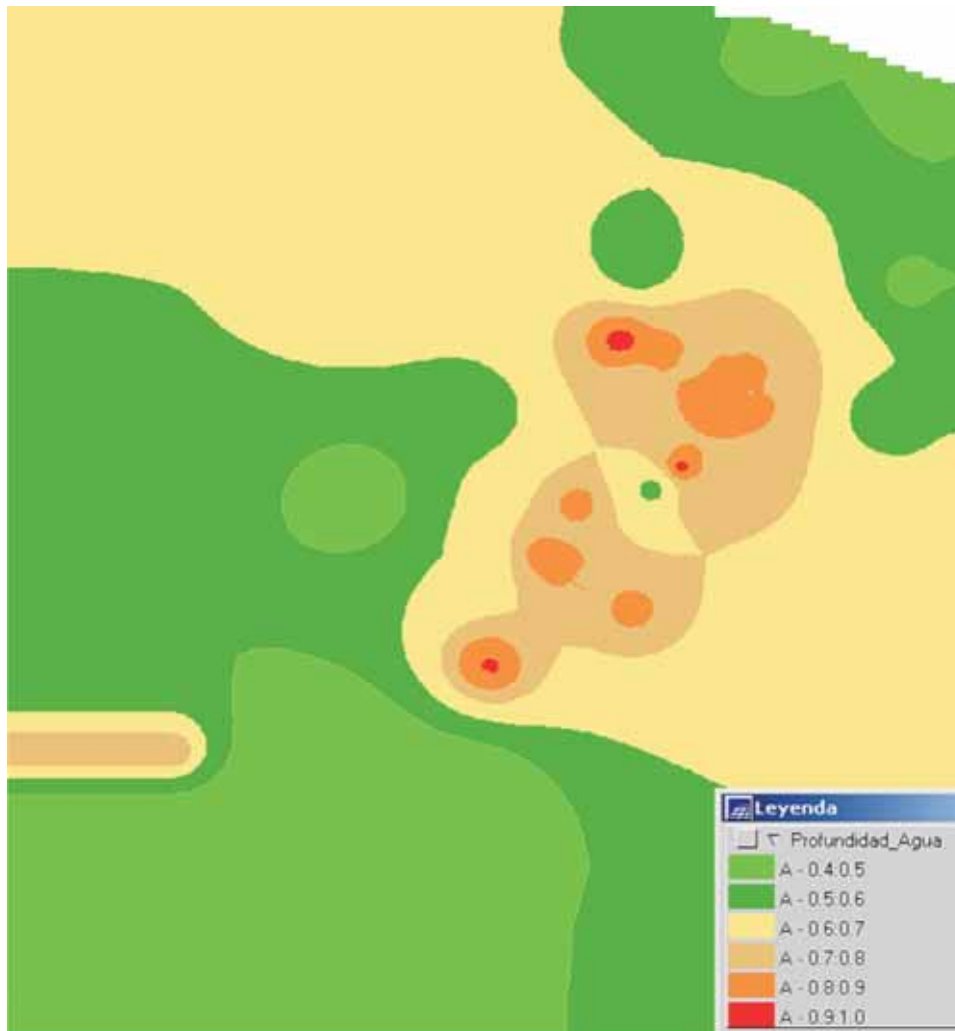
En la zona se tomaron cerca de 30 niveles freáticos medidos en los diferentes puntos de captación como aljibes, manantiales y pozos profundos; los lugares donde este dato no se pudo tomar, fueron ponderados según el espesor del techo del acuífero (ver Tabla 3).

- **Profundidad del Nivel Freático Menores de 1 m:** En el valle de Samacá Sora y Cucaita se encuentran niveles freáticos altos, < de 1 m. Los

niveles se hallan en general a lo largo de todo los depósitos Fluvioacustres que pertenecen a las Veredas de Tibaquirá y Vereda Centro. Se asignó un índice de vulnerabilidad "D" de 1,0.

- Profundidad del Nivel Freático entre 1 y 3 m:** Los niveles que se encuentran entre 1 y 3 m están distribuidos en gran parte del área del valle con un promedio de 2.13 m de profundidad. Se asignaron índices de vulnerabilidad de 0,9.
- Profundidad del Nivel Freático entre 3 y 6 m:** Estos niveles, se encuentran principalmente ubicados en los depósitos Coluviales y Glaciares con un promedio de profundidad de 3.23 m. Se asignaron índices de vulnerabilidad de 0,8.
- Profundidad del Nivel Freático Entre 6 y 12 m:** Estos niveles, se encuentran principalmente ubicados en los depósitos de la Formación Labor y tierna. Se asignaron índices de vulnerabilidad de 0,7.
- Profundidad del nivel freático entre 12 y 25 m:** Con promedios de 20 m de profundidad, se encuentran ubicados en la Formación Churuvita, y Guaduas. Se asignaron índices de vulnerabilidad de 0,6.
- Profundidad del Nivel Freático Mayor de 25 m:** Estos valores se registraron en las Formaciones Churuvita y Conejo con una profundidad promedio de 33.3 m. Se asignaron índices de vulnerabilidad de 0,5.

Figura 4. Parámetro "D" (Profundidad de Agua)



Este mapa fue obtenido por medio de técnicas de interpolación al utilizar software para Modelos Digitales de Terreno, el insumo fundamental fueron los datos dados a partir de la toma de profundidades de agua con la Sonda Eléctrica.

Este mapa de isovalores ha sido posteriormente vinculado al Sistema de Información Geográfica en un Plano de Información de tipo numérico reclasificándose posteriormente de acuerdo a los valores presentados en la Tabla 3.

Tabla No 3. Valores Asignados en Profundidad de Agua.

ESTE	NORTE	PROFUNDIDAD (m)	FORMACIÓN	ACUIFERO	INDICE DE VULNERABILIDAD
1,066,847.40	1,105,517.00	1.50	Qpl	1B1	0.90
1,067,620.10	1,105,139.00	4.00	Qpl	1B1	0.80
1,067,936.90	1,104,415.60	0.65	Qpl	2B2	1.00
1,067,804.90	1,104,947.20	2.80	Qpl	1B1	0.90
1,066,248.90	1,104,724.70	4.80	Qpl	1B1	0.80
1,068,451.10	1,105,191.80	3.00	Qpl	1B1	0.90
1,068,138.30	1,104,679.30	3.00	Qpl	1B1	0.90
1,068,709.80	1,104,779.80	2.20	Qpl	1B1	0.90
1,066,013.60	1,105,742.80	0.10	Qpl	1B1	1.00
1,065,852.00	1,105,760.20	0.15	Kscn	3A1	1.00
1,069,305.30	1,104,609.00	3.50	Qc	1B1	0.80
1,068,337.50	1,104,313.10	2.50	Qpl	1B1	0.90
1,068,778.80	1,104,445.90	3.50	Qpl	1B1	0.80
1,068,865.50	1,104,215.60	2.00	Qpl	1B1	0.90
1,068,627.50	1,104,556.00	0.15	Kscn	2B1	1.00
1,067,287.10	1,102,621.10	0.15	Qpl	1B1	1.00
1,066,637.30	1,102,057.70	15.00	Kg2	2B1	0.60
1,064,979.40	1,101,705.50	1.50	Qca	1B2	0.90
1,065,080.30	1,099,808.10	3.80	Qpl	1B1	0.80
1,066,181.50	1,099,124.40	1.50	Qpl	1B1	0.90
1,063,111.90	1,097,667.40	0.50	Qca	1B2	1.00
1,062,939.40	1,097,787.10	1.00	Qcg	1B2	1.00
1,062,853.30	1,097,710.20	0.80	Qcg	1B2	1.00
1,067,512.80	1,101,725.90	4.50	Qcg	1B2	0.80
1,064,645.70	1,100,157.20	0.70	Qpl	1B1	1.00
1,064,173.50	1,100,450.70	1.60	Qpl	1B1	0.90
1,068,268.50	1,104,396.50	0.40	Qpl	1B1	1.00
1,059,758.20	1,107,020.80	5.00	Ksch	3A1	0.80
1,069,292.40	1,112,853.90	30.00	Ksch	3A1	0.50
1,066,367.10	1,107,713.60	25.00	Ksch	3A1	0.60
1,062,791.80	1,104,034.20	20.00	Ksch	3A1	0.60
1,073,084.40	1,111,771.70	38.00	Kscn	2B1	0.50
1,072,380.21	1,107,172.50	28.00	Kscn	2B1	0.50
1,071,730.10	1,103,926.00	20.00	Ktg	3A1	0.60
1,062,683.50	1,100,192.50	12.00	ksg1	2B1	0.70
1,060,137.40	1,101,869.90	42.00	Kscn	2B1	0.50
1,055,966.20	1,095,593.30	3.00	Qcg	1B1	0.90
1,059,758.20	1,095,160.40	75.00	Tpc	1B3	0.40
1,056,562.10	1,092,617.30	100.00	Tb	3A2	0.40
1,062,358.40	1,094,402.90	70.00	Ktg	3A1	0.40

6. ÁLGEBRA DE MAPAS PARA OBTENER LA VULNERABILIDAD GOD

El Sistema de Información Geográfica utilizado ha sido el software SPRING el cual es de uso libre y que proviene del Instituto de Investigaciones Espaciales de Brasil. La versión utilizada ha sido la 4.1 para Windows.

Antes de obtener el mapa de vulnerabilidad se han importado los mapas antes mencionados al SIG a través de su módulo de importación. El tipo de datos para los planos de información trabajados fueron en su respectivo orden:

- Parámetro "G" (Ocurrencia de Agua Subterránea): Temático y Numérico.
- Parámetro "O" (Predominio Litológico Zona No Saturada): Temático y Numérico.
- Parámetro "D" (Profundidad de Agua): Modelo Numérico de Terreno y Temático.

El orden que se menciona es básicamente que al momento de importar los datos, se ingresan en un plano de información de tipo temático con sus respectivas clases (excepto el Parámetro D que se ingresa en el tipo MNT); posteriormente se han reclasificado de acuerdo a los valores presentados en las tablas relacionadas vinculando estos valores temáticos a los valores numéricos asignados (excepto el Parámetro D que ya se encontraba como tipo MNT).

Vale la pena aclarar que esto no afecta de ninguna manera la información base del estudio, sencillamente ahora es otro tipo de dato; por ejemplo en Litoestratigrafía, la Formación Geológica de Depósitos Glaciares es ahora un valor de 0.95. Este tratamiento es indispensable para poder aplicar las técnicas del Algebra de Mapas así como en las matemáticas convencionales no se puede sumar peras con manzanas, o en este caso, para ser más específicos no multiplica Litoestratigrafía (tipo temático) con Profundidad de Agua (tipo MNT), en conclusión, todo debe ser del mismo tipo antes de aplicar las técnicas de álgebra de mapas.

SPRING cuenta con una gran ventaja sobre sus pares de software libre relacionados con Sistemas de Información Geográfica y es básicamente que permite

realizar operaciones entre planos de información haciendo uso de un lenguaje de programación propio denominado LEGAL.

La estructura fundamental de un programa en LEGAL comprende tres pasos fundamentales que son:

- **Declaración:** donde se definen las variables.
- **Instanciación:** donde se recupera (o asigna) la información de las tablas o se crean nuevas capas temáticas.
- **Operaciones:** es donde se realiza específicamente las técnicas de Algebra de Mapas, se trata en términos simples de realizar operaciones algebraicas con la información geográfica almacenada en los planos de información (cuatro para este caso específico).

La obtención del Mapa GOD se simplifica en la operación matemática:

$$\text{MAPA GOD} = G * O * D$$

Que es la operación matemática indicada en el programa en LEGAL.

Un programa en LEGAL debe ser ejecutado para poder obtener los valores deseados, a continuación se presenta el resultado para el Mapa de Vulnerabilidad mediante los índices GOD (Ver Figura 5) y GODS (Ver Figura 7). Posteriormente se presentará el código empleado para su obtención y se explicarán los resultados obtenidos del estudio para el Mapa GODS.

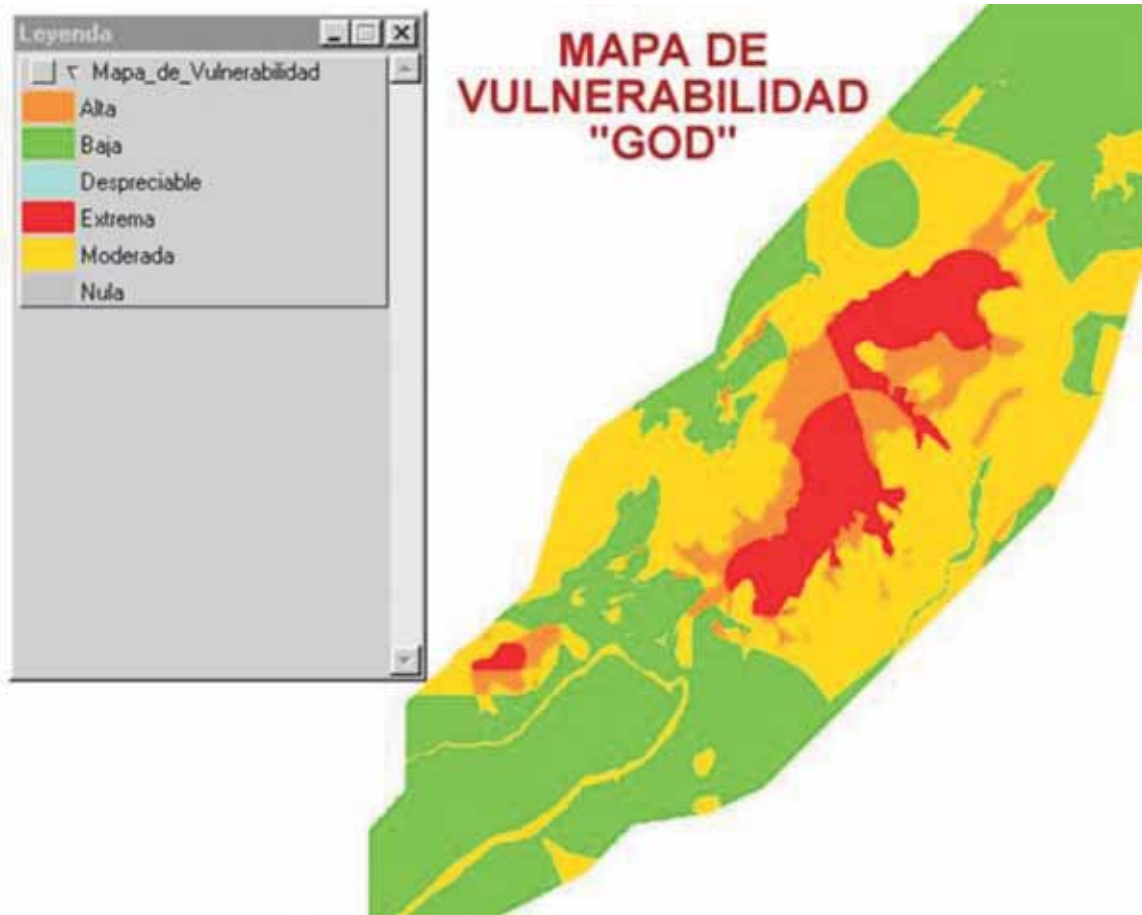
7. MAPA DE VULNERABILIDAD "GODS"

Para obtener este mapa es preciso primero analizar el siguiente parámetro:

7.1 Parámetro "S" (zonificación textural de suelos)

Para evaluar este parámetro se partió del Estudio Semidetallado de Suelos de Boyacá, e IGAG, 1980. A cada conjunto y/o asociación se asignaron los valores de vulnerabilidad (ver Tabla 4 y Figura 6) de acuerdo a sus características texturales, las cuales van desde

Figura 5. Vulnerabilidad GOD.



las muy finas, (arcillosas), hasta las muy gruesas (pedregosas). Los índices fueron asignados de acuerdo con la Universidad Católica de Chile, y la C.V.C. 1996.

Una vez se evalúa este parámetro y se introducen sus valores en el programa en LEGAL se ejecuta para obtener el Mapa de Vulnerabilidad GODS donde la fórmula matemática es similar a la anterior pero ahora añadiendo el parámetro S.

$$\text{MAPA GODS} = G * O * D * S$$

El producto obtenido se presenta en el mapa de la Figura 7.

A continuación se presentan los apartes más importantes del algoritmo creado para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos.

//DECLARACIÓN DE VARIABLES

//Conversión de Profundidad de Agua Temático a TABLA GODS

Temático Agua3 ("Variables");
Tabla Clases2 (Ponderación);
Numérico Agua4 ("Modelos_Calculados");

//Conversión Litoestratigráfico a Ponderación GODS

Temático Lito1 ("Litoestratigráfico");
Tabla Clases3 (Ponderación);
Numérico Lito2 ("Modelos_Calculados");

//Conversión Geología (OCURRENCIA DE AGUA) a Ponderación GODS

Temático Geo1 ("Geología");
Tabla Clases4 (Ponderación);
Numérico Geo2 ("Modelos_Calculados");

//Conversión de SUELOS Temático a T ABLA GODS

Temático Suelo1 ("Suelos");
Tabla Clases5 (Ponderación);
Numérico Suelo2 ("Modelos_Calculados");

//Variables para determinar la VULNERABILIDAD

Numérico PAgua, PLito, POcAgua, PSuelos ("Modelos_Calculados");
Numérico Vulnera ("Modelos_Calculados");

//Variables para Conversión de Vulnerabilidad Numérico a Temático

Temático MVulnera ("Vulnerabilidad");
Numérico DVulnera ("Modelos_Calculados");
Tabla Clases10 (Slicing);

//DECLARACIÓN DE TABLAS GENERALES

//Conversión entre Profundidad de Agua Numérico a Temático

Clases1 = Nuevo (CategoriaFim = "Variables",
[-100, -50]: "Agua_G",
[-49.9999, -25]: "Agua_F",
[-24.9999, -12]: "Agua_E", ...

//Conversión entre Profundidad de Temático a Valores GODS

Clases2 = Nuevo (Categorialni="Variables",
"Agua_A": 1.0,
"Agua_B": 0.9,
"Agua_C": 0.8, ...

Figura 6. Parámetro "S" (Zonificación Textural de Suelos)

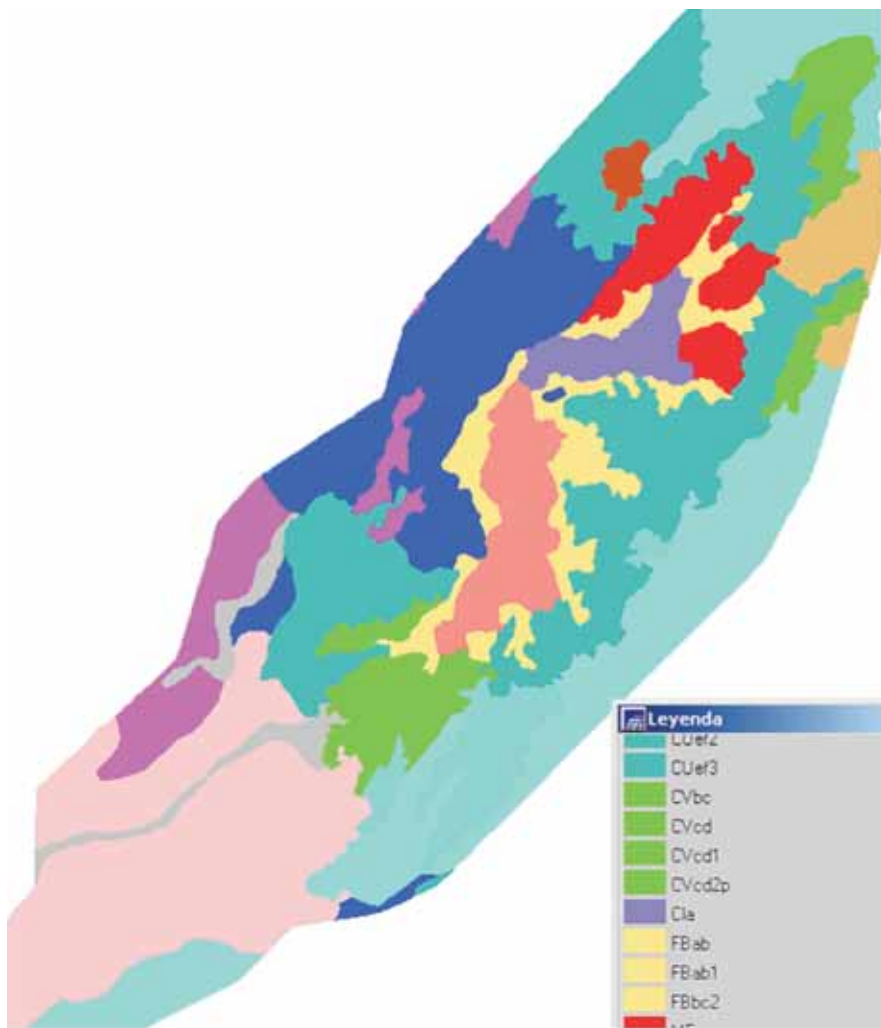


Tabla No 4. Valores Asignados para Suelos.

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS	CARACTERÍSTICAS TEXTURALES REPRESENTATIVAS	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD
Cacd	Relieve ondulado a fuertemente ondulado; moderadamente profundo. Altos contenidos de carbón orgánico y aluminio.	Lutitas y arcillas de textura moderadamente fina a fina, Bien drenados.	0.45
Cbab	Relieve plano a inclinado, moderadamente profundo. Altos contenidos de carbón.	Arcillas de texturas de medias a finas, moderadamente profundos y bien drenados.	0.58
CRbc	Relieve ligeramente ondulado a ondulado, moderadamente profundo, altos contenidos de carbón orgánico y aluminio.	Arcillas y lutitas de textura fina a moderada con influencia coluvial. Algunos fenómenos erosivos.	0.65
Cude2p	Comprende suelos transicionales entre los climas frío húmedo y frío seco, en los municipios de Samacá, Cucaita, Sora y Ráquira. Relieve quebrado a fuertemente quebrado.	Suelos poco desarrollados, derivados de arenisca, localizados en las laderas de relieve más escarpado y erosionado. Excesivamente drenados, de textura moderadamente fina a fina. Erosión moderada.	0.70
ME	Constituido por áreas en donde los agentes erosivos han actuado con tal intensidad, que se han perdido los horizontes superficiales y en su reemplazo se encuentran cárcavas amplias y profundas, desprovistas de vegetación. También se observan afloramientos rocosos y pedregosidad.	Cárcavas amplias y profundas desprovistas de vegetación. Afloramientos rocosos y pedregosidad.	1.00
Picd2	Relieve ondulado a fuertemente ondulado, con pendientes de 7 a 12 y 12 a 25% y erosión moderada.	Los suelos son superficiales limitados por arcillas, moderadamente bien drenados a drenaje imperfecto, consta de 3 horizontes de textura fina.	0.45
Scabp	Relieve plano a ligeramente inclinado, con pendientes de 0% a 7%.	Suelos bien drenados con texturas medias a moderadamente finas, con cascajo, gravilla, piedra y carbonatos.	0.80

Nota: No se presentan todos los datos debido a la gran cantidad de información.

//Conversión entre Litoestratigráfico de Temático a Valores GODS

Clases3 = Nuevo (Categorialni= "Litoestratigrafico",
 "Ksg1-1": 0.70,
 "Ksg1-2": 0.65,
 "Ksg1-3": 0.70, ...

//Conversión entre Geológico (OCURRENCIA AGUA) de Temático a Valores GODS

Clases4 = Nuevo (Categorialni= "Geología",

"Ksch": 0.70,
 "Kscn": 0.80,
 "Ksg1": 0.80, ...

//Conversión entre SUELOS Temático a Valores GODS

Clases5 = Nuevo (Categorialni= "Suelos",
 "CAde1": 0.45,
 "CBab": 0.58,
 "CBbc": 0.58, ...

//Conversión de Vulnerabilidad Numérico a Temático

Clases10 = Nuevo (CategoriaFim = "Vulnerabilidad",
[-0.0001, 0]: "Nula",
[0.00001, 0.1]: "Despreciable",
[0.10001, 0.3]: "Baja",
[0.30001, 0.5]: "Moderada",
[0.50001, 0.7]: "Alta",
[0.70001, 1.0]: "Extrema");

//OPERACIONES

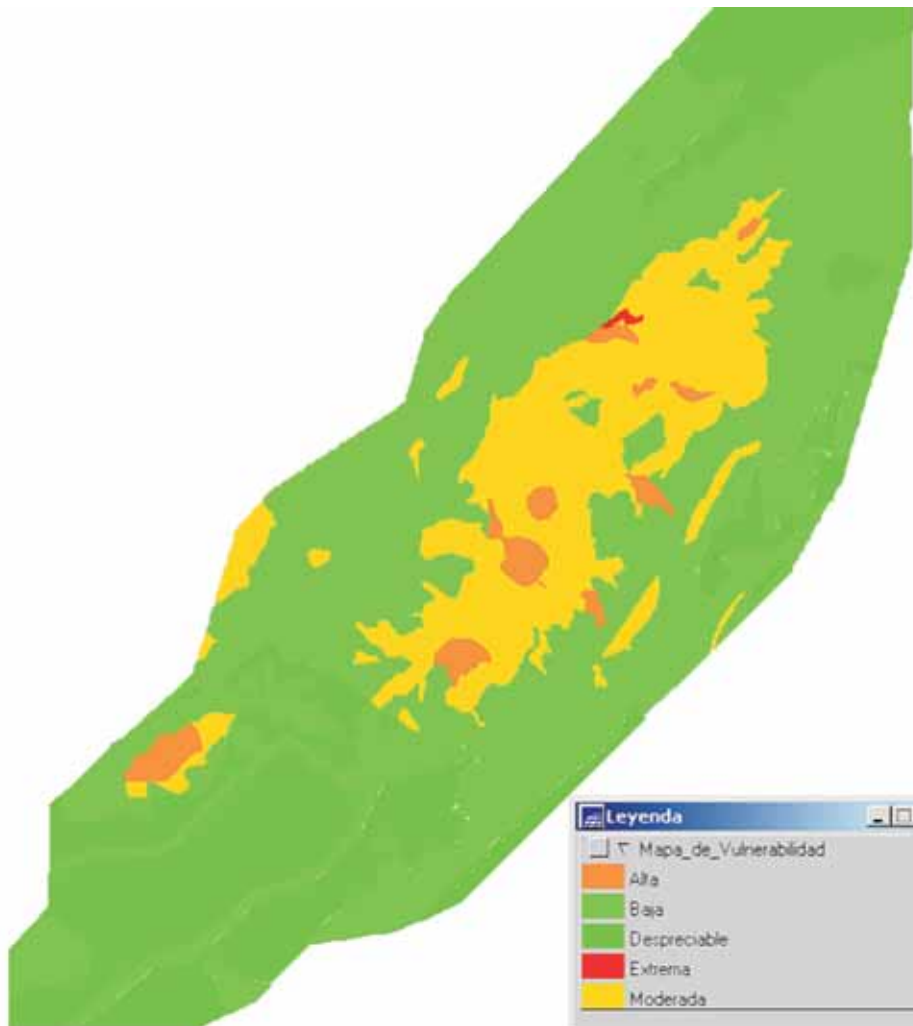
//Conversión entre Profundidad de Agua Numérico a Temático

Agua2 = Recupere (Nombre = "Profundidad_ Agua");
Agua1 = Nuevo (Nombre = "Temas_PR_Agua", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 25000);
Agua1 = Slice (Agua2, Clases1);

//Conversión entre Profundidad de Temático a Valores GODS

Agua3 = Recupere (Nombre = "Temas_PR_Agua");
Agua4 = Nuevo (Nombre = "Prof_A gua_GODS", ResX= 30, ResY= 30, Escala = 25000, Min = 0, Max = 1);
Agua4 = Pondere (Agua3, Clases2);

Figura 7. Vulnerabilidad GODS



Nota: No se presenta toda la información de la sección de instancia debido a su gran extensión: la información que no se coloca se encuentra en las tablas analizadas anteriormente

//Conversión entre Litoestratigrafico de Temático a Valores GODS

Lito1 = Recuperare (Nombre = "Mapa_Litoestratigrafico");
 Lito2 = Nuevo (Nombre = "Valor_Lito_GODS",
 ResX=30, ResY=30, Escala =
 25000, Min = 0, Max = 1);
 Lito2 = Pondere (Lito1, Clases3);

//Conversión entre Geología (OCURRENCIA AGUA) de Temático a Valores GODS

Geo1 = Recuperare (Nombre = "Mapa_Geologico");
 Geo2 = Nuevo (Nombre = "Valor_Oc_Agua_GODS ",
 ResX=30, ResY=30,
 Escala = 25000, Min = 0, Max = 1);
 Geo2 = Pondere (Geo1, Clases4);

//Conversión entre SUELOS de Temático a Valores GODS

Suelo1 = Recuperare (Nombre = "_Mapa_de_Suelos");
 Suelo2 = Nuevo (Nombre = "Suelos_GODS", ResX=30,
 ResY=30, Escala =
 25000, Min = 0, Max = 1);
 Suelo2 = Pondere (Suelo1, Clases5);

//OPERACIÓN PARA DETERMINAR**LA VULNERABILIDAD**

PAgua = Recuperare (Nombre = "Prof_Agua_GODS");
 PLito = Recuperare (Nombre = "Valor_Lito_GODS");
 POcAgua = Recuperare (Nombre = "Valor_Oc_Agua_GODS");
 PSuelos = Recuperare (Nombre = "Suelos_GODS");
 Vulnera = Nuevo (Nombre="Mapa_Vulnerabilidad",
 ResX=30, ResY=30,
 Escala=25000, Min=0, Max=1);
 Vulnera = PAgua * PLito * POcAgua * PSuelos;

//OPERACIÓN PRA RECLASIFICAR**LA VULNERABILIDAD DE NUMÉRICO A TEMÁTICO**

DVulnera = Recuperare (Nombre = "Mapa_Vulnerabilidad");
 MVulnera = Nuevo (Nombre = "Mapa_de_Vulnerabilidad", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 25000);
 MVulnera = Slice (DVulnera, Clases10);

El uso de esta técnica (que es en verdad simple cuando se comprenden los tipos de datos y los parámetros implicados para crear un programa en LEGAL) facilita la

obtención de diferentes modelos con la simple variación de los parámetros de evaluación en las tablas y su posterior actualización y ejecución en la programación en LEGAL.

La primera vez que se aplicó esta técnica sobre los planos de información ya comentados fue en un computador AMD K6 -2 a 400 MHz con 128 Mbytes de RAM, el proceso de ejecución del programa en LEGAL y la obtención de resultados tardó aproximadamente 10 minutos.

Posteriormente se migró la información a un computador Pentium IV a 1700 MHz con 256 Mbytes de RAM, donde el tiempo de respuesta se redujo a aproximadamente 2 minutos, tiempo razonablemente rápido para la obtención de los resultados si se tiene en cuenta la gran cantidad de información que se debe procesar.

8. RESULTADOS

Como resultado final de la evaluación se presenta el mapa GODS donde la vegetación y características del suelo son factores atenuadores, indica que donde la cobertura vegetal existe, el factor atenuador, es mucho mayor frente a los agentes contaminantes. La aplicación del método de indexación arrojó cinco zonas así:

- Vulnerabilidad Despreciable: Ocupa el área más pequeña de vulnerabilidad con 70.202025 Km², representada por sedimentos correspondientes a rocas predominantemente arcillosas y de baja permeabilidad, donde la profundidad del agua es mayor de 25 m.
- Vulnerabilidad Baja: Ocupa un área de 142.212150 Km², la mayor zona de vulnerabilidad; constituida por rocas de composición variada de características semipermeables, donde su profundidad es de 12 y 25 m. Hacen parte de estos sedimentos Formaciones como Guaduas, Conejo, Churuvita y Bogotá, entre otras.
- Vulnerabilidad Moderada: Tiene un área de 45.969638 Km², constituida por depósitos no consolidados de permeabilidad moderada, y rocas correspondientes a la Formaciones Plaeners, Labor y Tierna, Guaduas y Conejo. Las profundidades de agua varían de 3 a 12 m.

- Vulnerabilidad Alta: Abarca un área de 5.476050 Km², constituida por depósitos de permeabilidad moderada, correspondientes a los Cuaternarios Fluvioalacustres, Coluvioaluviales y de origen Glacial.
- Vulnerabilidad Extrema: Tiene un área de 0.161887 Km², afortunadamente es un área muy pequeña, corresponde a depósitos Fluvioalacustres donde la profundidad de agua es menor de 3 m.

CONCLUSIONES

Los mapas de vulnerabilidad combinan varios mapas temáticos correspondientes a los parámetros elegidos para el estudio, que dependen fundamentalmente de los cambios originados en los acuíferos generando resultados de vulnerabilidad no estáticos, por lo que conviene actualizarlos de forma periódica.

Los resultados finales del estudio se sintetizan en el mapa de vulnerabilidad GOD y GODS. El primero de los mapas no considera el factor atenuador del suelo y el segundo en cambio, tiene en cuenta su potencial de atenuación y por lo tanto el grado de vulnerabilidad pudo disminuir en una categoría, en lugares específicos, con relación a los resultados del mapa GOD.

El método de indexación GODS, permitió evaluar la zona, ante un contaminante general y no específico. Para poder determinar la contaminación generada, por el uso de productos agroquímicos y en general cualquier contaminante específico, deben hacerse estudios de evaluación más puntuales.

El uso de los Sistemas de Información Geográfica y especialmente de la técnica de Álgebra de Mapas, facilita la elaboración de múltiples modelos en corto tiempo y con mínimo esfuerzo, razón por la cual es prioritario difundir este conocimiento a la comunidad científica del país.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ-CAMPANA, JUL. "La contaminación de las aguas subterráneas en Galicia. Caso del entorno hidrogeológico del río Louro". Tierra y Tecnología, N° 12, 1996.

ARNAIZ, J.A. & BENIT O, J. "Suelos contaminados y su saneamiento. Ingeniería Química, junio de 1991.

CORPOBOYACÁ, Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos de Puerto Boyacá.

CORPOBOYACÁ, Heladio Guió, Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos del Sector Sur del Municipio de Paipa.

CORPOBOYACÁ. C.E.A. Estudio Evaluación del potencial hídrico subterráneo del Valle de Samacá Cucaita y Sora, 2000.

INTERNATIONAL ASSOCIATION HYDROLOGISTS. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, International Contributions to Hydrogeology, Vol 16, Jaroslav Vrba - Alexander Zoporozec Editors, and Hanover: Heise, 1994.

INVENTARIO GEOLÓGICO MINERO DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ. Convenio Corpes Centro Oriente, Gobernación de Boyacá, Instituto de Recursos Mineros Y Energéticos "Irme" y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tomo I, 1997.

LeGRAND, H.E. & ROSEN, L. "Common Sense in Ground –Water Protection and Management in the United States". Ground Water, Vol. 30, N° 6, nov-dec. 1992.

NATIONAL ACADEMY PRESS. "Ground Water Vulnerability Assessment" in: Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty: ", Washington, D.C., 1993.