

---

---

## VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN, ZONA SUR ACUIFERO DEL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA.

---

---

*Liliana Ríos Rojas<sup>1</sup> & María Victoria Vélez Otálvaro<sup>2</sup>*

*1. Est. Maestría Ingeniería-Recursos Hidráulicos, 2. Directora Escuela de Geociencias y Medio Ambiente  
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas  
Universidad Nacional de Colombia, Medellín*

*mvvelez@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 22 de Agosto de 2007 / Aceptación: 18 de Junio de 2008 / Recibida versión final: 22 de Junio de 2008

### RESUMEN

El movimiento de un contaminante desde la superficie del suelo hasta el agua subterránea puede tomar días ó décadas antes que el impacto de la contaminación resulte evidente y hasta este momento grandes volúmenes del acuífero estarán involucrados. Por lo cual las medidas de limpieza, casi siempre tienen un alto costo económico y su ejecución es bastante dispendiosa desde el punto de vista técnico. Es ésta entonces una justificación válida para un estudio de vulnerabilidad a la contaminación que determine las áreas de mayor y menor susceptibilidad que posee el sistema. La vulnerabilidad a la contaminación de la zona sur del Valle del Cauca fue estimada con seis métodos de índice y superposición (AVI, BGR, DRASTIC, GOD, GODS y PATHS) y un modelo de flujo de zona no saturada (HYDRUS 1D®). Los resultados de los índices fueron contrastados con los del HYDRUS 1D®, asumiendo que el escenario más cercano a la realidad era el modelo de flujo, dado que incluye parámetros variables en el tiempo que no pueden ser tenidos en cuenta por los índices, como es el caso de la variabilidad de la humedad del suelo. Ninguno de los índices replicó completamente los resultados del HYDRUS 1D®. Algunos índices como el BGR y GODS, coincidieron con el HYDRUS 1D® en la ubicación de zonas de vulnerabilidad muy alta; otros como el GOD y AVI, que califican una amplia zona como vulnerabilidad muy alta incluyen también ésta zona del HYDRUS-1D.

**PALABRAS CLAVES:** Vulnerabilidad a la contaminación, Acuífero, Índice de superposición, HYDRUS 1D®, Valle del Cauca, Colombia.

### ABSTRACT

The movement of a polluting agent from the surface of the ground to the aquifer can take days or to decades before the impact of the contamination is evident and until this moment great volumes of the aquifer are involved. Thus the cleaning functions, have a high economic cost almost always and its execution is quite expensive from the technical point of view. It is a this one then valid justification for a study of vulnerability to the contamination that determines the areas of greater and smaller susceptibility than has the system. The vulnerability to the contamination of the South zone of the Valle del Cauca was considered with six methods of index and superposition (AVI, BGR, DRASTIC, GOD, GODS and PATHS) and a model of flow of zone unsaturated (HYDRUS 1D®). The results of the indexes were resisted with those of the HYDRUS 1D®, assuming that the scene closest to the reality was this one, since it includes variable parameters in the time that cannot be considered by the index, as it is the case of the variability of the humidity of the ground. No of the indexes completely talked back the results of the HYDRUS 1D®. Some indices like BGR and GODS, agreed with the HYDRUS 1D® in the location of zones of very high vulnerability; others like the GOD and AVI, that describe an ample zone as very high vulnerability also includes this one zone of the HYDRUS 1D®.

**KEY WORDS:** Vulnerability to the contamination, Aquifer, Index of superposition, HYDRUS 1D® Model, Valle del Cauca, Colombia

## 1. INTRODUCCIÓN

En el Valle del Cauca, el agua subterránea sustenta el 90% del consumo para la producción de caña de azúcar y gran parte del consumo humano. Este cultivo ocupa aproximadamente 200.000 hectáreas y es una de las principales amenazas para el recurso, ya que el uso de agroquímicos es una carga contaminante constante. Por tanto un estudio de vulnerabilidad a la contaminación es una herramienta de gestión para la protección del agua subterránea.

La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca del sistema hidrogeológico (Foster, 1987). Esta propiedad no puede ser medida en campo y depende de diferentes factores: recarga del acuífero, características hidráulicas del suelo y de la zona no saturada y saturada (Foster, 1987 y Foster et al, 2002). Además del contenido de humedad del suelo como el factor que puede agilizar ó retardar la movilidad de la sustancia.

Para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas existen diferentes métodos, de acuerdo con Lindström, (2005) podrían mencionarse: a) métodos de índice y superposición, los cuales evalúan la vulnerabilidad de manera cualitativa y relativa. Su dependencia al volumen de información y al conocimiento del sistema hacen que la evaluación implique un alto grado de subjetividad; b) los modelos de simulación, cuantifican el tiempo de viaje de la sustancia hasta la superficie del agua y requieren una gran cantidad de información. c) los modelos estadísticos, donde la vulnerabilidad se expresa como una probabilidad de la contaminación. En este estudio se presentan los resultados obtenidos en la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación de la zona sur del acuífero del Valle Del Cauca, Colombia, aplicando seis metodologías de índice y superposición, DRASTIC, GOD, GODS, BGR, PATHS, AVI y comparándolos con los resultados de la aplicación de un modelo de simulación, HYDRUS 1D®.

## 2. DEFINICIÓN DE VULNERABILIDAD

Desde la introducción del termino "vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación" Margat (1968), se han dado numerosas definiciones, calificaciones y metodologías sobre éste, buscando una mejor interpretación espacio-temporal de la misma, Foster e Hirata (1991), Carbonell (1993), Zaporozec y Vrba (1994). Una definición útil y consistente es la dada por Foster, (1987), éste considera la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie.

Vrba (1998) hace distinción entre dos tipos de vulnerabilidad: intrínseca o natural, la cual no considera atributos ni comportamientos de contaminantes particulares y la vulnerabilidad específica, que valora un sólo tipo ó grupo de contaminante de propiedades similares. Dado que no existen datos y recursos suficientes para realizar una evaluación específica para cada sustancia o cada actividad contaminante como sugieren Andersen y Gosk (1987) argumentando que es científicamente más consistente; según Foster et. al. (2002) un índice de vulnerabilidad absoluto integrado es un marco de referencia para la evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas y formulación de políticas de protección.

### 2.1 Métodos para Estimación de Vulnerabilidad

Para asignar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se han desarrollado diferentes metodologías: métodos de índice y superposición, métodos que emplean modelos de simulación y modelos estadísticos ó de monitoreo (Carbonell, 1993, Lindström, 2005).

### 2.2 Métodos de índice y superposición

Este tipo de métodos se fundamentan en el hecho de que algunos parámetros importantes controlan en gran parte la vulnerabilidad del agua subterránea y la evalúan de manera cualitativa y relativa. La vulnerabilidad es interpretada de

rangos de valoración predefinidos para cada índice. Estos son resultado de operar matemáticamente los parámetros en el espacio. El uso de uno u otro método es función del tipo y escala de la investigación, el nivel de información y conocimiento del sistema (Auge, 2004).

### 2.3 AVI (Van Stempvoort et al, 1992)

Cuantifica la vulnerabilidad del acuífero a través de un parámetro denominado Resistencia Hidráulica (C), función del espesor de las capas homogéneas ubicadas sobre el sistema saturado ( $d_i$ ), y la permeabilidad ( $K_i$ ) (ecuación 1). Esta resistencia hidráulica corresponde a una estimación del tiempo de viaje del contaminante a través de la zona no saturada.

$$C = \sum_{i=\text{Estratos}} \frac{d_i}{K_i} \quad (1)$$

Según el método si C es menor de 10 años la vulnerabilidad será extremadamente alta; si se encuentra entre 10 y 100 años, muy alta; entre 100 y 1000 años, moderadamente alta; entre 1000 y 10000 años, baja y finalmente mayor que 10000 años, extremadamente baja.

### 2.4 BGR (Hölting, et al. 1995)

El método estima la protección que brindan los materiales de la zona no saturada al acuífero, los principales parámetros que intervienen en la evaluación de la protección (PT) son: la capacidad de campo efectiva del suelo (S), recarga natural del acuífero (W), litología (R), es decir el tipo de sedimentos o rocas presentes en la zona no saturada, espesor de cada una de las capas de la zona no saturada (T), presencia de acuíferos colgados (Q), condiciones de presión ( $H_p$ ). A cada uno de estos factores se les asocia un puntaje, los cuales ponderados y sumados entre sí, dan como resultado un valor que se traduce en vulnerabilidad (ecuación 2).

$$P_T = W * S + W \left( \sum_{i=1}^N R_s * T_i \right) + Q + H_p \quad (2)$$

El método evalúa la protección que otorgan el suelo y el subsuelo al acuífero, en consecuencia la vulnerabilidad es relativa al orden de protección. Si la protección es mayor que 4000, la vulnerabilidad es muy baja dado que el tiempo de residencia del contaminante en el suelo y subsuelo es mayor a 25 años; si la protección está entre 2000 y 4000 la vulnerabilidad es baja, la residencia estará entre 10 y 25 años; para una protección entre 1000 y 2000, la vulnerabilidad es moderada y la residencia entre 3 y 10 años; para una protección entre 500 y 1000, la vulnerabilidad es alta y la residencia equivale a varios meses a 3 años; para una protección menor a 500 la vulnerabilidad es muy alta y la residencia será de pocos días hasta 1 año.

### 2.5 DRASTIC (Aller et al., 1987)

Es un sistema basado en siete parámetros hidrogeológicos: profundidad del nivel freático, D recarga, R; litología del medio acuífero, A; tipo de suelo, S; pendiente del terreno, T; naturaleza de la zona no saturada, I; Conductividad hidráulica, C. El índice de vulnerabilidad obtenido es el resultado de sumar los productos de los diferentes parámetros por su factor de ponderación, W y el puntaje asignado a cada parámetro, R, (Ecuación).

$$\text{Índice Vulnerabilidad DRASTIC} = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (3)$$

El rango posible de valores de DRASTIC está comprendido entre 23 y 226 puntos siendo más frecuentes valores entre 50 y 200 puntos. Los intervalos de vulnerabilidad se definen en función de la aplicación (Bear, et. al., 1992), de acuerdo al modelo de las ecuaciones 4 y 5. Este fue ajustado a todos los métodos de índice y superposición utilizados para definir los intervalos de vulnerabilidad en las condiciones del sistema evaluado.

$$V_i = V_{i-1} + \Delta D \quad (4)$$

Donde  $V_i$  va de 1 a 5.  $V_1$  será el mínimo valor obtenido para el índice mas el  $\Delta D$ ,  $V_2$  será  $V_1 + \Delta D$ , y así sucesivamente hasta  $V_5$  que es el máximo valor obtenido.

$$\Delta D = (D_{Max} - D_{Min}) / 5 \quad (5)$$

Donde,  $\Delta D$  es el intervalo,  $D_{Max}$  máximo puntaje de DRASTIC y  $D_{Min}$  puntaje Mínimo de DRASTIC.

## 2.6 GOD (Foster, 1987)

Este sistema sólo utiliza tres parámetros: **G**rado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración, **O**currencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes. **D**istancia al agua determinada como la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados. El índice final integrado de vulnerabilidad de acuíferos GOD es el producto de los valores obtenidos para cada uno de los parámetros incluidos en su cálculo (ecuación 6) y puede tomar valores entre 0 y 1. Mientras mayor el puntaje GOD, mayor es la vulnerabilidad.

$$\text{Índice Vulnerabilidad}_{GOD} = G * O * D \quad (6)$$

## 2.7 GODS (Foster et. al., 1996, citado por CVC, 1999)

Utiliza los mismos parámetros que el índice GOD, más por consenso de algunos investigadores, se decidió incluir el efecto que tiene el suelo, (parámetro S) sobre la vulnerabilidad, ecuación 7.

$$\text{Índice Vulnerabilidad}_{GODS} = G * O * D * S \quad (7)$$

Tanto para el índice GOD como para el GODS, la vulnerabilidad es categorizada en cinco intervalos. Entre 0.7 y 1.0 la vulnerabilidad es muy alta; entre 0.5 y 0.7 la vulnerabilidad es alta; entre 0.3 y 0.5 la vulnerabilidad es moderada; entre 0.1 y 0.3, la vulnerabilidad es baja y para menos de 0.1 la vulnerabilidad es calificada como muy baja.

## 2.8 PATHS (Valcarce y Rodríguez, 2004)

Este índice se obtiene a partir del análisis de factores como la Precipitación (Pp), Profundidad del Nivel Freático (P), Litología del acuífero (A), Tectónica (T) Pendiente Topografía (PT) y la Resistencia Hidráulica del Suelo (HS). Cada uno de los parámetros es ponderado por un factor W, según su importancia. La valoración del índice se hace según la ecuación 8.

$$\text{Índice Vulnerabilidad}_{PATHS} = WP + WPp + WA + WT + WPT + WHS \quad (8)$$

Finalmente el resultado es directamente proporcional a la vulnerabilidad del acuífero. Los autores recomiendan que para valores del índice menores a 100 la vulnerabilidad es baja; entre 100 y 120, la vulnerabilidad es moderada; entre 120 y 140, la vulnerabilidad es alta y para valores mayores a 140, la vulnerabilidad es muy alta.

## 2.9 Modelo de simulación HYDRUS 1D®

Los modelos de simulación evalúan la vulnerabilidad desde el punto de vista cuantitativo. El objetivo está en estimar los tiempos del recorrido ó las concentraciones de un contaminante en las zonas no saturadas y saturada. El limitante para el uso de los modelos de simulación es la gran cantidad y manejo de información necesaria para simular la heterogeneidad espacial edáfica e hidrogeológica. La dependencia de los datos de entrada abundantes implica que cuando los datos son escasos, los resultados obtenidos sufrirán de incertidumbre substancial (Lindström, 2005).

En este trabajo se utilizó el modelo de flujo y transporte HYDRUS-1D® (Simunek et al., 1998). El modelo HYDRUS-1D® esta desarrollado en elementos finitos y soluciona numéricamente la ecuación de Richards (1931) para flujo en medios porosos con contenido de humedad variable, ecuación 9, incluyendo la ecuación de advección-dispersión para el flujo de calor y transporte de solutos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (9)$$

donde h es la cabeza de presión [L],  $\theta$  es el contenido volumétrico de humedad [ $L^3 L^{-3}$ ], t es el tiempo [T], x es la coordenada espacial [L], S explica la absorción de agua por las raíces de la planta (Feddes et. al., 1978) [ $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ],  $\alpha$  es el ángulo entre la dirección del flujo y el eje vertical ( $\alpha = 0^\circ$  para flujo vertical,  $\alpha = 90^\circ$  para flujo horizontal, y  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  para flujo inclinado) y K es la conductividad hidráulica [ $LT^{-1}$ ].

El modelo describe las características hidráulicas de la zona no saturada usando las ecuaciones propuestas por Brooks y Corey (1966) y las modificaciones de funciones analíticas hechas por van Genuchten (1980), para mejorar la descripción de características hidráulicas cerca de la saturación, los parámetros de dicha ecuación ( $Q^r$ ,  $Q^s$ ,  $\alpha$ , n,  $K^s$  y l), fueron seleccionados de acuerdo al material de la base de datos de HYDRUS 1D®, dado que no se contaba con este tipo de información

El modelo HYDRUS 1D®, fue utilizado para encontrar el tiempo de viaje de un posible contaminante a través de la zona no saturada hasta el nivel freático. Algunos supuestos al momento de la simulación fueron: el flujo es solamente advectivo, vertical y el contaminante viaja mezclado con el agua, las características del contaminante no son tenidas en cuenta, puesto que se evalúa la vulnerabilidad intrínseca, la vulnerabilidad disminuye en la medida en que el contaminante resida mayor tiempo en el suelo.

El tiempo de viaje indica qué tanto puede residir el contaminante en el suelo, sufrir fenómenos que conlleven a su decaimiento, transformación y/o desaparición. Para medir el tiempo de viaje, se simuló un evento de infiltración con el modelo HYDRUS 1D®, a través de la columna de suelo (Figura 1), por un período de dos años, para lo cual se contó con series climatológicas que permitieron tener una condición variable para la superficie; la condición de saturación en el fondo de la columna fue constante. En la mayoría de las simulaciones puntuales la sustancia alcanzó el acuífero con este período de simulación.

Para verificar directamente el tiempo de viaje, se incluyó en la simulación un trazador no reactivo; este trazador fue aplicado en la superficie del terreno al inicio de la simulación, el cual viajó a través de cada columna respondiendo a un flujo netamente advectivo, lo cual se consiguió minimizando los parámetros difusivos y/o reactivos.

Para valorar la vulnerabilidad con el modelo HYDRUS 1D® el tiempo de viaje fue asociado al criterio de movilidad de un contaminante (KEMI, 1992). Así una sustancia que posee una movilidad extrema, es decir que en menos de 50 días ha llegado a la fuente subterránea la vulnerabilidad será muy alta, para una movilidad alta, cuyo tiempo está entre 50 y 150 días, la vulnerabilidad es alta; si la movilidad es ligera, es decir el tiempo está entre 500 y 2000 días la vulnerabilidad es baja y si la sustancia se considera inmóvil, se necesitan más e 2000 días para alcanzar el acuífero, la vulnerabilidad será muy baja.

### 3. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a un importante relleno aluvial entre las Cordilleras Occidental y Central en el departamento del Valle del Cauca, al sur occidente colombiano, (Figura 2.). Comprende el acuífero influenciado por la zona plana de las cuencas de los ríos Bolo, Fraile, Desbaratado, Cali, Jamundí, Meléndez y el río Cauca como drenaje principal. El área aproximada es 835 km<sup>2</sup>, alturas de 900 a 1100 m.s.n.m., precipitación de 1200 mm/año y una ETP de 800 mm/año.

La zona plana es una superficie modelada en depósitos aluviales del río Cauca y algunos de sus afluentes, conformada por gravas, arenas finas, limos y arcillas, los cuales han tenido intensa influencia antrópica con fines agrícolas, principalmente en la adecuación de cauces para la agricultura mecanizada.

Los suelos se desarrollaron a partir de materiales aluviales provenientes del río Cauca y algunos de sus afluentes, conformados por gravas, arenas finas, limos y arcillas, los cuales han tenido intensa influencia antrópica con fines agrícolas, principalmente en la adecuación de cauces para la agricultura mecanizada. Poseen drenajes que van desde buenos hasta muy pobres influenciados directamente por niveles freáticos temporalmente altos en las zonas medias y constantemente someros para zonas cercanas al río Cauca (CVC, 1997). Hacia la zona de los conos aluviales (este y oeste) los depósitos provienen de la remoción en masa de la parte media y alta de las Cordilleras occidental y central. Los sedimentos presentan gradación de bloques, guijos y guijarros en la parte más alta de la unidad, los sedimentos más finos como arenas, limos y arcillas se ubican en la parte más distal, donde se interdigitan con los depósitos de la llanura aluvial del río Cauca.

La zona no saturada del acuífero del Valle del Cauca está compuesta principalmente por sedimentos finos. En zonas de cauces abandonados, los sedimentos son más gruesos al igual que en las zonas cercanas al pie de monte, con mayor presencia hacia la cordillera central. La variación en tamaño de los materiales responde a la dinámica fluvial que existe en la zona. Cerca al río Cauca la zona no saturada es de menor espesor, debido a la influencia que tiene el nivel del río. A medida que se asciende hacia el piedemonte, el acuífero se encuentra a mayor profundidad, excepto en la zona influenciada por los ríos Bolo y Fraile, donde los niveles, son más elevados.

El sistema hidrogeológico se caracteriza por una gran unidad acuífera intercalada con lentejones de limos y arcillas. No se trata de un acuífero estrictamente estratificado sino que es una sola unidad acuífera la cual presenta algunos lentejones de arcilla con total conexión hidráulica entre capas. El flujo subterráneo en la zona tiene direcciones Este-Oeste en la margen derecha del río Cauca y Oeste-Este en la margen izquierda. Los gradientes hidráulicos son altos hacia los conos aluviales y muy bajos en la zona próxima al río Cauca. Hay una componente regional del flujo subterráneo en dirección Sur - Norte. La recarga del acuífero se da principalmente en los conos aluviales, con un mayor aporte por precipitación desde la zona de ladera, ver Figura 2.

#### 3.1 Manejo de la información

La información en su totalidad fue suministrada por la Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC). Se contó con información histórica de niveles freáticos, precipitación, evapotranspiración, caudales; cartografía detallada de suelos a nivel de consociación; estratigrafía de zona no saturada hasta tres metros de profundidad en la zona plana a escala 1:25000; topografía del orden de 5m entre curvas a nivel y recarga del acuífero, entre otros.

Para aplicar cada uno de los métodos de índice y superposición se usó un Sistema de Información Geográfica (SIG), desarrollado con el software (ARCGIS®).

Parte de la información necesaria para aplicar el modelo HYDRUS 1D®, fue tomada de la base de datos del mismo modelo, tal fue el caso de los parámetros empíricos de la ecuación de Richards, los cuales se escogieron según la textura ó material de cada estrato. La simulación se realizó para un período de 2 años consecutivos, para los cuales se tenían series de precipitación y evapotranspiración, a resolución diaria.

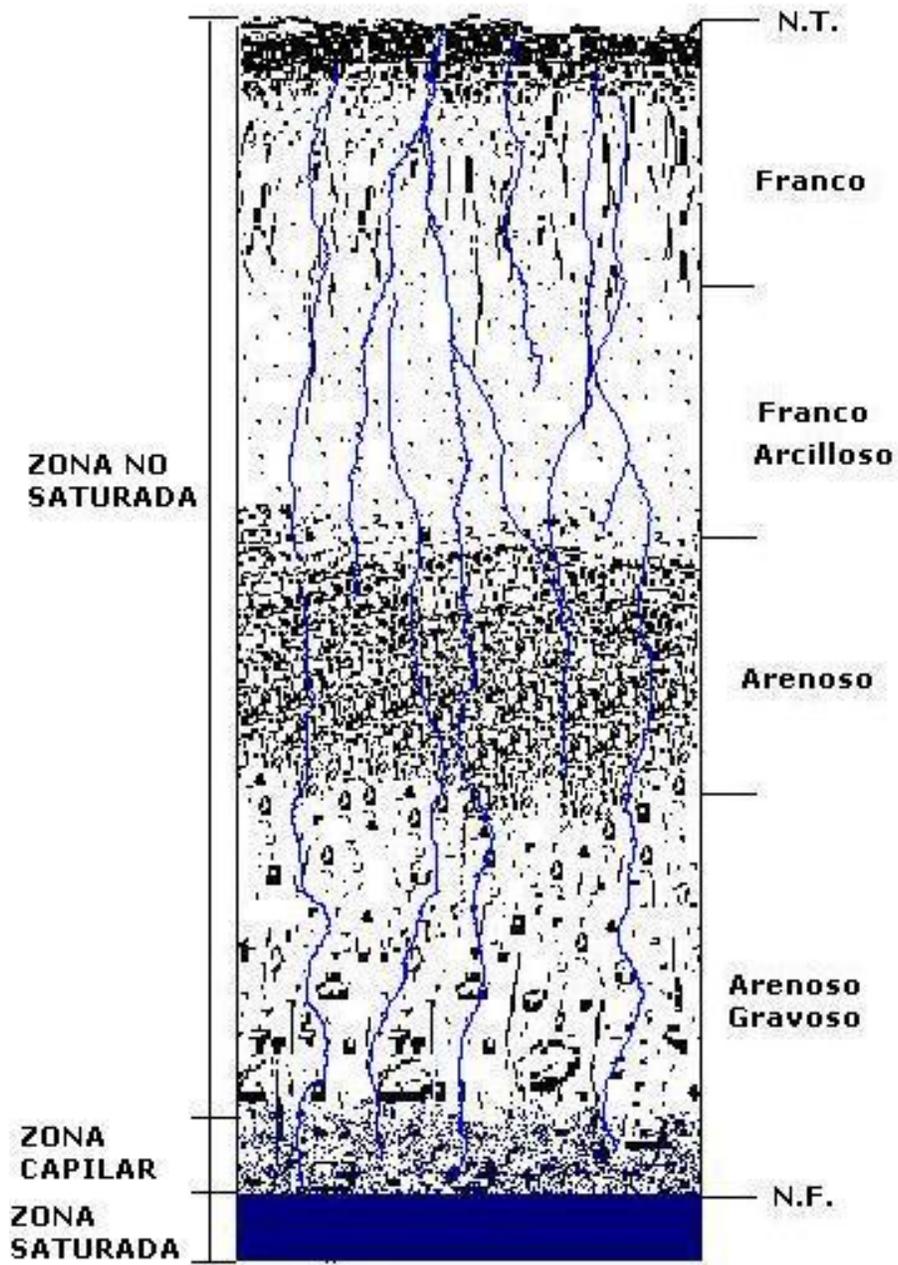


Figura 1. Esquema de columna de suelo utilizada para la simulación con HYDRUS 1D®,

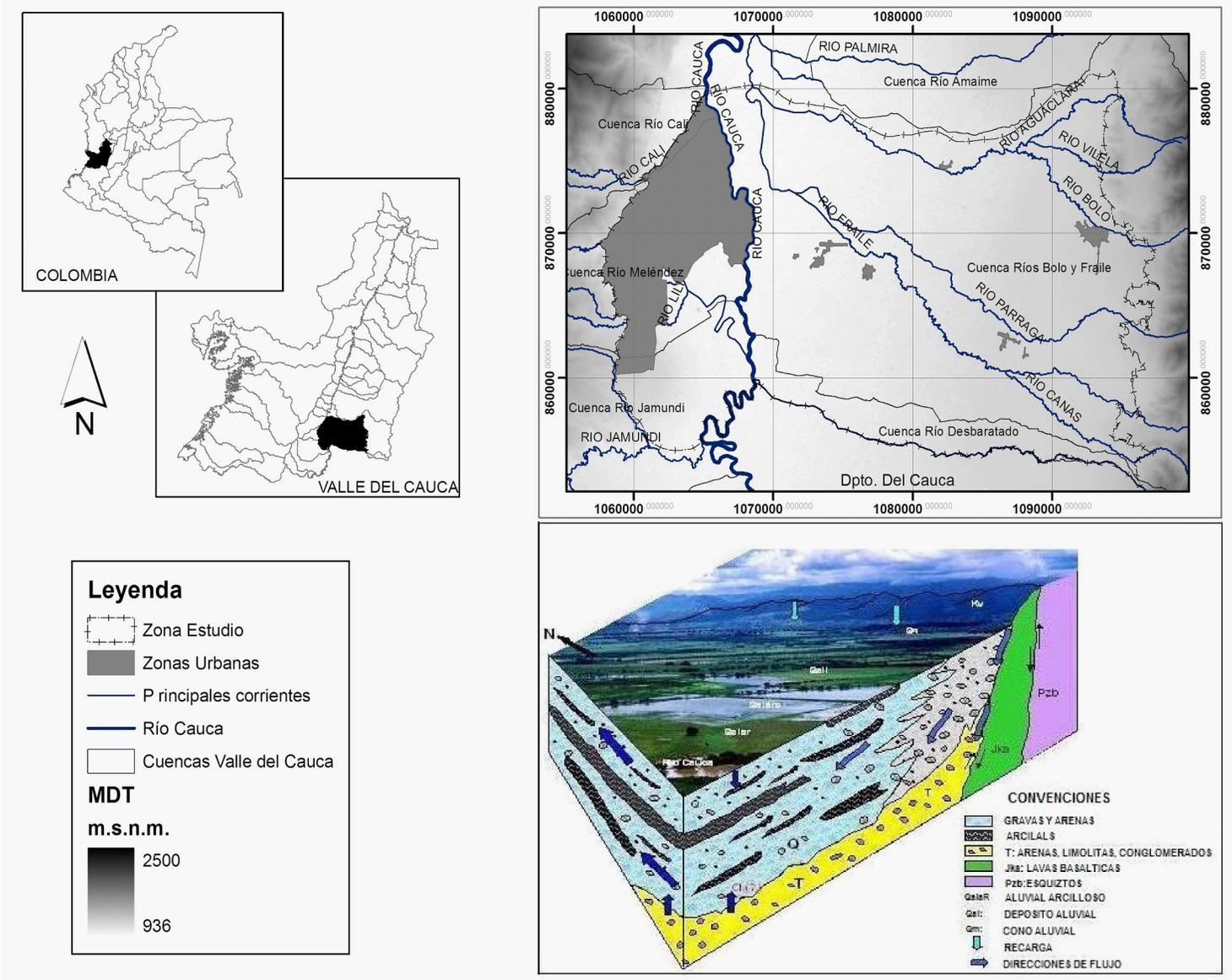


Figura 2. Zona de Estudio: Zona Sur del Acuífero Valle del Cauca

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Seis metodologías del tipo índice y superposición (DRASTIC, GOD, GODS, BGR, PATHS, AVI) fueron aplicadas, cada una fue contrastada con los resultados obtenidos con el modelos de simulación (HYDRUS 1D®); asumiendo que la simulación puede hacer una mejor representación de la realidad, ya que obedece a leyes físicas del movimiento del flujo en medio no saturado representado por la ecuación de Richards. El modelo además incluye directamente las variables meteorológicas, la profundidad del medio no saturado hasta el nivel freático y además considera el contenido de humedad del suelo.





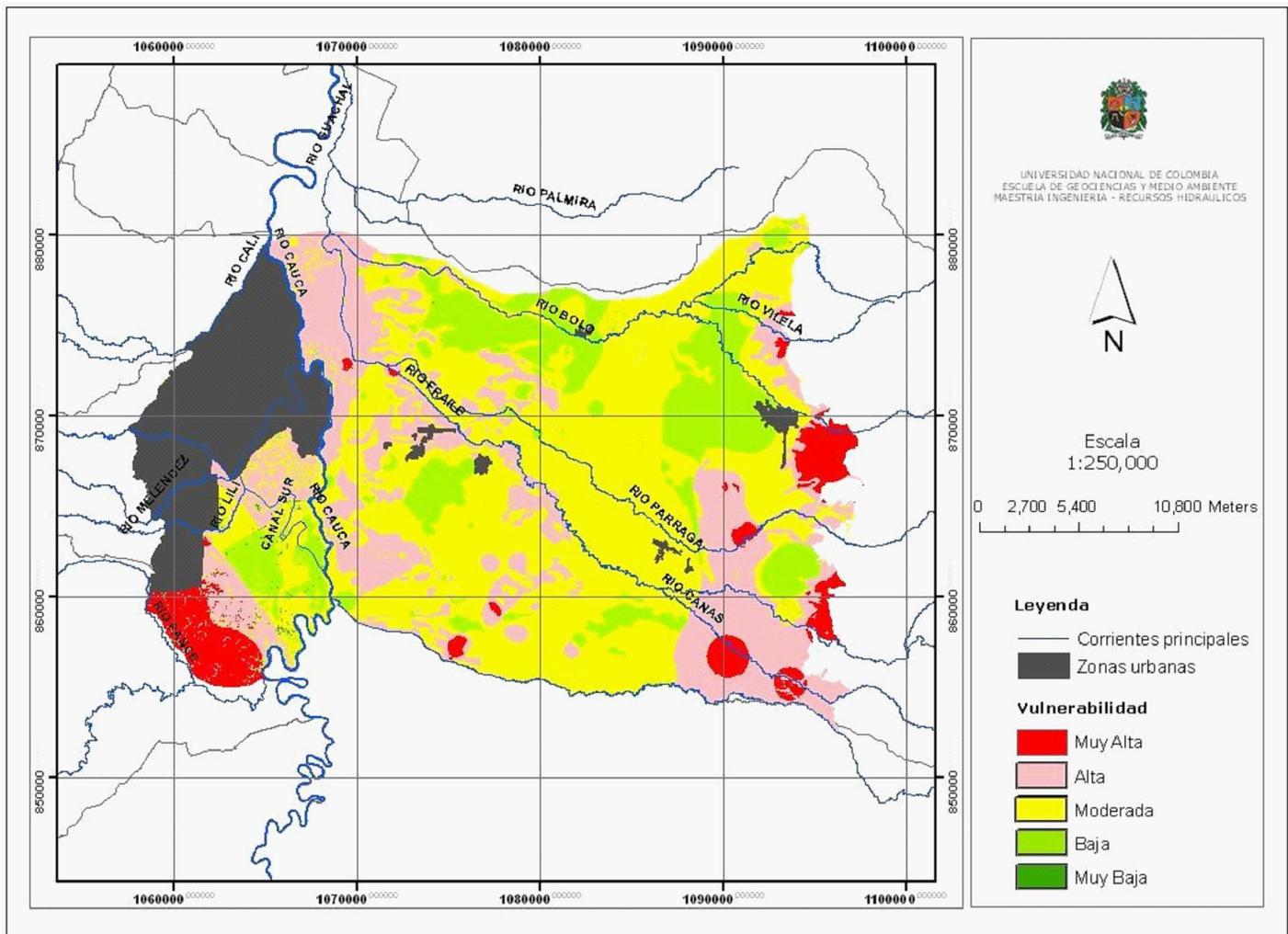


Figura 5. Vulnerabilidad a la contaminación, índice DRASTIC

Tal como se observa en la Figura 7, el índice GODS, redefine notablemente la vulnerabilidad, si es comparada con los resultados del índice GOD. El suelo aporta protección en sectores arcillosos dando lugar a la presencia de vulnerabilidades baja y moderada, la vulnerabilidad alta se ubica en los sectores de suelos más permeables y la vulnerabilidad muy alta para niveles freáticos muy someros.

La zona de estudio es definida como zona plana, la profundidad del nivel freático, se ubica en el mismo rango según la valoración del método PATHS, la valoración para el régimen de precipitación varía poco, el acuífero es considerado como libre en toda su extensión y no se consideran sistemas fallados.

Entonces, la vulnerabilidad según éste índice es función de materiales del suelo. Sectores arcillosos presentan vulnerabilidades moderadas, y sectores arenosos son categorizados como de vulnerabilidad alta y muy alta, dependiendo de la gradación del material presente (Figura 8).

La Figura 9, muestra los resultados obtenidos con el modelo de flujo HYDRUS 1D®. La vulnerabilidad muy alta se observa en zonas de gran influencia fluvial (Nor-Occidente), donde los ríos Cauca, Bolo y Fraile se encuentran cercanos. Aquí los niveles freáticos son someros (menos de 50 cm) y la delgada capa de arcillas no es suficiente para retener la carga contaminante. En este caso el modelo estima que un contaminante accedería a la zona saturada en menos de 50 días. La zona de vulnerabilidad alta corresponde a niveles un poco más profundos y menores a 1m. En este caso la residencia del contaminante en la zona no saturada estaría entre 50 y 150 días. La vulnerabilidad moderada domina el área de estudio.

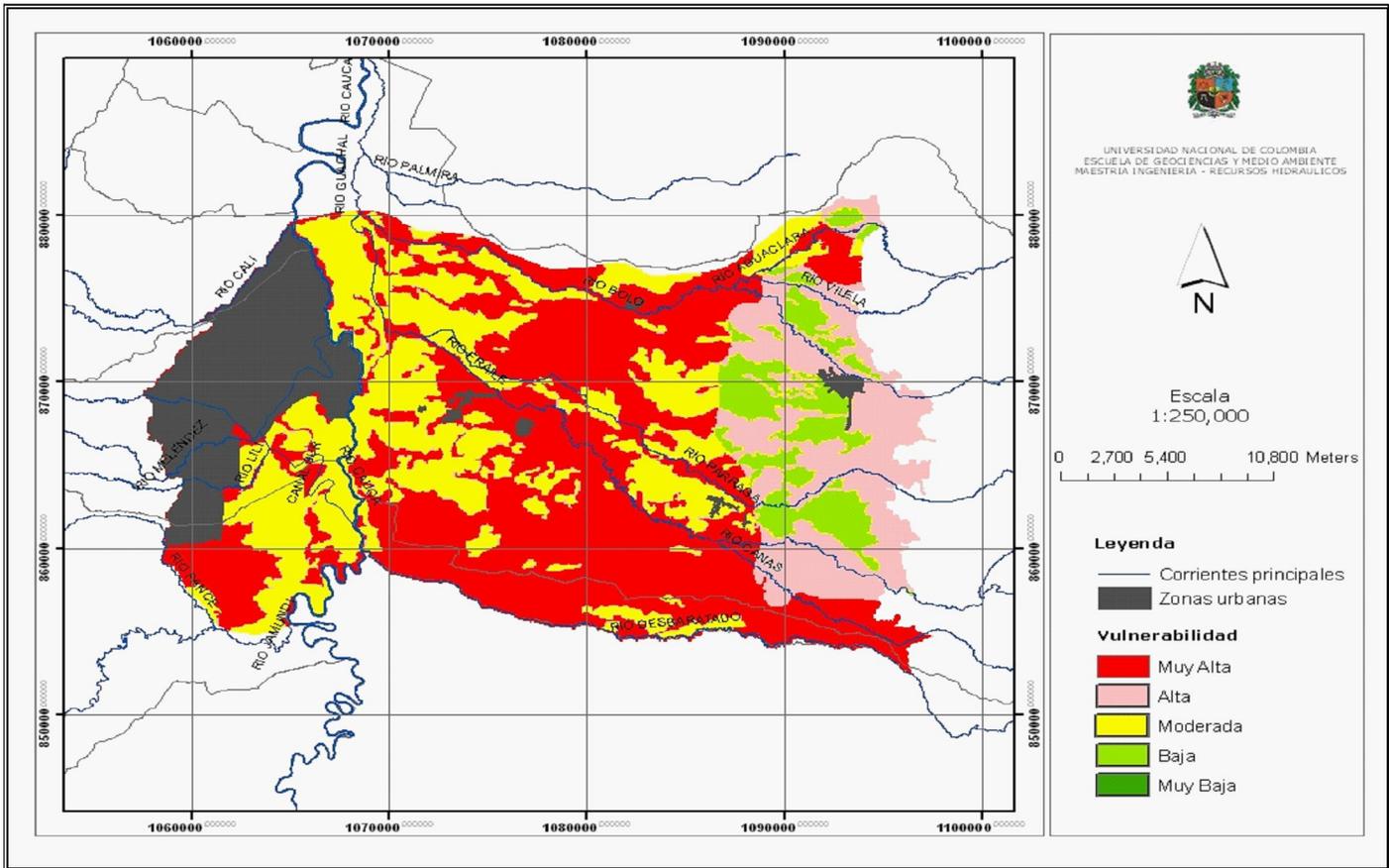


Figura 6. Vulnerabilidad a la contaminación según el índice GOD

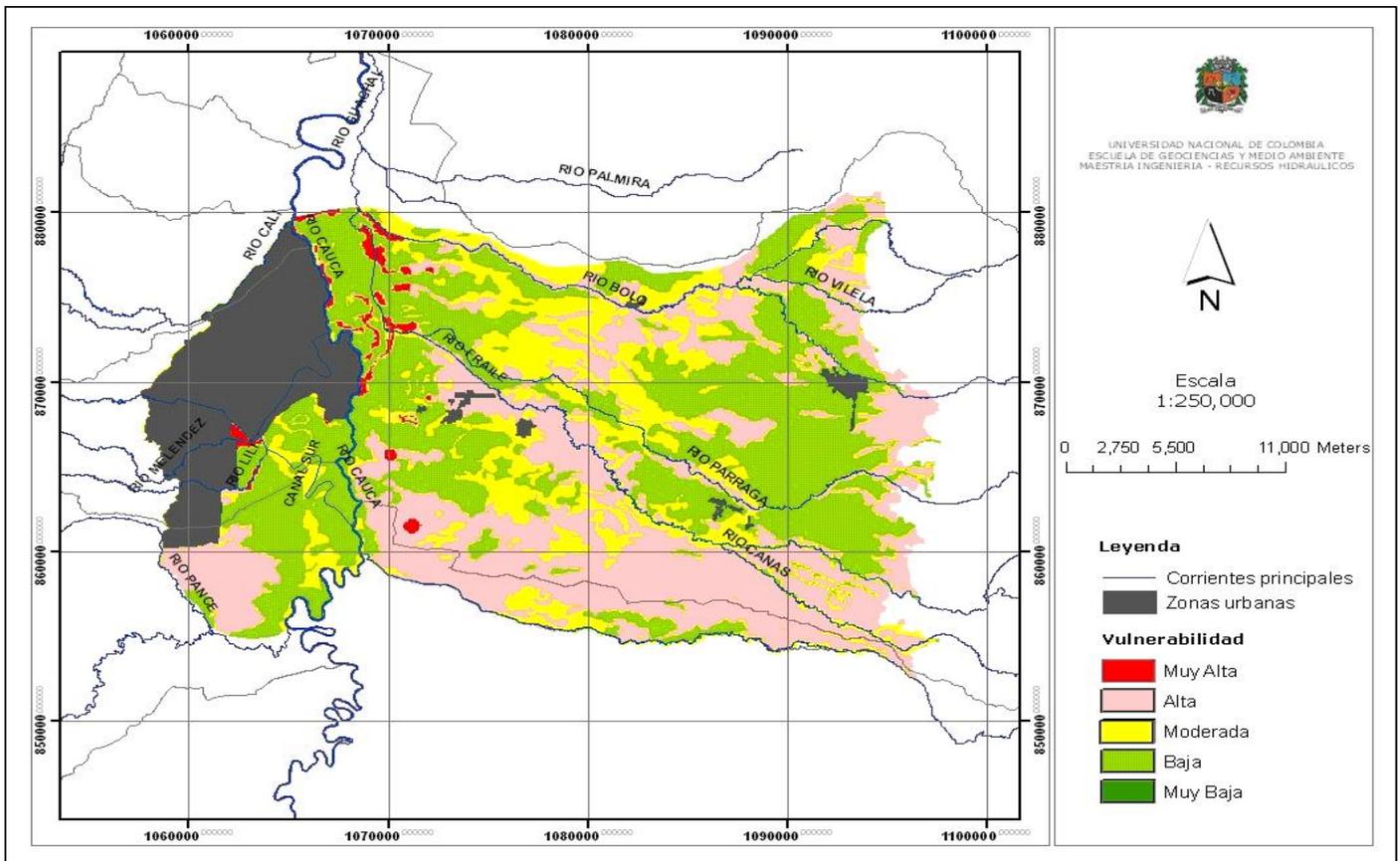


Figura 7. Vulnerabilidad a la contaminación según el índice GODS

Obedeciendo estos resultados a la intercalación de estratos de diferente permeabilidad y la profundización graduada del nivel freático. El contaminante llegará al acuífero en este caso en un lapso comprendido entre 150 y 500 días.

Resulta difícil recomendar uno u otro método de índice y superposición, que por su sencillez de aplicación y la poca necesidad de información para algunos de ellos, serían una buena opción. Sin embargo los resultados impiden una elección ante la variabilidad de los mismos. Por lo cual se cree que siempre será mejor realizar una simulación con un modelo de flujo, ya que con éste, el nivel de incertidumbre disminuye ante el menor número de suposiciones que debe hacer el investigador comparado con los modelos de índice y superposición.

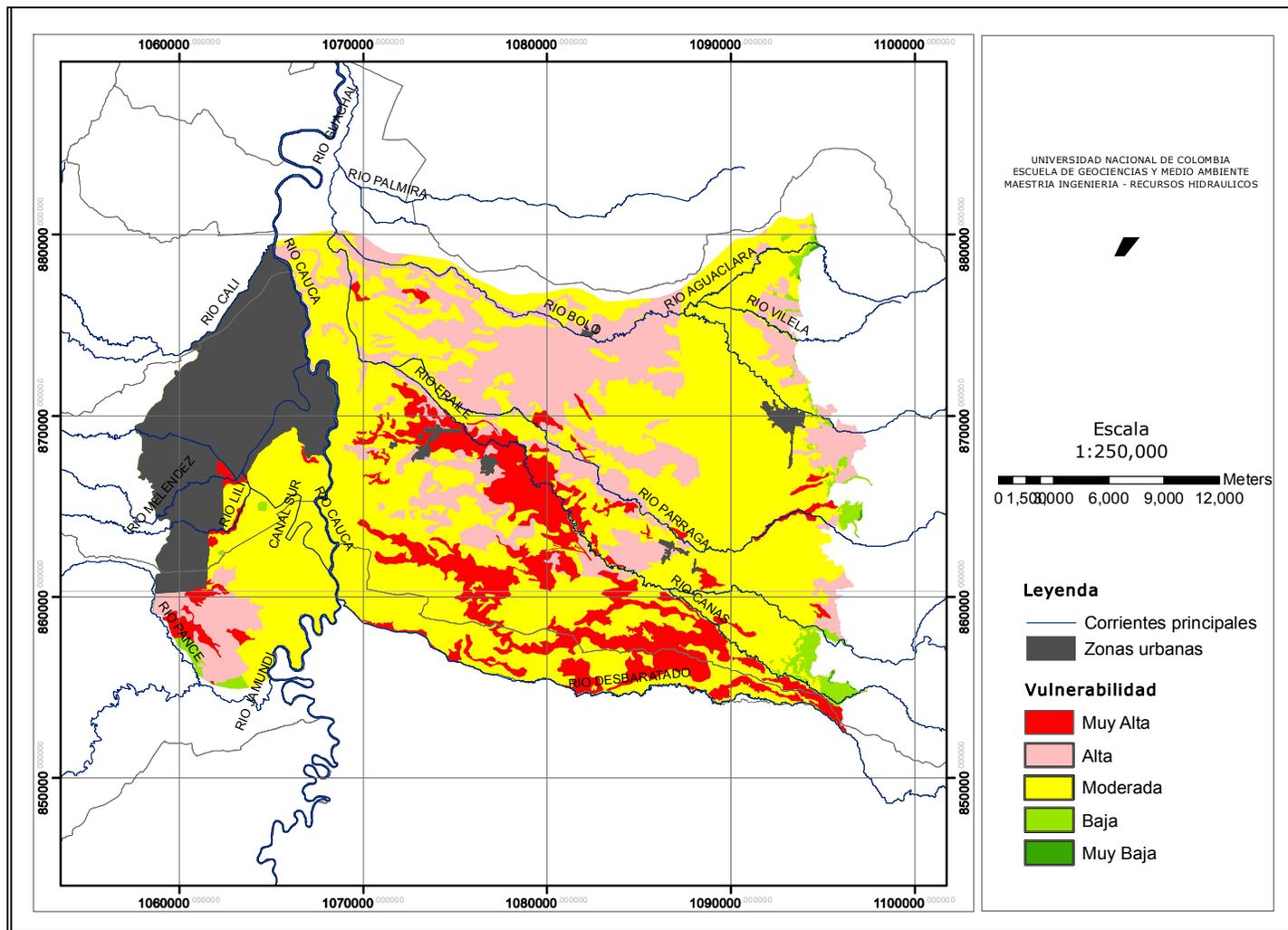


Figura 8. Vulnerabilidad a la contaminación según el índice PATHS

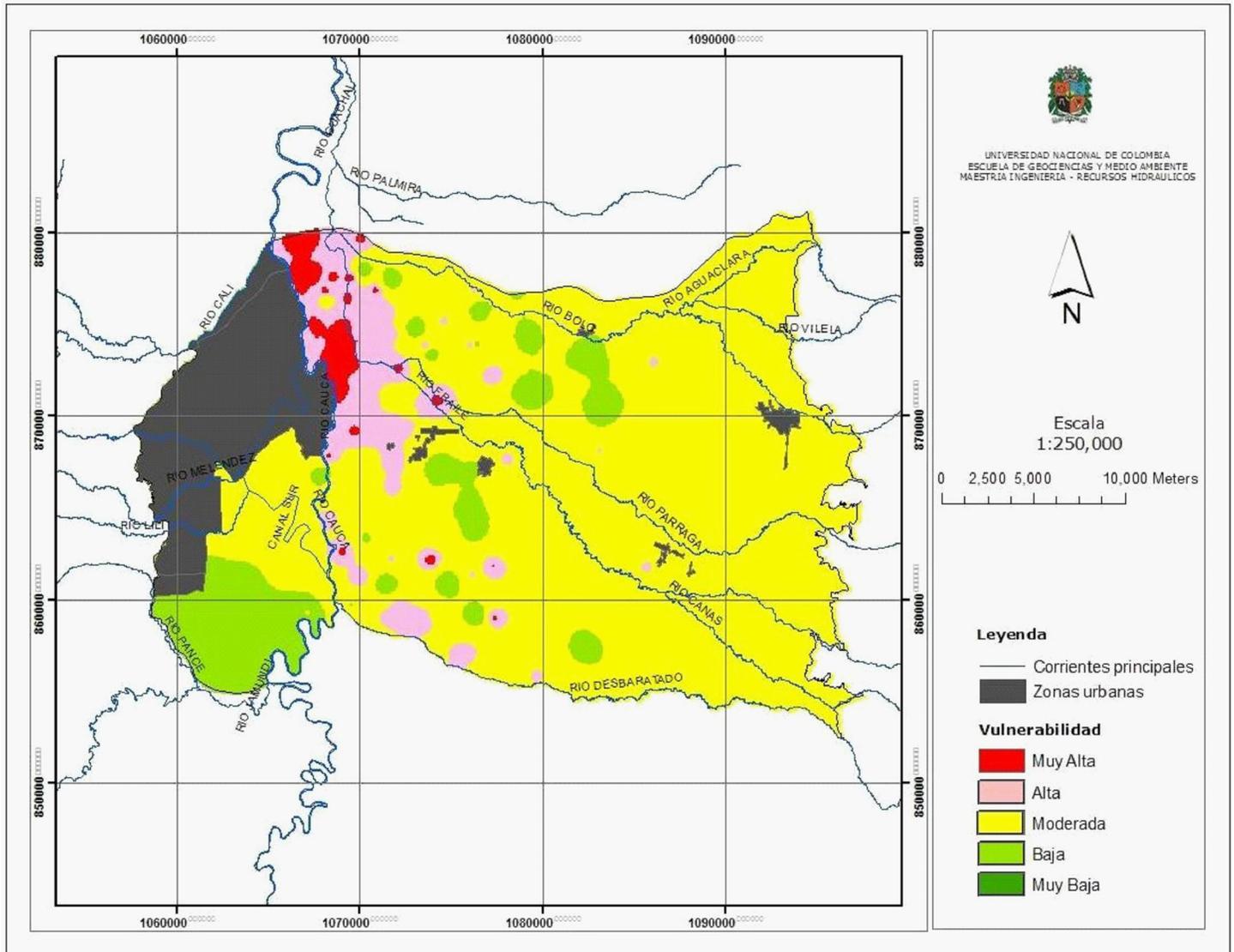


Figura 9. Vulnerabilidad a la contaminación, HYDRUS 1D®

## 5. CONCLUSIONES

Dado que es poco realista pensar en la protección de toda el agua subterránea, zonificar la vulnerabilidad puede ser muy ventajoso, pues es la única manera de asegurar que se alcance de forma objetiva el equilibrio entre el desarrollo económico y la protección del acuífero.

Se considera que los métodos de índice y superposición son subjetivos y que, si es posible y se cuenta con la información necesaria a una escala detallada y el adecuado conocimiento del sistema, los mapas de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea deberían ser construidos con un modelo de simulación en el cual se incluya menos incertidumbre para la toma de decisiones. Así pues se gana en precisión y confianza en los resultados, más el costo en información es bastante elevado.

No es posible, desde esta investigación, descartar ó recomendar alguno de los métodos de índice y superposición. Lo que si es claro es que estos métodos incluyen demasiada incertidumbre dado que dependen del criterio del investigador. Además tal como lo reporta la NRC (1993) todo acuífero tiene algún grado de vulnerabilidad a la contaminación y cualquier evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos tiene incertidumbres.

Contrario a lo que podría pensarse, la presencia de capas arcillosas en la zona no saturada, (no en todos los casos), no es garantía de protección para el acuífero; antes de aseverar ésto se debe tener en cuenta la ubicación del nivel freático, dado que un contaminante puede demorar menos transitando por una capa arcillosa con mucha materia orgánica, alto contenido de humedad, de poco espesor que una capa arenosa profunda con un bajo contenido de humedad, tal como se observó en los resultados del modelo de flujo de zona no saturada.

Ninguno de los índices replicó completamente los resultados del HYDRUS 1D®. Algunos índices como el BGR y GODS, coincidieron con el HYDRUS 1D® en la ubicación de zonas de vulnerabilidad muy alta; otros como el GOD y AVI, que califican una amplia zona como vulnerabilidad muy alta incluyen también ésta zona del HYDRUS-1D.

Finalmente se encontró que los métodos de índice y superposición aciertan en la inclusión de parámetros como la permeabilidad de los estratos no saturados, la profundidad del nivel freático y algunos la recarga, más no incluyen un parámetro muy importante en la definición de la vulnerabilidad, que es el contenido de humedad del suelo que puede acelerar ó retardar el acceso y tránsito del contaminante hasta el acuífero.

## AGRADECIMIENTOS

Dirección de Investigación y Extensión de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (DIME).

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Colombia.

## REFERENCIAS

- Aller, I., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. H. y Hackett, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. U.S. Environmental Protection Agency, EPA, Report 600/2-87-035; pp. 1-455.
- Andersen, L. J. y Gosk, 1987. Applicability of vulnerability maps. TNO Committee for Hydrological Research: Proceedings and Information, Delft, Netherlands. 38, pp. 321-332.
- Auge M., 2004. Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos. Universidad de Buenos Aires. CONICET.
- Bear, J., Beljin M. S. y ROSS, R. R., 1992. Fundamentals of Ground-Water Modeling. Groud Water Issue. EPA. 11 P.
- Brooks, R. H., y Corey, A. T., 1966. Properties of porous media affecting fluid flow, J. Irrig. Drainage Div., ASCE Proc. 72(IR2), pp. 61-88.
- Carbonell A., 1993. Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Research Council. National Academy Press. 204 P.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, 1997. Subdirección de Patrimonio Ambiental. Grupo De Suelos. Estudio General De Suelos, Zona Andina. Cali, Colombia.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, 1999. Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en el Valle del Cauca. Santiago de Cali. 26 P.
- Feddes, R. A., P. J. Kowalik, y H. Zaradny, 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley & Sons, New York.
- Foster, S., 1987. Fundamental concept in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc. Intl. Conf. Vulnerability of soil and groundwater to pollution. Nordwijk, The Netherlands.

- Foster S. y Hirata R., 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes. OPS-CEPIS, Lima. 80 P.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. y Paris, M., 2002. Groundwater quality protection. A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. The World Bank. Washington, D.C. 88 P.
- Hölting, B., Haertlé, T., Hohberger, K.H., Nachtigall, K.H., Villinger, E., Weinzierl, W. y Wrobel, J-P., 1995. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. - Geol. Jb., C-63: pp. 5-24; Hannover. - [translated into English by the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources: Concept for the Determination of the Protective Effectiveness of the Cover above the Groundwater against Pollution. - Ad-hoc Working Group on Hydrogeology, Hannover. 28 P].
- KEMI (National Chemicals Inspectorate), 1992. Pesticide Data Fact Sheet. Suecia.
- Lindström, R., 2005. Groundwater Vulnerability Assessment Using Process-Based Models. Vetenskap Och Kons, KTH, Architecture and the Built Environment. Stockholm, Sweden. 36 P.
- Margat J., 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution. Bases de la cartographie. BRGM # 68. SLG 198 HYD. Orléans
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 1993. Groundwater vulnerability assessment: Contamination potential under conditions of uncertainty. Committee for Assessing Ground Water Vulnerability, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC. US.
- Ramirez, J., 2004. Analisis comparativo de técnicas de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos. Aplicacion a la zona norte de la ciudad de Santiago. Tesis de maestría. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.
- Richards, L.A., 1931. Capillary Conduction through Porous Mediums. Physics 1: pp. 313-318.
- Simunek, J., Huang K., y Van Genuchten, M. TH., 1998: The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably- saturated media. Version 6.0, Research Report No. 144, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 164 P.
- Valcarce O. R. M. y Rodríguez M. W., 2004. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en los acuíferos cubanos. IV seminario-taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación: protección de la calidad del agua Lima, Perú. En: <http://www.tierra.rediris.es/hidrored/index.html>.
- Van Genuchten, M.TH., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: pp. 892-898.
- Van Stempvoort, D., Ewert, L., y Wassenaar, L., 1992. AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada. Prairie Provinces Water Board, Regina, Saskatchewan.
- Vrba, J. 1998. Vulnerabilidad, protección y gestión de la calidad de las aguas subterráneas. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: Un problema pendiente. Valencia 1998. AIH-GE.
- Zaporozec A. y Vrba J., 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Association of Hydrogeologist. Vol 16, 131 P.