

ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN MODELO CUANTITATIVO - HYDRUS 1D

Liliana Ríos Rojas & María Victoria Vélez Otálvaro
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín
lrios@unal.edu.co, mvvelez@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 11 de Abril de 2007/ Aceptación: 11 de Mayo de 2007 / Versión final: 5 de Mayo de 2007

RESUMEN

En el presente trabajo se efectúa una estimación y zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea del sector sur del acuífero del Valle del Cauca, mediante el modelo HYDRUS-1D que representa los fenómenos de flujo y transporte en la zona no saturada (ZNS). Se comparan los resultados con los obtenidos usando diferentes métodos de índice y superposición. También se simula un evento de contaminación usando el modelo Visual MODFLOW para la zona saturada (ZS). El modelo HYDRUS-1D muestra que el 75% de la zona de estudio es de vulnerabilidad moderada y que la zona influenciada por los ríos Bolo, Fraile y Cauca posee vulnerabilidad entre alta y muy alta, por la proximidad del nivel freático a la superficie del suelo. Los resultados del modelo no pudieron ser validados con información de campo, y por tanto el propósito es presentar esta metodología como punto de partida para la realización de campañas de medición y monitoreo y para estudios detallados de los fenómenos físicos bajo estudio.

PALABRAS CLAVES: Vulnerabilidad; Contaminación del Agua Subterránea; Acuíferos; Valle del Cauca (Col.); Zona no Saturada; Zona Saturada

ABSTRACT

This study summarizes an estimation with areal classification of the groundwater pollution vulnerability of the Valle del Cauca southern aquifer. The HYDRUS-1D model is used to estimate flow and transport in the soil non-saturated zone. Results are compared with the observed ones by using different methods from index and superposition methods. Also a contamination event is simulated using Visual model MODFLOW for the saturated zone (ZS). Model HYDRUS-1D allowed to identify that 75% of the study zone is of moderate vulnerability and that the zone influenced by the rivers Bolo, Fraile and Cauca has high to very high vulnerability due to the proximity of the water table to the ground surface. The results of the model could not be validated with field information, and therefore the aim is to present/display this methodology as a departure point for the accomplishment of measuring and monitoring campaigns for detailed studies of the physical phenomena under study.

KEY WORDS: Vulnerability; Groundwater Contamination; Aquifers; Valle del Cauca (Col.); Unsaturated Zone; Saturated Zone

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas constituyen una importante fuente de suministro de agua en Colombia, tanto para las zonas urbanas como rurales. En zonas como la Guajira, los Valles de los ríos Cauca y Magdalena, la fuente subterránea es vital para el desarrollo social, agrícola e industrial. En el caso particular del Valle del Cauca, la presión sobre el recurso es intensa dado que el uso del suelo es principalmente agrícola y el uso de agroquímicos constituye una carga contaminante constante y significativa. Por ello es necesario estudiar la vulnerabilidad de los acuíferos ante riesgos de contaminación, como herramienta para la conservación, protección y gestión del recurso subterráneo. Este trabajo estudia la vulnerabilidad de los acuíferos ante la contaminación, y ha sido desarrollado con el apoyo de la Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC), aplicando el modelo HYDRUS-1D (Simunek et al., 1998), el cual simula el flujo y transporte de contaminantes a través de la (ZNS) Zona no saturada. Los resultados del modelo de ZNS son comparados con resultados obtenidos de la aplicación de métodos de índice y superposición (Lindström, 2005; Auge, 2004). Una vez obtenidas las zonas homogéneas de vulnerabilidad se simula un evento de contaminación con el modelo Visual MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988), con el cual puede modelarse el comportamiento de la sustancia contaminante en la zona saturada.

2. ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

El término “vulnerabilidad” ha recibido numerosas definiciones y calificaciones en el contexto de las aguas subterráneas, y para ello se han propuesto variadas metodologías: Margat (1968), Foster e Hirata (1991), EPA (1991), Carbonell (1993), Zaporozec and Vrba (1994), Custodio (1995).

Foster (1987) considera la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero como “aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie”. Vrba (1998) hace una diferenciación entre dos tipos de vulnerabilidad: vulnerabilidad intrínseca o natural (como una función de las condiciones naturales) y la vulnerabilidad específica (valora la vulnerabilidad

en relación a un sólo tipo de contaminante o un grupo de contaminantes de propiedades similares).

Las metodologías más usadas y reportadas en la literatura para el análisis y cuantificación de la vulnerabilidad de acuíferos son las denominadas “de índice” y “superposición”, las cuales asumen que algunos parámetros influyen más que otros en la determinación de la vulnerabilidad del acuífero. Además existen métodos estadísticos que relacionan la vulnerabilidad con la probabilidad que el contaminante alcance el nivel freático. Y también existen los modelos de simulación que estiman los tiempos de viaje del contaminante a través de la zona no saturada (ZNS), los cuales se utilizan en el presente estudio.

2.1. Modelo de flujo y transporte en ZNS, HYDRUS-1D

El modelo HYDRUS-1D (Simunek et al., 1998) utiliza una solución numérica de la ecuación de Richards (1931) (Ec. 1), mediante la técnica de elementos finitos, para representar el flujo de agua en medios porosos con contenido de humedad variable. Tal modelo incluye la ecuación de advección-dispersión (Ecs. 2 y 3) para representar la fase de transporte de solutos y flujo de calor. El modelo permite cuantificar los tiempos de viaje de un trazador (sustancia contaminante) desde la superficie del suelo, a través de la ZNS, hasta la superficie freática. La ecuación básica es:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (1)$$

Donde h es la cabeza presión [L], θ es el contenido volumétrico de humedad [L³ L⁻³], t es el tiempo [T], x es la coordenada espacial [L] (positiva hacia arriba), S explica la absorción de agua por las raíces de las plantas (Feddes et. al., 1978) [L³ L⁻³T⁻¹], α es el ángulo entre la dirección del flujo y el eje vertical ($\alpha \neq 0^\circ$ para flujo vertical, 90° para flujo horizontal, y $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ para flujo inclinado), y K es la conductividad hidráulica [LT⁻¹].

$$\frac{\partial \theta R_c}{\partial t} + \nabla \cdot u + \mu \theta_c = 0 \quad (2)$$

$$u = -\theta D \nabla_c + q_c \quad (3)$$

Donde, c es la concentración volumétrica del soluto [M/L^3]; R , el factor de retardo (adimensional); D , el coeficiente de dispersión-difusión [L^2/T]; u , el flujo advectivo-difusivo del contaminante [M/L^2T], y μ , el coeficiente de degradación de primer orden.

La simulación se hace de manera puntual para una columna de suelo (Figura 1) de la cual se conocen las siguientes características por estrato: espesor, material, profundidad de raíces y parámetros de la ecuación de Richards (1931). Estos últimos pueden ser obtenidos a partir de los valores teóricos consignados en la base de datos del modelo, de acuerdo con el material del estrato.

tiempo de viaje en la zona se realiza a través de un proceso de interpolación.

De la misma forma, seleccionando el tipo de cultivo, pueden obtenerse los parámetros de la ecuación de Feddes et al. (1978)

$$S(h) = \alpha(h)S_p \tag{4}$$

que describe el proceso de toma de agua por las plantas (S) de acuerdo con la presión $a(h)$ [L], a la que se encuentra en determinado momento la raíz y S_p [$L^3 L^{-3}T^{-1}$], se refiere a la tasa potencial de toma de agua por las raíces.

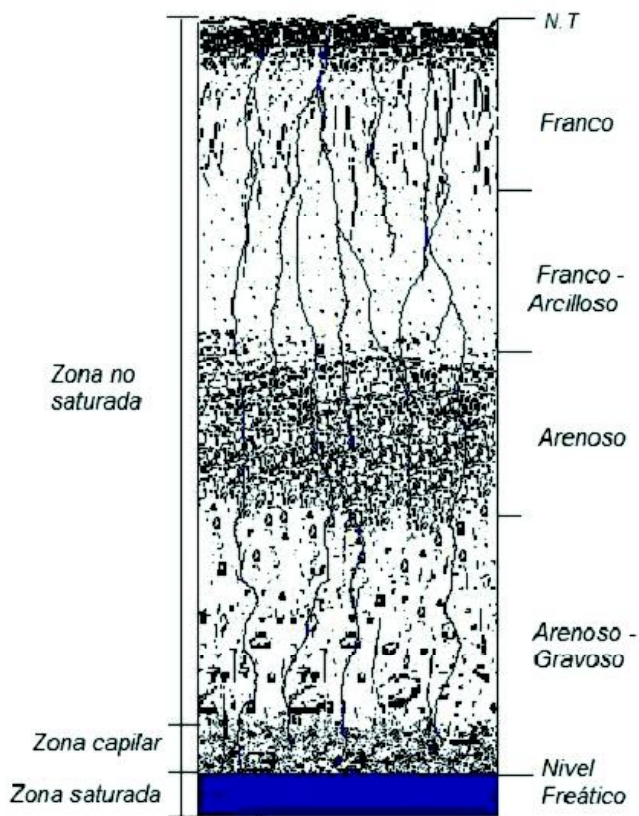


Figura 1. Esquema de la columna de suelo.

Una vez introducidos los parámetros litológicos y edáficos y las variables climatológicas, la ejecución del modelo permite al trazador (sustancia contaminante) recorrer la ZNS hasta el acuífero en un tiempo determinado; este es el tiempo de viaje del contaminante. El procedimiento se repite para cada una de las columnas disponibles y la distribución en el área del

La Figura 2 esquematiza el modelo usado por Feddes et al. (1978). Para $h < h_4$ (punto de marchitez permanente) y a punto de saturación ó anaerobiosis h_1 , la toma de agua es considerada igual a cero; el óptimo para la toma de agua se encuentra entre h_3 y h_2 ; entre h_3 y h_4 la toma decrece y entre h_1 y h_2 incrementa, linealmente con h . La simulación se hizo para un período de dos años (Nov.

1998 a Oct. 2000), considerando que para el inicio de la misma, el suelo se encontraba en capacidad de campo (0.3 atmósferas). Para esto se contaba con una serie de precipitación unificada para la zona, la cual se consiguió con la información de las estaciones encontradas en el área de estudio; de la misma manera, se obtuvo una serie de evapotranspiración real, estimada a partir del método del tanque clase A, a resolución diaria, insumos para el modelo. Las series se consideraron representativas de la zona dada la poca variabilidad fisiográfica y de cobertura, pues se trata de parte de la zona plana del Valle del Cauca, cuya cobertura principal es la caña de azúcar.

Para esta aplicación, se asume que la sustancia contaminante, un trazador (partícula hipotética) en este caso, no es reactiva y que es transportada por el agua a

través de la ZNS. Esta sustancia, cuya concentración inicial fue de 1000 mg/L, fue aplicada al suelo el primer día de la simulación y se cuantificó su tiempo de travesía hasta la ZS. Se consideró entonces como tiempo de viaje, el transcurrido entre el primer día de simulación y el momento en que una concentración de 0,002 mg/L (mínima concentración tóxica para el mercurio) de la sustancia alcanzaba el nivel freático.

La categorización de la vulnerabilidad obtenida con el modelo HYDRUS-1D se hizo asociando los tiempos de viaje al parámetro movilidad de una sustancia, para el caso un plaguicida en el suelo (KEMY, 1992), dado que ambos conceptos (movilidad y tiempo de viaje) se refieren al tiempo de residencia de la sustancia en la ZNS. Las categorías de vulnerabilidad obtenidas con este criterio pueden observarse en la Tabla 1.

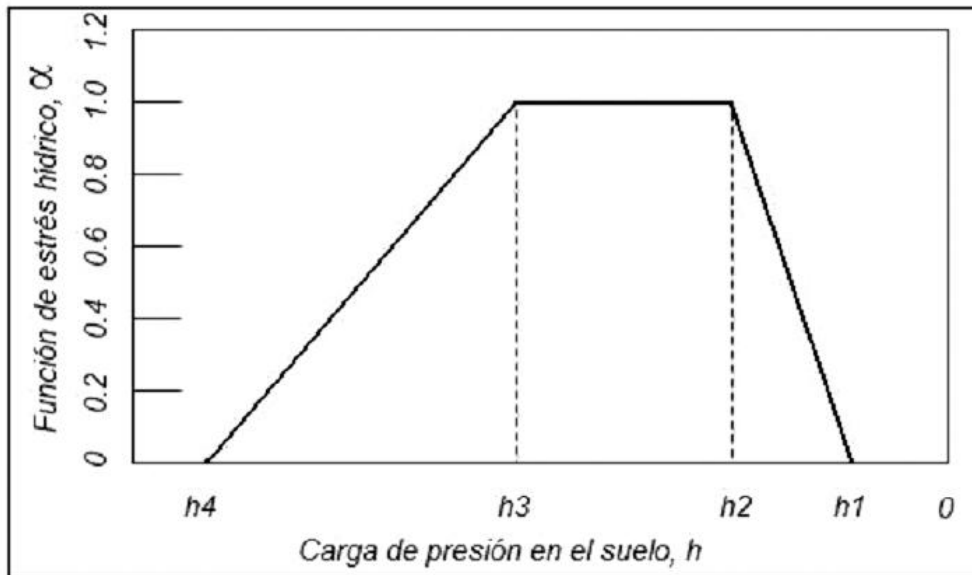


Figura 2. Modelo de Feddes et. al, (1978), para la toma de agua por las raíces.

Tabla 1. Categorías de la Vulnerabilidad para el modelo HYDRUS 1D®

Movilidad	Tiempo (días)	Vulnerabilidad
Extrema	<50	Muy alta
Alta	50 - 150	Alta
Mediana	150 - 500	Moderada
Ligera	500 - 2000	Baja
Inmóvil	>2000	Muy baja

Ahora bien, con los tiempos de viaje y su respectiva categorización de vulnerabilidad se obtuvo el mapa de vulnerabilidad del acuífero para la zona sur del Valle del Cauca, para las condiciones simuladas. Aquí cabe mencionar que los mapas de vulnerabilidad no son estáticos por que dependen de parámetros variables en el espacio y el tiempo, tales como la profundidad del nivel freático y el contenido de humedad del suelo, los cuales a su vez dependen de la variabilidad climática y que en rigor deben ser calculados para los diferentes regimenes climáticos que se presenten en la zona.

2.2. Localización e Información disponible

Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada al sur del departamento del Valle del Cauca, entre las cordilleras occidental y central

(Figura 3). Comprende aproximadamente 835 km², alturas entre los 900 a 1100 m.s.n.m. y precipitación media anual de 1000 a 1200 mm y una evapotranspiración potencial (ETP) de 800 mm/año. Corresponde al acuífero influenciado los ríos Bolo, Fraile, Desbaratado, Cali, Jamundí y Meléndez, los cuales recorren la zona perpendiculares al río Cauca, el cual transita en sentido Sur-Norte.

De acuerdo con CVC (2003), la zona de estudio corresponde a un importante relleno aluvial, cuyos depósitos pertenecen al río Cauca y a algunos de sus afluentes. Los suelos se desarrollaron a partir de estos materiales, con 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).

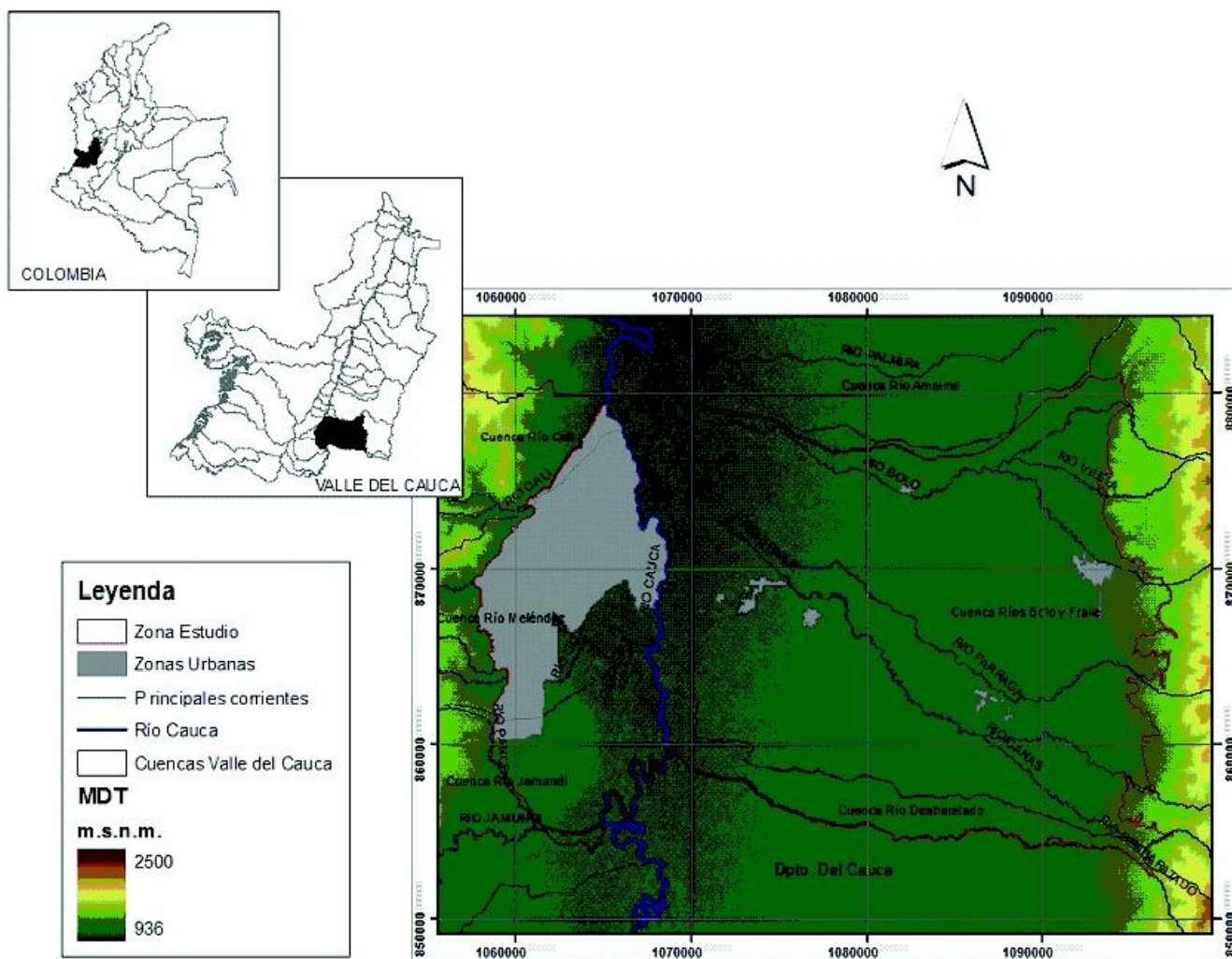


Figura 3. Zona de estudio localizada al zona sur del acuífero Valle del Cauca.

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 converge desde las cordilleras al río Cauca, con la influencia de un flujo de mayor magnitud en sentido Sur-Norte, paralelo al mismo río.

La recarga estimada del acuífero se da principalmente en los conos aluviales, con un mayor aporte por precipitación desde la zona de ladera del 66% y el restante 34% pertenece a la infiltración directa desde la zona plana (CVC, 2005), sin descartar el aporte desde los ríos, el cual aún no ha sido cuantificado ni validado.

Información

Este tipo de modelos demandan un gran volumen de información, puesto que su aplicación es puntual y su generalización en el área se hace por medio de interpolaciones, lo cual implica que entre más puntos se tengan, más ajustada será la distribución espacial. En el

caso de este estudio se contó con información estratigráfica de 212 columnas de suelo, información histórica de niveles de agua subterránea e información climatológica, como ya había mencionado. Dado que las variables climatológicas fueron unificadas para la zona de estudio, la variabilidad es representada por las condiciones litológicas del suelo.

Para cada columna se obtuvo un tiempo de viaje. El promedio para una zona se estimó a partir una interpolación con el método Inverso de la distancia (IDW, por sus siglas en inglés).

La profundidad del nivel freático se mide directamente en campo. De este parámetro se contó con información histórica, ya que la CVC, realiza dos campañas de medición de niveles al año, para toda la zona plana del Valle del Cauca influenciada por el acuífero. Los niveles fueron tomados de 255 pozos de monitoreo ubicados en el área de estudio. Con estos se desarrolló la distribución espacial de los niveles para el período de simulación; mapa de la Figura 4, éste restado del mapa de topografía de la zona, permitió definir la profundidad de la ZNS.

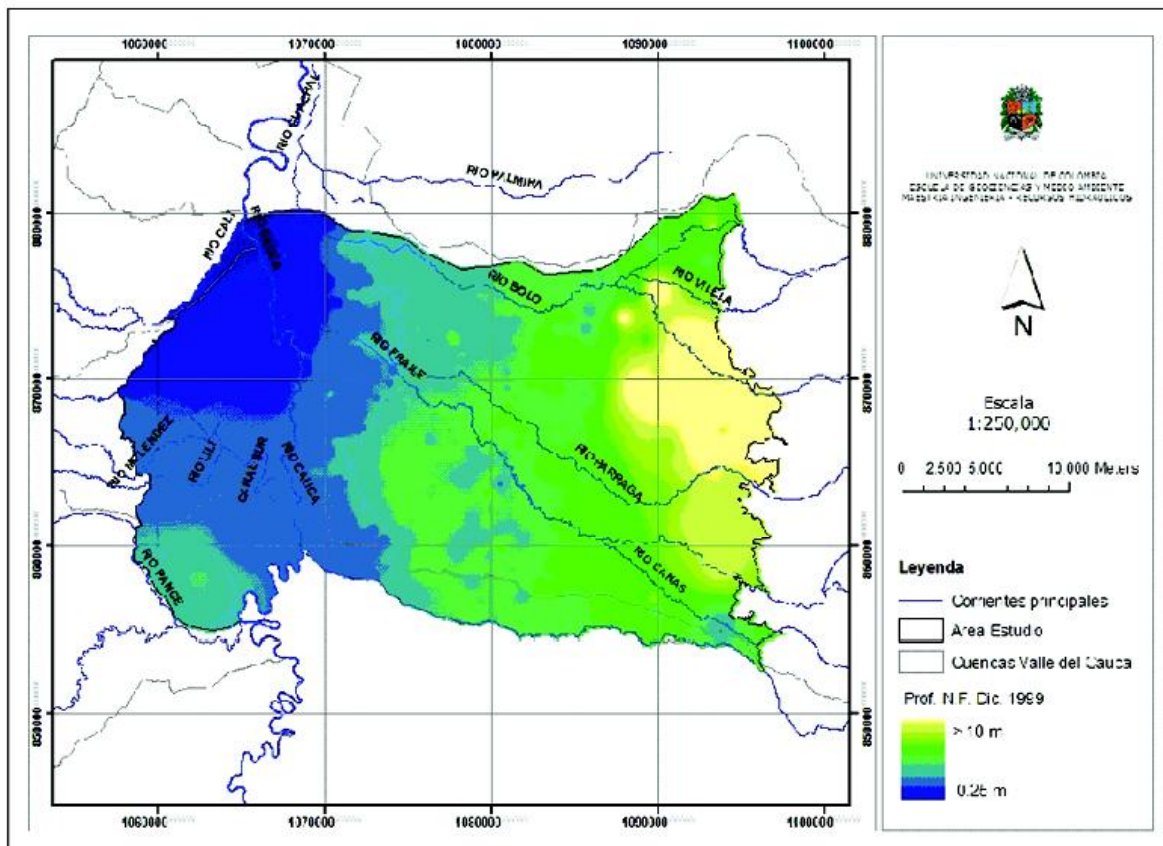


Figura 4. Niveles freáticos utilizados para la simulación, Dic. 1999.

Como puede observarse los niveles freáticos someros se encuentran en la zona influenciada por el río Cauca y en la confluencia de otros ríos a éste, avanzando hacia el pie de monte de la cordillera Occidental el acuífero se profundiza alcanzando valores mayores a 10 m.

Las características litológicas de la ZNS fueron tomadas del estudio de diagnóstico del problema de salinidad y drenaje en la zona plana del Valle del Cauca (CVC, 1991). Este permitió identificar y describir los diferentes estratos de la ZNS, de manera puntual, hasta una profundidad de 3m. Un ejemplo de la forma como se presentaban estas columnas puede observarse en la Figura 5.

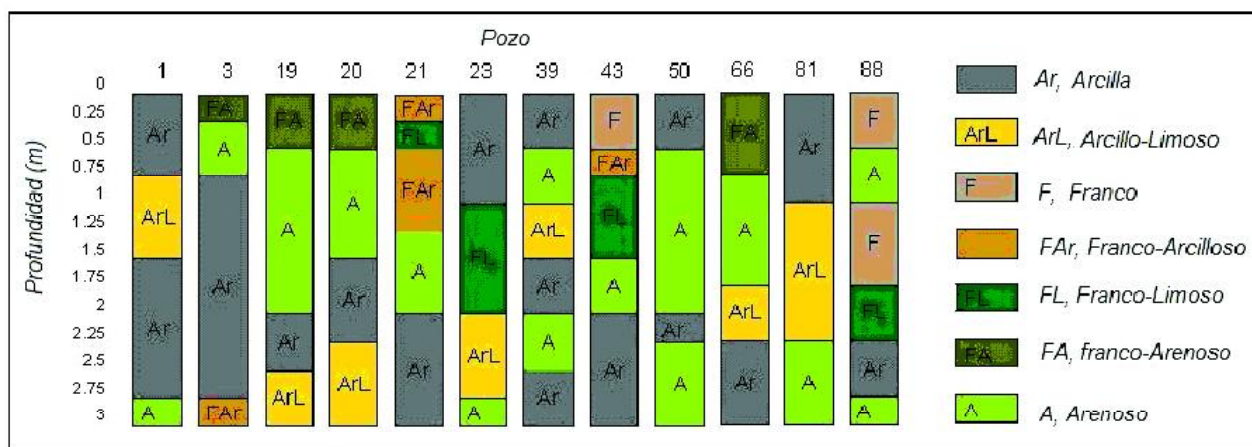


Figura 5. Esquema de columnas utilizadas para la simulación.

En los casos donde la ZNS tenía mayor profundidad, hacia el pie de monte, se consultó directamente la información de pozos profundos del archivo de información de pozos con el que cuenta la CVC, en total se dispuso de 212 columnas para la simulación.

Se encuentran entonces zonas muy permeables cercanas al río Cauca y las influenciadas por las corrientes que drenan la zona, como son los ríos Bolo, Fraile, Pance, Lili y Cali, además de las zonas del pie de monte donde se encuentran grandes depósitos de gravas.

Como el cultivo predominante en la zona es la caña de azúcar, para cada una de las columnas se seleccionó esta cobertura.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo HYDRUS 1-D, fue corrido para las 212

columnas disponibles, asumiendo que estas inicialmente se encontraban a capacidad de campo en la superficie y saturadas en la zona de contacto con el acuífero. Así, entonces el flujo es dominado por la variación que de estas condiciones provoquen las condiciones climáticas en este caso la precipitación y evapotranspiración incluidas en la simulación. Dado que las series climáticas fueron incluidas a escala diaria, la simulación queda sometida a esta resolución, por un período de dos años (Nov. 1998 a Oct. 2000).

3.1. Aplicación modelo HYDRUS 1-D

En la zona de estudio, la mayor densidad de información correspondiente a las columnas estratigráficas, se

encontraba entre el río Cauca y el sector central de la zona de estudio; observándose un menor número de columnas hacia el pie de monte de las cordilleras, por lo cual para cubrir toda la zona se recurrió a la información de pozos profundos; este aspecto impone un mayor grado de incertidumbre a los resultados para el área cercana a las cordilleras. La falta de información en las zonas urbanas indujo a que fueran descartadas del análisis.

De acuerdo con las Figuras 6 y 7, el modelo HYDRUS-1D permite estimar que la mayor parte del área (75%), presenta vulnerabilidad moderada, para las condiciones de régimen climático y niveles de agua subterránea simulados. Como las condiciones de clima y recarga permitieron simular niveles freáticos altos, es decir espesores mínimos para la ZNS, podría decirse que la situación simulada permite predecir un estado de condiciones extremas de vulnerabilidad para la zona.

La vulnerabilidad muy alta y alta se observan en la zona influenciada por los ríos Bolo, Fraile y Cauca, determinada por el poco espesor de la ZNS en este sector.

3.2. Modelo de Flujo de ZNS vs. Métodos Índice y superposición

En la Figura 5 se presentan los resultados de las áreas

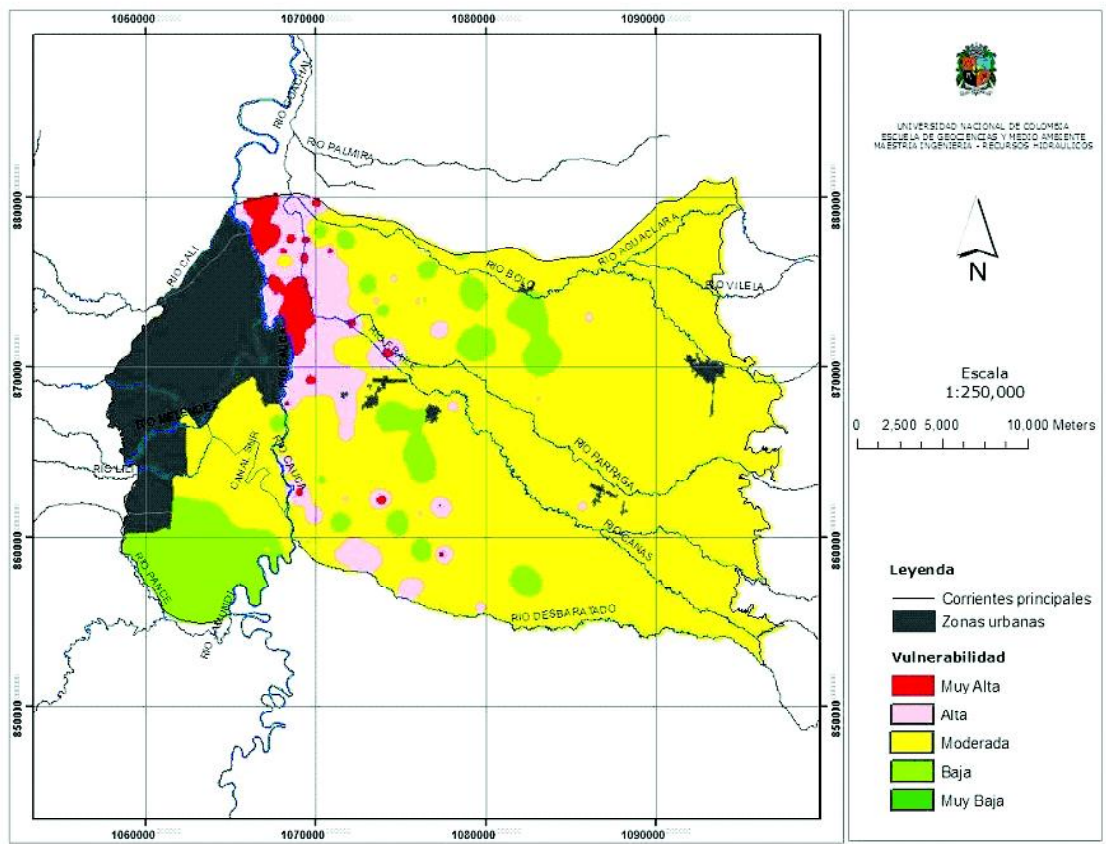


Figura 6. Estimativos de la vulnerabilidad en la zona sur del Valle del Cauca, usando el modelo HYDRUS - 1D.

La vulnerabilidad baja se identificó en zonas donde el trazador no alcanzó la zona saturada en el período simulado, esto es, para la zona de pie de monte donde los niveles son profundos y para zonas muy arcillosas, por lo cual se asume que éste tardaría un poco más de dos años en llegar al acuífero.

En el sector sur-occidental donde el modelo identifica una vulnerabilidad baja podría decirse que se subestima la vulnerabilidad, puesto que se da mayor peso al espesor de la ZNS que a la permeabilidad de los materiales (gravas con matriz arcillosa). Esto podría mejorarse desarrollando un análisis de tiempos de viaje para los contaminantes de mayor uso en la zona y generar una categorización apropiada. Tal estudio deberá involucrar los procesos químicos y biológicos no tenidos en cuenta en esta evaluación.

homogéneas de vulnerabilidad obtenidas mediante la aplicación de seis métodos de índice y superposición (AVI (Van Stempvoort, 1992), BGR (Höiting, et al. 1995), DRASTIC(Aller et al., 1987), GOD (Foster, 1987), GODS (Foster et al., 1996), PATHS(Valcarce y Rodríguez, 2004)) y el modelo de simulación HYDRUS 1-D.

Considerando que el modelo de simulación hace una buena representación del sistema y que implica en la evaluación, la estructura de los materiales allí presentes y la disponibilidad hídrica los cuales rigen el proceso de flujo del agua a través de la ZNS, se ha tomado éste como referencia para ser comparado con diferentes métodos. Algunos parámetros importantes en la evaluación, debieron ser tomados de la base de datos del modelo, como fueron los coeficientes de la ecuación de Richards y las presiones del modelo de Feddes et al.

(1978); lo cual implica algún grado de incertidumbre por la utilización de estos valores teóricos.

Se observa (Figura 7) que ninguno de los métodos de índice y superposición replica ó se aproxima a los resultados del modelo HYDRUS 1-D. Esto se atribuye al hecho de que éstos métodos no pueden evaluar la fluctuación temporal de la humedad del suelo y de las variables climatológicas, que afectan significativamente la vulnerabilidad intrínseca del sistema, pues ésta asume que el agente contaminante viaja con el agua.

se limita a la protección otorgada por el suelo.

Las diferencias entre los métodos se observan tanto en la magnitud como en la ubicación de las áreas homogéneas de vulnerabilidad; es decir, no coinciden la distribución espacial de los distintos grados de vulnerabilidad ni el porcentaje del área ocupado por cada uno de ellos. La única categoría de vulnerabilidad que tiende a coincidir en ubicación, más no en magnitud, es la calificada como muy alta, que corresponde a la zona

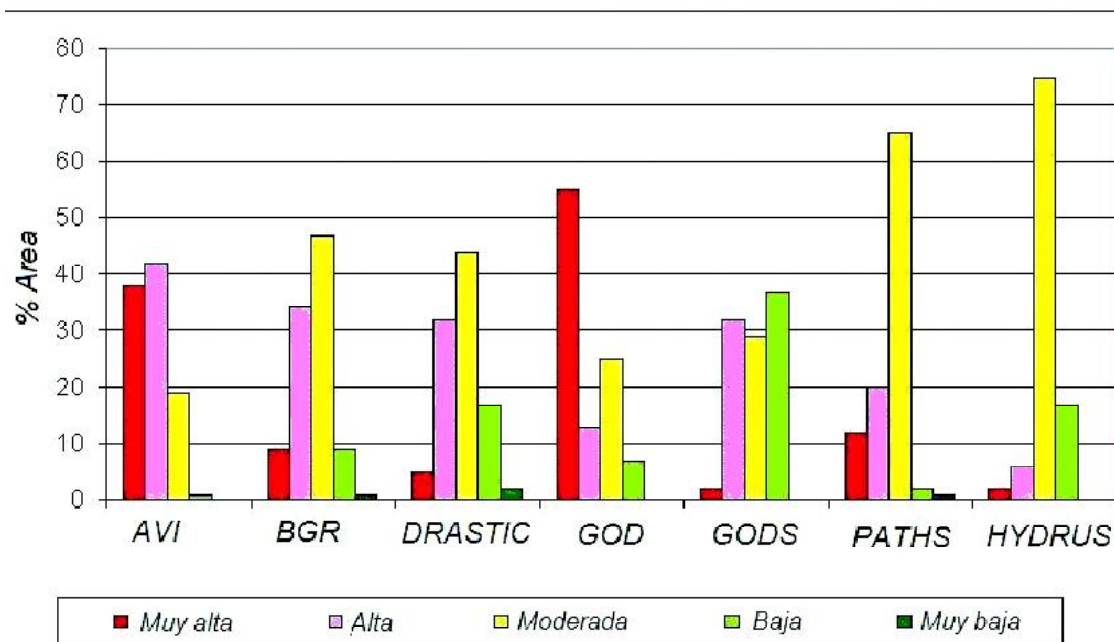


Figura 7. Porcentaje de áreas homogéneas de vulnerabilidad, según los distintos métodos utilizados.

Además, el modelo de flujo de ZNS transita la sustancia (trazador) a través de cada uno de los estratos de la columna, conservando sus propiedades litológicas; es decir la litología de la ZNS no debe ser generalizada para todo el espesor de la misma como si debe hacerse con la mayoría de los métodos de índice y superposición, a los cuales se debe dar una sola calificación litológica según la predominancia de materiales en profundidad. Los resultados de la aplicación del modelo HYDRUS-1D indican que la mayor parte del área bajo estudio (75%) presenta vulnerabilidad moderada, mientras que índices como AVI, GOD y GODS, asignan esta categoría a menos del 30% del área. Sólo el PATHS (65%) se acerca un poco más al HYDRUS 1-D, sin embargo este método no incluye en la evaluación la totalidad la ZNS, sino que

influenciada por los ríos Bolo, Cauca y Fraile, donde la ZNS es de poco espesor (menos de 0.5 m).

3.3. Aplicación modelo de zona saturada Visual MODFLOW

Una vez identificadas las zonas más vulnerables, se realizó una simulación con el modelo Visual MODFLOW (Mc Donald and Harbaugh, 1988). El modelo de flujo de la zona saturada que fue desarrollado por la CVC (2004), representa la hidrogeología e hidráulica de la ZS a escala regional. Con el módulo MODPATH del Visual MODFLOW, se simuló un evento de contaminación con un campo de partículas para observar su trayectoria y tiempo de viaje.

La Figura 8 muestra la superposición del mapa de vulnerabilidad obtenido con HYDRUS-1D y el campo de partículas para un tiempo de simulación de 20 años. En la figura 8, se observa además, la ubicación de la partícula (punto) y su trayectoria (línea). Se observa que en la zona centro-oriental de la zona de estudio, las partículas avanzan poco y en algunos sectores son retenidas por los estratos poco permeables, los cuales se caracterizan por la presencia de arcillas. En este caso al observar que la ZNS presenta vulnerabilidad moderada, las condiciones poco permeables de la ZS favorecen la protección del acuífero y en el caso de presentarse un evento de contaminación, la sustancia avanzaría con muy poca velocidad y el acuífero podría ser remediado.

Avanzando hacia el occidente de la zona de estudio, las partículas adquieren mayor velocidad influenciadas por el flujo regional (sentido sur-norte) convergiendo a la zona mas vulnerable y al cauce del río Cauca, en este

mismo sentido se ven avanzar las partículas provenientes del extremo occidental de la zona de estudio contribuyendo a que la zona más vulnerable, zona nor-occidental, se vea aún más afectada, ya que los contaminantes aplicados en otros sectores convergen a ella con el flujo subterráneo.

4. CONCLUSIONES

Se ha hecho una aplicación teórica del modelo HYDRUS 1-D para estimar la distribución espacial de los distintos grados de vulnerabilidad a la contaminación por fuentes puntuales en la zona del sur del Valle del Cauca. No existe una técnica única para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea y probablemente no será posible desarrollarla, dada la variedad de condiciones y necesidades entre diferentes países. Es posible que esto sea el reflejo de que el término vulnerabilidad del agua subterránea no tiene una definición estándar concisa.

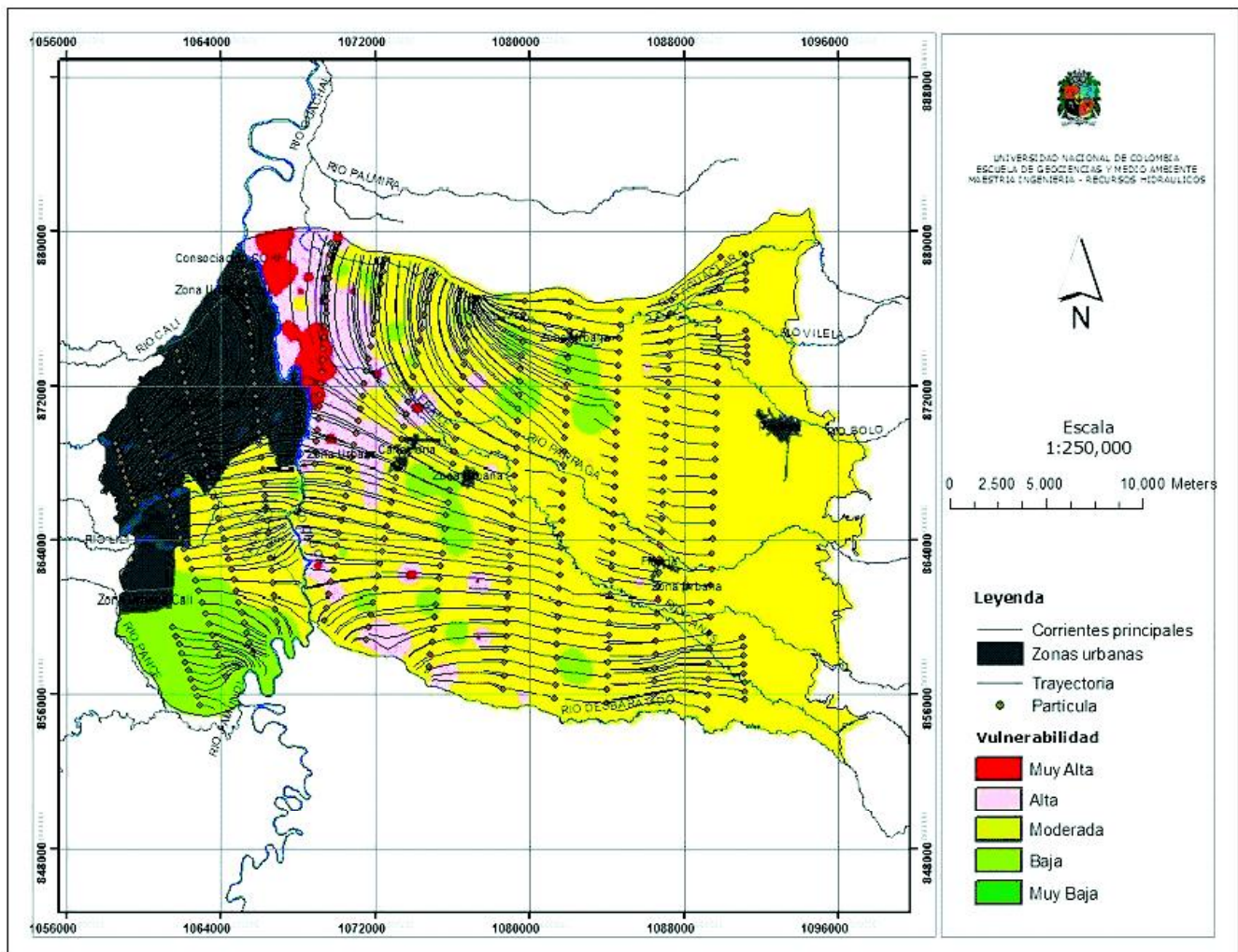


Figura 8. Resultado de la aplicación de los modelos MODFLOW Y MODPATH.

La aplicación de los modelos de simulación se limita cuando la información es escasa ó de mala calidad. No son una buena opción para lugares donde hay poca información.

Mediante el ejercicio presentado en este trabajo no es posible afirmar que el modelo HYDRUS-1D es el mejor para la zona de estudio. Es necesario validar los resultados mediante mediciones de campo de la contaminación. De la misma manera, y por carecer de información para su validación, no es posible recomendar los métodos de índice y superposición. Sin embargo, los resultados permiten vislumbrar aquellas zonas potencialmente vulnerables a la contaminación dentro de la región de estudio. Así, este tipo de estudios constituyen el punto de partida para nuevas investigaciones que permitan determinar y seleccionar la mejor alternativa de evaluación, al igual que sirve de guía para la realización de monitoreos de la calidad del agua del acuífero. Es recomendable entonces formular un plan de monitoreo y la densificación de la red, de manera que los resultados puedan ser validados y se pueda llegar a desarrollar estudios que den bases científicas para la protección y manejo del recurso subterráneo.

El modelo HYDRUS-1D requiere información de parámetros considerados importantes para este tipo de análisis, como son la profundidad del nivel freático ó espesor de la ZNS, el contenido de humedad del suelo, la permeabilidad de los estratos no saturados y la recarga. Por ello este tipo de modelo puede ser considerado como una buena alternativa para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos, siempre que se cuente con la información necesaria.

El modelo sugiere que el área con la vulnerabilidad más alta para la zona sur del Valle del Cauca influenciada por el acuífero, se presenta en el sector al que confluyen los ríos Fraile, Bolo y Cauca, dado que allí éstos aportan materiales que confieren alta permeabilidad a los estratos no saturados y los niveles freáticos se mantienen someros por largos períodos. Además, el modelo sugiere la presencia de zonas de vulnerabilidad moderada y baja para regiones donde la profundidad del agua y las características litológicas de la ZNS, permiten algún grado de protección al acuífero.

La vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación debe ser una tarea de evaluación dinámica en el tiempo. Tal caracterización de los sistemas subterráneos depende

de las condiciones climáticas, altamente variables en pequeñas escalas de tiempo y espacio. El nivel freático, por ejemplo, fluctúa con la recarga y la interacción del acuífero con las corrientes superficiales, por lo cual el grado de vulnerabilidad varía entre épocas de altas lluvias y de estiaje. Una estimación de este tipo debe considerar por lo menos la variabilidad temporal del régimen hidrológico a escala anual en la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Posgrado en Aprovechamiento en Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas. Dirección de Investigación (DIME), Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

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.
- Auge, M., 2004. Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos. Universidad de Buenos Aires. CONICET.
- Carbonell A., 1993. Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Research Council. National Academy Press. 204 P.
- CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, 1991. Subdirección de recursos naturales. Diagnostico Del Problema De Salinidad Y Drenaje, Río Fraile- Río Desbaratado. Cali, Colombia. 80 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, 2003. Manejo Integrado Y Sostenible De Los Recursos Hídricos Subterráneos En América Latina. Proyecto R1a/8/031. Valle Del Cauca - Colombia. Informe De Avance (Versión 1). 65 P.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, 2005. Dirección Técnica

- Ambiental. Estimación de la recarga potencial por precipitación para la zona sur del acuífero del valle del Cauca. Cali, Colombia.
- Custodio, E., 1995. Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. II Seminario Hispano - Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología subterránea. Serie Correlación Geológica San Miguel de Tucumán. N. 11, pp. 99-122.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J., y Zaradny, H., 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley y Sons, New York.
- Foster, S.D., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc Intl Conf Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutant Noordwijk, The Netherlands/April 1987.
- 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.
- Höltling, 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, 28 p.; Hannover].
- KEMI (National Chemicals Inspectorate), 1992. Pesticide Data Fact Sheet. Stockholm. Swedish.
- 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.
- Mc Donald, M.G. y Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Ch. A1. 586 P.
- Richards, L. A., 1931. Capillary Conduction through Porous Mediums. Physics 1: 313-318 P.
- 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, Abril 2004. En: <http://www.tierra.rediris.es/hidrored/index.html>
- Van Stempvoort, D., Ewert, L., y L. Wassenaar, 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. AIH-GE.
- Zaporozec A. y Vrba J., 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Association of Hydrogeologist. Vol 16, 1994. 131 P.