



análisis de vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la unidad hidrogeológica Huaquillas

Analysis of vulnerability to the contamination in the aquifers of the hydrogeological unit Huaquillas



*López Vera Stephanya, Ingeniera en Geología, Universidad Central del Ecuador

**Alulema Del Salto, Rafael Alberto, Ingeniero en Geología, Universidad Central del Ecuador Máster en Gestión Ambiental, Escuela Politécnica del Ejército. Docente (UCE) alulema.rafael@yahoo.com

Resumen

El análisis de vulnerabilidad de contaminación en un acuífero es una estimación del grado de exposición del manto de agua subterránea frente a un potencial contaminante (independientemente de su naturaleza o composición), en función de las propiedades intrínsecas del subsuelo. La vulnerabilidad de contaminación en la Unidad Hidrogeológica Huaquillas fue evaluada mediante dos métodos cualitativos: GOD y DRASTIC. Los mapas de vulnerabilidad generados han permitido catalogar a la llanura costera como la zona menos apta para tolerar una potencial dispersión contaminante. De acuerdo a los resultados obtenidos en el método DRASTIC, el acuífero Q2 y las zonas de los acuíferos Q1 y Ng que se ubican en la cuenca baja, presentan vulnerabilidad de contaminación media, mientras que, el método GOD cataloga a estas zonas con alto grado de vulnerabilidad. En la cuenca alta, la vulnerabilidad de los acuíferos Q1 y Ng varía entre baja a muy baja. Por lo tanto, los resultados de vulnerabilidad a la contaminación sugieren que la cuenca alta es la zona con menor grado de exposición ante un posible evento de contaminación, donde se podrían desarrollar actividades antrópicas sin poner en riesgo la calidad del recurso hídrico subterráneo.

Palabras clave: contaminación; vulnerabilidad

Abstract

The aquifer vulnerability assessment is an estimation of the groundwater table exposure degree to a potential pollution (independently of their nature or composition) according to subsurface intrinsic properties. The pollution vulnerability in Huaquillas Hydrogeological Unit has been determined by qualitative methods GOD and DRASTIC. The generated vulnerability maps catalogued the coastal plain as the least suitable area to endure a potential pollution. According to DRASTIC method, aquifer Q2 and Q1/Ng unconfined areas located at lower basin, present medium degree pollution vulnerability, but according to GOD method, these areas present high vulnerability degree. Otherwise at high basin, vulnerability aquifers Q1 and Ng ranging between low to very low. Therefore, the results of pollution vulnerability suggest that the upper basin is the zone with the lowest degree of exposure to a potential pollution event, where anthropic activities could be carried out without compromising the groundwater quality.

Keywords: pollution; vulnerability

Introducción

El grado de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, está determinado por los parámetros hidrogeológicos propios del medio. Foster & Hirata (1988), definen a la vulnerabilidad a la contaminación como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada de agua subterránea, de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en superficie [1].

En la Unidad Hidrogeológica Huaquillas, existen potenciales amenazas de contaminación que ponen en riesgo la calidad del agua subterránea como: la infiltración en el subsuelo de pesticidas y fertilizantes utilizados en las camaroneras y bananeras de la zona; fugas en el sistema de alcantarillado y estaciones de servicio, y el mantenimiento inadecuado de los pozos de agua para uso doméstico.

De acuerdo al primer principio de la Declaración de Dublín sobre agua y desarrollo sostenible, realizada por la ONU en 1992, el agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente [2].

La evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, mediante los métodos GOD y DRASTIC, permitirá identificar las zonas de mayor sensibilidad ante un posible evento de contaminación. El presente estudio está enfocado en la Gestión Integrada de Recursos Hídricos y en el manejo sustentable del agua subterránea, y permitirá a los Gobiernos Autónomos Descentralizados de la zona, controlar las actividades antrópicas y planificar el ordenamiento territorial de las ciudades involucradas.

La zona de estudio forma parte del acuífero transfronterizo de Zarumilla, ubicado en el SO del Ecuador y NE de Perú. La cuenca hidrográfica del río Zarumilla en Ecuador, incluye a los cantones Huaquillas, Arenillas y Las Lajas, y en Perú a los distritos de Aguas Verdes, Zarumilla, Papayal y Matapalo, pero la superficie perteneciente al Ecuador ha sido definida como la Unidad Hidrogeológica Huaquillas, la misma que se extiende de Norte a Sur desde el cantón Huaquillas (*Lat. 03° 28' S / Long. 80° 13' O*) hasta el poblado La Libertad (*Lat. 03° 50' S / Long. 80° 6' O*). Se ubica en la estructura geológica Bloque Amotape Tahuín, 40 km al SO de la ciudad de Machala, capital de la provincia de El Oro, la extensión de la zona de estudio es aproximadamente 800 km² (Figura 1).

Material y métodos

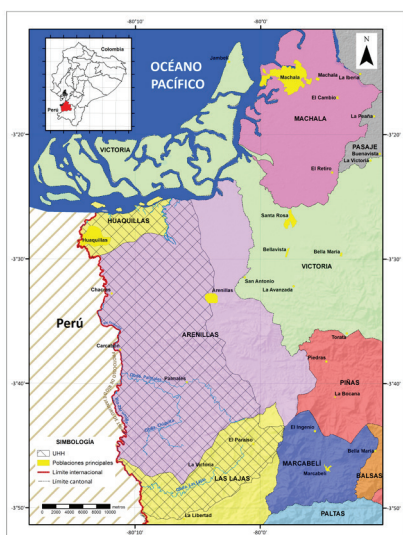


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, comprendida por los cantones Huaquillas, Arenillas y Las Lajas.

Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

El índice de vulnerabilidad de contaminación en la Unidad Hidrogeológica Huaquillas, fue determinado mediante los métodos GOD y DRASTIC, que analizan los parámetros físicos referidos exclusivamente al medio, y no toman en cuenta la naturaleza o tipo de contaminante. Los parámetros hidrogeológicos que evalúa cada método fueron obtenidos a partir de registros de perforación de varios pozos activos que forman parte del inventario de información del INAMHI.

Debido a que cada método está definido por una ecuación, fue necesaria la aplicación de álgebra de mapas empleando el software ArcGis 10.1, que se fundamenta en el cálculo de matrices, permitiendo generar algoritmos y aplicarlos a cada uno de los píxeles, el tamaño de píxel (cell size) definido para cada mapa generado fue 10.

Método GOD

El método GOD (por sus iniciales en inglés: Groundwater hydraulic confinement, Overlaying Strata, Depth to groundwater table) está definido por la Ecuación 1 [1].

$$\text{Vulnerabilidad} = G \times O \times D$$

Donde:

G = grado de confinamiento hidráulico

O = ocurrencia del sustrato suprayacente

D = distancia al nivel del agua subterránea

Grado de confinamiento hidráulico (G)

Este factor se refiere al tipo de acuífero y a la permeabilidad de las capas que conforman su techo y base. También se puede considerar como la facilidad que tienen los fluidos para llegar al acuífero en función de la porosidad y permeabilidad de las capas suprayacentes. Los diferentes tipos de acuíferos han sido valorados en la Tabla 1.

Tabla 1

Grado de confinamiento hidráulico

Tipo	Índice
Ninguno	0
Surgente	0
Confinado	0.2
Semiconfinado	0.4
No confinado (cubierto)	0.6
No confinado	1.0

Fuente: Foster & Hirata, 1988

Si un acuífero no tiene un estrato que lo separe de la superficie y la



presión hidrostática es igual a la presión atmosférica, se denomina acuífero no confinado [3]. Foster & Hirata (1988) califican a este tipo de acuífero con el mayor índice (valor = 1.0), ya que es el más susceptible a ser afectado por un contaminante, al no tener una capa suprayacente que retarde o evite la infiltración del mismo.

Ocurrencia del sustrato suprayacente (O)

Es la caracterización de la litología que se encuentra sobre el acuífero en estudio, de acuerdo a la compactación y porosidad del sustrato suprayacente. Inicialmente, hace una distinción entre rocas consolidadas y no consolidadas; como es de suponer, la porosidad de las rocas es mayor en aquellas que no están compactadas (Tabla 2). Los espacios vacíos que existen entre los sedimentos permiten la fácil circulación de fluidos, consiguiendo ser un factor contribuyente para la infiltración de sustancias contaminantes.

Tabla 2
Ocurrencia del sustrato suprayacente

Litología		Índice
No Consolidado	Consolidado	
Sedimentos porosos	Rocas no porosas	0.4
Arcillas lacustres y de estuarios		
Suelos residuales		0.5
Limos aluviales, loess, till glaciar	Arcillas, lutitas	
Arenas eólicas	Formaciones ígneas/metamórficas + volcánicas antiguas	0.6
Arenas aluviales y fluvio-glaciares	Areniscas	0.7
Gravas coluviales	Lavas volcánicas recientes	
	Calizas blandas	0.9
	Caliche + calizas karstificadas	
		1.0

Fuente: Foster & Hirata, 1988

Distancia al nivel del agua subterránea (D)

Este parámetro evalúa la posibilidad de que un contaminante

alcanze el manto de agua, mientras más cercano se encuentre de la superficie más rápido será alcanzado por el agente contaminante (Tabla 3).

Tabla 3
Distancia al nivel del agua subterránea

Profundidad (metros)	Índice
> 50	0.6
20 – 50	0.7
5 – 20	0.8
< 5	0.9

Cualquier profundidad (rocas volcánicas recientes y calizas karstificadas) 1.0

Fuente: Foster & Hirata, 1988

El índice de vulnerabilidad podrá ser inferido al aplicar la Ecuación 1 definida anteriormente y se lo clasifica de acuerdo a la Tabla 4.

Tabla 4
Grado de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

Grado de vulnerabilidad	Índice
Despreciable	0 – 0.1
Baja	0.1 – 0.3
Media	0.3 – 0.5
Alta	0.5 – 0.7
Extrema	0.7 – 1.0

Fuente: Foster & Hirata, 1988

Método DRASTIC

El método DRASTIC (acrónimo en inglés de Depth to water, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone, Conductivity of the aquifer) fue desarrollado en la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos por Aller et. al. (1987). Establece que se debe determinar sistemáticamente los pesos, rangos y valoraciones de los parámetros hidrogeológicos: profundidad del nivel freático, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, impacto de la zona vadosa y conductividad hidráulica [4].

Los autores de este método proponen inicialmente asignar pesos relativos a cada una de las variables. Cada factor es calificado de acuerdo a su grado de influencia en el caso de una potencial

contaminación (Tabla 5), este valor representa una constante y no debe ser modificado.

Tabla 5

Pesos asignados para los parámetros hidrogeológicos

Parámetro	Peso (w)
Profundidad del nivel freático	5
Recarga neta	4
Litología del acuífero	3
Tipo de suelo	2
Topografía	1
Impacto de la zona vadosa	5
Conductividad hidráulica	3

Fuente: Aller et. al., 1987

Para la valoración de los parámetros profundidad del nivel freático, recarga neta, topografía y conductividad hidráulica, el método exige agruparlos

en intervalos de acuerdo a su magnitud; a cada rango le corresponderá un valor (Tablas 6 y 9), mientras que los factores litología del acuífero, tipo de suelo e impacto de la zona vadosa son caracterizados de acuerdo a su génesis y composición (Tablas 10 y 12).

Tabla 6

Ponderación de la profundidad del nivel freático

Rango (metros)	Valor (r)
0 – 1.5	10
1.5– 4.6	9
4.6– 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2– 22.9	3
22.9– 30.5	2
>30.5	1

Fuente: Aller et. al., 1987

Tabla 7

Ponderación de la recarga neta

Rango (milímetros)	Valor (r)
0– 50	1
50– 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

Fuente: Aller et. al., 1987

Tabla 8

Ponderación de la topografía

Rango (% de pendiente)	Valor (r)
0– 2	10
2– 6	9
6 – 12	5
12– 18	3
> 18	1

Fuente: Aller et. al., 1987

Tabla 9

Ponderación de la conductividad hidráulica

Rango (metro/día)	Valor (r)
0.04– 4.08	1
4.08 – 12.22	2
12.22– 28.55	4
28.55– 40.75	6
40.75– 81.49	8
> 81.49	10

Fuente: Aller et. al., 1987

Tabla 10

Ponderación de la litología del acuífero

Tipo	Valor	Valor típico (r)
Lutita masiva	1 – 3	2
Rocas metamórficas/ ígneas	2 – 5	3
Rocas metamórficas meteorizadas/ ígneas con capas delgadas de arenisca o caliza	3 – 5	4
Secuencia de lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena y grava	4 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza karstificada	9 – 10	10

Fuente: Aller et. al., 1987



Tabla 11
Ponderación del tipo de suelo

Tipo	Valor (r)
Ausente o delgado	10
Grava	10
Arena	9
Turba	8
Arcillas expansivas	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco limoso	4
Franco arcilloso	3
Estiércol	2

Tabla 12
Ponderación de la zona vadosa

Tipo	Valor	Valor típico (r)
Limo/arcilla	1 – 2	1
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Intercalación de lutita, arenisca, caliza	4 – 8	6
Arena y grava con limo y arcilla	4 – 8	6
Rocas metamórficas/ígneas	2 – 8	4
Arena y grava	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza karstificada	8 – 10	10

Fuente: Aller et. al., 1987

El índice DRASTIC se obtiene mediante la Ecuación 2, en ella intervienen los pesos (w) y valores (r) definidos en las tablas anteriormente descritas.

Donde:

- D = profundidad del nivel freático
- R = recarga neta
- A = litología del acuífero
- S = tipo de suelo
- T = topografía
- I = impacto de la zona vadosa
- C = conductividad hidráulica

En este método se obtienen resultados de relación directa, es decir que a mayor índice DRASTIC, mayor será la vulnerabilidad del acuífero a ser contaminado. Con el propósito de interpretar fácilmente el producto, se debe generar el mapa final de vulnerabilidad de acuerdo a la

escala de colores expuesta en la Tabla 13.

Tabla 13.
Grado de vulnerabilidad de contaminación DRASTIC

Grado de vulnerabilidad	Índice	Color
Despreciable	< 79	Violeta
Extremadamente baja	80 – 99	Azul oscuro
Baja	100 – 119	Azul claro
Media	120 – 139	Verde oscuro
Alta	140 – 159	Verde claro
Muy alta	160 – 179	Amarillo
Extremadamente alta	180 – 199	Anaranjado
Supremamente alta	> 200	Rojo

Fuente: Aller et. al., 1987

Resultados

Vulnerabilidad a la contaminación mediante el método GOD

Grado de confinamiento hidráulico (G)

La caracterización del acuífero transfronterizo de Zarumilla, exhibe que el sistema hidrogeológico está conformado por tres acuíferos detríticos: el acuífero libre Q1, que se limita al cauce del río Zarumilla y a sus afluentes principales; el acuífero libre Q2, que se extiende en la llanura costera y está conformado por depósitos marinos; y finalmente, el acuífero confinado Ng, que se encuentra bajo el acuífero Q2 y que además presenta zonas de condiciones freáticas [5].

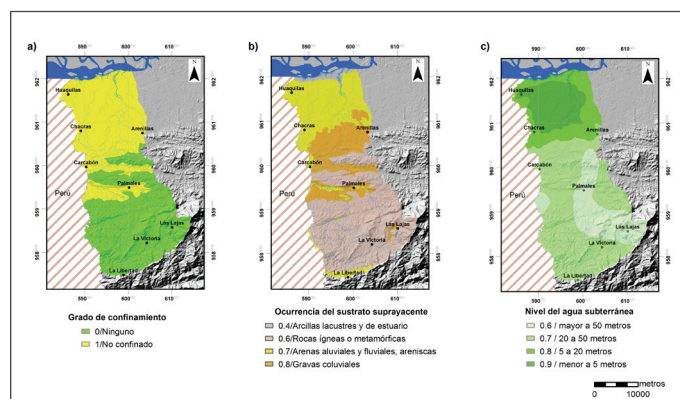


Figura 2: Parámetros que intervienen en el método GOD. a) grado de confinamiento hidráulico, b) ocurrencia del sustrato suprayacente y c) nivel del agua subterránea.

En la Figura 2a se identifican dos tipos de confinamiento hidráulico de acuerdo a la clasificación propuesta por Foster & Hirata (1988). Las rocas ígneas y metamórficas de edad Mesozoico y Paleozoico que afloran en el centro y Sur de la cuenca, han sido asignadas el valor cero por su incapacidad de almacenar agua, estas rocas podrían poseer permeabilidad

secundaria, asociada al fracturamiento causado por el régimen tectónico. Sin embargo, al no disponer de registros de pozos perforados en estas zonas se ha considerado prudente caracterizarlas como totalmente impermeables.

Mientras que a las unidades Q1, Q2 y Ng se las ha catalogado en este mapa como acuíferos libres, a los que les corresponde el máximo valor (uno), de acuerdo a su condición, estas zonas son las que presentan mayor susceptibilidad a ser afectadas por un agente contaminante.

Ocurrencia del sustrato suprayacente

La caracterización de la litología que yace sobre las unidades acuíferas se ha realizado mediante las hojas geológicas publicadas por el INIGEMM. En la Figura 2b se ha representado cada una de las litologías presentes en la cuenca de estudio y valoradas en función de su compactación y porosidad.

A lo largo del margen costero se han formado depósitos sedimentarios estuarinos que hacen posible la acumulación de arcillas y limos, asignándoles el valor 0.4. Hacia el interior de la llanura costera, donde se asientan los poblados de Huaquillas y Chacras y a lo largo de los cauces del Río Zarumilla y quebrada Palmales se han depositado arenas aluviales y fluviales, y mucho más hacia el Sur, cerca del poblado La Libertad se han identificado areniscas pertenecientes a la Unidad El Tigre, todas ellas valoradas con 0.7.

Los depósitos sedimentarios de mayor granulometría conformados por gravas y conglomerados, han sido calificados con el valor 0.8, al poseer mayor porosidad y permeabilidad.

El autor del método propone asignar el valor 0.6 a las rocas ígneas y metamórficas indiferentemente de si se encuentren o no fisuradas.

Distancia al nivel del agua subterránea

El trazado de las isopiezas fue elaborado a partir de la interpolación de valores de niveles de agua medidos hasta el año 2007 en pozos ubicados en los acuíferos Q2 y Ng, esta información fue generada en varios proyectos de caracterización hidrogeológica de la zona, y que ha sido compilada por el INAMHI. La Figura 2c representa la clasificación de acuerdo a los rangos propuestos en el método GOD, donde se distingue que, en la cuenca baja el manto de agua se encuentra más cercano a la superficie, pudiendo ser afectado con mayor rapidez por algún potencial contaminante.

La vulnerabilidad de contaminación en los acuíferos de la Unidad Hidrogeológica Huaquillas, calculada mediante el método GOD está representada en la Figura 3. De acuerdo a la aplicación del algoritmo propuesto por Foster & Hirata, la cuenca no presenta vulnerabilidad extrema, pero en aquellas zonas donde el sustrato suprayacente está conformado por arenas y gravas, y además el manto de agua se encuentra más cercano a la superficie la vulnerabilidad de contaminación es alta, se observa también que los poblados Huaquillas, Chacras y Arenillas están dentro de esta condición.

En el borde costero y en ciertas zonas del acuífero Q1 que limita al río Zarumilla y a la quebrada Palmales, la vulnerabilidad de contaminación es media.

El método GOD permitió definir que los acuíferos Q2, Ng y el segmento del acuífero Q1 situado en la cuenca baja, presentan vulnerabilidad de contaminación alta; en las zonas aledañas a los poblados Carcabón y Palmales el grado de vulnerabilidad es medio, mientras que en la cuenca alta es prácticamente despreciable o nula.

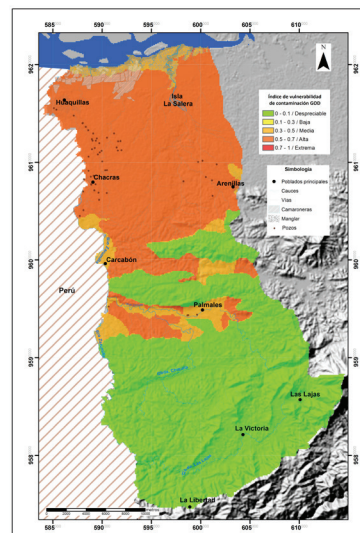


Figura 3

Mapa de vulnerabilidad de contaminación en la Unidad Hidrogeológica Huaquillas, de acuerdo al método GOD. Los acuíferos Q2, Ng y parte del acuífero Q1 presentan alto grado de vulnerabilidad, las zonas del acuífero Q1 restringidas a la zona alta del río Zarumilla y quebrada Palmales presenta grado.

Vulnerabilidad a la contaminación mediante el método DRASTIC

Profundidad del nivel freático

Al igual que el método anterior, el análisis de la profundidad del nivel freático permite evaluar la agilidad relativa que un contaminante tiene para

alcanzar el agua subterránea. El método DRASTIC hace una clasificación más discriminativa y precisa, a la que se le añaden rangos de menor amplitud. Así, en la Figura 4a se observa siete clases valoradas entre 1 a 10, que indican el aumento progresivo del grado de susceptibilidad desde la zona central de la cuenca baja hacia sus alrededores.

Recarga neta

Este parámetro fue determinado a partir del balance hídrico de suelos, mediante el método de Schosinsky. Se debe esclarecer que estos resultados se refieren solamente a la recarga anual potencial por precipitación, siendo este el método más adecuado para un análisis de escala regional, ya que la estimación de la recarga indirecta efectuada por los cauces requiere de una evaluación a detalle.

Se obtuvo las tasas de recarga potencial para cada una de las cinco estaciones meteorológicas que se encuentran distribuidas en la cuenca [6]. La Figura 4b representa la variación espacial de



la recarga, de acuerdo a los rangos propuestos por la metodología DRASTIC, en la que se evidencia apenas dos clases: la primera, varía de 0 a 50 mm anuales y comprende gran parte de la zona de estudio, y la segunda varía de 50 a 103 mm anuales, ubicada en la llanura costera oriental.

Litología del acuífero

La litología de los acuíferos de la Unidad Hidrogeológica Huaquillas fue definida a partir de la correlación lito-estratigráfica de los registros de perforación de varios pozos [6]. En general, los tres acuíferos están conformados por arcilla, arena y grava en diferentes proporciones, ponderados con un valor relativamente alto (8.0) en una escala de 1 a 10. Las rocas ígneas y metamórficas que conforman la estructura geológica Bloque Amotape Tahuín, han sido calificadas con un valor inferior (3.0) por su limitada capacidad de conductividad hidráulica (Figura 4c.).

Tipo de suelo

Para la ponderación del tipo de suelo se ha utilizado como base el Mapa de textura del suelo del Ecuador publicado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) en el año 2002. Gran parte de la cuenca está cubierta por suelo franco, es decir, que su contenido de arena y limo es proporcional. En los márgenes de los cauces de la zona nor-oriental, la textura del suelo es franco arenoso, y en los cauces principales como el río Zarumilla y las quebradas Palmales y Chiquita es de mayor granulometría (grava) (Figura 4d).

También existen zonas donde la capa de suelo es muy delgada o ausente, es el caso de la ciudad de Huaquillas, donde el suelo ha sido erosionado por la urbanización y actividades agrícolas, exhibiendo una mayor vulnerabilidad respecto a las zonas que presentan una cobertura de suelo, que se desempeña como una barrera que difiere el ingreso de los contaminantes al subsuelo.

Topografía

Este parámetro expresa el grado de influencia que tiene la pendiente del relieve ante una posible contaminación. En la cuenca alta el índice es mínimo (1) ya que la pendiente supera el 18 por ciento. La cuenca baja y la subcuenca de la quebrada Palmales presentan el mayor índice (10) porque la pendiente en esta zona está es inferior al 2 por ciento (Figura 4e.).

Impacto de la zona vadosa

La litología de las capas suprayacentes del acuífero es un parámetro que fue analizado también en el método GOD, la clasificación difiere ligeramente del método DRASTIC, pero en conclusión su fundamento es el mismo. Como se observa en la Figura 4f las rocas ígneas y metamórficas son las que presentan la menor valoración (4), mientras que las zonas donde se presenta arena y grava la ponderación varía entre 6 a 8, dependiendo del contenido de arcilla.

Conductividad hidráulica

Los valores de conductividad hidráulica se obtuvieron de los registros de pruebas de bombeo de varios pozos que forman parte del inventario de información hidrogeológica del INAMHI. La Figura 4 representa la variación espacial de la permeabilidad en los acuíferos Q2 y Ng; desafortunadamente no existe información de pozos de monitoreo en la zona Sur, que permita ampliar el contexto de sus condiciones hidráulicas. Pero en general, se

observa que la conductividad hidráulica media en los acuíferos de la Unidad Hidrogeológica Huaquillas varía entre 4.08 a 12.22 m/día. Como se explicó anteriormente, la litología heterogénea de los acuíferos Q2 y Ng genera una gran variabilidad en los valores de permeabilidad.

La combinación de los siete parámetros anteriormente analizados, refleja la vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos de la Unidad Hidrogeológica Huaquillas. Se consiguió deducir mediante este método, que gran parte del acuífero Q2 presenta vulnerabilidad media (Figura 5), incluyendo a todo el borde costero a diferencia del resultado obtenido mediante el método GOD. Además, se identificó una zona puntual de vulnerabilidad alta cercana a los manglares de la isla La Salera.

El grado de vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos Q1 y Ng, varía entre bajo a extremadamente bajo; mientras que aquellas zonas donde afloran rocas ígneas y metamórficas el valor es despreciable o nulo.

La ciudad de Huaquillas se encuentra dentro del rango de vulnerabilidad media, y las ciudades de Arenillas, Chacras y Carcabón, han sido catalogadas con vulnerabilidad baja. Los resultados de DRASTIC difieren en algo con respecto a la anterior metodología por analizar más parámetros; sin embargo, los dos métodos proyectan deducciones coherentes.

Discusión

Los resultados de vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la Unidad Hidrogeológica Huaquillas, por medio del método GOD, indican que el acuífero Q2 (a excepción del borde costero donde existen manglares) y gran parte de los acuíferos Q1 y Ng que yacen en la cuenca baja, presentan alto grado de vulnerabilidad.

Por otro lado, el método DRASTIC clasifica a gran parte del acuífero Q2 con vulnerabilidad media, incluyendo a la ciudad de Huaquillas. El grado de vulnerabilidad en los acuíferos Q1 y Ng varía entre bajo a extremadamente bajo; mientras que aquellas zonas donde afloran rocas ígneas y metamórficas el grado de vulnerabilidad es despreciable, al igual que en el método GOD.

Los métodos GOD y DRASTIC, coinciden al catalogar a la llanura costera como la zona menos apta para tolerar una potencial dispersión contaminante. Los resultados de DRASTIC difieren con respecto a GOD por tratarse de un método más selectivo; sin embargo, los resultados proyectan deducciones coherentes, y se debe tomar en cuenta que los métodos aplicados no pretenden exponer resultados determinantes, sino proponer una orientación a la protección de la calidad del agua subterránea.

Conclusiones

La información hidrogeológica de la zona de estudio ha permitido aplicar los métodos de vulnerabilidad a la contaminación GOD y DRASTIC, en forma adecuada, con resultados coherentes y de aplicación en la gestión de los acuíferos.

La llanura costera ha sido identificada como la zona de mayor vulnerabilidad frente a una potencial dispersión contaminante. El

acuífero Q2 y las zonas de los acuíferos Q1 y Ng que se ubican en la cuenca baja, presentan un grado de vulnerabilidad de contaminación medio de acuerdo al método DRASTIC, y alto de acuerdo al método GOD, mientras que en la cuenca alta la vulnerabilidad de los acuíferos Q1 y Ng varía entre baja a muy baja.

La cuenca alta es la zona con menor grado de exposición ante un posible evento de contaminación, donde se podrían desarrollar actividades antrópicas sin poner en riesgo la calidad del potencial recurso hídrico subterráneo.

Recomendaciones

Los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) de la zona de estudio, deberán gestionar ordenanzas para proteger el recurso hídrico subterráneo, estableciendo límites de aprovechamiento, los cuales no deberían superar la tasa de recarga potencial, evitando la sobreexplotación del recurso. Además, establecer áreas de expansión urbana, agrícola e industrial, en aquellas zonas que presentan menor vulnerabilidad ante un posible evento contaminante.

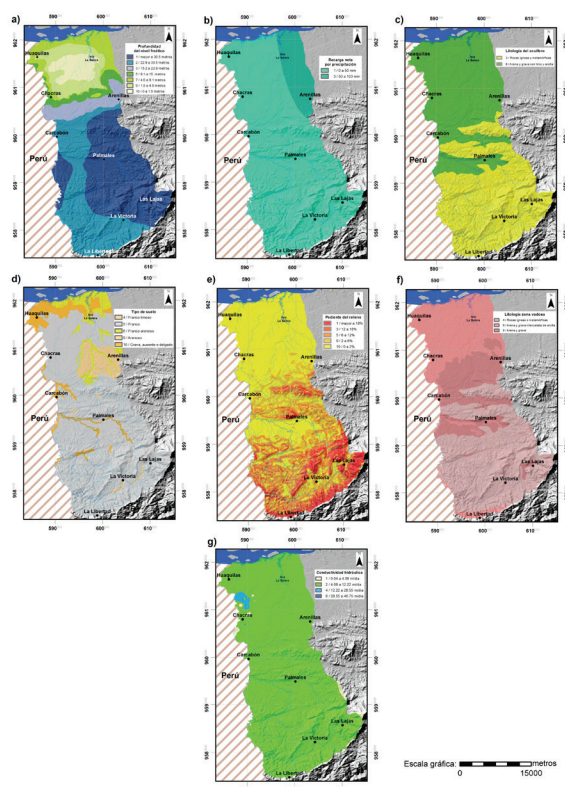


Figura 4: Parámetros que intervienen en el método DRASTIC: a) profundidad del nivel freático, b) recarga neta por precipitación, c) litología del acuífero, d) tipo de suelo, e) pendiente del relieve, f) impacto de la zona vadosa y g) conductividad hidráulica.

Realizar estudios a detalle de las zonas que presentan mayor vulnerabilidad de contaminación,

para determinar el grado y el tipo de contaminante, establecer la geometría espacial y temporal de la contaminación, tanto en la zona no saturada como en la zona saturada de los acuíferos, para promover programas de prevención, mitigación y remediación según los casos.

Aprovechando los pozos de explotación actual, se debe realizar un estudio detallado de las características hidráulicas de los acuíferos, con pruebas de eficiencia en cada pozo, para planificar una red

de pozos de explotación técnicamente ubicados y que eviten una sobreexplotación del recurso o una contaminación del mismo.

El estudio a detalle de cada cantón involucrado ayudaría a tener un mejor entendimiento del contexto hidrogeológico de los acuíferos que yacen en la zona. Es importante y recomendable realizar el monitoreo continuo de la calidad y cantidad de agua subterránea. Además, la planificación acertada de la explotación del recurso permitirá evaluar las reservas y conservar la calidad del agua, de forma que se garantice el recurso a los pobladores.

Con esta investigación y con el amparo de la nueva Ley Orgánica de Recursos Hídricos y su Reglamento y las Unidades de Cuenca que serán creadas próximamente, deberá exigirse que se implemente un Plan de Gestión Integrada con la participación de la agroindustria y los GADs, precautelando los recursos en general y el recurso hídrico subterráneo en particular.

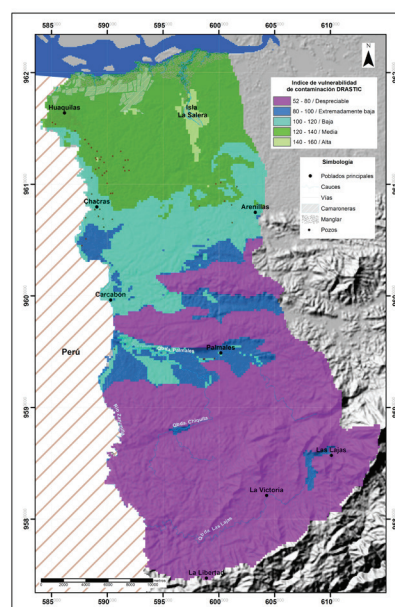


Figura 5: Mapa de vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos de la Unidad Hidrogeológica Huaquillas, de acuerdo al método DRASTIC. El acuífero Q2 presenta un grado de vulnerabilidad media, mientras que los acuíferos Q1 y Ng presentan vulnerabilidad baja a extremadamente baja.

Referencias bibliográficas

- Aller, L., Lehr, J. & Petty, R. (1987). DRASTIC: a standardized system to evaluate the groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US EPA, Ohio.
- Coello, X. (2006). Characterization of the Zarumilla transboundary aquifer between Perú and Ecuador. UNESCO – IHE, Delf.
- Comisión Docente Curso de Hidrología Subterránea. (2009). Hidrogeología, conceptos básicos de hidrología subterránea. Barcelona: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.
- Foster, S. & Hirata, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment. CEPIS-WHO, Lima.
- López, S. & Alulema, R. (2016). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación en la Unidad Hidrogeológica Huaquillas. Universidad Central del Ecuador, Quito.