© Ministerio del Ambiente. Dirección General de Investigación e Información Ambiental
Memoria Segundo Encuentro de Investigadores Ambientales
3-5 de julio de 2013 (Arequipa, Perú)

ANÁLISIS DE RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZANDO MAPA DE VULNERABILIDAD Y PELIGRO EN EL CASO ACUÍFERO AGUASCOCA

RISK ASSESSMENT OF GROUNDWATER CONTAMINATION USING AQUIFER VULNERABILITY AND RISK MAPPING: A CASE STUDY OF THE AGUASCOCA AQUIFER

Palomino O. S.

Resumen

Esta investigación intenta establecer una metodología que sirva para construir mapas de riesgo de la contaminación de aguas subterráneas, teniendo como unidad de estudio, la cuenca y como principal actividad contaminante, las actividades mineras. Para construir el mapa de riesgo de contaminación se construyó previamente el mapa de vulnerabilidad aplicando los métodos drastic (Aller et *al.*, epa 1987) y god (Foster e Hirata, cepis, 1991) y el mapa de peligros aplicando la metodología modificada por el autor del Cost Action 620 (Cooperación Unión Europea para la Investigación Técnica). Al superponer estos mapas se obtuvo el mapa de riesgo que identificó diversas áreas de la cuenca con alto, medio y bajo riesgo de contaminación. Esta es una herramienta que permite plantear medidas preventivas puntuales para aminorar el riesgo de contaminación en las áreas específicas de la cuenca con alto riesgo.

Palabras claves: Riesgo, contaminación, vulnerabilidad, peligro, minería.

Abstract

This research attempts to establish a methodology that will be used to assess the risk of groundwater pollution from mining activities using vulnerability and danger maps. The main study unit is the groundwater basin. In order to build the contamination risk map, it was necessary to firstconstruct the vulnerability map applying the drastic (Aller *et al.,* epa, 1987) and god (Foster e Hirata, cepis, 1991) methodologies and subsequently construct the danger map applying a modifiedversion of the methodology employed by the author of Cost Action 620 (European Cooperation in Science and Technology). Finally the vulnerability map and the danger map were superposed; the result was the contamination risk map that identifies areas of the basin characterized by high, medium and low contamination risk.This is a tool that will allow the development of preventive measures in areas identified as being at-risk of contamination.

Keywords: contamination, vulnerability, danger, mining.

Introducción

Durante los últimos años, el recurso hídrico ha adquirido un súbito interés desde un enfoque renovado. Los conflictos sociales originados a partir del uso del agua y su disponibilidad han desencadenado acciones políticas con el fin de intentar proteger, y gestionar el agua; sin embargo, estas iniciativas estimables aún no son suficiente. Si bien la base legal está dada, las metodologías usadas para evaluar el impacto ambiental y el riesgo de contaminación siguen basándose en características cualitativas y no cuantitativas. Esto genera ambigüedades por las distintas percepciones de los profesionales que la ejecutan, que devienen en conflictos. Por ello es importante establecer metodologías de evaluación de impacto y riesgo de contaminación que generen valores cuantificables y mapas cartográficos representativos.

Actualmente, el enfoque moderno de gestión de agua toma como unidad de estudio la cuenca, siendo esta zona naturalmente delimitada donde se establecen las ciudades y se desarrollan todas las actividades¸ tanto domésticas también la agricultura, la industria y la minería, esta última creadora de controversias actuales, debido a su fama de «contaminadora». Lo seguro es que

una inadecuada gestión podría ocasionar daños irreparables a las aguas superficiales y más aún a las subterráneas. Es por esa razón que este estudio intentar establecer una metodología que sirva como herramienta a la gestión del agua subterránea, mediante la identificación de las zonas de más alto riesgo de contaminación y teniendo como unidad de estudio la subcuenca Aguascocha, donde se ha establecido minería formal.

Materiales y métodos

Recopilación y análisis de datos disponibles

La metodología aplicarse comienza con la delimitación de la unidad de estudio: la subcuenca Aguascocha. Como primer paso se deberá recopilar y analizar los datos disponibles.

- Los datos geológicos y cartas geológicas fueron obtenidos del Instituto Geológico Minero (INGEMET)
- Los datos de calidad de agua fueron obtenidos del estudio de impacto ambiental brindado por la compañía minera.
- La data hidrológica y meteorológica se obtuvo de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAHMI).
- La topografía se obtuvo del Instituto Geográfico del Perú (IGN).
- También se realizó una inspección de campo y toma de muestras de agua para verificar la información recolectada.

Construcción del modelo conceptual del acuífero

Al delimitar el área de estudio, el siguiente paso es la determinación del modelo conceptual del acuífero. Para esto se deberá considerar lo siguiente:

- Construcción del mapa topográfico.
- Construcción del mapa geológico.
- Datos meteorológicos (precipitación, evaporación, temperatura).
- Medición de caudales de aguas superficiales en la subcuenca Aguascocha.
- Identificación de las zonas de recarga y descarga de agua.
- Realización del balance hídrico.
- Tratamiento de información piezométrica.
- Interpretación de los perfiles estratigráficos y pruebas hidráulicas obtenidos en las perforaciones de los piezómetros.
- Determinación de la dirección del flujo superficial y subterráneo (haciendo uso del software Surfer 8.0).
- Caracterización de las aguas (haciendo uso del *software* Aquachem V.10).

Evaluación de vulnerabilidad

Una vez definido el modelo conceptual del acuífero se deberá aplicar los métodos drastic y GOD para hallar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

Recién al tener toda esta información como base se podrá determinar un modelo conceptual del acuífero que describa el comportamiento real en campo.

Estos métodos cuantificables, se caracterizan por dar valores numéricos a determinados parámetros; para esto se hará uso de los cuadros de clasificación de parámetro, establecidos en cada método.

Métodos de vulnerabilidad GOD

La metodología god fue desarrollada por Foster (1988) y es un método sencillo y sistemático, por lo que se usa cuando se cuenta con escasos datos, estos no son fiables o no cubren la totalidad del territorio que se estudia.

Por su estructura simple y pragmática, es el método utilizado en primer lugar para estimar el riesgo de contaminación de un acuífero, lo que sirve para establecer prioridades de actuación a la vista de los resultados. Sin embargo, tiende a simplificar, y no tener en cuenta el tipo de suelo, la infiltración efectiva ni la dispersión/dilución de contaminantes dentro del acuífero. Esto genera la pérdida de definición, volviéndose imposible diferenciar un tipo de contaminante de otro.

El método GOD se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a tres variables, que son las que nominan el acrónimo:

- G (*groundwater ocurrence*): Tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea.
- (*overall aquifer class*): Litología de la zona no saturada. Se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas y como consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada.
- D (*depth to groundwater*): Profundidad del agua subterránea o del acuífero.

Estos tres parámetros se multiplican para obtener una valoración de la vulnerabilidad de 0 (despreciable) a 1 (extrema):

$$\boxed{GOD = GOD \approx 0\text{-}1}$$

La lógica en la asignación de índices a cada variable es el resultado de un estudio previo del autor con respecto a las características de tipo de acuífero, litología de la zona no saturada y profundidad del agua subterránea.

Estos índices fueron establecidos considerando la característica y la facilidad que permite esta característica para un desplazamiento más rápido de cualquier contaminante hacia las aguas subterráneas.

Métodos de vulnerabilidad DRASTIC

El método DRASTIC es el más utilizado y suele ser muy útil cuando se quiere construir mapas de vulnerabilidad con datos de profundidad de agua, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona no saturada y conductividad hidráulica. Así mismo, se utilizan el sistema de información geográfica (SIG) y el *software* Arcgis10.0 para combinar las distintas variables.

Es un método usado tanto para la cualificación como para la cartografía y se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad), de acuerdo con las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo drastic:

- D (depth): Profundidad del agua subterránea.
- R (recharge): Recarga neta.
- A (aquifer): Litología del acuífero.
- S (soil): Tipo de suelo.
- T (topography): Topografía.
- I (impact): Naturaleza de la zona no saturada.

Además de la valoración de 1 a 10 que se da a cada parámetro, se pondera su influencia dentro de la evaluación de la vulnerabilidad mediante la asignación de unos pesos de 1 a 5. Ambos índices se multiplican y se suman los siete resultados para obtener una valoración final, según se indica en la siguiente expresión:

$$DRASTIC = (Dr \cdot Dw) + (Rr \cdot Rw) + (Ar \cdot Aw) + (Sr \cdot Sw) + (Tr \cdot Tw) + (Ir \cdot Iw) + (Cr \cdot Cw)$$

r: indica factor de clasificación o valoración.
w: indica factor de ponderación.

La lógica en la asignación de índices a cada variable es el resultado de un estudio previo del autor con respecto a las características de la profundidad del agua subterránea, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona no saturada y conductividad hidráulica del acuífero. Estos índices fueron establecidos considerando la característica y la facilidad que permite esta característica para un desplazamiento más rápido de cualquier contaminante hacia las aguas subterráneas.

La valoración de los parámetros mostrados en los cuadros va de 1 (la mínima vulnerabilidad) a 10 (la máxima). Además de lo expresado, a cada variable se le asigna un peso o ponderación, de acuerdo con la influencia respecto de la vulnerabilidad.

Construcción de mapas de peligro

La determinación del peligrosidad de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero Aguascocha se obtendrá a través de la identificación de las zonas donde se desarrollarán las actividades altamente peligrosas.

En base a estas actividades identificadas, se procederá a calcular el índice de peligrosidad (hi) mediante la siguiente fórmula:

$$HI = H.\ T.\ P.$$

Donde:

H: peso de la actividad peligrosa (tabla adecuada de la presentada por *cost action* 620).
T: factor de ecotoxicidad de la actividad peligrosa.
P: probabilidad de que el evento de contaminación ocurra.

La metodología propuesta por cost action 620 fue modificada en este estudio estableciendo un nuevo parámetro «T» ecotoxicidad de la actividad peligrosa.

Peso de la actividad peligrosa (H): Debido a la ausencia de un método que permita identificar y clasificar numéricamente las actividades mineras por su peligro a la contaminación, se elaboró un cuadro de análisis de peligrosidad en base a la tabla establecida en *cost action* 620.

En la tabla N.° 1 se muestra una gama de actividades y su valoración como contribuyente a la contaminación. La tabla original muestras un rango numérico de 0 a 100; sin embargo, dicha tabla no consideraba dentro de su clasificación las actividades mineras, por lo que se adecuó una valoración a dichas actividades. Esta adecuación de rangos numéricos se obtuvo basándose en la experiencia profesional de diversos profesionales en el campo.

Tabla 1
Cuadro de valoración de peso de la actividad peligrosa

N.º	Riesgo	Valoración H
	Actividades mineras	
1,1	Excavación	
	Excavación a tajo abierto	60
	Excavación subterránea	75
1,2	Plantas procesadoras	
	Planta de beneficio	98
1,3	Presa de relaves	85
1,4	Campamento	20

El factor de toxicidad de la actividad peligrosa minera (T): Este factor se calculará considerando el manejo de reactivos químicos utilizados en las distintas instalaciones mineras y que son dañinos para la salud humana y el medio ambiente.

Se deberá identificar el límite de ecotoxicidad de cada compuesto en las hojas de seguridad (mds). La ecotoxicidad se obtiene sobre pruebas realizadas a peces, siendo el límite de concentración para una morbilidad del 50% de la muestra y con un periodo de exposición de 96 horas. Para obtener el índice de toxicidad se divide la concentración del compuesto en el efluente entre el límite de toxicidad sobre peces.

Probabilidad de que el evento ocurra (P): Para calcular la probabilidad de que el evento de contaminación ocurra se debería tener una data estadística de varios años de la compañía minera. Esta data debería tener un número de accidentes de derrame u otros eventos por año. Pero al no tenerlo y como recomendación del autor del método, se considerará el P = 1.

Tabla 2
Valorización numérica
de las actividades contaminantes

Intervalo de peligro	Valoración	Descripción
0-20	1	Muy bajo
20-40	2	Bajo
40-60	3	Moderado
60-80	4	Alto
80-100	5	Muy alto

Fuente: Elaboración propia.

Construcción de mapas de riesgo de contaminación-vulnerabilidad y peligro

Previamente, se deberá identificar las actividades contaminantes mineras y otras desarrolladas en sus zonas de influencia.

Estas actividades serán valorizadas de acuerdo a la Tabla N.° 1, mediante la construcción del mapa de peligros. Una vez construido el mapa de vulnerabilidad y el de peligros estos se traslapan, se multiplican sus valores numéricos y se hace uso del *software* Arcgis10.0, para obtener finalmente el mapa de riesgo de contaminación de aguas subterráneas en el acuífero Aguascocha.

En estos mapas se identificarán las zonas de muy alto y alto riesgo, lo que permitirá registrar las zonas donde se deberá priorizar la implementación de medidas de protección. Al determinar la zona de más alto riesgo se evaluará si el riesgo es aceptable y puede producirse. Finalmente, de acuerdo con la estimación del riesgo y la evaluación del mismo, se plantearán las medidas de control necesarias para minimizar el riesgo.

Esta respuesta incluye la evaluación y selección de opciones, y la aplicación de medidas para prevenir o reducir al mínimo la probabilidad de un evento de contaminación y sus consecuencias, en caso de producirse.

Resultados

Primero se delimitó la cuenca en estudio. Esta se emplaza en la meseta intracordillerana de Junín-Cerro de Pasco, a una altitud de 4,770 msnm, y políticamente pertenece al distrito Santa Bárbara de Carhuacayán, provincia de Yauli, región Junín.

Modelo conceptual

El agua subterránea discurre en un sistema de acuífero libre en medio fisurado kárstico, constituido principalmente por una alternancia entre caliza fracturada, marga, calcarenitas fracturadas y, en menor grado, combinado por arcilla y grava pertenecientes al cretáceo superior. Esta dinámica de flujo va desde el noreste hacia el sur, notándose una bifurcación del flujo tanto hacia el suroeste, que vendría a ser la quebrada Aguascocha, y hacia el sureste, en la laguna Tuctococha. La sospecha de que el flujo de aguas subterráneas también parte hacia esta laguna se ve respaldada con los resultados geoquímicos y de balance hídrico.

El tipo de agua subterránea se caracteriza principalmente por tener un alto contenido de bicarbonatos y calcio, los que provendrían de la disolución de las rocas carbonatadas con el agua; así mismo, presenta sulfatos posiblemente por la oxidación de la pirita y otras zonas mineralizadas. También presenta cierto grado de contaminación por hierro y plomo.

El acuífero tiene un aporte significativo de agua durante las épocas de avenida (precipitación), mientras que durante la época de estiaje la recarga en precipitación se minimiza y produce un déficit en el balance hídrico, el que podría verse equilibrado con el agua de las lagunas.

Relevancia del resultado y su aporte a la realidad nacional, regional o local

La aplicación de la metodología permite identificar las zonas con moderado y alto riesgo de contaminación, considerando la vulnerabilidad intrínseca, es decir, sus características geológicas naturales y los peligros que vienen a ser las actividades mineras establecidas en la zona de estudio. La investigación permite establecer una metodología cuantitativa que busque dirigir los esfuerzos de protección de aguas subterráneas frente a actividades contaminantes en determinadas zonas que tienen mayor riesgo de contaminación con respecto a otras. De esta forma la metodología sirve como un instrumento para la gestión integral de los recursos hídricos en la unidad de estudio, la cuenca.

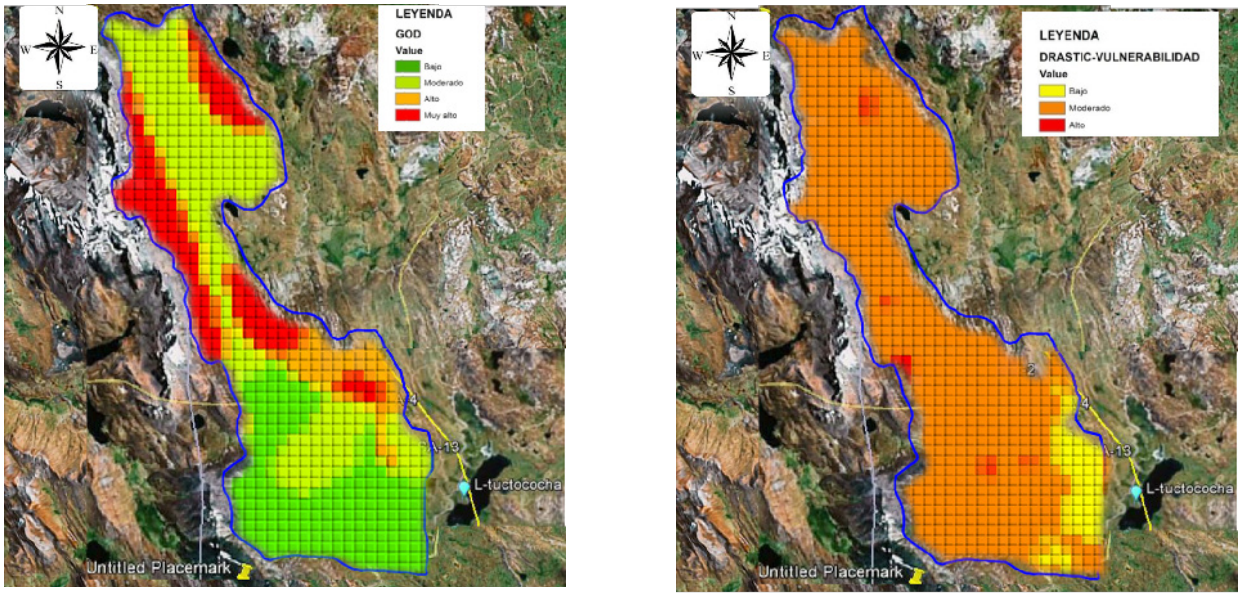

Figura 1. Mapa de vulnerabilidad

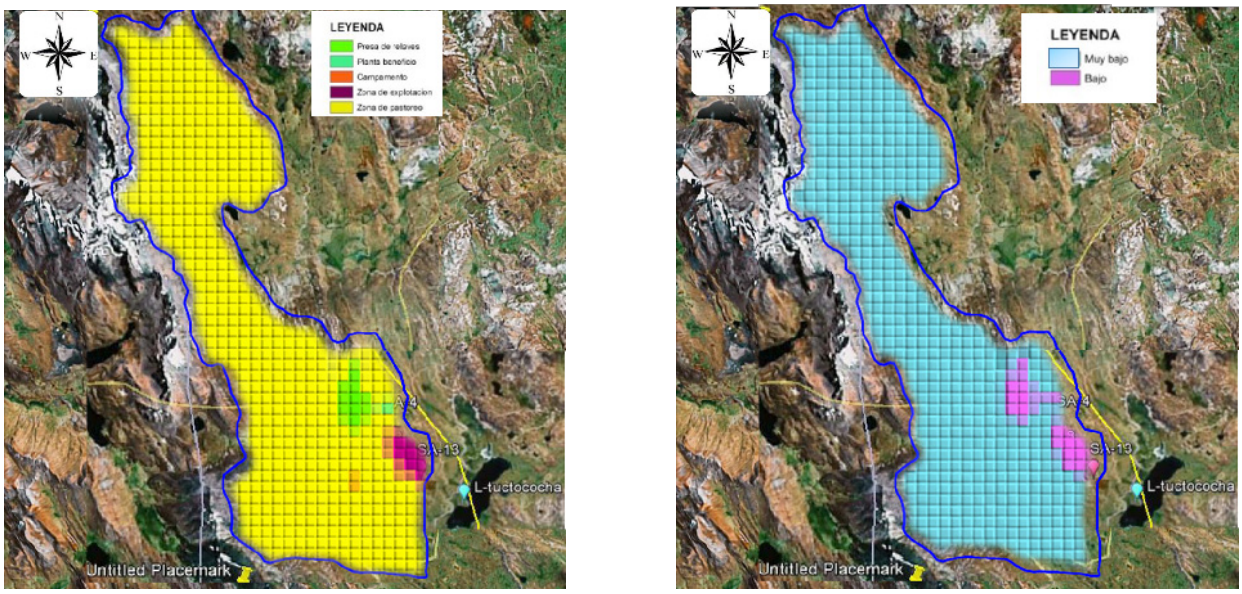

Figura 2. Mapa de peligro

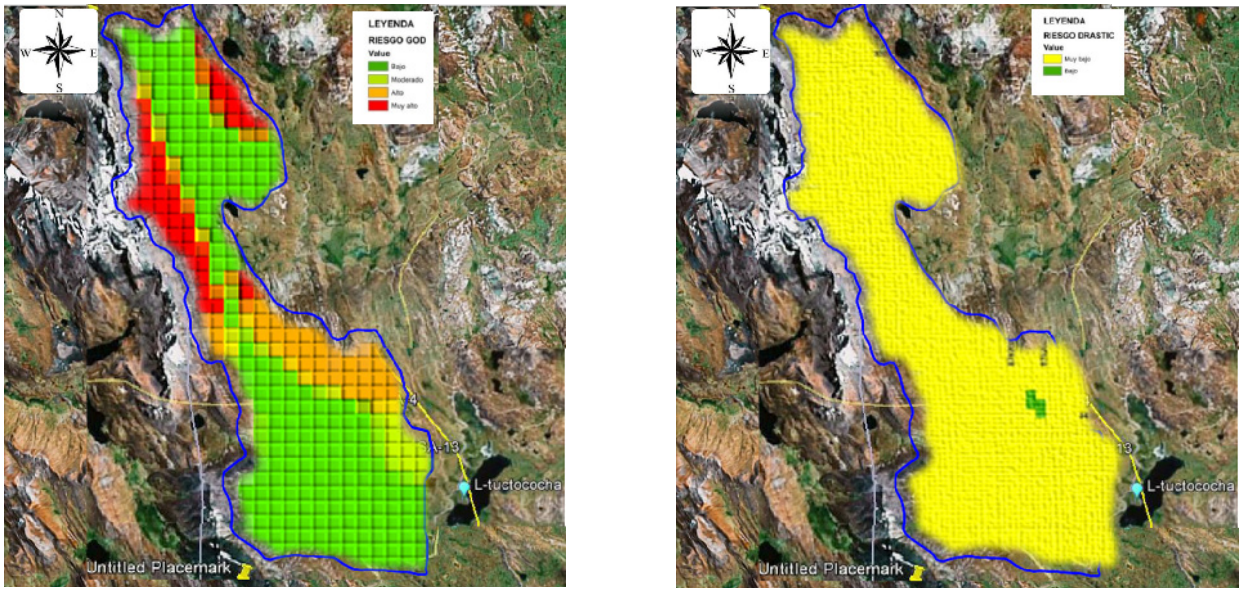

Figura 3. Mapa de riesgo de contaminación

Conclusiones

Según el método god, la vulnerabilidad varía entre bajo, moderado, alto y muy alto. La vulnerabilidad baja se presenta en el 33.6% del área total de estudio y abarca la zona sur de la subcuenca Aguascocha. La vulnerabilidad moderada abarca la zona norte y central de la zona de estudio y cubre un total de 37.7% del área total de estudio. La vulnerabilidad alta abarca alrededor de la zona norte de la concesión minera, lo que representa el 7.8% del área total de estudio. Finalmente, la vulnerabilidad muy alta abarca la zona de bofedales que va hacia el norte de la zona de estudio y una zona central del mismo, y corresponde al 20.8% del área total de estudio.

Según el método drastic, la zona de vulnerabilidad baja se da exactamente sobre la zona de explotación, mientras que la vulnerabilidad alta se da en ciertos puntos definidos. Finalmente, la vulnerabilidad moderada se da en casi toda la zona de estudio.

La peligrosidad de las actividades desarrolladas en la subcuenca Aguascocha, según la metodología establecida, nos da rangos de peligrosidad de muy bajo a bajo. Estos valores de peligro fueron plasmados en el mapa de peligros de la zona de estudio, que considera la ubicación de las actividades. El peligro bajo se presenta en el 4,3% del área total y se ubica en la zona de explotación minera, la presa de relaves y la planta beneficio.

La razón por la que estos valores de peligro son bajos y muy bajos es, principalmente, el amplio grado de dilución que tienen los reactivos químicos de la planta concentradora, lo que hace que la proporción con relación al límite de toxicidad sea mínima.

Referencias

Aller, L., T. Bennett; Lehr, J. H.; Petty, R. J. y Hackett, G. (1987). *Drastic: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. EE. UU.: EPA.

Canto Martín, J. C.; Herrera González, R.; Osorio Rodríguez, H.; García Sosa, J.; Sánchez y Pinto, I. y Mandujano Sánchez, P. (2009). *Evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas de Chetumal, Quintana Roo*. México.

Cárdenas Gaudry, M. (2002). *Análisis de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en el acuífero Chancay-Huaral.* Perú.

COST 620 (2008). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers.* Unión Europea.

Custodio, E. y Llamas, R. (1996). *Hidrología subterránea*. España.

Fetter, C. W. (1998). *Contaminant Hydrogeology*. Prentice-Hall.

Foster, S. y Hirata, R. (1988). *Determinación de la contaminación de aguas subterráneas: Una metodología basada en datos existentes.* Lima: ops-cepis.

Freiburg-Ebnet (2008). *Risk assessment case study.* Alemania.

Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Ed. Prentice Hall.

Herrero A. C. (2006). *Desarrollo metodológico para el análisis de riesgo hídrico poblacional humano en cuencas periurbanas.* Argentina.

Lobo Ferreira J. y Oliveira, M. (2004) *Groundwater vulnerability assessment in Portugal.* Portugal.

Tovar, J.; Sayán Miranda, J. L.; Pérez, G. y Guzmán, A. (2006). *Estado del conocimiento de la hidrogeología en Perú.* Perú.

Vrba, J. y Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability.*

Younger, P. (2007). *Groundwater in the Environment.* Reino Unido.