



**Determinación del tipo de acuífero de ciudad Guatemala
para la definición correcta de su vulnerabilidad
intrínseca**

Isaac Rodolfo Herrera Ibáñez¹
Carolina Herrera Rosales²

Recibido el 04 de abril de 2022.

Aprobado el 08 de abril de 2022.

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. iherrera@hotmai.com

² Facultad de Ingeniería, Investigador Asociado.

RESUMEN

En la ciudad Guatemala el agua potable proviene principalmente de acuíferos, planteándose la necesidad de seguir aprovechando el agua subterránea en forma sostenible, siendo importante determinar la vulnerabilidad intrínseca y el proceso de atenuación natural del acuífero.

El área de estudio es la subcuenca del río Los Ocotes, en la parte noreste de la ciudad, donde se localiza un acuífero volcánico que abastece a varias zonas de la capital.

En este artículo se presentan metodologías para la definición precisa de las características hidráulicas del acuífero, principalmente del coeficiente de almacenamiento, parámetro que se utiliza de base para modelar numéricamente los procesos de flujo del agua subterránea, transporte de contaminantes y el establecimiento de zonas de protección de pozos y manantiales.

Los resultados de la investigación definen el tipo de acuífero y el comportamiento del mismo, para la predicción de la contaminación del agua subterránea, permitiendo ofrecer a la comunidad científica nacional una guía para el establecimiento de los parámetros hidrogeológicos y la vulnerabilidad.

Palabras clave: acuífero, agua subterránea, coeficiente de almacenamiento, vulnerabilidad, contaminación.

ABSTRACT

In Guatemala City, drinking water comes mainly from aquifers, raising the need to continue using groundwater in a sustainable way, being important to determine the intrinsic vulnerability and the process of natural attenuation of the aquifer.

The study area is the sub-basin of the Los Ocotes River, in the northeastern part of the city, where a volcanic aquifer is located that supplies several areas of the capital.

This paper describes methodologies for the precise definition of the hydraulic characteristics of the aquifer, mainly the storage coefficient, a parameter that is used as a basis for numerically modeling the processes of groundwater flow, transport of contaminants and the establishment of protection zones of wells and springs.

The results of the research define the type of aquifer and its behavior, for the prediction of groundwater contamination, allowing to offer the national scientific community a guide for the establishment of hydrogeological parameters and vulnerability.

Key Words: aquifer, groundwater, storage coefficient, vulnerability, contamination.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas la ciudad de Guatemala ha crecido alarmantemente, consecuencia de la migración de la población del interior del país a la ciudad y del crecimiento demográfico, existiendo más de cinco millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística, 2016). Paralelamente a esto se ha verificado el crecimiento industrial, dando como resultado altos niveles de contaminantes en las aguas superficiales de ríos y el Lago de Amatitlán, que las hace inadecuadas para el consumo humano, dándose el incremento en la explotación de las aguas subterráneas, donde necesario definir la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (Herrera et al, 2007).

Los acuíferos son sistemas físicos que poseen un funcionamiento regulado por la recarga, movimiento del agua, descarga y extracciones, y tienen ciertas características fundamentales para la definición del acuífero como la porosidad, la conductividad hidráulica, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Estos parámetros permiten predecir el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a determinadas acciones exteriores como la contaminación (Fetter, 1980).

El análisis de los procesos de flujo subterráneo de la zona no saturada a la saturada, requiere de la definición de los parámetros hidrogeológicos, principalmente del coeficiente de almacenamiento. Esta característica se debe medir directamente en el campo para predecir la vulnerabilidad del acuífero. Las dificultades que se presentan, es que se necesita un pozo de observación próximo al pozo de bombeo, que se carece en la mayoría de los casos, por lo que resulta ser el parámetro hidrogeológico más difícil de estimar (Herrera y Orozco, 2010).

La vulnerabilidad de un acuífero se refiere a la susceptibilidad natural que presenta a la contaminación y está determinada principalmente por las características intrínsecas del acuífero. También, es función de la resistencia de la zona no saturada a la penetración de contaminantes, así como de la capacidad de dicha zona de atenuar o reducir la acción del o los agentes contaminantes. La capacidad de resistencia de la zona no saturada depende de varios factores, entre los cuales destacan: el grado de confinamiento del acuífero, la profundidad del nivel de agua subterráneo y el tipo de medio de la zona no saturada (Orozco et al, 2011).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de investigación se sitúa en la cuenca de Los Ocotes, que geográficamente se localiza entre los 14° 32' 06" a 14° 39' 23" de latitud norte y los 90° 24' 02" a 90° 28' 37" de longitud oeste, a una elevación media de 1,500 msnm (Herrera, 2012).

La cuenca tiene una superficie de 63.60 km² y se encuentra entre los municipios de Guatemala, San José Pinula y Santa Catarina Pinula. Tiene su nacimiento en las aldeas El Pajón (río Acatán) y Cienaga Grande (río La Palma), al sur del área.

Los materiales utilizados fueron principalmente informes, mapas y perfiles geológicos e hidrogeológicos. Las técnicas comprendieron la recopilación de información geológica e hidrogeológica de la cuenca del río Los Ocotes, realización de una prueba de bombeo del pozo Los Ocotes y la identificación de la estratigrafía del pozo.

Métodos utilizados para determinar el coeficiente de almacenamiento

Generalmente se emplean los métodos de Theis o Jacob (Custodio y Llamas, 2001), sin embargo, si el tipo de acuífero es semiconfinado, se puede utilizar el método de Walton (Kruseman y Ridder, 1994). El valor del coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres varía de 0 y 0.3 a 0.4 (30 a 40 % de porosidad eficaz), mientras que, en acuíferos confinados, el intervalo más frecuente es de 10⁻⁵ a 10⁻³ (Escuder et al, 2009). En los acuíferos semiconfinados se presentan valores de 10⁻².

El método de Theis calcula el coeficiente de almacenamiento, mediante la expresión:

$$S = \frac{4 * u * T * t}{r^2}$$

donde:

S = Coeficiente de almacenamiento (adimensional)

u = Determinado por curva patrón de Theis

T = Transmisividad (m²/día)

t = Tiempo transcurrido desde que se inicia el bombeo (días)

r = Distancia desde el pozo de observación al pozo de bombeo (m)

El método de Jacob el cálculo del coeficiente de almacenamiento utiliza la relación:

$$S = \frac{2.25 * T * t_0}{r^2}$$

donde:

T = Transmisividad (m²/día)

t₀ = Valor que se obtiene al intersectar la recta abatimiento-tiempo en el eje de abatimiento en días.

r = Distancia desde el pozo de observación al pozo de bombeo (m)

El método de Walton (Kruseman y Ridder, 1994) considera la existencia de al menos un acuitardo o capa poco permeable, que es capaz de transmitir lentamente agua. Para este tipo de acuífero semiconfinado se asume que se presentan condiciones similares a la solución de Theis, con las siguientes adiciones: i) filtración por goteo a través de la capa confinante, la cual es vertical y proporcional al abatimiento, ii) la presión en los depósitos que abastecen filtración por goteo es constante, y iii) el almacenamiento en la capa confinante es insignificante.

El método utiliza la familia de curvas tipo de Waltón y el abatimiento (s) por bombeo puede ser descrito por la fórmula de Hantush y Jacob (Kruseman y Ridder, 1994):

$$s = \frac{Q}{4\pi * T} W(u, r / L)$$

Los términos u se pueden definir como:

$$u = \frac{r^2 * S}{4 * T * t}$$

donde:

s = Abatimiento (s = h₀ – h)

Q = Caudal de bombeo

T = Transmisividad (m²/día)

S = Coeficiente de almacenamiento

r = Distancia desde el pozo de observación al pozo de bombeo (m)

t = Tiempo transcurrido desde que se inicia el bombeo (días)

k' = Conductividad hidráulica vertical de la capa semipermeable (m/d)

b' = Espesor de la capa semipermeable (m)

L = Factor de goteo o precolación (m)

C = Resistencia hidráulica de la capa semipermeable (días), siendo C = b'/k' o L²/T

Método para determinar la vulnerabilidad del acuífero

La vulnerabilidad es la capacidad, susceptibilidad o sensibilidad que presenta el recurso hídrico subterráneo de ser dañado por diversos procesos, de acuerdo a características naturales y antrópicas, y está determinada principalmente por las características intrínsecas del acuífero. La vulnerabilidad del agua subterránea se refiere a la tendencia o probabilidad que un contaminante alcance el sistema acuífero, después de su introducción en algún punto sobre el terreno.

El método GOD (Foster et al, 2003), estima la vulnerabilidad de un acuífero, multiplicando tres parámetros que representan tres tipos de información espacial, como:

- **Grado de confinamiento hidráulico o tipo de acuífero**, cuyo índice puede variar entre 0 a 1.

El modo de ocurrencia del embalse subterráneo varía entre la inexistencia de acuíferos (evaluado con índice 0) en un extremo y la presencia de un acuífero libre (evaluado con índice 1), en el otro extremo, pasando por acuíferos semiconfinados, confinados y surgentes (Figura 2).

- **Ocurrencia del sustrato suprayacente o litología de la zona no saturada**, que evalúa las características litológicas y el grado de consolidación de la zona no saturada o capas confinantes.

Esta información se usa para obtener un índice que puede variar en un rango entre 0.4 a 1.

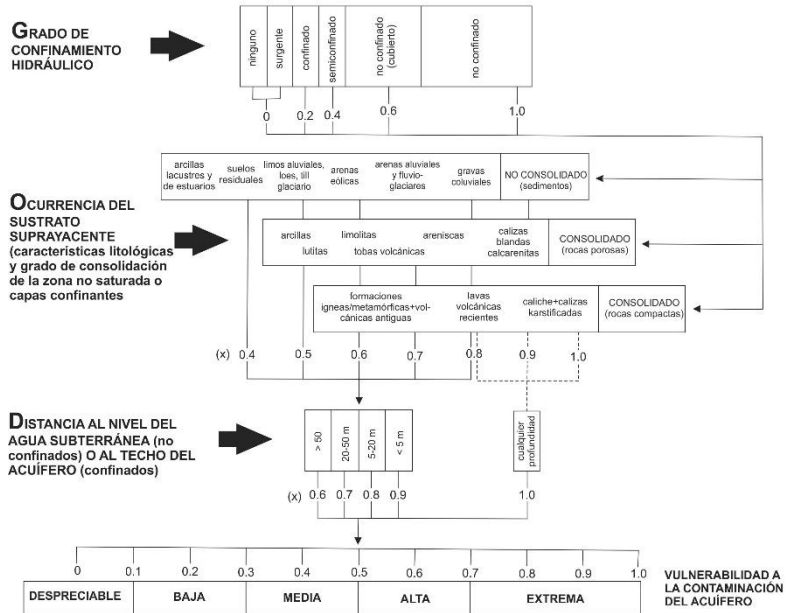
- **Distancia al nivel de agua subterránea, nivel freático o al techo del acuífero (nivel piezométrico).**

De acuerdo a la profundidad observada, este componente puede tomar un valor entre 0.6 a 1.

El producto de estos tres componentes arroja un índice de vulnerabilidad que puede variar entre 0 y 1, indicando vulnerabilidades desde despreciables (0 – 0.1), baja (0.1 – 0.3), media (0.3 – 0.5), alta (0.5 – 0.7) y extrema (0.7 – 1.0).

Figura 2.

Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

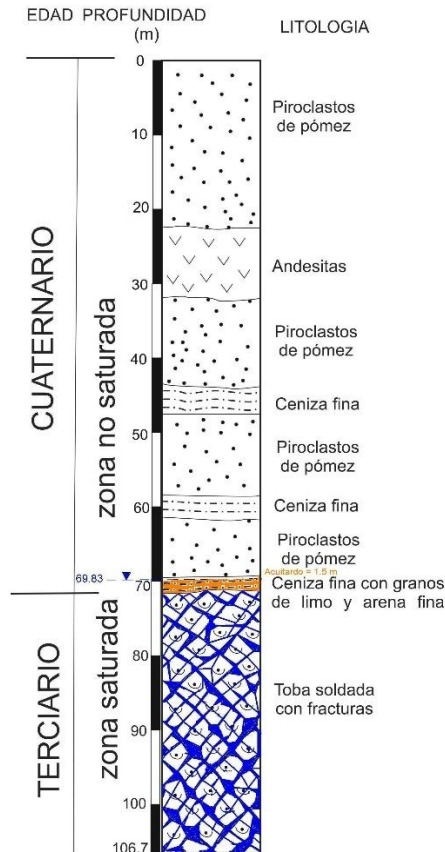


Fuente: Foster, et al., 2003.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El acuífero de la parte noreste de ciudad Guatemala, está constituido por tobas soldadas del período Terciario superior, con características de permeabilidad secundaria por fracturación (Lamarre et al, 1971). Además, el acuífero se encuentra cubierto por depósitos piroclásticos de pómez, una colada de andesitas y capas de ceniza volcánica del período Cuaternario, que constituyen la zona no saturada y el acuitardo (Figura 3).

Figura 3.
 Columna litológica del pozo Los Ocotes



Parámetros hidrogeológicos del acuífero

En el pozo 1 del poblado de Los Ocotes (Finca El Sintul), se extrajo un caudal de 545 m³/d (100 gal/min), mientras que el pozo 2 ubicado a 37.7 metros de distancia, se utilizó como pozo de observación (pozo sin bombeo), con un nivel estático de 69.83 metros bajo la superficie del terreno, siendo la profundidad total de los dos pozos de 106.7 metros (350 pies).

Los valores de los parámetros hidrogeológicos, se presentan en la Tabla 1, obtenidos de acuerdo a los gráficos de los métodos de Theis y Jacob, que se observan en las Figuras 3, 4 y 5. Se resalta que los métodos de Theis y Jacob no tienen un buen ajuste, por lo que se empleó el método de Walton (Figura 6).

Tabla 1. Parámetros hidrogeológicos obtenidos con diferentes métodos

Método	Coefficiente de almacenamiento	Transmisividad (m ² /d)	Conductividad hidráulica (m/d)
Theis	2.4x10 ⁻²	971	4.85
Jacob	1.82x10 ⁻²	1,642	8.21
Recta 1	9.19x10 ⁻²	282	1.41
Jacob	1.98x10 ⁻²	542	2.71
Recta 2			
Walton			

Figura 3.

Gráfico de Theis de la prueba del pozo Los Ocotes

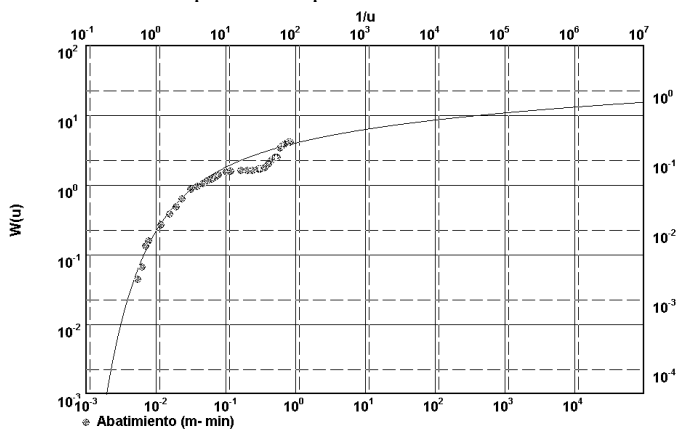


Figura 4.
Gráfico de Jacob de recta 1 de la prueba del pozo Los Ocotes

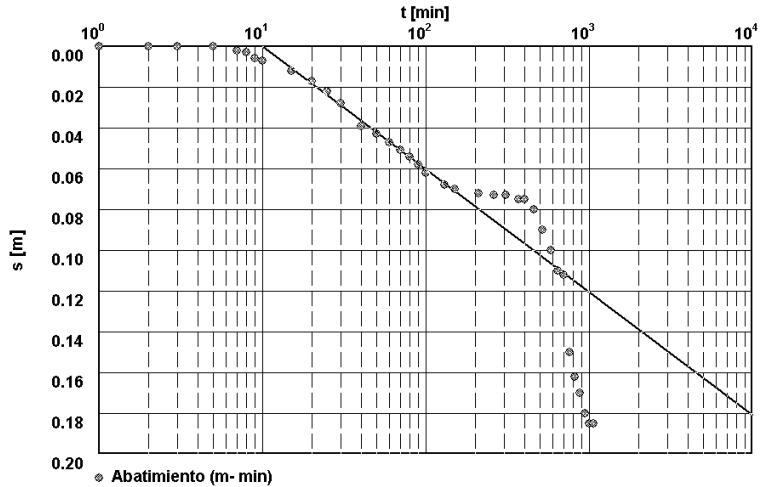


Figura 5.
Gráfico de Jacob de recta 2 de la prueba del pozo Los Ocotes

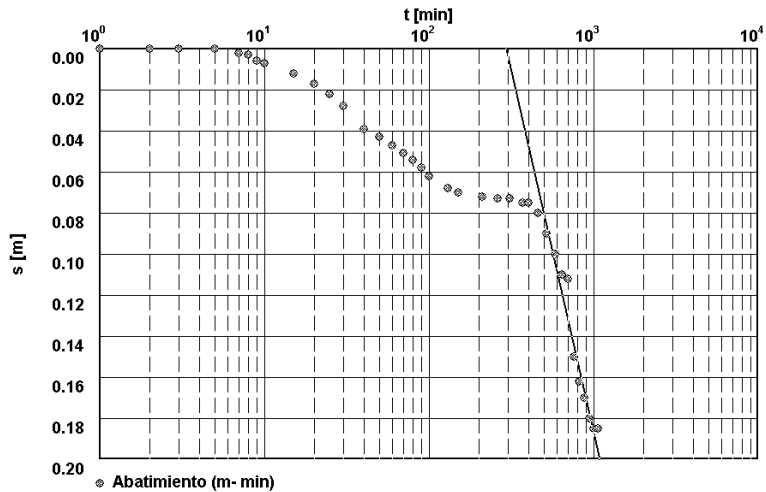
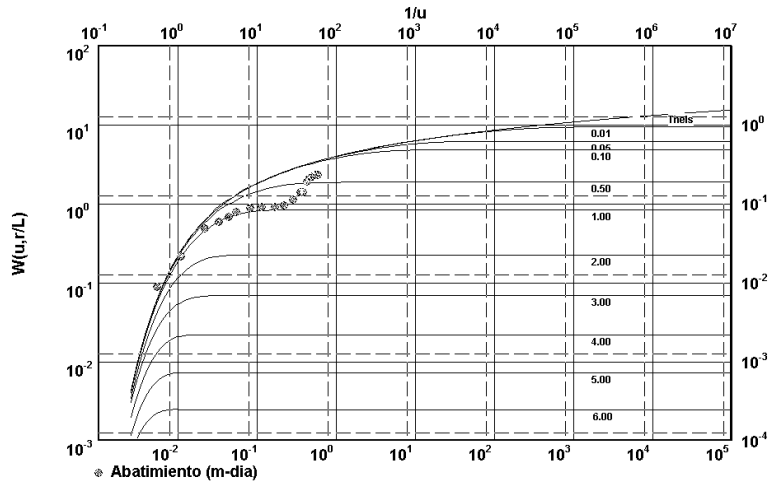


Figura 6.

Gráfico de Walton de la prueba del pozo Los Ocotes



En el pozo Los Ocotes el nivel piezométrico es de 69.83 metros de profundidad y se encuentra en una capa de cenizas volcánicas con limo y arena fina de 1.5 metros de espesor (b'), que funciona como un acuitardo (ver Figura 7) o capa que transmite agua muy lentamente de manera vertical, pero no lateralmente.

En los gráficos de Theis y Jacob, se puede observar que la distribución de los puntos de abatimiento se estabiliza entre los 190 a 310 minutos, como resultado de que el acuitardo, contiene cierta cantidad de agua que cede muy lentamente, y por presentarse pequeños niveles de descenso, se comporta como una recarga.

Por otra parte, en el gráfico de Jacob, la primera disposición de los puntos origina una recta con menor pendiente que define un menor abatimiento y por ende una mayor transmisividad ($1,642 \text{ m}^2/\text{d}$). Seguidamente el descenso de nivel de agua subterránea, después de los 100 minutos intercepta un sistema de fracturas y se estabiliza hasta los 310 minutos, y posteriormente se presenta una disposición de puntos que origina una recta con mayor pendiente, mayor abatimiento y menor transmisividad ($282 \text{ m}^2/\text{d}$), lo que confirma que es un medio fracturado y con sistemas de fracturas de diferente permeabilidad.

Cuando existe un acuífero semiconfinado, los métodos de Theis y Jacob no proporcionan valores de transmisividad confiables y, por lo tanto, se

recurre al método de Walton, que considera la existencia de al menos un acuitardo, calculándose valores más precisos de transmisividad de 542 m²/d y de coeficiente de almacenamiento de 1.98×10^{-2} .

La conductividad hidráulica (K) se obtuvo de acuerdo a la relación de la transmisividad y el espesor saturado ($K = T/b$), siendo este último de 200 metros, obtenido de acuerdo a la profundidad total de los pozos más profundos de Kanajuyú Zona 16 (350 metros) y Hacienda Real Zona 17 (400 metros) y el nivel estático de 150 y 208 metros respectivamente.

El método de Walton, también permite determinar la resistencia hidráulica (C), la permeabilidad (k') y la transmisividad (T') del acuitardo, de acuerdo a la curva utilizada de $r/L = 0.9$, con lo que se obtuvieron los valores: $W(u, r/L) = 1$, $u = 1$, $s = 0.08$ m, $t = 0.013$ días.

La resistencia hidráulica ($C = L^2/T$) del acuitardo es de 3.24 días, para que se infiltre una gota de agua. La permeabilidad ($k' = b'/C$) del acuitardo es 0.46 m/d, lo que significa que el medio es poco permeable y drena mal. Mientras que la transmisividad ($T' = k' \cdot b'$) del acuitardo es menor a 1 m²/d, que se clasifica como nula.

Vulnerabilidad intrínseca del acuífero

El tipo de ocurrencia del agua subterránea (G), se clasifica con un valor índice de 0.4, que corresponde a un acuífero semiconfinado. La ocurrencia del sustrato suprayacente (O) o litología de la zona no saturada, es de piroclastos de pómez de arenas eólicas y capas de ceniza volcánica, que definen un índice de 0.6. Mientras que la distancia al nivel del agua subterránea (D), en las partes alta y media de la subcuenca es mayor de 50 metros bajo el terreno, siendo el índice de 0.6 y por lo tanto, la vulnerabilidad del acuífero es de 0.144, que corresponde a una vulnerabilidad baja. En la parte baja de la subcuenca la distancia al nivel estático, es de 8.33 a 9.14 metros y el índice es 0.8, definiéndose una vulnerabilidad de 0.192, que también se clasifica como baja.

La vulnerabilidad del acuífero esta definida principalmente por el grado de confinamiento hidráulico o tipo de acuífero, que en este caso para un acuífero semiconfinado es baja, siendo generalmente alta para acuíferos libres. La ocurrencia del sustrato suprayacente de piroclastos de pómez o litología de la zona no saturada, determina un índice medio, siendo alto para gravas, calizas y rocas fracturadas, mientras que para arcillas y rocas consolidadas el índice es bajo. La distancia al nivel del agua subterránea es variable de acuerdo a la posición topográfica, teniendo un índice medio.

4. CONCLUSIONES

1. La caracterización hidrogeológica de la subcuenca del río Los Ocotes en la parte noreste del valle de Guatemala, identifica un acuífero volcánico en tobas fracturadas, cuyo espesor es superior a los 200 metros.
2. Los parámetros hidrogeológicos del acuífero son: coeficiente de almacenamiento de 1.98×10^{-2} que define un acuífero semiconfinado, una transmisividad media de 542 m²/día y una conductividad hidráulica media de 2.71 m/día.
3. La aplicación de diferentes métodos de la prueba de bombeo del pozo Los Ocotes, ubicado en la parte media de la subcuenca, permitió definir el tipo de acuífero como semiconfinado con un alto grado de precisión, que fue confirmado por la litoestratigrafía y la pequeña variación de niveles estáticos de pozos en tres años de medición.
4. El cálculo correcto del coeficiente de almacenamiento, es un aporte científico importante para la definición del tipo de acuífero en el valle de Guatemala y para la estimación del índice de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.
5. El tipo de acuífero semiconfinado y la litología de la zona no saturada de piroclastos de pómez con capas de ceniza volcánica, evidencian una vulnerabilidad baja.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Custodio, E., & Llamas, R. Hidrología subterránea. Tomo I (2ª ed.). Omeqa Ediciones. Barcelona, España. 2001. 1157p.
- Escuder, R.; Fraile, J.; Jordana, S.; Ribera, F.; Sánchez-Vila, X. & Vázquez-Suñé, E. Hidrogeología, conceptos básicos de hidrología subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS). Barcelona, España. 2009. 768 p.
- Fetter, C.W. Applied Hydrogeology. (3ª ed.). New York. 1980. 654p.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M. & Paris, M. Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Una contribución para hacer más visible al agua subterránea y así más manejable. Banco Mundial. Washington, D.C. 2003. 115 p.
- Herrera, I. R. Estudio hidrogeológico de la subcuenca del río Los Ocotes para determinar las áreas principales de recarga hídrica e identificación de las áreas vulnerables a deslizamientos e inundaciones para proponer alternativas de prevención de la parte noreste de la Ciudad de Guatemala. Informe Final proyecto FODECY 035-2009. Guatemala, Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología, 2012. 123 p.
- Herrera, I. I.; Orozco, E. O. y Padilla, T. A. Guía para el manejo de cuencas hidrográficas. Primera edición. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2007. 135 p.
- Herrera, I.R. & Orozco, E.O. Hidrogeología de Ojo de Agua, cuenca sur de la Ciudad de Guatemala. Rev. Geol. América Central., 42: 85-98, 2010.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). Encuesta nacional de condiciones de vida. Guatemala. 2016.

- Kruseman, G. & De Ridder, N. Analysis and evaluation of dumping test data. Second edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement. The Netherlands. 1994. 377 p.
- Lamarre, A.; Lamarre, R.; Loucks, T. & Brown, R. The geology of the San José Pinula quadrangle, Guatemala. Dartmouth College Hanover, New Hampshire. 1971. 102 p.
- Orozco, E.O.; Herrera, I.R. & Mujica, A.C. Vulnerabilidad intrínseca del acuífero del valle de Chimaltenango, altiplano central de Guatemala. Impactos preliminares de su gestión integrada. Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias., 20(4): 42-47, 2011.