

Artículo científico

Distribución espacial de la vulnerabilidad potencial a contaminación del acuífero noreste de ciudad de Guatemala**Edio Giovanni González-Celada**

M.Sc. Recursos hidráulicos opción Hidrología, ERIS-USAC, Guatemala

M.Sc. Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, CATIE, Costa Rica

Facultad de Agronomía, USAC, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: edio.gonzalez@catie.ac.cr

Recibido 27.09.1019 aceptado 08.11.2019

Resumen

Para determinar el potencial de vulnerabilidad espacial a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala con base a sus características intrínsecas, se utilizó el método por sobre posición índice DRASTIC; el cual está compuesto por siete parámetros hidrogeológicos: profundidad del agua (D), recarga neta (R), medio del acuífero (A), medio del suelo (S), topografía (T), impacto de la zona vadosa (I), y conductividad hidráulica (C). La recarga neta se obtuvo por modelación hidrológica con la herramienta SWAT (Soil Water Assessment Tool); se calibró la variable caudal con el algoritmo SUFI-2 del programa SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction), y esta no fue satisfactoria. Los otros parámetros se estimaron con base a información existente en el acuífero noreste y su posterior procesamiento en el programa QGIS v 2.6.1. La vulnerabilidad de este acuífero en su mayoría es baja (56%), según el código de color de los Estados Unidos y con base a clasificación local propuesta, la mayor superficie es de vulnerabilidad media (66%). Con base al uso/cobertura de la tierra como parámetro de influencia de contaminación por actividades antrópicas, predomina las zonas de baja prioridad (80.6%); las cuales corresponden al uso bosque. Mientras que las zonas de alta y media prioridad están en áreas de uso agricultura anual, matorrales y pastos. Los parámetros impacto de la zona vadosa (30.8%), medio del acuífero (27.1%), y recarga hídrica (23%), presentan el mayor impacto o influencia en el potencial de vulnerabilidad, según el análisis de sensibilidad de un solo parámetro.

Palabras Claves: vulnerabilidad intrínseca, índice DRASTIC, modelación hidrológica, SWAT, influencia antrópica**Abstract**

The potential of spatial vulnerability to pollution in the northeast aquifer in Guatemala City is determined based on its intrinsic characteristics. The overlay index DRASTIC method was used, which is composed by seven hydrogeological parameters: water depth (D), net recharge (R), aquifer media (A), soil media (S), topography (T), impact of the vadose zone (I), and hydraulic conductivity (C). The net recharge was obtained by the hydrological model using the SWAT tool (Soil Water Assessment Tool); the streamflow was calibrated with the SUFI-2 algorithm from the SWAT-CUP program (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction), where the calibration was not satisfactory in the only calibration point. The other six parameters of the DRASTIC index were estimated based on the existing information of the northeast aquifer and its posterior process in the QGIS v 2.6.1 program. The vulnerability of this aquifer is mainly low (56%), according to the colour code from the United States, and based on the proposed local classification most of the surface is in medium vulnerability (66 %). Based on the land use/cover as an influential pollution parameter due to human-induced activities, the low-priority zones predominate; which correspond to the forest use. Whereas the high and medium priority zones are located in annual agricultural use, scrubland and pastureland. The impact parameters of the vadose zone, aquifer environment, and water recharge show the most impact or influence in the vulnerability potential, according to the sensibility analysis of a single parameter.

Key words: intrinsic vulnerability, DRASTIC index, hydrological modelling, SWAT, anthropic influence

Introducción

De acuerdo a Megdal (2018), la dependencia mundial por el agua subterránea se ha incrementado, resultado del crecimiento poblacional y cambio climático; por ello la gestión de este recurso requiere especial interés en su cantidad y calidad. En referencia a su calidad, globalmente la recarga hídrica más reciente, menos de 50 años, es la más vulnerable a contaminación por actividades antrópicas de industria y agricultura (Gleeson, Befus, Jasechko, Luijendijk, y Cardenas, 2016). Es así como la degradación de la calidad de agua subterránea por acción antrópica es un problema cada vez más frecuente en países en desarrollo (Giordano, 2009). En América Central los acuíferos volcánicos son fuente de aprovisionamiento de agua potable para la mayoría de grandes ciudades, y este tipo de acuíferos con formaciones de lava cuaternaria y terciaria presentan alta permeabilidad que los hacen altamente vulnerables a la contaminación antrópica (Ballesteros, Reyes, y Astorga, 2007). Este argumento se confirma con la existencia de un amplio sistema de fracturas del terciario que se caracteriza por su permeabilidad secundaria en la zona metropolitana de Guatemala, y unido al sistema de fallas geológicas propicia un medio con alta permeabilidad y flujo a través del medio fisurado. Estas condiciones inherentes a la geología del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala lo hacen vulnerable a contaminación por ingreso de contaminantes que se transportan en la fracción de precipitación pluvial que recarga los acuíferos (Aller, Bennett, Lehr, Petty, y Hackett, 1987; Ballesteros *et al.*, 2007; Herrera Ibáñez, Manzo Barrientos, y Hernández, 2016). El acuífero

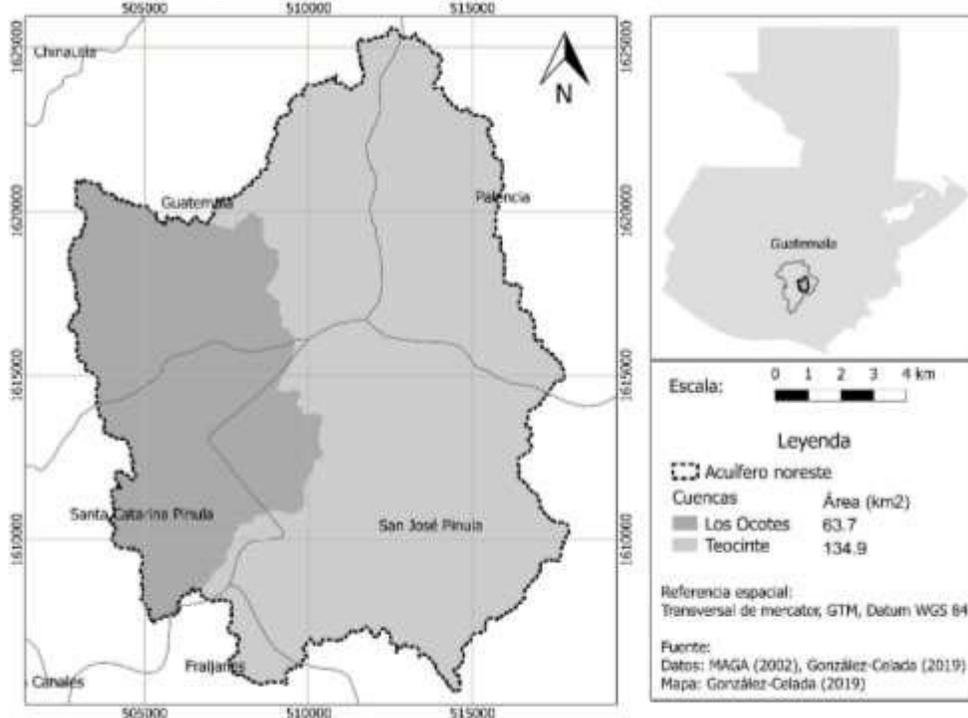
noreste de la ciudad de Guatemala es estratégico, dado su aporte de agua subterránea para el aprovisionamiento de este recurso para la ciudad de Guatemala y municipios adyacentes (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016). El presente estudio aplica el método de sobre posición DRASTIC, el cual considera siete parámetros hidrogeológicos que originan el acrónimo del nombre del método. Posteriormente se realiza priorización con base al uso/cobertura de la tierra como variable de influencia antrópica en la contaminación, y finalmente se somete a análisis de sensibilidad de un solo parámetro (Napolitano y Fabbri, 1996) cada parámetro del índice DRASTIC.

Metodología

Área de estudio

El acuífero noreste de la ciudad de Guatemala es de origen volcánico que comparte superficie con cinco municipios del departamento de Guatemala, y corresponde a la cuenca hidrográfica de los ríos Los Ocotes y Teocinte, con una extensión de 198.72 km² (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016) (Fig. 1). El uso/cobertura de la tierra, está representado por bosques, cultivos anuales, pastizales, uso urbano, cultivo de café y cuerpos de agua (GIMBUT, 2014).

Figura 1. Acuífero noreste de la ciudad de Guatemala



Mapeo de la vulnerabilidad

El mapeo de la distribución espacial de la vulnerabilidad se realizó con el método del índice de sobre posición DRASTIC (Aller et al., 1987); el cual, desde su creación, ha sido ampliamente usado para mapear la vulnerabilidad de las aguas subterráneas (Al-Zabet, 2002; Rupert, 1999). Este método evalúa la vulnerabilidad a contaminación con base a la superposición de siete parámetros o factores hidrogeológicos que controlan el movimiento del agua subterránea, estos son: profundidad del agua (D), recarga hídrica neta (R), medio del acuífero (A), medio del suelo (S), topografía (T), impacto de la zona vadosa (I), y conductividad hidráulica (C) (Aller et al., 1987; Iqbal, Gorai, Tirkey, y Pathak, 2012). Tales parámetros para el acuífero noreste se determinaron con el procesamiento de información existente y la aplicación de métodos para la obtención de su capa vectorial (Tabla 1). A cada capa vectorial se le asignaron valores de clasificación con base a rangos establecidos por el método DRASTIC (Aller et al.,

1987), para su posterior conversión de vector a ráster. Cada parámetro fue ponderado según lo propone el método DRASTIC. Finalmente, se calculó el valor numérico del índice DRASTIC (Ec. 1); y se clasificó según el código de color nacional de los Estados Unidos (Aller et al., 1987) y el potencial de vulnerabilidad propuesto por Musálem, McDonald, Jiménez, y Laino (2015). También, se propone una clasificación de valores numéricos de DRASTIC para este acuífero. Los procesos de digitalización, georreferenciación, clasificación, ponderación y sumatoria de capas se realizaron en la interfaz del programa de sistemas de información geográfica QGIS versión 2.6.1

$$V = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (1)$$

Donde, *V*, es el potencial de contaminación; los subíndices *R* y *W*, son el valor de clasificación y peso, respectivamente

Tabla 1. Métodos y fuentes de información utilizadas para determinar los parámetros del índice DRASTIC

Parámetro	Métodos	Fuente
Profundidad del agua (D)	Se aplicó algebra de mapas entre el atributo elevación del modelo de elevación digital (MED), y el nivel estático de pozos y/o isopiezas; para obtener la profundidad del agua. Luego se construyó la capa vectorial de puntos y se interpoló por el método de la distancia inversa ponderada (IDW).	Estudio hidrogeológico de la subcuenca Los Ocotes (Herrera Ibáñez, 2012). Mapa de isopiezas del acuífero noreste (Herrera Ibáñez <i>et al.</i> , 2016). Mapa del nivel freático de ciudad de Guatemala (JICA, 1986). Pozos con información piezométrica (JICA, 1995; FUNCAGUA, 2019; IGN, 1973; INSIVUMEH, 1978; Municipalidad de Palencia, 2018).
Recarga neta (R)	Se estimó con base a modelación hidrológica con la herramienta SWAT (<i>Soil and Water Assessment Tool</i>) en su versión QSWAT 1.7 para el programa QGIS 2.6.1. Con un periodo de simulación de 19 años (1995 a 2013), a escala mensual. La calibración del caudal mensual (05/2009 a 04/2011) se ejecutó en el algoritmo SUFI-2 integrado en el programa SWAT-CUP. En ese sentido, se operaron dos iteraciones con 500 simulaciones cada una. El detalle de los procesos para realizar la modelación hidrológica y determinación de los otros parámetros del índice DRASTIC, pueden revisarse en González-Celada (2019).	Tipo de suelo del estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala a escala 1:50,000 (MAGA-DIGEGR, 2017). El uso/cobertura del suelo del mapa de bosques y uso de la tierra a escala 1:50,000 (GIMBUT, 2014), y del mapa forestal por tipo y subtipo de bosque a escala 1:25,000 (INAB-CONAP, 2015). La topografía del modelo de elevación digital (MED) con resolución espacial de 15 m (MAGA, 2010). Información climática de la estación central del Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología (2018).
Medio del acuífero (A)	Se comparó la descripción de los perfiles y su ubicación espacial al traslaparse con el mapa de unidades hidrogeológicas. Así se asignó el tipo de litología del acuífero al mapa de unidades hidrogeológicas.	Mapa de unidades hidrogeológicas y perfiles hidrogeológicos (Herrera Ibáñez <i>et al.</i> , 2016). Otros perfiles hidrogeológicos (JICA, 1995; Ckc Chuo Kaihatsu Corporation, 1995; INSIVUMEH, 1978; Manzo Barrientos, 2008; MAGA, 1991).
Medio del suelo (S)	Se efectuó análisis comparativo de la textura de cada horizonte del suelo en las distintas unidades de clasificación de suelo (UCS). A cada UCS se asignó la clase textural más importante en el movimiento de agua.	Estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala (MAGA-DIGEGR, 2017).
Topografía (T)	El modelo de elevación digital se procesó y calculó la pendiente (%).	Modelo de elevación digital, resolución espacial 15 m (MAGA, 2010).
Impacto de la zona vadosa (I)	El impacto de la zona vadosa se mapeó con base a la descripción de los perfiles hidrogeológicos, donde la información de su litología se asignó al mapa de unidades hidrogeológicas luego de hacer comparación espacial entre ambas informaciones.	Mapa de unidades hidrogeológicas y perfiles hidrogeológicos del acuífero noreste (Herrera Ibáñez <i>et al.</i> , 2016). Información de otros estudios (Ckc Chuo Kaihatsu Corporation, 1995; INSIVUMEH, 1978)
Conductividad hidráulica (C)	Al mapa del parámetro medio del acuífero se le asignó la conductividad hidráulica. Los valores de conductividad hidráulica fueron obtenidos a partir de transmisividades de diferentes pruebas de bombeo y el espesor saturado para el acuífero (entre 80 y 200 m)(Herrera Ibáñez, 2012; Herrera Ibáñez <i>et al.</i> , 2016).	Prueba de bombeo de un pozo en San José Pinula (JICA, 1995). Conductividad hidráulica en pozo ubicado en Finca El Sintul (Herrera Ibáñez, 2012). Prueba de bombeo de un pozo en Puerta Parada (INSIVUMEH, 1978), otro en Santa Catarina Pinula (Manzo Barrientos, 2008), y cinco pozos en Palencia.

Priorización de la vulnerabilidad

La priorización de la vulnerabilidad a contaminación según el uso/cobertura de la tierra como variable de influencia antrópica se realizó con base a tres criterios que fueron desarrollados por Ribeiro (2005), Brindha y Elango (2015), y un tercero propuesto para el uso/cobertura de la tierra en el acuífero noreste, que fue toma valores de 1 a 9, estos representan la mínima y mayor influencia a la vulnerabilidad por actividades antrópicas, respectivamente (Tabla 2). Las categorías de vulnerabilidad intrínseca del índice DRASTIC se reclasificaron de 1 a 8; que corresponde al mínimo y máximo potencial de vulnerabilidad. Por último, se operó el producto entre la vulnerabilidad del índice DRASTIC reclasificado y el uso/cobertura de la tierra clasificado según los tres criterios antes indicados (Laino, Jiménez, Páez, Casanoves, y Velásquez, 2006) (Ec. 2).

$$V_p = V_{Reclas} * U_{clas} \tag{2}$$

Donde, V_p es la vulnerabilidad priorizada por el uso/cobertura de la tierra; V_{Reclas} es la vulnerabilidad intrínseca DRASTIC reclasificada (1-8), y U_{clas} es el uso/cobertura de la tierra clasificada (1-9).

Tabla 2. Clasificaciones asignadas al uso/cobertura de la tierra respecto a su influencia en contaminación

Uso	Ribeiro (2005) *	Secunda et al. (1998)	González-Celada (2019)
Agricultura anual	9	8	9
Cultivos Permanentes herbáceos	7	6	5
Café	7	6	4
Bosque	0	1	1
Cultivos arbóreos	7	6	6
Pastos	5	5	2
Guamil-matorral	5	5	3

Uso	Ribeiro (2005) *	Secunda et al. (1998)	González-Celada (2019)
Urbano	7	8	8
Cuerpos de agua	0	7	7

(*) Valor modificado del original

Sensibilidad

A los siete parámetros del índice DRASTIC se les aplicó el método del análisis de sensibilidad de un solo parámetro (Ec. 3; SPSA, por sus siglas en inglés) (Napolitano y Fabbri, 1996); con la finalidad de medir la influencia de estos en el valor numérico de DRASTIC para el acuífero noreste.

$$W_{pi} = \frac{P_{Ri} P_{Wi}}{V_i} * 100 \tag{3}$$

Donde, W_{pi} es el peso efectivo o impacto del parámetro sobre el índice DRASTIC; P_{Ri} valor de clasificación del parámetro; P_{Wi} peso teórico del parámetro; V_i es el índice de vulnerabilidad.

Resultados

Profundidad del agua (D)

En su mayoría el acuífero noreste presenta profundidad del agua superior a los 30.5 m. Para acceder el resultado espacial de este parámetro y los otros, consultar a González-Celada (2019).

Recarga neta (R)

La modelación hidrológica con la herramienta SWAT estimó la recarga hídrica media multianual (1997-2013) del acuífero noreste en 186 mm/año. La modelación hidrológica en mención fue sujeta a calibración de caudales durante el período abril 2009 a mayo 2011, donde los estadísticos de eficiencia KGE (Gupta, Kling, Yilmaz, y Martinez, 2009) y Nash y Sutcliffe (1970), fueron igual a -0.29 y -3.19, respectivamente.

Medio del acuífero (A)

Con base al material rocoso del acuífero se presentan dos litologías, los piro clastos de pómez y las rocas

volcánicas fracturadas, ésta última con la mayor presencia en el acuífero noreste.

Medio del suelo (S)

En este acuífero las zonas de mayor potencial a contaminación, debido al medio del suelo, se presentan en la cuenca baja del río Teocinte y lechos de ríos; dada la existencia de capas del suelo con texturas (arenoso, franco arenoso) que propician la percolación y con ello el movimiento de contaminantes. Por su parte, las áreas de menor potencial a contaminación están distribuidas en la zona media y alta de las cuencas de los ríos Los Ocotes y Teocinte, donde existen horizontes de suelo con textura (arcilla, franco arcilloso) que limitan la percolación y con ello restringen el movimiento de contaminantes (Aller *et al.*, 1987).

Topografía (T)

En la mayor parte de la superficie de las dos cuencas hidrográficas que corresponden al acuífero noreste, Los Ocotes y Teocinte, la pendiente está por arriba de 18%, lo que a su vez conlleva que bajo la influencia de este parámetro el potencial de contaminación del acuífero es bajo.

Impacto de zona vadosa (I)

Las áreas con mayor potencial a contaminación están sobre rocas volcánicas fracturadas, las zonas de potencial medio están sobre piro clastos de pómez y las rocas impermeables presentan el menor potencial.

Conductividad hidráulica (C)

La mayoría del acuífero presenta conductividad hidráulica con bajo potencial a contaminación (4.08 – 12.22 m/día).

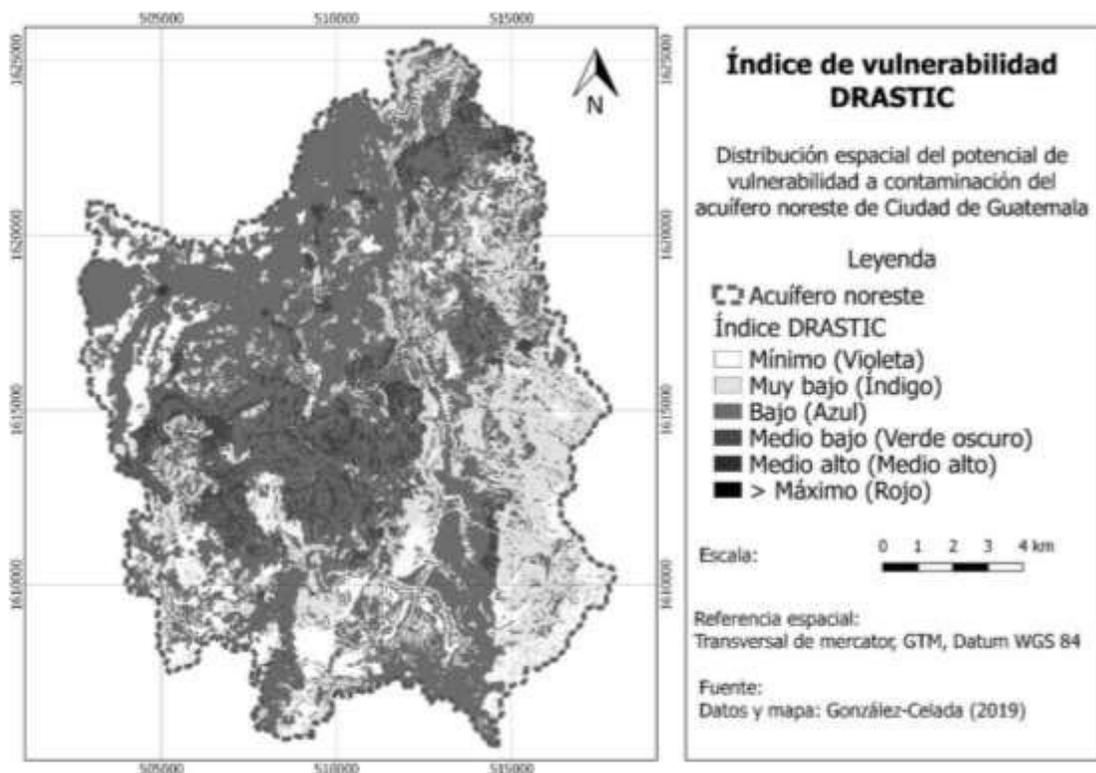
Vulnerabilidad espacial a contaminación

La vulnerabilidad a contaminación del acuífero presenta su mayor frecuencia en la clase de potencial de vulnerabilidad bajo (56.09%) con base al código de color nacional de los Estados Unidos (Aller *et al.*, 1987) y la clasificación propuesta por Musálem *et al.* (2015). Mientras que las clases muy bajo, mínimo y medio bajo con 22.77%, 13.50% y 7.62%, respectivamente. Las clases medio alto y máximo representan mucho menos del uno por ciento (Fig. 2). Para la escala de clasificación local de vulnerabilidad, la mayor frecuencia fue el potencial de vulnerabilidad medio (66%) (González-Celada, 2019)

Priorización por influencia antrópica

Con base a la influencia de actividades antrópicas propias de cada uso/cobertura de la tierra, se tiene que, las zonas de alta prioridad están localizadas en una franja dispersa entre el suroeste y noreste, con correspondencia geográfica con la agricultura anual; mismo patrón se presenta para los tres criterios de clasificación de influencia del uso/cobertura utilizados. No obstante, estas zonas de alta prioridad no representan la misma superficie. Similarmente las zonas de prioridad media la representan, además de la agricultura anual, guamil, pastos y uso urbano. La superficie de baja prioridad corresponde con zonas de cobertura boscosa; la figura 3, presenta la propuesta local de priorización por influencia antrópica.

Figura 2. Distribución espacial del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala



Análisis de sensibilidad

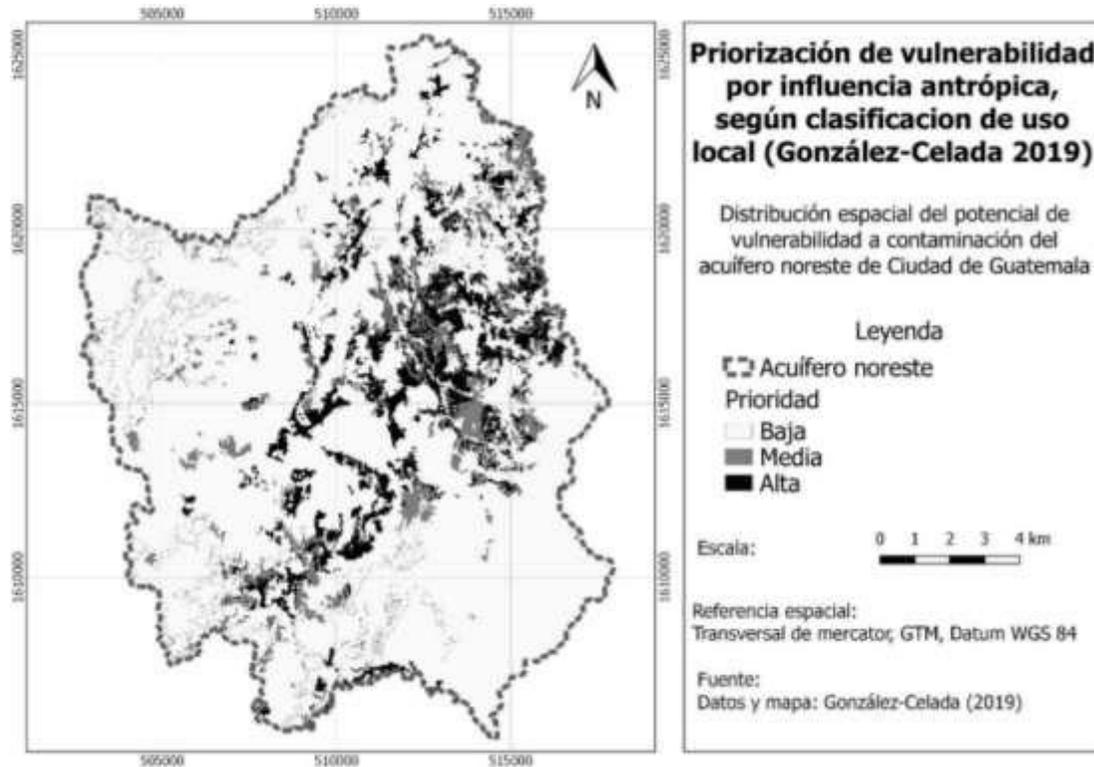
En el área de estudio, los parámetros de mayor impacto o influencia en el potencial de vulnerabilidad intrínseca del método DRASTIC, son el impacto de la zona vadosa (I), medio del acuífero (A), y recarga neta (R), con pesos efectivos de $30.8\% \pm 7.2$, $27.1\% \pm 4.4$, y $23.0\% \pm 11.2$, respectivamente. Contrariamente, el resto de los parámetros expresan un impacto bajo ($< 6.0\%$) (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de sensibilidad de un solo parámetro para los factores del índice DRASTIC.

Factor	Peso teórico	Peso teórico (%)	Peso efectivo (%)	
			Media	Desviación estándar
D	5	21.7	5.1	1.2

Factor	Peso teórico	Peso teórico (%)	Peso efectivo (%)	
			Media	Desviación estándar
R	4	17.4	23.0	11.2
A	3	13.0	27.1	4.4
S	2	8.7	5.5	2.8
T	1	4.3	2.6	2.8
I	5	21.7	30.8	7.2
C	3	13.0	6.0	1.1

Figura 3. Priorización de la vulnerabilidad a contaminación según propuesta local de uso/cobertura de la tierra.



Análisis de resultados

Profundidad del agua (D)

De igual manera a este estudio, el IARNA y TCN (2012), reporta profundidades hasta el orden de los 100 m. Esto ya se presentaba desde los años setenta del siglo pasado (IGN, 1973). En el presente, esto se ha agravado por el descenso continuo de los niveles de agua de los acuíferos metropolitanos; donde existen tasas de abatimiento que van desde los 4.44 m/año (Coló López, 2014) hasta los 9 m/año (Morales Samayoa, 2013), en el acuífero noreste y norte, respectivamente. En el sur de la ciudad, en los últimos cuarenta años, el nivel ha descendido en promedio entre 40 m y 400 m (FUNCAGUA, 2019). Tal situación es preocupante ya que es posible que este recurso se esté usando insostenible e ineficientemente (Ballester et al., 2007).

Recarga neta (R)

En comparación con la recarga hídrica estimada en este estudio, el IARNA y TCN (2012) estimó la recarga en 136 mm/año en el mismo acuífero. En tanto, la recarga para la cuenca Los Ocotes equivale a 66 mm/año (Herrera Ibáñez, 2012). La calibración del caudal mensual fue no satisfactorio dado el valor de los estadísticos de eficiencia previamente indicados, de acuerdo a Moriasi *et al.* (2007). Esta falta de ajuste es explicada por múltiples situaciones, como lo es la limitación de datos, espacial y temporalmente detallados (Zhang, Srinivasan, y Van Liew, 2008), e incertidumbre en la medición de caudales; que en conjunto llevan a errores en registro y simulación (Refsgaard, 1996). También, la falta de un registro detallado de extracciones superficiales y subterráneas para diferentes usos, que SWAT puede tomar en cuenta en su modelo conceptual (Neitsch, Arnold, Kiniry, Williams, y King, 2005). Los caudales calibrados presentaron asociación lineal muy pobre con la precipitación pluvial ($r = 0.015$), lo opuesto se presenta con los caudales sin calibración ($r = 0.92$). Por tanto,

para la estimación de la recarga hídrica no se parametrizó el modelo con los factores de ajuste que arrojó la calibración en mención.

Medio del acuífero (A)

El origen volcánico de este acuífero le confiere fracturamiento rocoso (Herrera Ibáñez et al., 2016) que da lugar altos valores de clasificación DRASTIC, ya que en muchos casos este tipo de acuíferos es altamente vulnerable a contaminación (Ballesteros et al., 2007).

Medio del suelo (S)

Es evidente como la proporción de partículas de textura del suelo específicamente la arcilla y su granulometría, determinan el potencial de contaminación de un suelo (Aller et al., 1987). Este parámetro es clave, ya que la mayoría de los procesos que dan lugar a la atenuación y eliminación de contaminantes ocurren en esta zona de mayor actividad biológica (Foster y Hirata, 1991; Golwer, 1983).

Topografía (T)

Dada la pendiente del terreno en el acuífero, no se ofrecen las condiciones ideales para que el contaminante permanezca en la superficie y se infiltre con el movimiento del agua (Aller et al., 1987). La pendiente de este territorio se debe a su relieve típico con presencia de filas y vigas, lomas y terrazas (MAGADIGEGR, 2017)

Impacto de zona vadosa (I)

Dado el flujo lento y su condición química, medio aeróbico y alcalino, esta zona es la más importante en cuanto a la atenuación de contaminantes por arriba del nivel de agua subterránea (Aller et al., 1987; Foster y Hirata, 1991). Esta posee un alto potencial de eliminación, inactivación e interceptación de bacterias y virus (Foster y Hirata, 1991; Matthess, Pekdeger, y Schroeter, 1988), así como de atenuación de metales pesados y biodegradación de hidrocarburos (Foster y Hirata, 1991). Ante estas consideraciones, en el acuífero noreste de ciudad Guatemala, existe mayor potencial a contaminación en áreas con rocas fracturadas del terciario, en contraste con las rocas intrusivas impermeables.

Conductividad hidráulica (C)

La habilidad de transmitir agua del acuífero esta entre baja y media (Aller et al., 1987; Herrera Ibáñez et al., 2016); pese a la inherencia geológica del acuífero con la presencia de un medio de rocas fracturadas. No obstante, este sistema de fracturamiento es poco abierto (Herrera Ibáñez et al., 2016). Asimismo, existen altas transmisividades que resultan en baja permeabilidad dado el espesor saturado.

Vulnerabilidad espacial a contaminación

Similarmente a la vulnerabilidad estimada, Ramírez Mejía (2003) presenta que la vulnerabilidad moderada es la más frecuente en los sectores del acuífero noreste evaluados con el índice DRASTIC. Por su parte, Herrera Ibáñez (2015), estimó en vulnerabilidad baja la mayor extensión de este acuífero que tiene correspondencia con la cuenca del río Los Ocotes; el autor utilizó el método de sobre posición GOD.

Priorización por influencia antrópica

Con la priorización realizada se comprende mejor los hallazgos de la vulnerabilidad de DRASTIC (Ribeiro, 2005). Puesto que este índice expresa la vulnerabilidad intrínseca (Focazio, Reilly, Rupert, y Helsel, 2002), y estas características intrínsecas son estáticas y fuera del control antrópico (Lobo Ferreira y Oliveira, 2004).

Análisis de sensibilidad

En el caso del parámetro profundidad del agua, históricamente en este acuífero la profundidad del agua ha sido superior a 30.5 m, y este es el umbral que Aller et al. (1987), fija como el mínimo valor de clasificación para este parámetro. Por tanto, localmente este parámetro no expresa variación espacial, esto se evidencia en que su peso efectivo es mucho menor al valor teórico. Similar situación ocurre con los parámetros topografía, medio del suelo, y conductividad hidráulica. Por su parte el impacto de zona vadosa, tiene mayor influencia, puesto que la vulnerabilidad en esta zona está dominada por múltiples factores relacionados con los estratos litológicos (Li et al., 2017); es así como las rocas fracturadas del acuífero incrementan su impacto en el potencial de vulnerabilidad. Mientras que la recarga neta incrementa su impacto, dada la alta tasa de recarga hídrica (Gheisari, 2017). Dadas las condiciones que anteceden, incrementar los sitios de monitoreo, considerando los hallazgos de la presente

investigación, incrementará los elementos de análisis del territorio y con ello, mejorar esta herramienta de planificación ambiental útil para tomadores de decisión (Gogu y Dassargues, 2000).

Conclusiones

En el acuífero noreste predomina la clase de vulnerabilidad baja (56%), y según propuesta de clasificación local, la vulnerabilidad media (66%).

El promedio anual multianual de la recarga neta simulada por modelación hidrológica con la herramienta SWAT, es igual a 186 mm/año. La calibración no satisfactoria de caudales refleja la falta de detalle en los datos, temporal y espacialmente, además de incertidumbre en su medición, y la ausencia de registro de extracción de fuentes de agua para diferentes usos.

En cuanto a la priorización de vulnerabilidad por influencia antrópica, bajo el enfoque de tres criterios, en su mayoría el acuífero es de baja prioridad (80.6%). Evidenciándose que las zonas de alta y media prioridad (19.4%) están ubicadas en zonas de agricultura anual, matorrales, pastizales y uso urbano; mientras que las de baja prioridad en áreas de bosque.

Los parámetros de mayor impacto o influencia en el mapa o capa de vulnerabilidad intrínseca son el impacto de la zona vadosa (I), medio del acuífero (A), y recarga hídrica (R); con pesos efectivos promedio de 30.8%, 27.1% y 23.0%, respectivamente. Pesos que a su vez son mayores que los pesos teóricos establecidos por el método DRASTIC.

Referencias

- Agencia de Cooperación Internacional del Japón. (1995). Estudio sobre el desarrollo de las aguas subterráneas en el altiplano central de la República de Guatemala. Tokio: Autor.
- Al-Zabet, T. (2002). Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental geology*, 43(1-2), 203-208.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R., y Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. Oklahoma, USA: Environmental Protection Agency.
- Ballester, M., Reyes, V., y Astorga, Y. (2007). Groundwater in Central America: its importance, development and use, with particular reference to its role in irrigated agriculture. Giordano, M. & Villholth, KG, The agricultural groundwater revolution. Opportunities and threads to development. International water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka. (pp. 100-128).
- Brindha, K., y Elango, L. (2015). Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. *Journal of Hydrology*, 524, 597-613.
- Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. (1995). Estudio Hidrogeológico en el valle de la Ciudad de Guatemala, Proyecto Emergencia I. Guatemala: Autor.
- Coló López, G. R. (2014). Estudio de los niveles freáticos del área norte y este de la ciudad capital. (Tesis), Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Focazio, M. J., Reilly, T. E., Rupert, M. G., y Helsel, D. R. (2002). Assessing ground-water vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for decision makers. United States: US Geological Survey Circular 1224.
- Foster, S. S., y Hirata, R. C. A. (1991). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas; una metodología basada en datos existentes (2 ed.). Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud.
- Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala. (2019). Análisis piezométrico de pozos de agua para los municipios de la Mancomunidad Gran Ciudad del Sur: Amatitlán, Mixco, San Miguel Petapa, Santa Catarina Pinula, Villa canales y Villa Nueva, Guatemala. Guatemala: Autor.
- Gheisari, N. (2017). Groundwater vulnerability assessment using a GIS-based modified DRASTIC model in agricultural areas. (Tesis), Université d'Ottawa/University of Ottawa.
- Giordano, M. (2009). Global groundwater? Issues and solutions. *Annual review of Environment and Resources*, 34, 153-178.
- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., y Cardenas, M. B. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 9(2), 161.
- Gogu, R., y Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability

- assessment using overlay and index methods. *Environmental geology*, 39(6), 549-559.
- Golwer, A. (1983). Underground purification capacity. En *International Association of Hydrological Sciences (Ed.), Groundwater in Water Resources Planning, Proceedings of the Koblenz Symposium*. (pp. 1063-1072).
- González-Celada, E. G. (2019). Distribución espacial del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, como herramienta de fortalecimiento de la gestión hídrica metropolitana. (Tesis), Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos (ERIS), Guatemala.
- Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra (Cartografía). (2014). Mapa de bosques y uso de la tierra 2012.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., y Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1), 80-91.
- Herrera Ibáñez, I. R. (2012). Estudio hidrogeológico de la sub-cuenca 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 (Proyecto FODECYT No. 2009-035). Recuperado de <http://glifos.concyt.gob.gt/library/index.php?title=4117&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@encabezamiento=MATEMATIC%A%20PURA%20@mode=&recnum=495>
- Herrera Ibáñez, I. R. (2015). Vulnerabilidad del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala. *Tikalía*, 33(2), 39-55.
- Herrera Ibáñez, I. R., Manzo Barrientos, D., y Hernández, E. J. (2016). Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala (Proyecto DIGI con partida presupuestaria 4.8.63.2.69). Recuperado de <http://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/NF-2016-05.pdf>
- Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, y The Nature Conservancy. (2012). Elementos de análisis para caracterizar el estado y estimar el consumo de las aguas subterráneas en el área metropolitana de Guatemala. Guatemala: Autor.
- Instituto Geográfico Nacional. (1973). Reconocimiento hidrogeológico del valle de Guatemala. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones y Obras públicas e Instituto Geográfico Nacional.
- Instituto Nacional de Bosques, y Consejo Nacional de Áreas Protegidas (Cartografía). (2015). Mapa Forestal por Tipo y Subtipo de Bosque, 2012
- Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología. (2018). Estación INSIVUMEH central: serie histórica (1970 a 2017) de variables climáticas [Base de datos en formato Microsoft Excel].
- Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología. (1978). Informe final del estudio de aguas subterráneas en el valle de la Ciudad de Guatemala. Guatemala: Autor.
- Iqbal, J., Gorai, A., Tirkey, P., y Pathak, G. (2012). Approaches to groundwater vulnerability to pollution: a literature review. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 9(1), 105-115.
- Japan International Cooperation Agency. (1986). Feasibility study on the ground water development project (for emergency 1) volume 2: Appendix 1. Guatemala: Autor.
- Laino, R. M., Jiménez, F., Páez, G., Casanoves, F., y Velásquez, S. (2006). Manejo del recurso hídrico y vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Guaraní en la cuenca del arroyo Capiibary, Paraguay. *Recursos Naturales y Ambiente*(48), 65-74.
- Li, J., Xi, B., Cai, W., Yang, Y., Jia, Y., Li, X., . . . Yang, J. (2017). Identification of dominating factors affecting vadose zone vulnerability by a simulation method. *Scientific reports*, 7, 45955.
- Lobo Ferreira, J., y Oliveira, M. M. (2004). Groundwater vulnerability assessment in Portugal. *Geofísica internacional*, 43(4), 541-550.
- Manzo Barrientos, D. (2008). Reconocimiento hidrogeológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula, Guatemala. (Tesis), Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala Guatemala.
- Matthess, G., Pekdeger, A., y Schroeter, J. (1988). Persistence and transport of bacteria and viruses in groundwater—a conceptual evaluation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2(2), 171-188.

- Megdal, S. B. (2018). Invisible water: the importance of good groundwater governance and management. *npj Clean Water*, 1(1), 15.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (Cartografía). (2010). Modelo de Elevación Digital escala 1:50,000
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo. (2017). Estudio semidetallado de suelos del Departamento de Guatemala, Guatemala. (Vol. I y II). Guatemala: Autor.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección General de Servicios Agrícolas; Dirección Técnica de Riego y Avenamiento. (1991). Plan maestro de riego y drenaje: Hidrogeología, disponibilidad de agua subterránea (Documento No. 2). Guatemala: Autor.
- Morales Samayoa, J. I. (2013). Descenso del nivel freático en la parte norte del acuífero Metropolitano en el valle de Guatemala. 8(1), 49-54.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Municipalidad de Palencia. (2018). Inventario de pozos mecánicos del cantón Rincón de la Piedra, Palencia [formato microsoft Excel].
- Musálem, K., McDonald, M. M., Jiménez, F., y Laino, R. (2015). Groundwater Vulnerability Mapping in Two Watersheds Affected by Yacyreta Dam in Paraguay. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(6), 49-61.
- Napolitano, P., y Fabbri, A. (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 235, 559-566.
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I— A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., y King, K. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Texas, USA: Autor.
- Ramírez Mejía, L. L. (2003). Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad capital de Guatemala. (Tesis), Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Refsgaard, J. (1996). Terminology, modelling protocol and classification of hydrological model codes. En A. MB & R. JC (Eds.), *Distributed hydrological modelling*. (pp. 17-39).
- Ribeiro, L. (2005). Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos à contaminação: Formulação e Aplicações in *Actas do 7º SILUSBA, APRH*. Évora, Portugal.
- Rupert, M. G. (1999). Improvements to the DRASTIC ground-water vulnerability mapping method. Idaho, USA: US Geological Survey.
- Zhang, X.-s., Srinivasan, R., y Van Liew, M. (2008). Multi-site calibration of the SWAT model for hydrologic modeling. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2039-2049.

Información del autor

Edio Giovanni González-Celada. M.Sc. Recursos Hidráulicos opción Hidrología; ERIS, Guatemala. M.Sc. Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas; CATIE, Costa Rica. Cuenta con experiencia en modelación hidrológica a escala de cuenca hidrográfica para simular balance hidrológico y erosión hídrica en cuencas de Guatemala, México, Perú y Costa Rica. Graduado de Ingeniería Agronómica en la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). Actualmente labora como profesor en esta facultad.