






Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Victoria – Güémez mediante el método DRASTIC

Luis Gerardo Vázquez-Guevara¹, René Ventura-Houle^{1*}, Glenda Nelly Requena-Lara¹, Elizabeth Andrade-Limas¹, Barbara Azucena Macías Hernández¹

Resumen

Los estudios sobre la situación del agua en los acuíferos son limitados y para el estado de Tamaulipas son escasos. Por esa razón, el objetivo de este trabajo fue evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero Victoria-Güémez, utilizando el método DRASTIC, además de emplear el modelador *WaterYield* de InVEST 3.7, que considera datos biofísicos del suelo y plantas, para estimar con mayor precisión el factor de recarga. Los resultados obtenidos permitieron identificar que la vulnerabilidad más alta del acuífero se presenta en y alrededor de las manchas urbanas de mayor superficie, mientras que la más baja se da en las zonas con alta profundidad del nivel freático y baja permeabilidad en la zona vadosa. Este estudio es el primer paso para generar una herramienta de gestión del agua subterránea en la que se establezcan las líneas de acción para administrar el agua del acuífero que se encuentra con déficit.

Palabras Clave: DRASTIC, agua subterránea, InVEST 3.7, acuífero Victoria-Güémez, Tamaulipas

Abstract

Studies about water in aquifers are limited, and scarce in the state of Tamaulipas. For this reason, the objective of this work was to evaluate the intrinsic vulnerability of the Victoria-Güémez aquifer using the DRASTIC method and the *WaterYield* modeler of InVEST 3.7, which considers biophysical data of the soil and plants, to estimate with greater precision the factor of recharge. The results obtained made it possible to identify that the highest vulnerability of the aquifer occurs in and around the urban areas with the largest surface area, while the lowest occurs in areas with a high depth of the water table and low permeability in the vadose zone. This study is the first step to generate a groundwater management tool in which the lines of action are established to manage the water of the aquifer that is in deficit.

Keywords: DRASTIC, groundwater, InVEST 3.7, Victoria-Güémez aquifer, Tamaulipas

Introducción

La definición de si un acuífero se considera sobreexplotado o deja de serlo está en función de la relación existente entre la extracción y la recarga, es decir, la cantidad del recurso utilizado y el tiempo que toma en recuperar su nivel (CONAGUA, 2018). Según lo documentado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a partir del 2001, la cantidad de acuíferos sobreexplotados en México osciló anualmente entre 100 y 106. Entre el año 2015 y 2018 la cifra aumentó de 105 a 144, por lo que en tres años hubo un aumento del 37%. Esto debido a que 70 millones de habitantes viven en las regiones hidrológico-administrativas en las que se genera un 60% del PIB de México, lo que coincide con la concentración demográfica, que provoca escasez de recursos y su sobreexplotación (Caballero, 2020). El crecimiento urbano implica el aumento de zonas más impermeables, por lo que

se reduce la infiltración del agua, se elimina la vegetación, hay cambios en la topografía del terreno y el uso del suelo (Ríos-Sánchez *et al.*, 2020).

La única información publicada sobre acuíferos en Tamaulipas se refiere a la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos que realiza la CONAGUA en el Diario Oficial de la Federación (DOF). Esto se realiza conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 “conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Dicha información consiste en una lista de los 653 acuíferos de México, con su condición de déficit o disponibilidad, donde 205 se encuentran catalogados como “sin disponibilidad”, déficit (CONAGUA, 2017).

Received: July 4, 2021; Accepted: December 13, 2022; Published on-line: April 1, 2023.

Editorial responsibility: María Aurora Armienta

* Corresponding author: René Ventura-Houle, rventura@docentes.uat.edu.mx y reneventura.houle@gmail.com

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario, CP. 87120, Cd. Victoria, Tamaulipas.

Vázquez-Guevara, L, Ventura-Houle, R, Requena-Lara, G, Andrade-Limas, E, Macías-Hernández, B

<https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2023.62.2.1589>

Tamaulipas cuenta con catorce acuíferos, tres de ellos con déficit: Hidalgo – Villagrán, Márgenes del Río Purificación y Victoria – Güémez (CONAGUA, 2018b). Para el acuífero Victoria – Güémez, el último estudio de disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA), expone que presenta un déficit de 28.768,000 m³ anuales; por tal motivo, no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones para los usuarios (CONAGUA, 2020).

Otra información importante para una adecuada gestión de acuíferos, como los relativos a la vulnerabilidad y disponibilidad de agua subterránea relacionados son limitados, de acuerdo con Mendieta-Mendoza *et al.* (2021). Para el caso de México, dichos estudios son escasos y en Tamaulipas se carece de datos sobre la evaluación de la situación o la vulnerabilidad del agua subterránea en los acuíferos.

La vulnerabilidad del agua subterránea se refiere a las propiedades intrínsecas del suelo, subsuelo y del acuífero que sirven de protección natural de las aguas subterráneas (Aguilar *et al.*, 2013). Esta variable determina la sensibilidad de un acuífero ante efectos de los contaminantes y es relativa, no medible y adimensional; se le considera intrínseca cuando la evaluación se realiza incluyendo los factores hidrogeológicos del acuífero y específica si contempla factores externos como el clima o las características del contaminante (Foster, 1987).

La generación de mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas funciona como herramienta esencial en la protección y gestión de estas (Thapa *et al.*, 2018). Actualmente éstos se pueden producir utilizando los sistemas de información geográfica (SIG), ya que existen diversos métodos que evalúan la vulnerabilidad del agua subterránea (González *et al.*, 2018). Uno de estos métodos más frecuentemente utilizados para su evaluación es DRASTIC, (Fijani *et al.*, 2013), que mediante su uso, se realiza una clasificación y ponderación de los factores geológicos e hidrogeológicos de los acuíferos, los cuales afectan el movimiento de contaminantes a través del suelo hasta entrar en contacto con el agua subterránea. Estos factores dan origen al nombre del método de Aller *et al.* (1987) y son, por sus siglas en inglés:

D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga), A (litología del acuífero), S (naturaleza del suelo), T (pendiente del terreno), I (naturaleza de la zona no saturada) y C (permeabilidad).

Mediante el desarrollo de los SIG se han propuesto modelos espaciales que simulan procesos hidrológicos. El modelador de valoración integrada de los servicios y las compensaciones de los ecosistemas (InVEST, por sus siglas en inglés), es ampliamente utilizado y resulta adecuado especialmente para establecer diversos servicios ambientales (ecosistémicos) como rendimiento de agua, retención de

nutrientes, retención de sedimentos en lugares donde no existen cantidades de datos suficientes (Yang *et al.*, 2020). De acuerdo con Mendoza *et al.*, (2011) el modelo *Water Yield del InVEST*, se utiliza como factor rector principal para modelar servicios ambientales como el rendimiento hídrico o aporte de agua, así como la carga y retención de contaminantes y sedimentos.

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo fue evaluar la vulnerabilidad del acuífero Victoria-Güémez, mediante el método DRASTIC a través de un Sistema de Información Geográfica.

Área de estudio

El acuífero Victoria – Güémez pertenece a la Cuenca IX “Golfo Norte” y se sitúa en la parte centro-occidente del estado de Tamaulipas. Cubre una superficie de 2,080 km² y presenta su zona de influencia en los municipios de Victoria, Güémez, Padilla y una porción del municipio de Hidalgo, Tamaulipas (Figura 1). Las poblaciones más importantes por su número y actividad económica son Ciudad Victoria, Güémez y Santa Engracia, con una población de casi 365 mil habitantes en 2020 (INEGI, 2020), con 96% de ellos residiendo en la primera, que es la capital estatal; en ellas el rápido crecimiento de población, el aumento de servicios urbanos y la agricultura, han elevado la competencia por el uso del agua subterránea, generando un incremento en la extracción del recurso (CONAGUA, 2017).

Para este acuífero, el volumen de extracción de aguas subterráneas es de 107’968,000 m³ anuales, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua (al 20 de febrero del 2020). No se registró un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones, pues el déficit del acuífero Victoria - Güémez es de 28’768,000 m³ anuales, que se están extrayendo a costa del “almacenamiento “no renovable” del acuífero (CONAGUA, 2017).

El área de estudio se localiza en las inmediaciones del conjunto montañoso que constituye el cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental (SMO), conformado principalmente por rocas sedimentarias de origen marino, cuya edad va del Cretácico hasta el Mioceno. Dichas rocas son de composición calcárea, arcillosa y arcillo-arenosa dispuesta en estratos de potencia variable, cuya facie mas densa y resistente son las calizas (Rubio *et al.*, 2011), que dan lugar a una estructura kárstica altamente fracturada, rocas de color crema, gris claro, gris oscuro y gris verdoso que suelen estar intercaladas con lutitas (Carrillo-Bravo 1961; Eguiluz *et al.*, 2000). Depósitos sedimentarios mas recientes sobreyacen a las predominantes calizas, los cuales son conglomerados del plioceno, además de aluviones y suelos residuales del cuaternario (Camacho 1987).

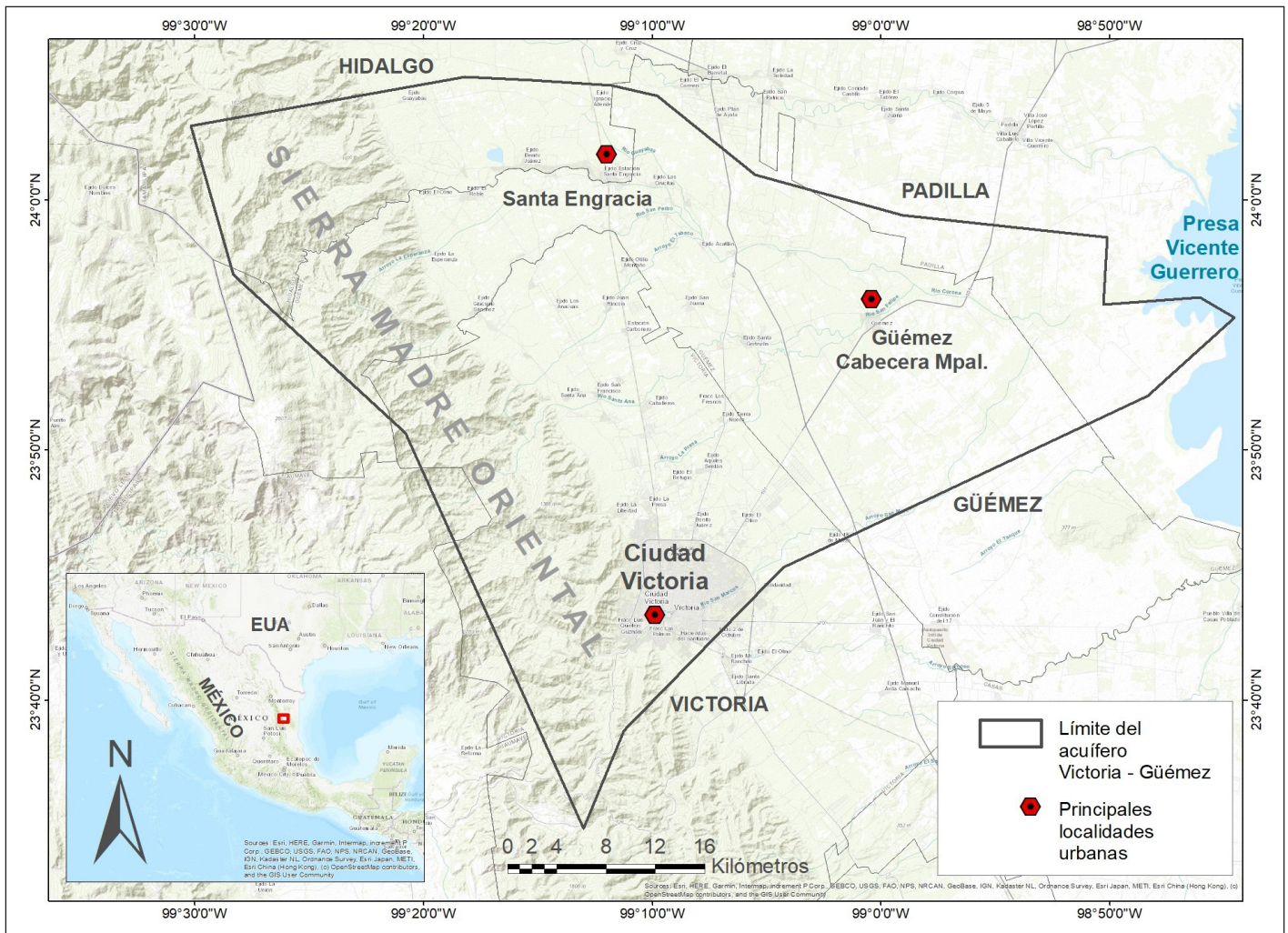


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

Dichas estructuras sobreyasen a un basamento que es un complejo metamórfico de edad precámbrica, rocas metamórficas que son las estructuras mas antiguas de la región, gneis azul-verdoso poco fracturados, aflorados en la zona denominada anticlinorio huizachal-peregrina. Un proceso volcánico da lugar a las formaciones rocosas mas recientes en la región, que son una serie de rocas ígneas intrusivas, hipabisales y extrusivas que irrumpen en los materiales sedimentarios ya sea de manera intrusiva o cubriéndolos en algunas zonas puntuales (Carrillo-Bravo 1961)

Las unidades hidrogeológicas que afloran en el área del acuífero corresponden a depósitos sedimentarios de diferentes edades, víctimas de diferentes procesos diagenéticos con los que se formaron las rocas localizadas actualmente en la zona (CONAGUA, 2017).

Metodología

El método DRASTIC combina factores geológicos e hidrogeológicos y selecciona siete indicadores representativos para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea con aspectos cualitativos y cuantitativos (Jia et al., 2019): profundidad

del agua, recarga neta, medios acuíferos, medios del suelo, topografía, impacto en los medios de la zona vadosa y conductividad hidráulica (Aller et al., 1987). Para cuantificar cada uno de los factores DRASTIC se aplicó un sistema de evaluación en el que se establecieron tres parámetros significativos: pesos, rangos y valores. La determinación de los índices de vulnerabilidad consistió en multiplicar cada uno de los parámetros (r), por el peso (w) asignado por el método y se suma el total. El peso para cada uno de los factores se establece de acuerdo con su importancia y aplicabilidad (Tabla 1).

Tabla 1. Pesos para cada variable del método DRASTIC.

	Tipo de variable						
	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw
Pesos	5	4	3	2	1	5	3

Dw= peso de profundidad, Rw= peso de recarga, Aw= peso de medios acuíferos, Sw= peso de medios del suelo, Tw= peso de topografía, Iw= peso de zona vadosa, Cw= peso de conductividad

Posteriormente se realizó una clasificación a cada factor con los nuevos valores y se aplicó la herramienta “álgebra de mapas” mediante el *software* ArcGIS 10.7.1, en donde se sumaron los parámetros ponderados, de acuerdo con la Ecuación 1, obteniendo como resultado final el índice de vulnerabilidad relativo (Figura 2).

Ecuación 1:

$$IndxV = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

Donde:

IndxV = Índice de vulnerabilidad

DrDw = profundidad del agua

RrRw = recarga neta

ArAw = medios acuíferos

SrSw = medios del suelo

TrTw = topografía

IrIw = impacto en los medios de la zona vadosa

CrCw = conductividad hidráulica

El resultado final es un índice relativo en forma numérica, el cual fue clasificado en la Tabla 2, con niveles para expresarlo en forma categórica, de acuerdo con Aller *et al.*, 1987, que se encuentran en la tabla siguiente.

A continuación, se describe cada factor y la forma en que se integró como modelo espacial en el SIG. En primera instancia, el territorio del acuífero se obtuvo del mapa digital de disponibilidad de agua por acuífero (CONAGUA, 2017), con el cual se procesaron el resto de las variables. La cartografía digital obtenida de CONABIO-INIFAB, del SGM, de INEGI y de CNA se encuentra a escala 1:250,000; mientras que la de CONABIO (1998) se obtuvo a 1:1'000,000. La información en formato ráster se procesó con un tamaño de celda de 100×100 metros.

1. Profundidad del agua (DrDw)

La profundidad del agua subterránea (Figura 6) se clasificó en siete rangos que van de 1 a 30 m de profundidad (Tabla 3). Los pesos asignados variaron de 1 a 10 (Aller *et al.*,

Tabla 2. Categorización de los valores numéricos del índice de vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

Índice de vulnerabilidad (IndxV)	Clasificación Vulnerabilidad
< 79	Muy baja
80 - 99	Baja
100 - 119	Baja - Moderada
120 - 139	Moderada
140 - 159	Moderada Alta
160 - 179	Alta
180 - 199	Muy Alta
200 >	Extremadamente Alta

Tabla 3. Valores DRASTIC para los rangos de profundidad al nivel freático.

Profundidad al nivel freático (m)	
Rango	Clasificación
0-1	10
1-3	9
4-9	7
9-15	5
15-22	3
22-30	2
>30	1

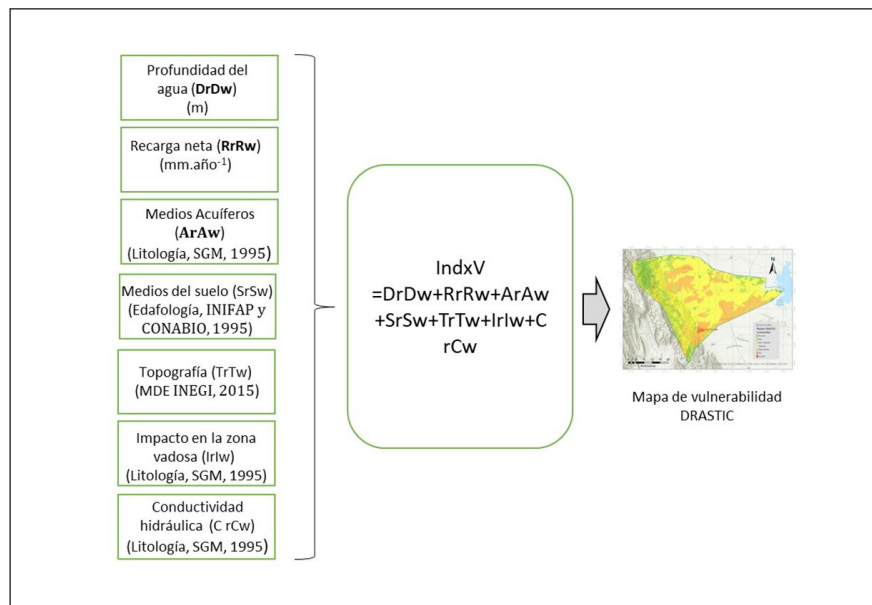


Figura 2. Esquema conceptual del desarrollo del modelo DRASTIC.

1987) indicando que, entre mayor sea el peso, mayor es la vulnerabilidad (Abunada *et al.*, 2021).

Los niveles de profundidad proporcionados por el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) fueron de los períodos de canícula 2018, invierno 2018 y canícula 2019. Por ello se tomó el promedio de los tres valores para cada uno de los pozos y se integraron en una base de datos para procesarla en el *software* ArcGIS 10.7.1.

2. Recarga neta (RrRw)

La recarga neta se mide en mm año⁻¹, y es definida por Abunada *et al.* (2021) como la cantidad de agua infiltrada desde la capa superior del suelo hasta el nivel freático. El método DRASTIC le asigna cinco valores a rangos de recarga, establecidos en la Tabla 4.

El factor de recarga es un indicador del movimiento de un contaminante hasta el agua subterránea mediante procesos de lixiviación. Actualmente, la generación de nuevos valores en el factor de recarga es una mejora en la evaluación de la vulnerabilidad, debido a que están sujetos a variaciones por los cambios de estación que dependen de las condiciones climáticas, así como la hidrología superficial, lo que dificulta la medición de la recarga de manera efectiva (Abunada *et al.*, 2021).

Tabla 4. Valores de clasificación para los rangos de la recarga neta otorgados por el método DRASTIC.

Recarga Neta (mm)	
Rango	Clasificación
0-50	1
50-100	3
100-180	6
180-255	8
>255	9

Se utilizó el *software* InVEST 3.8.9 del proyecto *The Natural Capital* para estimar los valores del factor de recarga, a través del modelador WaterYield. Este modelador parte de la hipótesis de Milly (Mendoza *et al.*, 2011), donde una estimación aproximada de la provisión de agua en un terreno puede obtenerse a partir de la interacción local entre las fluctuaciones de la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP), con las propiedades de almacenamiento del suelo. Esta diferencia es calculada como la provisión o aporte de agua (*Water Yield*) en cada píxel del área de estudio, indexándolo como $x = 1, 2, 3 \dots X$, para cada uso de suelo y cobertura vegetal (LULC), a través de la Ecuación 2: Ecuación 2:

$$Y_{xj} = \sum 1 - \frac{AET_{xj}}{P_{xj}} \cdot P_{xj} \cdot A_{xj}$$

Donde:

Y_{xj} = Aporte de agua del píxel x en el LULC j

AET_{xj} = ETP real anualizada del píxel x que tiene un LULC j .

P_{xj} = precipitación anual en el píxel x , con un LULC j .

A_{xj} = área del píxel x en el LULC j .

La porción del balance hídrico respectiva a la ETP dada por AET_{xj}/P_{xj} es parte de la curva de Budyko, de la Ecuación 3 (Mendoza *et al.*, 2011):

Ecuación 3:

$$\frac{AET_{xj}}{P_{xj}} = \frac{1 + \omega_{xj} R_{xj}}{1 + \omega_{xj} R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}}$$

Donde:

R_{xj} = proporción de ETP potencial respecto a la precipitación, o índice de aridez de Budyko (Mendoza *et al.*, 2011) en el píxel x del LULC j .

ω_{xj} = Proporción del Agua Almacenada Accesible para las Plantas (PAWC) respecto a la precipitación anual esperada.

P_{xj} = precipitación anual en el píxel x , con un LULC j .

La fracción del contenido de agua en el suelo disponible para las plantas (PAWC, por sus siglas en inglés) (Ecuación 4) caracteriza el balance de agua en las comunidades vegetales, dentro de unas condiciones prevalecientes de clima y de suelo (Mendoza *et al.*, 2011):

Ecuación 4:

$$\omega_{xj} = Z \frac{AWC_x}{P_{xj}}$$

Donde:

AWC_x = volumen (en mm) del agua contenida en el suelo que está disponible para las plantas.

Z = parámetro usado como constante de calibración, que se aplica a cada subcuenca.

P_{xj} = precipitación anual en el píxel x , con un LULC j .

Se generó el mapa de precipitación promedio anual (Figura 3), a partir de 124 estaciones climatológicas de ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica, de CONABIO-IMTA, 2001) que cubren los alrededores de la cuenca, en los estados de Tamaulipas y Nuevo León. A dichas estaciones se les asignaron los valores de las Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, que contempla un análisis de 1970 a 2000.

Por otra parte, la evapotranspiración promedio anual (Figura 4), se descargó en formato *grid* para ESRI, del CGIAR-CSI (*Consortium for Spatial Information*), de ETP promedio anual 1950-2000, producido por Trabucco & Zomer (2009). La profundidad del suelo se generó al asignar el atributo de profundidad, de acuerdo con las características de los perfiles de suelo, realizados en campo por la UAT

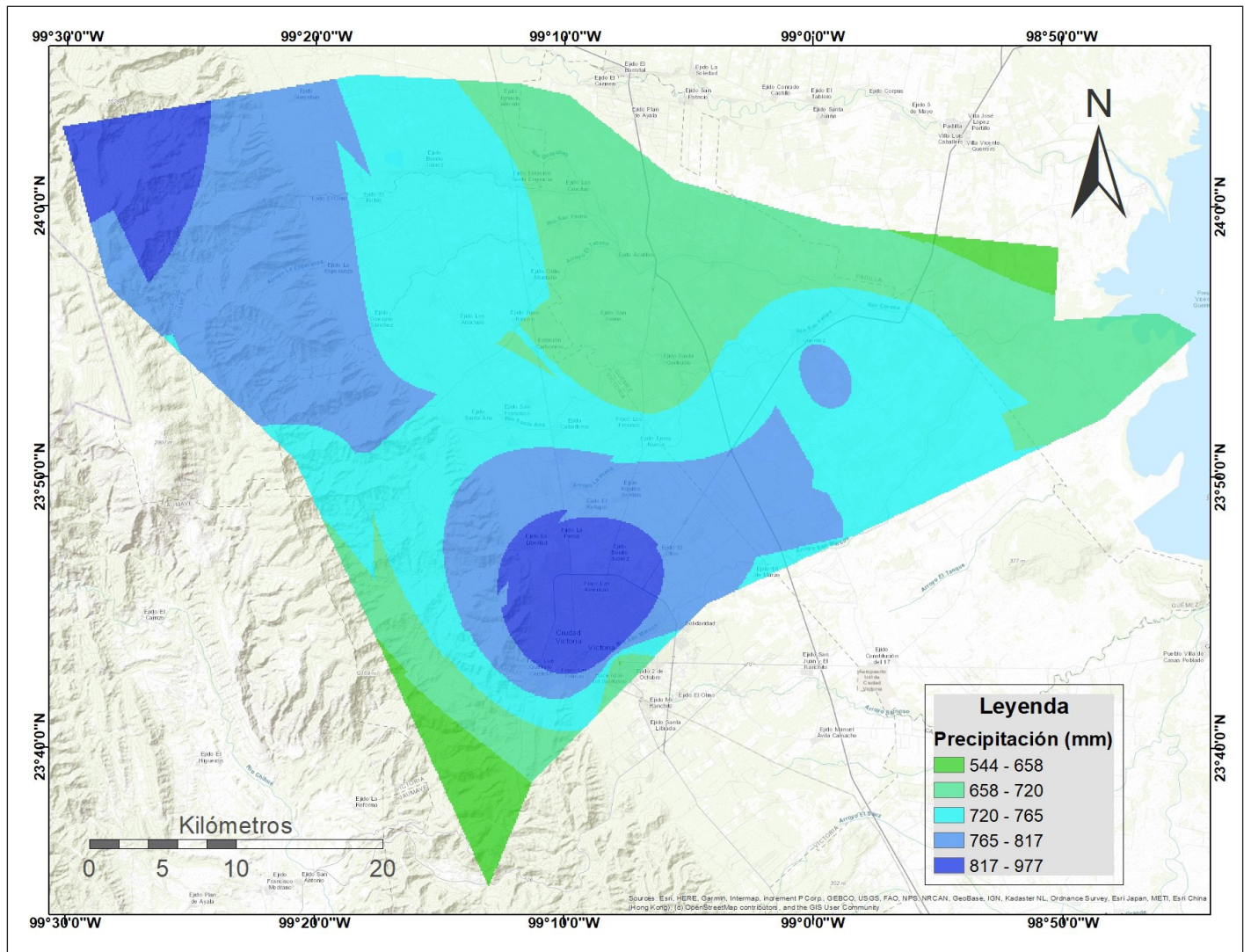


Figura 3. Precipitación promedio anual.

(2001) a la cartografía digital de edafología del INIFAP y CONABIO (1995), clasificado por tipo de suelo. La fracción del contenido de agua en el suelo disponible para las plantas (PAWC, por sus siglas en inglés) se obtuvo, como sugiere el manual de InVEST (Sharp *et al.*, 2020) mediante el uso del *software* SPAW 6.02.75 (Saxton, 2005), para análisis del agua del suelo. Se ingresaron los datos de los perfiles de la UAT (2001) respectivos a los contenidos de arcilla, arena, materia orgánica, salinidad, grava y compactación del perfil representativo de cada tipo de suelo. En algunos casos no se reportaban los contenidos de arena y arcilla como porcentaje en los perfiles, por lo que se ingresaron los que devolvió el programa al ubicar el punto medio en la casilla del triángulo de textura.

Con esos datos, se obtuvo el contenido de agua en el suelo disponible para las plantas (PAWC, por sus siglas en inglés). La fracción se obtiene dividiendo la cantidad de

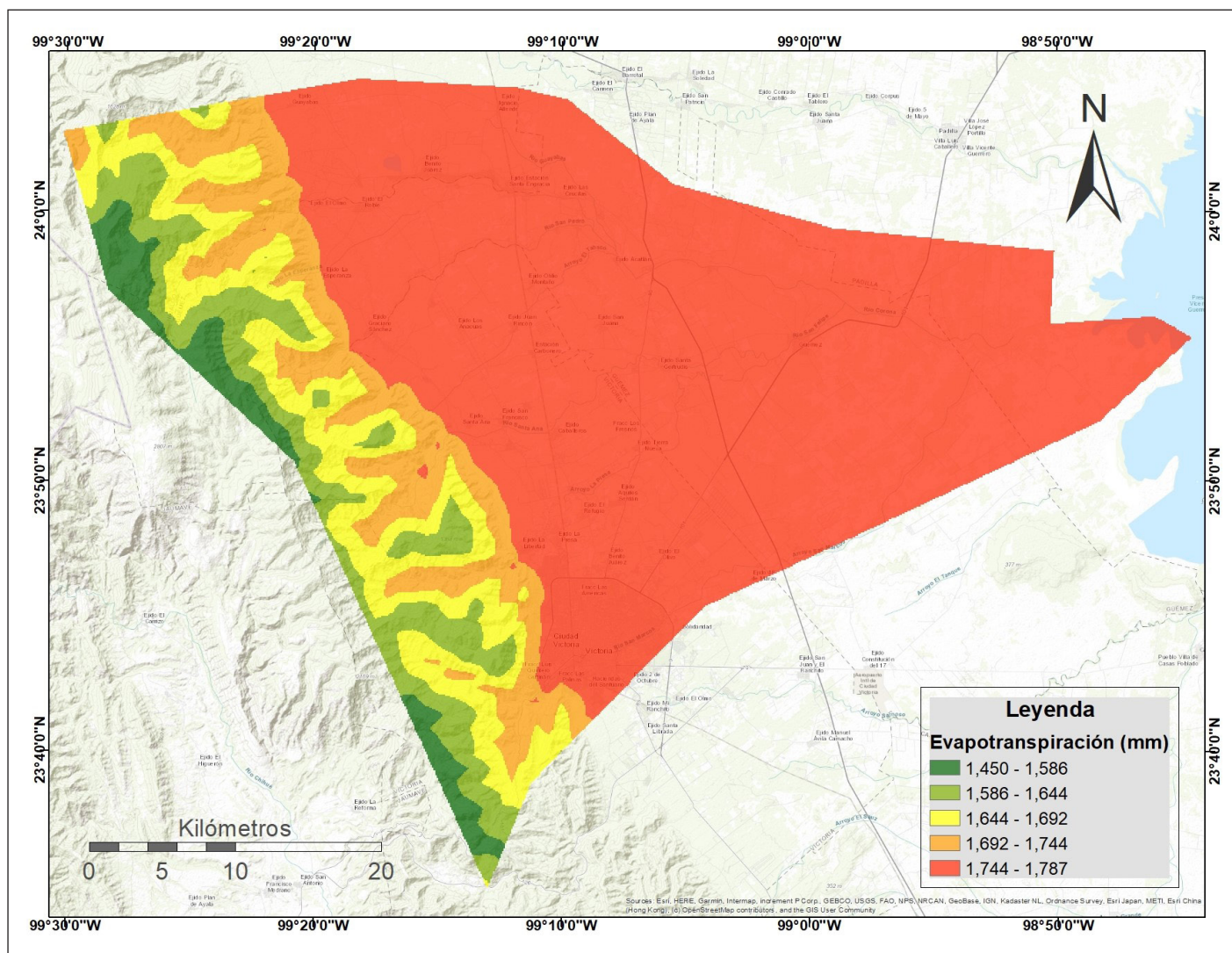


Figura 4. Evapotranspiración promedio anual con datos de Trabucco & Zomer (2009).

Tabla 5. Datos de profundidad del suelo (en mm, excepto PAWC, es adimensional)

Tipo de suelo	PRF	AW	PAWC	PRFS	PRFR
Cambisol-Cálcico	300	9.3	0.01516	1140	3420
Chernozem-Cálcico	850	8.6	0.00946	1250	3750
Litosol	300	19	0.06333	300	300
Luvisol-Vértico	800	0.2	0.01012	800	800
Regosol-Calcárico	1150	10.8	0.00939	1150	1150
Regosol-Eútrico	800	16.4	0.01632	3650	3650
Rendzina	1040	8.1	0.00779	1040	1040
Vertisol-Pélico	475	9.7	0.0218	1605	1605
Xerosol-Lúvico	360	10	0.4101	360	360

PRF= profundidad, AW= disponibilidad de agua en el perfil, PAWC= fracción del contenido de agua en el suelo disponible para las plantas, PRFS= profundidad total del suelo, PRFR= profundidad de raíces.

Tabla 6. Tabla biofísica de profundidad de raíces y coeficiente de ETP para cada tipo de vegetación y uso de suelo.

Tipo de uso de suelo y cobertura vegetal	Profundidad de las raíces (mm)	Coefficiente de evapotranspiración (ETK)
ARRE	210	500
ATCPS	7000	750
ATCA	210	500
AH	0	1
BE	7000	1000
BEVSAH	7000	1000
BPE	7000	1000
BPEVS	7000	1000
BMM	7000	1000
BMVS	7000	1000
CA	0	1000
MET	3700	750
MS	5100	1000
MSVS	5100	1000
MIH	7000	750
MIHVS	5100	750
PC	260	750
PI	260	250
SBCS	3700	1000
SBE	3700	750
SBEVS	15000	1000

ARRE= agricultura de riego (incluye riego eventual), ATCPS= agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes, ATCA= agricultura de temporal con cultivos anuales, AH= asentamiento humano, BE= bosque de encino, BEVSAH= bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, BPE= bosque de pino-encino, BPEVS= bosque de pino-encino con vegetación secundaria, BMM= bosque mesófilo de montaña, BMVS= bosque mesófilo de montaña con vegetación arbustiva y herbácea, CA= cuerpo de agua, MET= matorral espinoso tamaulipeco, MS= matorral submontano, MSVS= matorral submontano con vegetación secundaria, MIH= mezquital con huizachal, MIHVS= mezquital con huizachal y vegetación secundaria, PC= pastizal cultivado, PI= pastizal inducido, SBCS= selva baja caducifolia y subcaducifolia, SBE= selva baja espinosa, SBEVS= selva baja espinosa con vegetación secundaria.

agua disponible entre la profundidad del suelo. El PAWC se agregó como atributo al mapa del tipo de suelo. La Tabla 5 muestra los datos por tipo de suelo en los perfiles estudiados por la UAT (2001).

Se utilizaron también la cartografía digital de cuencas (CNA, 1998) y subcuencas hidrológicas (CONABIO, 1998) del acuífero así como el mapa digital de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal, serie V (INEGI, 2013); a este último se le asignó a cada una de sus clases el atributo de profundidad de raíces, como se muestra en la Tabla 6.

Por último, el modelador requirió el valor de la constante de Zhang, que varía de 1 a 30, de acuerdo con la distribución estacional de la precipitación. Si las lluvias se producen principalmente en los meses de invierno, los valores de Zhang deben estar cerca de 10; si hay más lluvias durante meses de verano o se propaga uniformemente durante el año, los valores de Zhang deben estar más cerca de 1 (Zhang *et al.*, 2004). Para la zona de estudio se utilizó una constante de 12. Una vez calculada la provisión de agua de un terreno a través de InVEST, se obtuvo el mapa de recarga neta en mm año⁻¹ de la zona de estudio.

3. Medios acuíferos (ArAw)

Se refiere como medios acuíferos a la formación consolidada, así como a rocas y guijarros que no se encuentran consolidados en los que está contenida el agua; incluye además poros y fracturas (Bera *et al.*, 2021). Dicha capa se derivó del mapa geológico de México (SGM, 1995) y se clasificó el tipo de material existente de acuerdo con los siguientes valores del método DRASTIC (Tabla 7).

Tabla 7. Valores del parámetro de Medios Acuíferos del modelo DRASTIC

Medios Acuíferos		
Rango	Clasificación	Clasificación típica
Esquisto masivo	1-3	2
Metamórfico / ígneo	2-5	3
Meteorizado metamórfico / ígneo	3-5	4
Arenisca fina, caliza, secuencias de lutitas	5-9	6
Arenisca masiva	4-9	6
Caliza masiva	4-9	6
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza kárstica	9-10	10

4. Medios del suelo (SrSw)

Los medios del suelo se refieren a la parte superior de la zona vadosa en la que se encuentran las actividades biológicas

activas; éstos controlan la permanencia de los contaminantes, además de la recarga en el área (Bera *et al.*, 2021). Para ingresar este indicador, se utilizó el mapa de edafología del INIFAP y CONABIO (1995), donde el tipo de suelo se clasificó, utilizando la información de los perfiles del suelo realizados por la UAT (2001). Los valores DRASTIC para este parámetro se muestran en Tabla 8.

Tabla 8. Valores del parámetro para medios de suelo para le modelo DRASTIC

Medios de suelo	
Rango	Clasificación
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Arcilla encogida y / o agregada	7
Franco arenosa	6
Franco	5
Franco limoso	4
Franco arcilloso	3
Arcilla no encogida y no agregada	1

5. Topografía (*TrTw*)

La topografía en este proceso indica la pendiente en la superficie de un terreno. Cuanto ésta es mayor, la tasa de infiltración es menor, por lo que las posibilidades de que los contaminantes se filtren hacia abajo y son menores (Bera *et al.*, 2021). del Modelo Digital de Elevación descargado del Continuo de Elevaciones Mexicano (INEGI, 2015), se derivó, con un tamaño de píxel de 90 por 90 m. Los rangos se clasificaron de acuerdo con el porcentaje de pendiente Tabla 9.

Tabla 9. Valores del parámetro de pendiente para le modelo DRASTIC

Topografía (% de pendiente)	
Rango	Clasificación
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

6. Impacto en los medios de la zona vadosa (*Irlw*)

La zona vadosa se define como la zona no saturada entre la capa superior del suelo y el nivel freático. Mientras mayor es la capacidad de atenuación de la zona vadosa, el área será menos vulnerable (Abunada *et al.*, 2021). El mapa de la zona vadosa, se obtuvo del mapa geológico del SGM

(1995) y clasificando los rangos de acuerdo con el grado de vulnerabilidad del material geológico (Tabla 10).

Tabla 10. Valores del parámetro para impacto en la zona vadosa según los materiales geológicos para le modelo DRASTIC

Impacto de la zona vadosa		
Rango	Clasificación	Clasificación típica
Limo/Arcilla	1-2	1
Esquisto	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca	4-8	6
Caliza, arenisca, lutita	4-8	6
Arena y grava con limo y arcilla significativos	4-8	6
Metamórfico / Ígneo	2-8	4
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza kárstica	8-10	10

7. Conductividad hidráulica (*CrCw*)

La conductividad hidráulica de un acuífero se refiere a la capacidad que tiene para transmitir agua mediante diversos gradientes hidráulicos, por lo que influye en la tasa del movimiento de un contaminante dentro del acuífero (Abunada *et al.*, 2021). En este trabajo, se derivó del mapa geológico de México (SGM, 1995), y los valores de conductividad se establecieron de acuerdo con el material geológico clasificado en función de la distancia diaria (m día⁻¹) que tarda en recorrer los distintos poros en el subsuelo por los valores calculados por Freeze and Cherry, 1979 (Tabla 11).

Tabla 11. Valores del parámetro conductividad hidráulica para el modelo DRASTIC (Freeze and Cherry, 1979).

Rango (m ³ /día)	Litología asociada	Clasificación
8-12	Esquisto	2
12-18	Gneis	3
18-22	Serpentinita	4
22 - 28	Arenisca-Conglomerado	6
22 - 28	Caliza	6
22 - 28	Caliza-Lutita	6
22 - 28	Lutita	6
22 - 28	Lutita-Arenisca	6
28-37	Conglomerado	8
8-18	Aluvial	9
59-90	Diorita	10
0-4	Sin datos	N.A.

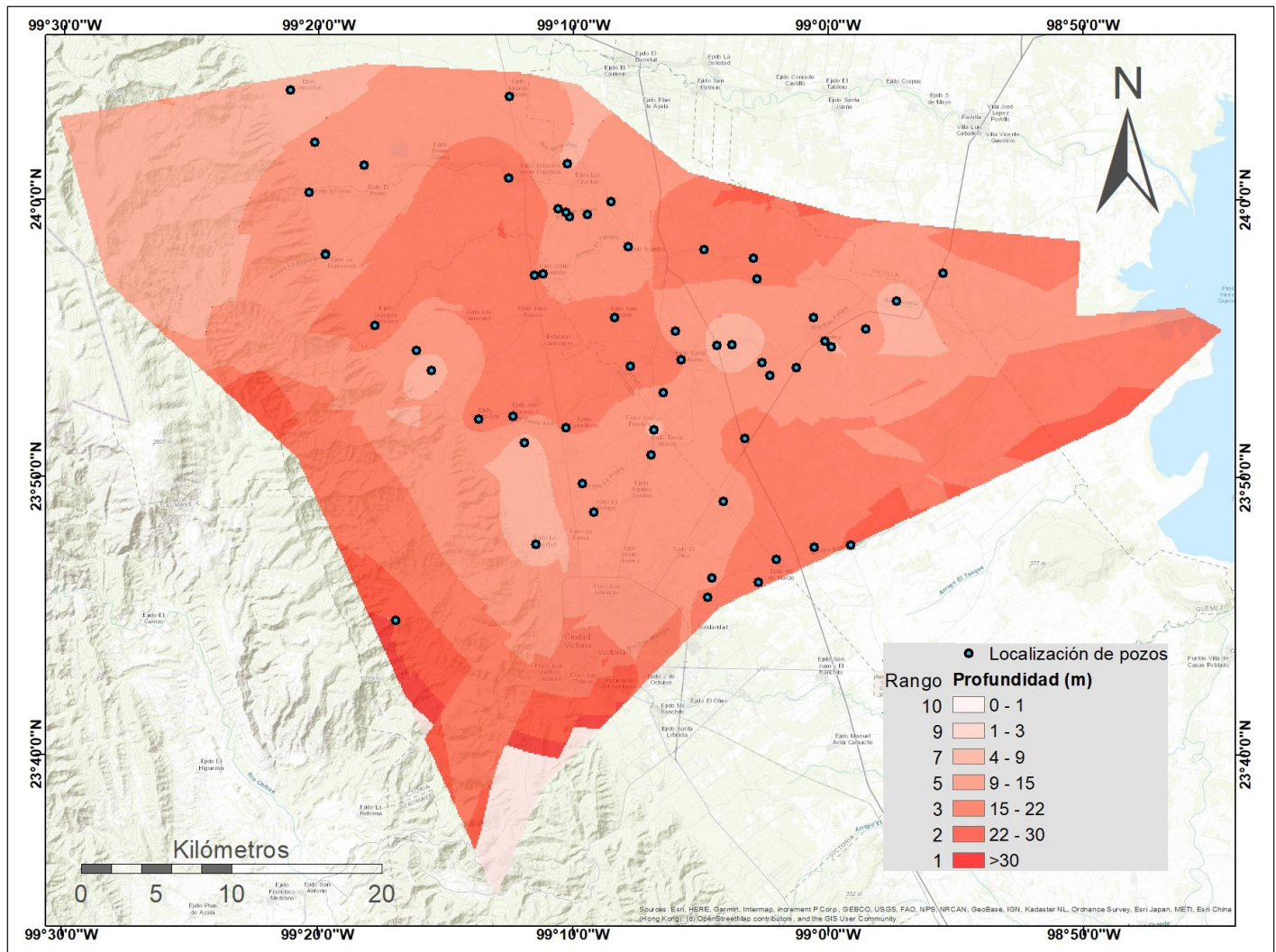


Figura 5. Profundidad del agua subterránea del acuífero Victoria-Güemez.

Resultados y discusión

1. Profundidad del agua

Los pozos de agua en la parte suroeste y sureste del área de estudio cuentan con una mayor profundidad (>30 m), lo que genera una protección al agua subterránea. Por el contrario, en la parte central del acuífero y coincidiendo con la mancha urbana de Ciudad Victoria (Figura 5), se observaron rangos de profundidad de 1 a 9 m. Esto representa una vulnerabilidad alta debido a la corta distancia por la que un contaminante puede entrar en contacto con el agua.

Las zonas donde el nivel freático se encuentra próximo a la superficie (menos de tres metros), indican una alta vulnerabilidad, de acuerdo con lo reportado Pacheco *et al.* (2018), pero en el área de estudio solo se reportan valores mayores a 4. Los acuíferos someros representan una vulnerabilidad a la degradación por concentración de componentes de interés sanitario y ambiental, como el nitrato, el nitrógeno amoniacal, derivados del petróleo, y de actividades de metalurgia, en general. Pathak y Bhandary (2020) resaltan la importan-

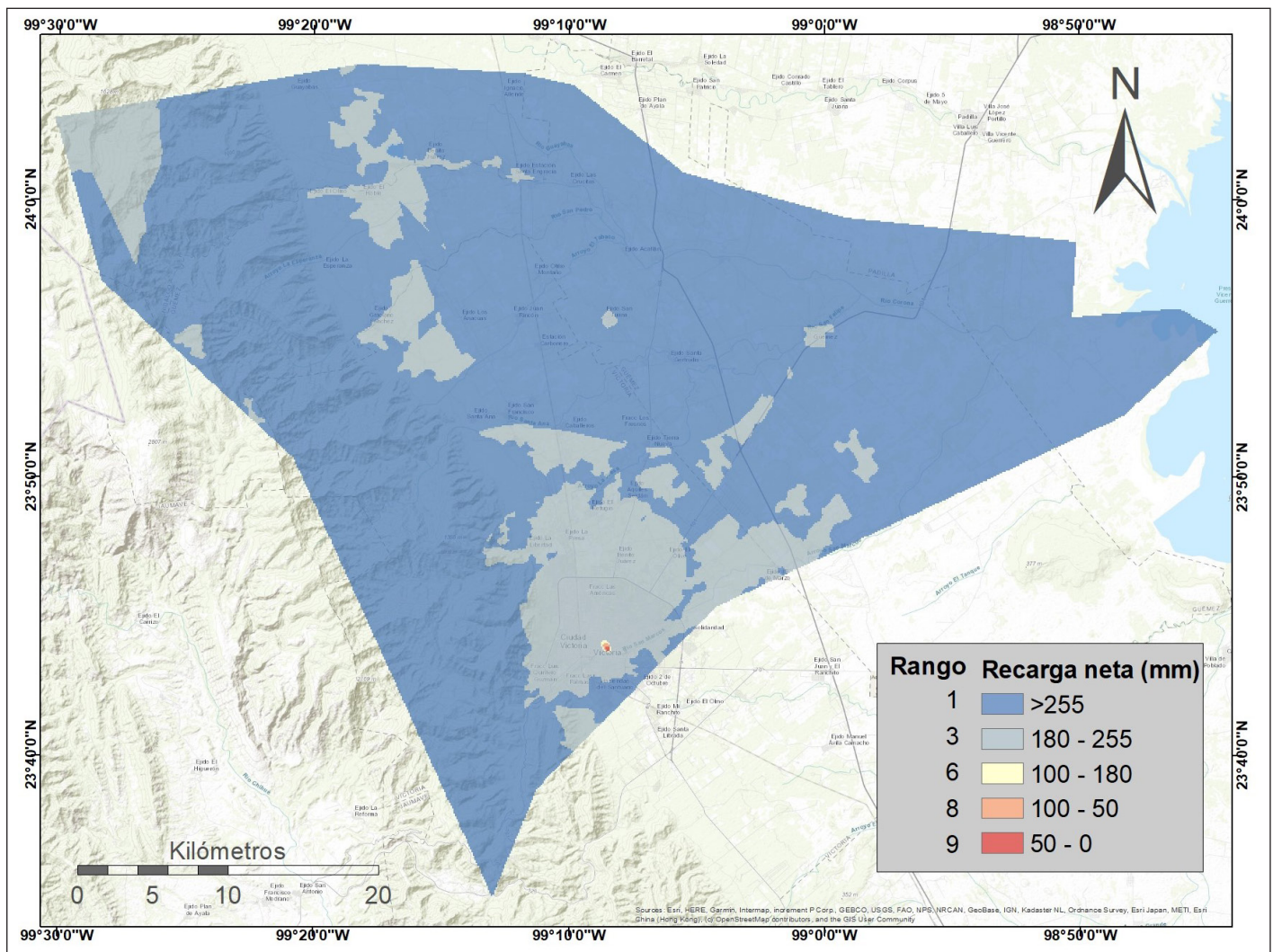


Figura 6. Distribución de la de recarga neta en el acuífero.

cia de la proximidad del manto freático a la superficie y su vulnerabilidad a la contaminación.

2. Recarga neta del agua subterránea

Se determinó que la recarga neta de agua subterránea en la mayor parte de la zona de estudio es de 255 mm año⁻¹. Su distribución espacial concuerda con el patrón del tipo de vegetación, ya que al oeste del acuífero se encuentra la Sierra Madre Oriental (SMO) donde predomina el bosque de pino encino y bosque mesófilo de montaña (Figura 6). Esto debido a que las raíces de ese tipo de vegetación suelen ser más profundas, lo que permite una mayor recarga de agua. Resultados similares fueron reportados por Sun *et al.* (2018) quienes encontraron mayor infiltración de agua en el bosque a diferencia de las zonas con pastizales; mencionan que eso se puede atribuir al hecho de que los suelos presentan una distribución más extensa de raíces debajo de las plantas leñosas.

En las zonas que pertenecen a las manchas urbanas de Ciudad Victoria, Gúemez y Santa Engracia los valores os-

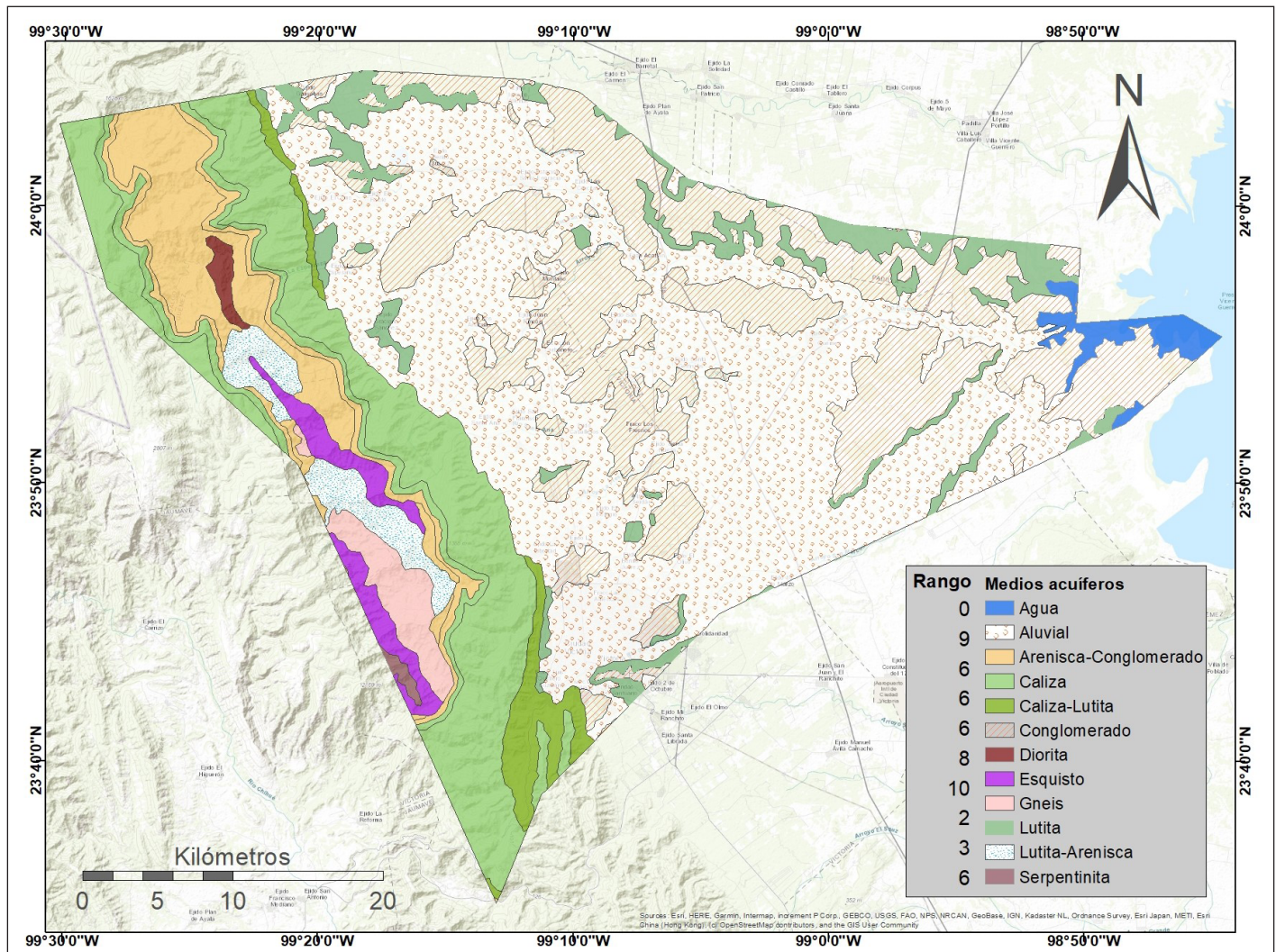


Figura 7. Medios acuíferos del acuífero Victoria – Güémez.

cilaron entre 180 y 255 mm año⁻¹. Estos resultados fueron opuestos a los de las zonas de la Sierra Madre Oriental, donde se presenta escasa o nula actividad humana.

Ye *et al.* (2019), demostraron que el consumo de agua del suelo asociado a la actividad de la vegetación depende principalmente de la precipitación, tipo de vegetación y la actividad humana, sin embargo, una zona dentro de la urbanización de Ciudad Victoria obtuvo valores de 0 a 50 mm año⁻¹. Hall *et al.* (2020), mencionan al respecto, que la urbanización produce importantes cambios a la estructura física de la superficie terrestre y al subsuelo poco profundo, además de afectar los patrones de uso del agua que cuentan con la capacidad de afectar el balance hídrico de las cuencas y los acuíferos.

3. Medios acuíferos

De norte a sur, en la parte oeste de la zona de estudio que corresponde a la Sierra Madre Oriental predominan las rocas calizas y calizas-lutitas (Figura 7). Por lo tanto, la vulnerabilidad del acuífero se encuentra en un nivel medio. Sin

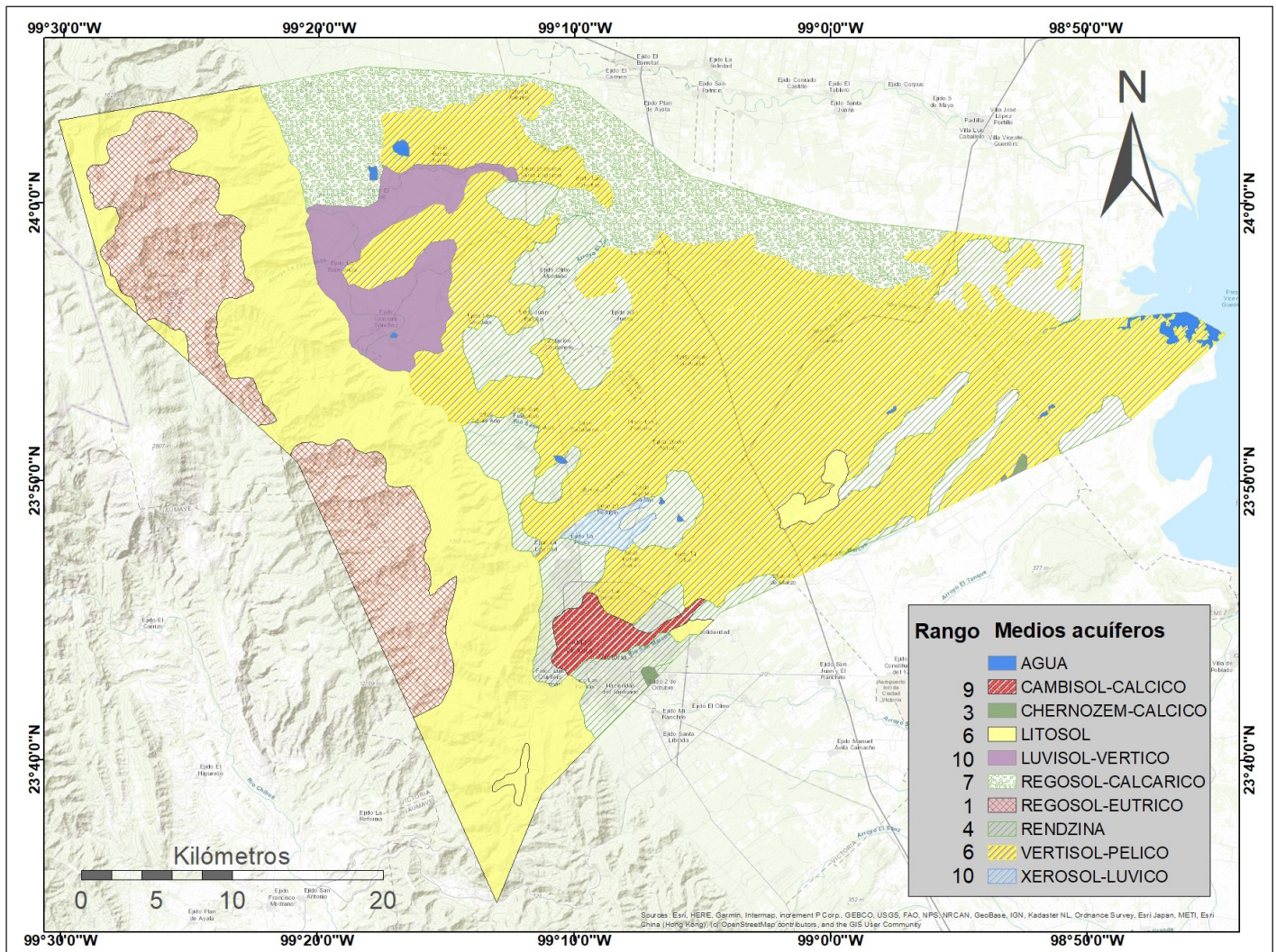


Figura 8. Medios del suelo en el acuífero.

embargo, el conglomerado y el material aluvial predominan en el resto de la zona de estudio. Este último está presente en la zona urbana de Ciudad Victoria y de acuerdo con lo que reportan Mendieta-Mendoza *et al.* (2021), las zonas donde se ubica el material aluvial se asocian con las áreas de mayor vulnerabilidad.

4. Medios del suelo

A través de la mayor parte de la zona de estudio, se distribuyen los suelos tipo Vertisol (Figura 8), siendo el tipo de suelo más abundante. El Vertisol está presente en la mayoría de las zonas agrícolas que se encuentran dentro del acuífero. En la parte norte del acuífero el tipo de suelo que predomina es el Regosol-Calcárico, mientras que en la parte oeste predomina el Regosol-Eútrico y en la zona serrana al poniente, lo hace el Vertisol.

Muhammad *et al.* (2015) mencionan que, durante la recarga, la capa de medios del suelo retiene los contaminantes al momento de infiltrarse hacia el agua subterránea, retardando la contaminación. Por su parte, Vu *et al.* (2021) reportan que

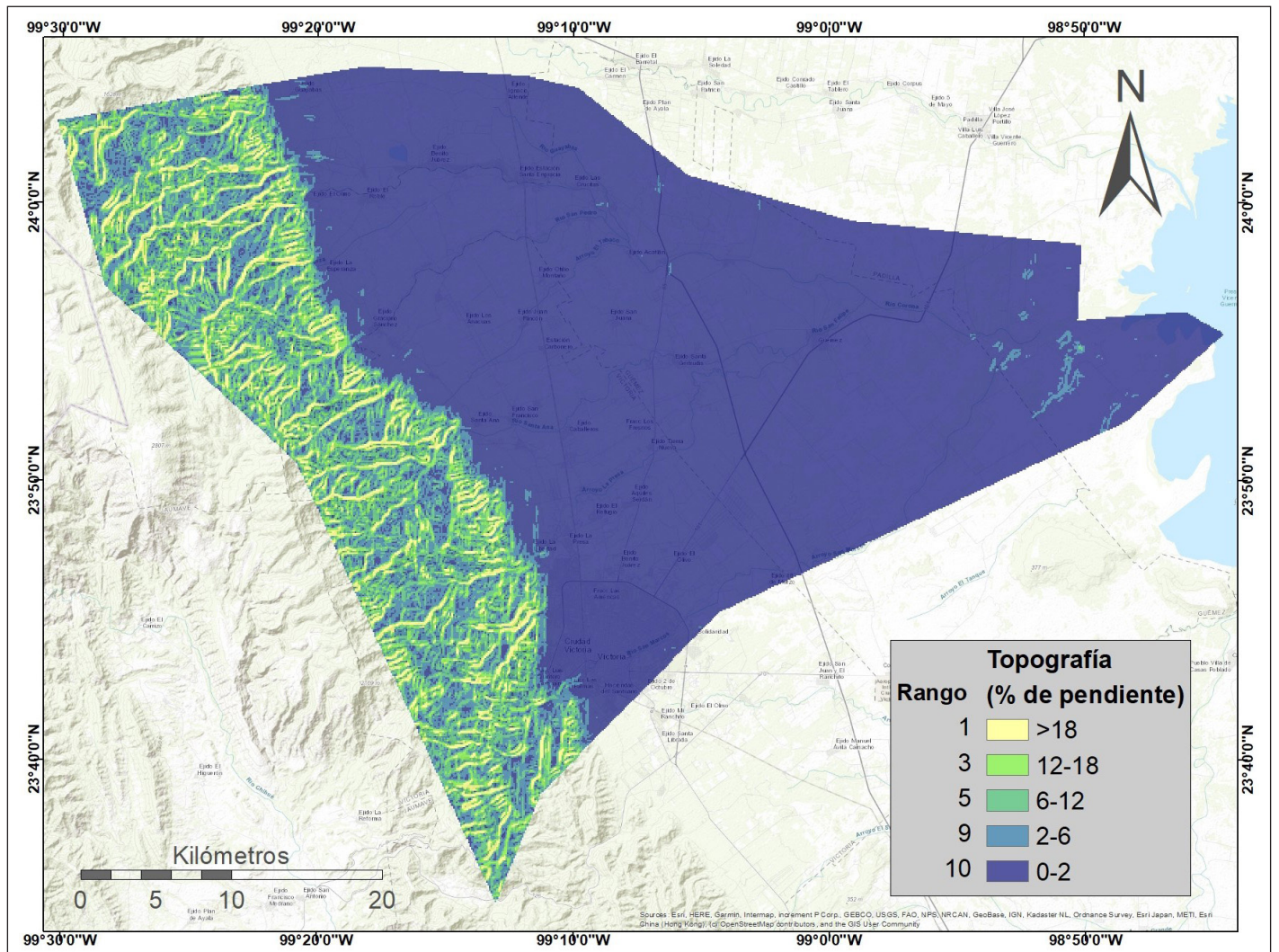


Figura 9. Topografía (pendiente) del acuífero Victoria-Güemez.

mientras más extendidas sean las zonas agrícolas, el potencial de contaminación de las aguas subterráneas aumenta.

5. Topografía

Los mayores porcentajes de la pendiente se identificaron en toda la parte oeste de la zona de estudio, donde se encuentra la Sierra Madre Oriental, con valores de la pendiente mayores de 18 % (Figura 9). De acuerdo con lo que mencionan Abunada *et al.* (2021), mientras mayor sea la pendiente menor será la vulnerabilidad en esa zona, debido a que disminuye la capacidad de que un contaminante entre en contacto con el agua subterránea. En el resto del acuífero, las zonas son de tendencia plana, con escasos lomeríos, por lo que la pendiente oscila entre 0-2%; lo que aporta a una mayor vulnerabilidad de su territorio.

6. Impacto en los medios de la zona vadosa

Para la zona no saturada que se encuentra entre la capa superficial del suelo, también llamada zona vadosa, el material predominante corresponde a rocas calizas y material aluvial

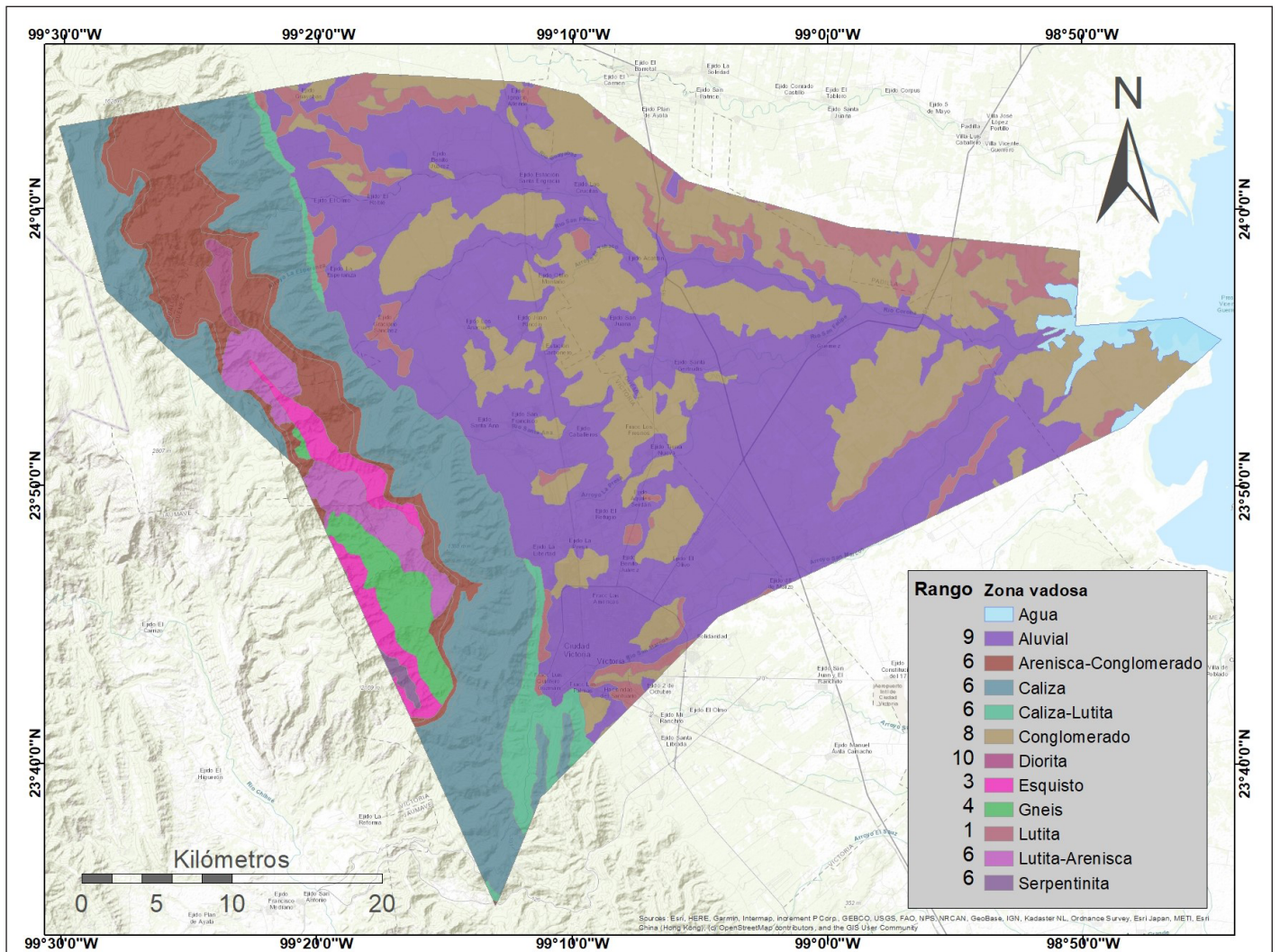


Figura 10. Impacto en los medios de la zona vadosa del acuífero.

(Figura 10). Los elementos geológicos de tipo sedimentario como las calizas, que subyacen a entornos aluviales de arenas, cuentan con características de conductividad hidráulica, que hacen a los acuíferos formados por estos materiales muy susceptibles a la infiltración de contaminantes (Bonacci 1987; Kozlowski & Sojka 2019; Pathak & Bhandary 2020)

7. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica depende del material geológico presente en el acuífero, y para la mayor parte del área de estudio se estimaron rangos de 0 a 4 m día⁻¹ (Figura 11). En la zona que corresponde al área urbana de Ciudad Victoria, se presentan estos valores, por lo que, de acuerdo con Abunada *et al.* (2021), en esos sitios se perfila una vulnerabilidad más alta, debido al corto tiempo que le toma a un contaminante recorrer los distintos poros y entrar en contacto con el agua subterránea.

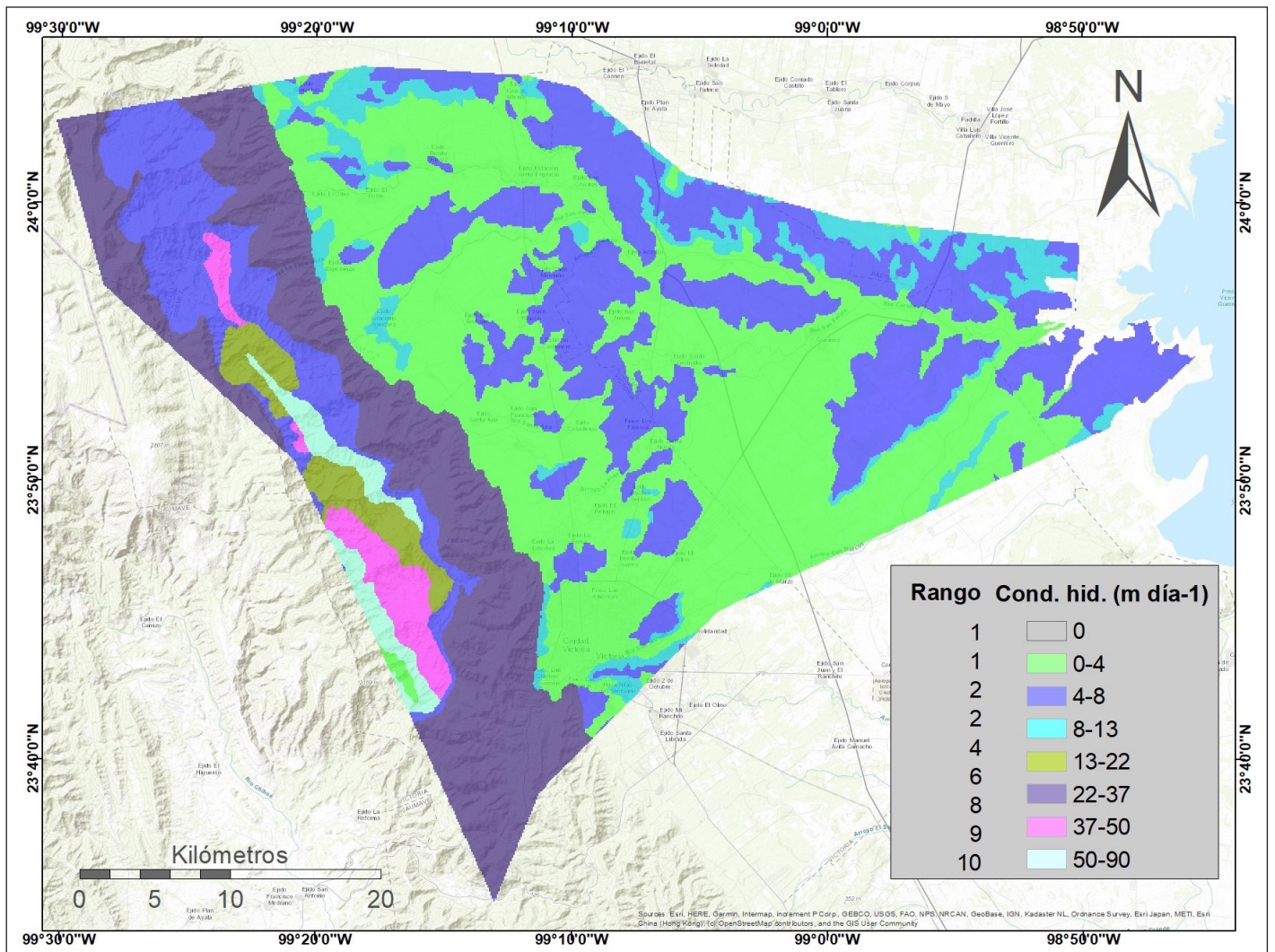


Figura 11. Conductividad hidráulica del acuífero.

8. Vulnerabilidad del acuífero Victoria - Güémez

El acuífero Victoria-Güémez presenta siete de los ocho niveles de vulnerabilidad clasificados por Aller *et al.*, 1987. Es importante señalar que las áreas con los más altos niveles registrados son poco significativas, ya que en conjunto no alcanzan a ocupar ni un punto porcentual del área de estudio. Sin embargo, cabe destacar que un 76.6% del acuífero presenta niveles de moderado a moderado-alto de vulnerabilidad (Tabla 12).

Tabla 12. Resultados de la clasificación del cálculo del índice DRASTIC

IndxV	Vulnerabilidad	Superficie (Ha)	Porcentaje
Sin datos	n/a	1,996	1.04%
62-79	Muy Baja	709	0.4%
80-99	Baja	15,195	7.9%
100-119	Baja - Moderada	26,271	13.7%
120-139	Moderada	100,556	52.3%
140-159	Moderada Alta	46,536	24.2%
160-179	Alta	968	0.5%
180-184	Muy Alta	7	0.004%

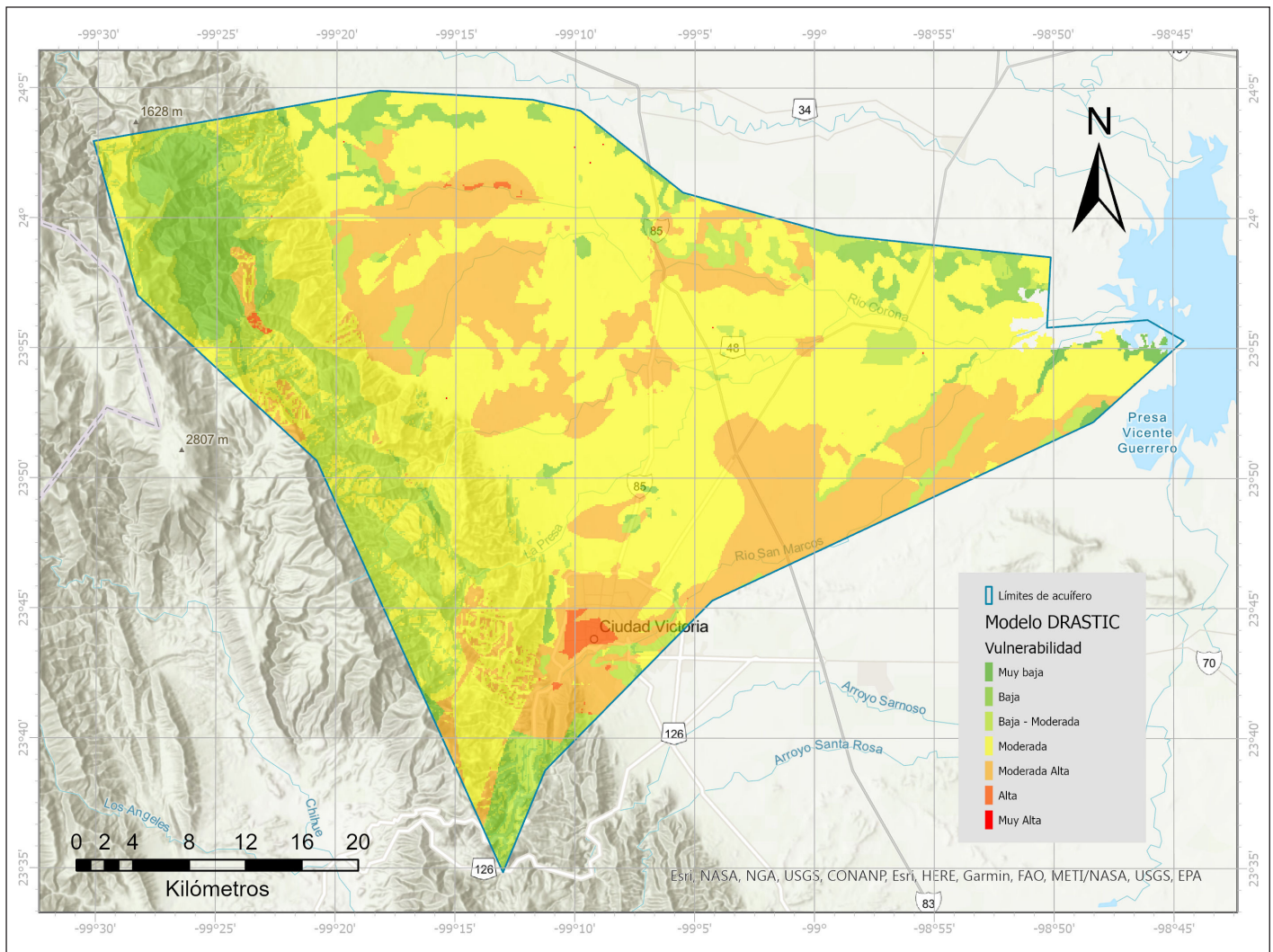


Figura 12. Vulnerabilidad del acuífero Victoria-Güemez.

En cuanto a su distribución territorial (Figura 12), las zonas menos vulnerables se localizan donde coincide una topografía de sierra o lomeríos asociados a la formación Méndez, conformado principalmente sobre lutitas con componentes arcillosos (Palmer 1927), con baja permeabilidad en la zona vadosa. Esto coincide con lo referido por Sadat-Noori & Ebrahimi (2015), quienes mencionan que factores como la alta profundidad del nivel freático y una baja permeabilidad en la zona vadosa generan bajo potencial de contaminación. De igual forma, algunas zonas asociadas a la parte alta de la Sierra Madre Oriental presenta valores de baja vulnerabilidad (zonas en color verde), áreas donde abundan calizas fracturadas que generan entornos altamente susceptibles a la infiltración de contaminantes (Henry & Suk 2018), pero que en este caso en particular, se clasifican como de vulnerabilidad baja, debido a la topografía escarpada de la zona.

En contraparte, prácticamente toda la parte central del territorio presenta una vulnerabilidad de moderada a muy alta. Se trata de las partes más planas del territorio estudiado donde se presentan profundidades del nivel freático bajas

y medias, con medios aluviales y conglomerados con alta permeabilidad en la zona vadosa asociado a Formaciones Neógenas. Este tipo de entorno es vulnerable a la contaminación por las actividades que se desarrollan en la superficie, que actualmente predominan entornos agrícolas, susceptibles a contaminar con NO_3 y residuos de insumos agrícolas (Kozłowski & Sojka 2019). Por otro lado, en algunas zonas clasificadas con vulnerabilidad moderada y moderadamente alto, concurren condiciones con una topografía accidentada, en partes de la SMO donde coincide una litología de calizas con suelos litosoles asociados a la Formación Tamaulipas.

En la zona urbana de Ciudad Victoria se presenta una vulnerabilidad muy alta del acuífero. Ahí concurre la presencia de asentamientos urbanos, que es donde se concentra la mayor carga de contaminación por presencia de automóviles, gasolineras, fábricas y talleres mecánicos, sumado a rangos de profundidad de 1 a 9 m, una recarga neta de 0 a 50 mm año⁻¹, material aluvial y conglomerado, además de una conductividad hidráulica con valores de 0 a 4 m día⁻¹. Los entornos urbanos son zonas con una alta vulnerabilidad

intrínseca, debido a la concentración de actividades y de seres humanos, por lo que, para efectos de estudios territoriales regionales, es normal y hasta predecible, que dichas zonas tengan alta vulnerabilidad (Vystavna et al, 2017).

Conclusiones

La modificación al factor de recarga mediante el uso del modelador *Water Yield* de InVEST, resultó en un modelo territorial de precisión adecuada para complementar la información hidrológica en el índice DRASTIC. Las áreas clasificadas por el modelo como vulnerables presentan una coherencia, aun y cuando el modelo presenta limitaciones en la calidad y la escala de los datos ingresados, el modelo se ajustó y brindó información suficiente. De acuerdo con lo representado en el modelo DRASTIC, el acuífero Victoria-Güémez presenta un 50% de su superficie con vulnerabilidad moderada, lo cual remarca la importancia de este tipo de instrumentos, para delimitar geográficamente, las características de vulnerabilidad del acuífero a ser degradado.

Los resultados de este análisis muestran que el acuífero Victoria-Güémez se encuentra expuesto casi en la totalidad de su territorio a vulnerabilidad a la contaminación con niveles moderados a muy altos. La mayor coincide con la zona urbana del municipio de Ciudad Victoria y en el poblado de Santa Engracia. Por esta razón, estos deberían considerarse como sitios prioritarios para la toma de decisiones y acciones que prevengan la contaminación en los pozos de agua que abastecen a sus usuarios.

Es necesario considerar que el modelo presentado tiene algunas limitaciones importantes, que básicamente provienen de la calidad de los datos ingresados, que depende de las fuentes; por ello, no fue posible sustituir la mayoría de la información cartográfica, pues es la existente en las fuentes oficiales, con escala de 1:250,000. La modelación de la profundidad freática se interpoló a partir de la información disponible de la profundidad de los pozos, por lo que es sólo un indicativo de ese valor. Por lo que, algunas formas plausibles para afinar este modelo, serían sustituir la evapotranspiración, la precipitación y la vegetación y uso de suelo por datos geospaciales para estimar la recarga del acuífero; además, podrían utilizarse una mayor cantidad de mediciones piezométricas el acuífero y sus alrededores. Finalmente, debería utilizarse cartografía digital geológica y edafológica a una escala local, ya sea producida por fuentes oficiales o por proyectos específicos de la región.

El presente análisis debe considerarse como un primer avance en el desarrollo de una herramienta de gestión del agua subterránea, pues el déficit de agua del acuífero es notorio. Y como las leyes estatales y nacionales carecen de atribuciones para tomar decisiones en materia de administración del agua, es necesario tomar acciones que generen un adecuado plan de gestión, en conjunto con los tomadores de

decisiones. Por estas razones, se propone que se afine más el modelo, utilizando la información digital ya mencionada, para continuar monitoreando la situación del acuífero.

Referencias

- Abunada, Z., Kishawi, T., Alslaibi, Kaheil, N. and Mittelstet, A. 2021. The application of SWAT-GIS tool to improve the recharge factor in the DRASTIC framework: Case study. *Journal of Hydrology*, 592,125613.
- Aguilar, D., Bautista, F., Mendoza, M. y Delgado, C. 2013. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 16,243-263.
- Aller, L., Lehr, J. and Petty, R. 1987. A standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings Natl. Water Well Assoc.
- Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., Chowdhury, P., Ghosh, A., and Biswas, S., 2021. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin, India with special emphasis on agricultural contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214, 112085.
- Bonacci Ognjen, 1987. *Karst Hydrology*, Springer Verlag, Berlin.
- Caballero, A., 2020. La Sequía En México, Un Efecto Más De La Crisis Climática En Los Recursos Hídricos. *Crisis Climática Y Recursos Hídricos*, 27.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2017. Disponibilidad de agua por acuífero. Valores de los términos que intervienen en su determinación conforme a la NOM-011-CONAGUA-2003. Cartografía digital, escala 1:250,000
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. 2018. Estadísticas del agua en México. Edición 2018. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM2018.pdf> 303 p.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. 2018b. Atlas del agua en México. Edición 2018 <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/AAM2018.pdf> 147 p.
- Diario Oficial de la Federación . 2020. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Victoria - Güémez (2807), Estado de Tamaulipas.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Cartografía digital de Subcuencas hidrológicas, escala 1:000,000,000. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/subcu1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Foster, S. 1987. Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, The Hague, 69-86.
- Fijani, E., Nadiri, A. Moghaddam, A., Tsai, T. and Dixon, B. 2013. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh-Bonab plain aquifer, Iran. *Journal of Hydrology* 503, 89-100.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.

- González, R., Albornoz, B., Sanchez, I., y Osorio, J., 2018. El acuífero yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 34,667-683.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V. 2da. Edición. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Aguascalientes. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s5ugw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INEGI. 2015. "Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0". De <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. 2020. Resultados definitivos del Censo de Población y Vivienda 2020. https://www.inegi.org.mx/servicios/widgets_poblacion.html
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). 1995. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 'Edafología'. Escala 1:250000
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 1996. Estaciones climatológicas del país obtenidas del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC). Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/estclimgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Jia, Z., Bian, J., Wang, Y., Wan, H., Sun, X., and Li, Q., 2019. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate in porous aquifers based on a DRASTIC method modified by projection pursuit dynamic clustering model. *Journal of contaminant hydrology*, 226, 103522.
- Kozłowski, M., and Sojka, M. 2019. Applying a Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability to Pollution: A Case Study in Central Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(3).
- Mendieta-Mendoza, A., Hanson, R., and Renteria-Villalobos, M. 2021. Potential adverse impacts on vulnerability and availability of groundwater from climate-change and land use. *Journal of Hydrology*, 594:125978.
- Mendoza, G., Ennaanay, D., Conte, D., Walter, M., Freyberg, D., Wonly, S., Hay, L., White, S., Nelson, E., and Solórzano, L. 2011. Chapter 4. Water supply as an ecosystem service for hydropower and irrigation. Natural Capital. *Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. Oxford University Press. Oxford. 365 pp.
- Muhammad, A., Zhonghua, T., Dawood, A., and Earl, B. 2015. Evaluation of local groundwater vulnerability based on DRASTIC index method in Lahore, Pakistan. *Geofísica internacional*, 54, 67-81.
- Palmer, R.H., 1927, Geology of eastern Hidalgo and adjacent parts of Vera Cruz, Mexico: American. Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 11(12), 1173-1220.
- Ríos-Sánchez, K., Sánchez, E., Santillan, Y., Ramírez, C., y Flores, M. 2020. Expansión urbana descontrolada: ¿Qué pasará con el agua? *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 54-59.
- Sadat-Noori, M., and Ebrahimi, K. 2016. Groundwater vulnerability assessment in agricultural areas using a modified DRASTIC model. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 19.
- Saxton, K.E. 2005. SPAW, Soil-Plant-Air-Water. Field and Pond Hydrology. Versión 6.02.75. USDA Agricultural Research Service y Department of Biological Systems Engineering de Washington State University.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 1995. Continuo Nacional de Geología de la República Mexicana de los años 1995 y 2005 con datos geológicos generados corresponden a la serie en formato digital de los años 1995 y 2005 escala 1:250,000
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., Chaumont, N., Denu, D., Fisher, D., Glowinski, K., Griffin, R., Guannel, G., Guerry, A., Johnson, J., Hamel, P., Kennedy, C., Kim, C.K., Lacayo, M., Lonsdorf, E., Mandle, L., Rogers, L., Silver, J., Toft, J., Verutes, G., Vogl, A. L., Wood, S, and Wyatt, K. 2020. INVEST 3.9.0.post86+ug.g1897be6 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Thapa, R., Gupta, S., Guin, S., and Kaur, H. 2018. Sensitivity analysis and mapping the potential groundwater vulnerability zones in Birbhum district, India: a comparative approach between vulnerability models. *Water Science*, 32,1, 44-66.
- Trabucco, A. and Zomer, R. 2009. *Global Aridity Index (Global-Aridity) and Global Potential Evapo-Transpiration (Global-PET) Geospatial Database*. CGIAR Consortium for Spatial Information. Published online, available from the CGIAR-CSI GeoPortal
- UAT (Universidad Autónoma de Tamaulipas). 2001. Diagnóstico Ecológico del Estado de Tamaulipas. Documento inédito. Ciudad Victoria. México.
- Vu, T., Ni, C., Li, W., Truong, M., and Hsu, S., 2021. Predictions of groundwater vulnerability and sustainability by an integrated index-overlay method and physical-based numerical model. *Journal of Hydrology*, 596, 126082.
- Vystavna, Y., Diadin, D., Yakovlev, V. 2017. Nitrate contamination in a shallow urban aquifer in East Ukraine: evidence from hydrochemical, stable isotopes of nitrate and land use analysis. *Environ Earth Sci* 76, 463. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6796-1>
- Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W., Chiew, F., Western, A., y Briggs, P. 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapo-transpiration. *Water Resources Research*. 40 (2).