

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Vulnerabilidad a la Contaminación en el Acuífero (502) Cañón de Derramadero,
Coahuila de Zaragoza.

Por:

ERNESTO GAYOSSO ESPINDOLA

INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Vulnerabilidad a la Contaminación en el Acuífero (502) Cañón de Derramadero,
Coahuila de Zaragoza.

Por:

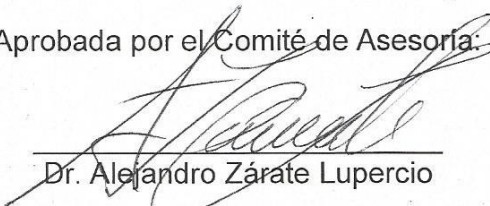
ERNESTO GAYOSSO ESPINDOLA

INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Alejandro Zárate Lupercio

Asesor Principal



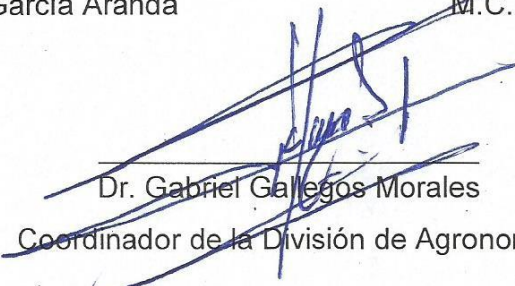
Dr. Mario Alberto García Aranda

Coasesor



M.C. Melchor García Valdés

Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2019

ESTA OBRA ESTÁ DEDICADA A CADA UNA DE LAS PERSONAS CON LAS QUE
DÍA A DÍA ME HE LEVANTADO Y QUE CONMIGO DE LA MANO HAN
CAMINADO

Agradecimientos

A mis papas por regalarme el más grande tesoro, que es la vida

Arnulfo Gayosso (†)
Elvira Espindola

A mis hermanos por regalarme los mejores recuerdos

Ana, Cris, Clari, Rachi, Chito

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por abrirme sus puertas para poder desarrollarme profesionalmente, y por lo que siempre estaré profundamente agradecido. A la cual juro siempre representar con respeto y las mejores intenciones, devolviendo siempre un poco de lo que me ha inculcado.

Al grupo de maestros del departamento forestal que participaron en mi formación académica, especialmente al comité de asesores por darme su valioso apoyo en el proceso de titulación

Dr. Alejandro Zarate Lupercio

Dr. Mario Alberto García Aranda

Mc. Melchor García Valdés

A mi país y a su pueblo, del cual siempre me sentiré orgulloso de pertenecer

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS	II
RESUMEN	III
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Justificación	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 El recurso hídrico subterráneo	3
2.1.1 El agua subterránea en Coahuila	3
2.2 Bases teóricas de los medios acuíferos.....	4
2.2.1 Partes de un acuífero.....	5
2.2.2 Propiedades de los acuíferos.....	5
2.2.3 Clasificación los acuíferos.....	6
2.3 Contaminación del agua subterránea.....	7
2.3.1 El concepto de contaminación	7
2.3.2 Principales fuentes de contaminación de las aguas subterráneas	7
2.3.2.1 Contaminación puntual y difusa	8
2.3.3 El transporte de los contaminantes hasta la zona saturada	9
2.4 Vulnerabilidad de acuíferos.....	10
2.5 La metodología DRASTIC.....	12
2.6 Variables de la metodología DRASTIC	13
2.7 Limitaciones de DRASTIC	17
2.8 Antecedentes de la zona de estudio	18

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
3.1 Descripción del área de estudio.....	19
3.1.1 Localización.....	19
3.1.2 Características físicas	19
3.1.2.1 Provincias fisiográficas.....	19
3.1.2.2 Clima.....	21
3.1.2.3 Hidrogeología	22
3.1.2.3.1 Balance de aguas	22
3.1.2.3.2 Formaciones geológicas	23
3.1.2.3.3 Zonas hidrogeológicas.....	25
3.1.2.3.4 Piezometría.....	26
3.1.2.3.5 Calidad del agua en el acuífero	27
3.1.2.4 Edafología.....	32
3.1.2.5 Hidrología.....	32
3.1.3 Características biológicas	34
3.1.3.1 Vegetación	34
3.2 Cálculo del Índice de vulnerabilidad DRASTIC.....	36
3.3 Cálculo del Índice específico de riesgo de contaminación (IRC)	51
IV. RESULTADOS.....	54
4.1 Índice de vulnerabilidad DRASTIC	54
4.2 Índice de riesgo a la contaminación	57
V. CONCLUSIONES.....	61
VI. RECOMENDACIONES.....	62
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Usos consuntivos del agua subterránea en Coahuila -----	4
Figura 2. Distribución vertical de un acuífero-----	5
Figura 3. Tipos de acuíferos -----	7
Figura 4. Evolución de los déficits del acuífero-----	18
Figura 5. Localización del área de estudio-----	20
Figura 6. Precipitación media mensual -----	21
Figura 7. Temperatura media mensual -----	21
Figura 8. Formaciones geológicas del acuífero -----	24
Figura 9. Zonas hidrogeológicas -----	25
Figura 10. Concentración de Solidos Totales Disueltos -----	29
Figura 11. Calidad agronómica de las aguas con las Normas Riverside -----	31
Figura 12. Edafología del acuífero-----	33
Figura 13. Usos de suelo y vegetación -----	35
Figura 14. Valores asignados a los distintos rangos de profundidad al nivel estático ----	37
Figura 15. Valores asignados a los rangos de infiltración estimados -----	41
Figura 16. Valores asignados a la litología media de la unidad hidrogeológica-----	43
Figura 17. Valores asignados a los distintos tipos de suelo -----	45
Figura 18. Valores asignados al impacto de los rangos de pendiente-----	47
Figura 19. Valores asignados al impacto de la litología de la zona no saturada-----	48
Figura 20. Valores asignados a los rangos medios de conductividad hidráulica -----	50
Figura 21. Valores asignados a los usos de suelo y vegetación-----	53
Figura 22. Mapa final de índices de vulnerabilidad -----	56
Figura 23. Mapa final de índices de riesgo de contaminación -----	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de asignación para factor D -----	13
Tabla 2. Valores de asignación para factor R -----	14
Tabla 3. Valores de asignación para factor A -----	14
Tabla 4. Valores de asignación para factor S -----	15
Tabla 5. Valores de asignación para factor T -----	15
Tabla 6. Valores de asignación para factor I -----	16
Tabla 7. Valores de asignación para factor C -----	17
Tabla 8. Valores de ponderación para cada parámetro del método DRASTIC-----	17
Tabla 9. Balance de aguas del acuífero-----	22
Tabla 10. Formaciones geológicas-----	23
Tabla 11. Monitoreo piezométrico en 2017 -----	27
Tabla 12. Tipos de agua según la concentración de Solidos Totales Disueltos -----	28
Tabla 13. Usos de suelo y tipos de vegetación -----	34
Tabla 14. Valores utilizados para factor D -----	36
Tabla 15. Matriz de coeficientes de escurrimiento a partir de la permeabilidad de los materiales y del grado de pendiente -----	39
Tabla 16. Valores utilizados para factor R-----	40
Tabla 17. Descripción y valores de utilizados para factor A-----	42
Tabla 18. Descripción y valores utilizados para factor S -----	44
Tabla 19. Valores utilizados para factor I-----	46
Tabla 20. Descripción y valores utilizados para factor C-----	49
Tabla 21. Clasificación de grados de vulnerabilidad-----	51
Tabla 22. Valoración utilizada para el riesgo de contaminación por uso de Suelo -----	52
Tabla 23. Índices de vulnerabilidad estimados-----	54
Tabla 24. Índices de riesgo de contaminación estimados-----	57

RESUMEN

En este presente estudio se puso en práctica el método DRASTIC propuesto por Aller *et al.*, (1987), con el fin de caracterizar la vulnerabilidad a la contaminación en el Acuífero Cañón de Derramadero, ubicado al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila.

El objetivo principal fue generar cartografía en la cual se delimiten las zonas con diferentes niveles de vulnerabilidad, así mismo, integrar información referente a los diferentes usos de suelo y vegetación presentes con el fin de obtener otro mapa de vulnerabilidad específica que sea más acorde a la realidad existente en la superficie del acuífero.

Para el desarrollo del estudio fue necesario recopilar información geohidrológica, meteorológica, geológica, edáfica, hidrológica, usos de suelo, entre otra. Esto a partir de distintas fuentes como son los portales del Servicio Geológico Nacional, el portal del INEGI, informes geohidrológicos y de cartas geográficas en físico.

La información se obtuvo y procesó en software especializado en información cartográfica, en distintos formatos (vectorial y raster) de tal forma que se generaron distintos mapas con cada una de las características o parámetros del método empleado.

Palabras clave: Aguas subterráneas, DRASTIC, Vulnerabilidad, Contaminación, Coahuila.

I. INTRODUCCIÓN

El ordenamiento de las principales áreas urbanas y el establecimiento de actividades económicas no ha tomado en cuenta que el agua es un recurso limitante y que va en deterioro, por lo tanto, el crecimiento y desarrollo de los establecimientos humanos ha repercutido directamente en la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos (Sainz y Becerra, 2003; Dávila-Porcel, 2011).

Actividades específicas como la excesiva irrigación y fertilización en zonas agrícolas, el uso de pesticidas y herbicidas, el establecimiento de zonas industriales, las actividades de minería a campo abierto, el mal manejo de residuos urbanos, la ganadería, etc., influyen directamente en la calidad del agua subterránea local, puesto que de ellas se derivan procesos a los cuales está expuesto el medio ambiente, especialmente el subsuelo (Foster e Hirata, 2003).

El vertido accidental o intencional de cualquier agente líquido contaminante sobre la superficie del suelo se puede mezclar con la humedad disponible y mediante procesos de infiltración migra hacia los horizontes inferiores del suelo, alcanzando la zona saturada del acuífero y por supuesto contaminando las reservas. En zonas urbanas suelen encontrarse la mayoría de las actividades antes mencionadas, sucediendo de manera simultánea o de manera conjunta, generando así una serie de impactos sinérgicos que repercuten directamente en la calidad del agua (Dávila y de León, 2011).

La facilidad con la que los contaminantes entran y se disipan en el medio subterráneo depende directamente de los materiales o tipos de rocas que lo conforman, características fisiográficas como la pendiente, el suelo, los patrones de infiltración, los tipos de vegetación y usos del suelo, así como las características hidrogeológicas como la conductividad hidráulica, la transmisividad, la porosidad y fracturación de los medios acuíferos, determinan en conjunto su fragilidad o vulnerabilidad intrínseca frente a la intrusión de cualquier sustancia que sea vertida en la superficie (Aller *et al.*, 1987).

Considerando lo anterior, podemos decir que la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero variara en tanto lo hagan sus características fisiográficas e hidrogeológicas, lo cual a su vez generara la existencia de áreas poco o muy vulnerables a la contaminación, a dicha

vulnerabilidad se le sumara el riesgo de contaminación que presentan los diferentes usos de suelo que existen y que podrían generar un impacto en la calidad del agua subterránea.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

1. Evaluar la vulnerabilidad y zonas con riesgo de contaminación del agua subterránea en el acuífero (502) Cañón de Derramadero, en el Estado de Coahuila.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Generar mapas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero mediante la metodología DRASTIC.
2. Identificar las zonas más y menos vulnerables
3. Contrastar la zonificación de vulnerabilidad intrínseca y específica con la información disponible de concentraciones de nitratos en el agua subterránea.

1.2 Justificación

En el sureste de Coahuila, así como en todo el Estado el abastecimiento de agua se basa en el aprovechamiento de los depósitos subterráneos, por esto, la identificación de zonas vulnerables y su respectiva protección; principalmente cuando converjan con las zonas de recarga del acuífero, deben ser prioridades por tomar en cuenta para alcanzar la sustentabilidad de los recursos hídricos.

La existencia de mapas de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos permite la zonificación de áreas con valores homogéneos de vulnerabilidad, volviéndose así una herramienta para el manejo del medio ambiente y un método practico para identificar áreas vulnerables que requieren de continua protección y monitoreo.

Este estudio permitirá contrastar los niveles de vulnerabilidad resultantes con los diferentes usos de suelo que se presentan en el área, e identificar los posibles riesgos que conllevan.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El recurso hídrico subterráneo

A pesar de vivir en un planeta que en su mayor parte está compuesto por agua, solamente un 2.53% de esta es dulce, $\frac{2}{3}$ de esta proporción se encuentra almacenada en glaciares y solo una tercera parte se encuentra disponible en cuerpos de agua superficiales y subterráneas (UNESCO, 2003).

El agua subterránea es definida como aquella parte del agua que fluye y se almacena bajo la superficie terrestre, a través de los poros o espacios originales de la roca (porosidad primaria) o por fisuras y cavidades de disolución (porosidad secundaria) que conforman a los acuíferos (Ordoñez, 2011; Collazo y Montaña, 2012).

En México, los depósitos de agua dulce se encuentran en 653 acuíferos subterráneos distribuidos a lo largo del territorio nacional, de los cuales 105 se encuentran en condición de sobreexplotación, 32 acuíferos localizados principalmente en la Península de Baja California y el altiplano mexicano, tienen presencia de suelos salinos o agua salobre, y por si fuera poco 18 acuíferos costeros a nivel nacional presentan intrusión marina (CONAGUA, 2018).

Si consideramos que el agua subterránea es la segunda fuente de abastecimiento aportando un 39% del total para los usos consuntivos (aquellas actividades que generan diferencias entre el volumen extraído y el descargado, tras el fin de la actividad, tales como: abastecimiento público, agropecuario, industria autoabastecida, producción de energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad) (CONAGUA, 2018), tendríamos que pensar que la situación empieza a ser un poco alarmante principalmente en esas regiones en donde la poca calidad del agua de los acuíferos se combina con fuertes presiones de extracción y con escasas tasas de recarga ocasionadas por los bajos regímenes de precipitación (Sainz y Becerra, 2003; Martínez y Patiño, 2012).

2.1.1 El agua subterránea en Coahuila

De los 28 acuíferos que se ubican dentro del estado de Coahuila, 14 se encuentran en condiciones de subexplotación presentando disponibilidades medias anuales que van desde

0.2 a 17.84 Hm³, los restantes tienen condición de sobreexplotación presentando déficits que van desde 0.01 a 123.6 Hm³ (DOF, 2018). La heterogeneidad de los datos de déficits y disponibilidad podría explicarse a partir de los distintos índices de presión a los que están sujetos los acuíferos, ocasionados por los diversos usos del agua que se le da en cada región, la variabilidad geográfica y climática, así como la centralización de áreas urbanas, entre otras.

El libro de estadísticas del agua en México señala que hasta el 2017 el Estado de Coahuila tenía 2 038.3 Hm³ de agua concesionada, siendo el uso agrícola el que más agua consume pues sus valores ascienden a 1 647.0 Hm³, seguido del abastecimiento público con 239.7 Hm³, la industria autoabastecida con 76.8 Hm³ y por último la producción de energía eléctrica con 74.9 Hm³ (CONAGUA, 2018).

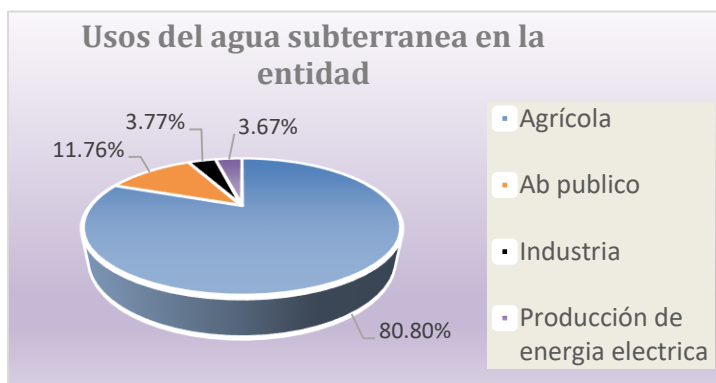


Figura 1. Usos consuntivos del agua subterránea en Coahuila

Fuente: CONAGUA (2018)

Las grandes presiones de explotación que ejercen las actividades agrícolas suscitadas en la entidad han logrado un desequilibrio en los ciclos de recarga de los acuíferos, impidiendo alcanzar la recuperación de los almacenamientos originales. No obstante, la geología del estado presenta grandes posibilidades de captación y recarga, que aunados a estrategias de control de explotación de agua subterránea y a trabajos de fomento a las recargas se podría alcanzar un equilibrio en el aprovechamiento de los recursos hídricos (INEGI, 1986).

En el estado, como en todo el país los depósitos de agua subterránea juegan un papel muy importante en el desarrollo de las actividades económicas, por lo que el estudio, la protección y el monitoreo de estos recursos debería ser una prioridad.

2.2 Bases teóricas de los medios acuíferos

Davis y De Wiest (1971) definen a los acuíferos como formaciones geológicas naturales situadas debajo de la superficie del suelo, las cuales tienen la capacidad de almacenar y transmitir agua a los pozos en cantidades suficientemente grandes como para ser

económicamente explotables, esto gracias a la cantidad de espacios vacíos (poros, fracturas, o cavidades) que conforman su interior.

2.2.1 Partes de un acuífero

En el perfil de cualquier unidad hidrogeológica se pueden distinguir dos principales franjas verticales determinadas por el nivel estático del agua: la zona no saturada, y la zona saturada.

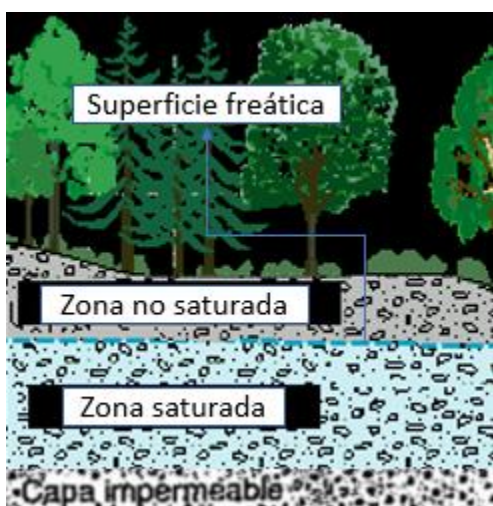


Figura 2. Distribución vertical de un acuífero

Fuente: <https://water.usgs.gov>

La zona no saturada, zona de aireación o zona vadosa, es la zona más somera, pues se encuentra entre la superficie del suelo y la superficie freática, por lo tanto, sus poros y cavidades están ocupados en su mayoría por aire (Collazo y Montaña, 2012).

La zona saturada es la franja más profunda, pues está situada debajo de la superficie freática, por lo que todos los poros existentes están llenos de agua (Collazo y Montaña, 2012).

La capa impermeable puede ser la base del acuífero o un estrato duro y cimentado que impide la filtración del agua. Las características de esta zona determinan el tipo de acuífero existente.

2.2.2 Propiedades de los acuíferos

El comportamiento del agua en el interior de los medios está determinado en su mayor parte por el siguiente conjunto de características:

- La porosidad

Se le denomina así al conjunto de espacios vacíos que integran a las rocas, en materiales blandos son originados a partir del orden y la geometría de las partículas individuales. Por el contrario, en rocas duras la porosidad se da por la formación de cavidades y fracturas presentes en los estratos (Ordoñez, 2011).

- La permeabilidad

Es la capacidad que tienen los cuerpos geológicos para permitir o evitar la circulación de cualquier fluido con el que entren en contacto, los niveles de permeabilidad estarán

determinados por la cantidad de poros y a su respectiva interconexión, por lo tanto, podría existir porosidad, pero con una mala interconexión de ella, las rocas no serían permeables (Ordoñez, 2011).

- La transmisibilidad

Es una medida de la cantidad de agua o capacidad del acuífero para conducir y transmitir agua a través del espesor horizontal de la zona saturada, por unidad de tiempo (Ordoñez, 2011; Collazo y Montaña, 2012).

2.2.3 Clasificación los acuíferos

En función del comportamiento hidráulico en las partes del acuífero y de sus propiedades estas formaciones suelen clasificarse en tres principales tipos (**Figura 3**):

- Acuíferos libres

Las aguas freáticas o libres que se encuentran en contacto con la atmosfera a través de los espacios vacíos que conforman una capa permeable arriba de la zona saturada, por lo que, la recarga de este tipo de acuíferos se da de manera directa por la infiltración del agua de lluvia (Collazo y Montaña, 2012).

- Acuíferos semiconfinados

Las aguas semiconfinadas representan una condición intermedia, pues a pesar de involucrar capas duras en la base o el techo del acuífero, estas poseen permeabilidad baja que, si bien dificultan el flujo vertical del agua, no lo impiden (Llopis, 1970; Collazo y Montaña, 2012). Los pozos en estos medios tienen muy bajo rendimiento, pero evitan un desenfrenado abatimiento de los recursos.

- Acuíferos confinados

Por el contrario, también existen las aguas confinadas, que involucran formaciones más complejas pues en su parte superior limitan con capas impermeables por lo que la recarga solamente es lateral. Pueden existir capas permeables que se intercalan con una o varias capas impermeables, ejerciendo así una gran presión sobre el cuerpo de agua cautivo (Llopis, 1970).

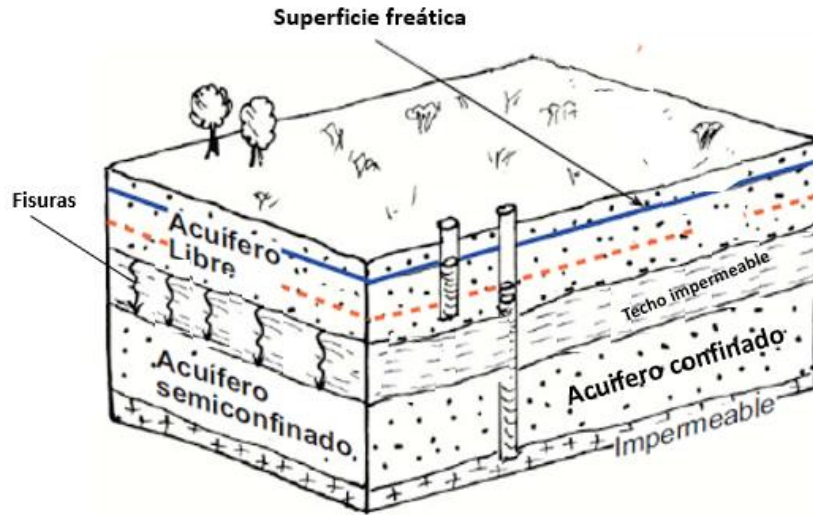


Figura 3. Tipos de acuíferos
 Fuente: www.lacomunidadpetrolera.com

2.3 Contaminación del agua subterránea

2.3.1 El concepto de contaminación

Definida como la alteración a la calidad natural del agua que es empleada como potable de uso público, debido; principalmente a las actividades antrópicas que se desarrollan con el fin de satisfacer las necesidades de los pueblos (Jiménez, 2001).

La Organización Mundial de la Salud considera que las aguas contaminadas ven modificada su composición, presentando alteraciones como la temperatura, color, densidad, sólidos suspendidos, radiactividad, alteraciones en su composición química y biológica, que le impiden cumplir sus funciones (García, 2009).

La calidad del agua determina los posibles usos a los que se le destinara, limitando algunos, pero conservando su aptitud para otras actividades (Davis y De Wiest, 1971).

2.3.2 Principales fuentes de contaminación de las aguas subterráneas

Desde que las aguas subterráneas empezaron a cobrar importancia, los principales objetivos de los estudios realizados fueron el caracterizar la calidad del agua y su aptitud para el uso doméstico, así como describir y relacionar el impacto que tienen las actividades humanas en la calidad del agua (Sánchez, s.f.).

Anqué, evidentemente existe contaminación secundaria por procesos naturales como la salinización del agua o la concentración de elementos libres (CaCO_3 , Cl , SO_4 , Ca , Mg , Na , K , Cu , Fe) que se encuentran de manera natural en los medios acuíferos y que como consecuencia de las interacciones entre la humedad infiltrada y el material litológico que los conforma, pueden disgregarse y estar en suspensión en el agua (Abarca y Mora, 2007).

La preocupación se centra principalmente, en los impactos causados al agua subterránea por parte de las sustancias que se originan en la superficie como lo son: nitratos (derivados de fertilizantes), materia orgánica (biodegradable o no), compuestos tóxicos orgánicos o inorgánicos, metales pesados, microorganismos patógenos, elementos radioactivos, etc., (Foster e Hirata, 1991).

2.3.2.1 Contaminación puntual y difusa

Autores como Sánchez (s.f.); Pacheco y Cabrera (2003); Foster *et al.*, (2003); (González, 2007); mencionan que las siguientes actividades están asociadas a la perturbación de la calidad del agua subterránea, y se pueden clasificar en dos grandes tipos:

Contaminación puntual por actividades y efluentes fijos, fácilmente monitoreados que generan descargas continuas identificables (Bravo-Inclán, 2015).

- La disposición de los residuos sólidos urbanos en la superficie o en la zona no saturada.
- Aguas residuales con mínima depuración vertidas en cauces superficiales o fosas sépticas.
- Los diferentes tipos de industria pueden llegar a generar efluentes con sustancias químicas variadas, líquidas que son fácilmente lixiviadas o sólidas que también suelen disgregarse. Las fugas de material en depósitos enterrados son muy peligrosas por la conexión directa con el acuífero.
- Los escombros y labores de tratamiento de los minerales en las mineras pueden llegar a generar contaminación por lixiviación.

Contaminación difusa por actividades que generan múltiples descargas o derrames individuales casi imperceptibles, pero casi siempre periódicos y por lo tanto acumulativos, ejercidos en una superficie considerable (González, 2007).

- Las grandes extensiones de uso agrícola que hacen uso indiscriminado de fertilizantes ricos en N, K, P, están asociadas a la generación de nitratos (NO_3); compuestos muy solubles en el agua, altamente peligrosos por su poca percepción y por los efectos en la salud humana. El uso de plaguicidas que llegan a persistir desde una semana hasta varios años.
- La ganadería genera grandes cantidades de residuos que pueden contener compuestos nitrogenados, fosfatos, bacterias, cloruros, y, en algunos casos, metales pesados.

Sin embargo, tal como lo dice Foster *et al* (2003) puede haber un sinnúmero de actividades ejercidas por el hombre, las cuales son potencialmente capaces de generar importantes cargas contaminantes, no obstante, solo algunas son las responsables de los disturbios en la calidad del agua subterránea.

2.3.3 El transporte de los contaminantes hasta la zona saturada

Las formas en la que estos contaminantes abordan al agua del subsuelo pueden ser variadas y muy complicadas, y están determinadas por las características de las sustancias, principalmente por la densidad.

Las principales fuentes de contaminación que describen autores como Pacheco y Cabrera (2003); Foster *et al*, (2003) y García (2009), utilizan tres principales mecanismos de propagación hacia los cuerpos de agua subterráneos:

1. A partir de la superficie

Es el principal mecanismo de propagación puesto que la contaminación se da por la lixiviación de cualquier sustancia que sea vertida o depositada en la superficie del suelo, como consecuencia de la disolución de esta con la infiltración de lluvia, de ríos, lagos o por los sistemas de riego.

2. A partir de la zona no saturada

Este mecanismo considera que la contaminación puede ocurrir por la filtración accidental de sustancias originadas en cualquier depósito de residuos subterráneos, como fosas sépticas, basureros, plantas de tratamiento, etc., el riesgo aumenta cuando estas

instalaciones son construidas sobre un material geológico poroso o fracturado que favorece la infiltración.

3. *A partir de la zona saturada*

Este mecanismo es menos frecuente, pero es el que representa más peligro porque los vertidos se dan directamente sobre la zona saturada del acuífero. Tal es el caso de la utilización de pozos de inyección de agua con poca calidad directamente en acuífero, así como los procesos de intrusión salina en acuíferos costeros.

La contaminación de los recursos hídricos subterráneos ha sido un problema silencioso al que no se le ha dado la importancia que se requiere, adicionado a esto en nuestro país la mala gestión de los recursos hidráulicos y la falta de responsabilidad civil frente al apego de las leyes de veda ha impactado en la calidad y disponibilidad del agua subterránea en algunas partes del país (Cubas *et al.*, 2017).

Por otra parte, Foster *et al.* (2003) mencionan que los procesos de control y corrección de la contaminación en las aguas son muy complejos y costosos, por lo que la principal estrategia desde un principio debe ser el evitar el que estos problemas lleguen a ocurrir. Este autor y sus colaboradores plantean que el peligro de contaminación se da por la interacción de los siguientes planteamientos:

- a. La vulnerabilidad a la contaminación del acuífero como consecuencia de las características hidrogeológicas y de la zona no saturada.
- b. La carga contaminante como consecuencia de las actividades humanas.

Entonces si consideramos que de lo anterior solamente se tiene control sobre las cargas contaminantes, tendríamos que puede existir vulnerabilidad sin que exista un significativo peligro por las cargas contaminantes.

2.4 Vulnerabilidad de acuíferos

La vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero; ha sido utilizada por varios autores (Margat, 1968; Foster, 1987; Pérez y Pacheco, 2004; Ríos y Vélez, 2008; Árcega *et al.*, 2015; Machiwal *et al.*, 2018) para describir la susceptibilidad, el riesgo o la probabilidad de que un contaminante se filtre hacia el subsuelo, y la cual debe ser valorada en función de la

accesibilidad de la zona saturada y de la capacidad de atenuación que el medio posee (Foster e Hirata,1991), por lo que es una propiedad cualitativa que no puede ser medida en campo y que por el contrario es resultado de la combinación de varios factores.

Los autores antes mencionados distinguen dos tipos de vulnerabilidad:

1. La vulnerabilidad intrínseca está determinada por las características propias de los acuíferos, y es tomada como referencia para la posible propagación de cualquier contaminante derivado de las actividades antrópicas en cualquier entorno.
2. Por otro lado, la vulnerabilidad específica, representa el riesgo del acuífero frente a alguna sustancia o grupo de sustancias en específico. Algunos autores como Foster e Hirata (1991) concluyen que la evaluación de la vulnerabilidad debería hacerse en específico para cada actividad y para cada contaminante, puesto que en cada caso los contaminantes se comportan de manera diferente.

Desde que Margat (1968) acuñó el término de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, se despertó el interés por el estudio y el fomento de metodologías que buscan evaluar la vulnerabilidad de un acuífero con base en las características intrínsecas del medio.

Metodologías como DRASTIC, GOD y SINTACS, son ampliamente usadas en todo el mundo debido a la disponibilidad de la información que requieren y al mínimo esfuerzo que se le aplica, y por supuesto a los resultados que generan (Agüero y Pujol, 2000; Estrada *et al*, 2013). Generalmente, la combinación de estas metodologías con el uso de Sistemas de Información Geográfica, facilitan la evaluación de la vulnerabilidad aplicando cualquier modelo y lo más importante generan resultados cualitativos fácilmente interpretables (Díaz y Yory, 2008).

La evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero puede ser la solución a grandes problemas como la contaminación del agua subterránea, puesto que el mapeo y la generación de cartografía que permita zonificar las tierras con base a características homogéneas de susceptibilidad a la contaminación ayudara a establecer y gestionar el correcto establecimiento de actividades que representen algún tipo de riesgo (Foster e Hirata, 1991; Garfias *et al*, 2002; Ríos y Vélez, 2008).

2.5 La metodología DRASTIC

Tal como se mencionó anteriormente la existencia de diferentes métodos para evaluar la vulnerabilidad intrínseca, favorecen la utilización de la metodología que mejor se adapte a la disponibilidad de información. Tomando en cuenta lo anterior, para el presente estudio se consideró al método DRASTIC, por ser el más completo y el que mejor describe la situación real de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero (Pérez y Pacheco, 2004).

La metodología DRASTIC propuesta por Aller *et al* (1987) ha sido ampliamente usada para la elaboración de estudios de vulnerabilidad de acuíferos (Muheeb y Rasheed, 2010; Dávila-Pórcel, 2011; Torres *et al.*, 2014; Árcega *et al.*, 2015; Lathamani *et al.*, 2015.,) en distintas partes del mundo y en realidades completamente diferentes. La facilidad con la que se procesa la información y los resultados que arroja, hacen de DRASTIC uno de los métodos más prácticos y efectivos para la creación de mapas temáticos de vulnerabilidad haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica.

La idea central de este modelo consiste en determinar las características de siete parámetros físicos e hidrogeológicos que, al ser mapeados y combinados conforman los requisitos necesarios para evaluar la fragilidad o vulnerabilidad del acuífero frente a un agente contaminante en cualquier entorno.

D: Depth to water	Profundidad del nivel estático
R: Recharge	Recarga
A: Aquifer	Litología del acuífero.
S: Soil	Tipo de suelo.
T: Topography	Topografía.
I: Impact in the vadose zone	Naturaleza de la zona no saturada.
C: Hydraulic conductivity	Conductividad hidráulica

El mapeo y la combinación de cada uno de los parámetros dan origen al índice de vulnerabilidad DRASTIC (IVD):

$$IVD = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

- a. El método asigna a (**r**) valores de 1 a 10 indicando los valores de los rangos de cada parámetro.
- b. Así mismo, a (**w**) se le asignan pesos que van de 1 a 5 para cada uno de los siete parámetros, y reflejan el grado de influencia que ejerce sobre la fragilidad del acuífero, siendo 1 el menos significativo, y 5 los más significativos. Estos pesos serán constantes en la aplicación del modelo.

2.6 Variables de la metodología DRASTIC

2.6.1 (D) Profundidad al nivel estático

La distancia que existe entre la superficie del suelo y el nivel estático es uno de los factores que determina el tiempo en el que el agente contaminante llegara hasta la zona saturada.

Aller *et al.*, (1987) diseñó esta metodología para su aplicación en acuíferos con niveles freáticos muy cercanos a la superficie, sin embargo, si deseamos utilizarla para acuíferos de zonas áridas en donde la distancia a los niveles piezométricos es mayor, se tendría que hacer una clasificación acorde a la zona de estudio, y se deberían disminuir los valores de vulnerabilidad, tomando como principio que a mayor profundidad menor vulnerabilidad.

Tabla 1. Valores de asignación para factor D

Profundidad (m)	Valoración (Dr)
0 - 1.5	10
1.5 - 4.6	9
4.6 - 9.1	7
9.1 - 15.2	5
15.2 - 22.9	3
22.9 - 30.5	2
> 30.5	1

El hecho de que existan acuíferos con grandes profundidades hasta el nivel estático no elimina completamente el riesgo de que aun pueda existir contaminación puesto que el proceso puede llegar a darse (Árcega *et al.*, 2015). La profundidad es un factor muy importante a la hora de evaluar la vulnerabilidad de un acuífero, pero, no es el único, por lo que los demás factores también ejercen un determinado grado de influencia en los resultados.

2.6.2 (R) Recarga

El método considera que la principal fuente de recarga se da por la precipitación, en menor proporción puede haber otras fuentes como la excesiva irrigación en áreas agrícolas, pero ambas siguen el mismo principio de infiltración que empieza en la superficie del suelo y culmina en la zona saturada (Aller *et al.*, 1987).

Tabla 2. Valores de asignación para factor R

Recarga (mm)	Valoración Rr
0 - 20	1
20 - 40	3
40 - 70	6
70 - 100	8
> 100	9

2.6.3 (A) Litología del acuífero

El material litológico que compone el subsuelo afecta de manera directa el curso de un contaminante, la cantidad de porosidad primaria y porosidad secundaria (fracturas) determinara la capacidad de atenuación que posee el acuífero frente a la intrusión de sustancias.

El tipo de roca existente determina el sistema de flujo subterráneo, y por lo tanto la ruta y la longitud de la ruta que debe seguir el contaminante, siendo esta última la que determina el tiempo disponible para poder atenuarlo.

Tabla 3. Valores de asignación para factor A

Tipo de acuífero	Rango de clasificación Ar	Valor típico Ar
Lutita masiva	1 - 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 - 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 - 5	4
Till glacial	4 - 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 - 9	6
Arenisca masiva	4 - 9	6
Caliza masiva	4 - 9	6
Arena o grava	4 - 9	8
Basaltos	2 - 10	9
Caliza kárstica	9 - 10	10

2.6.4 (S) Tipo de suelo

Las características de la capa más superficial de la corteza determinan significativamente la proporción de agua que puede infiltrarse, influyen en el desplazamiento vertical y en los procesos de atenuación. La textura y el espesor del suelo influyen directamente en los procesos de contaminación por lixiviados, ya sea absorbiéndolos y fijándolos entre los primeros horizontes impidiendo su avance. La actividad microbiológica (bacterias principalmente) que existe en suelos orgánicos puede inmovilizar y desintegrar sustancias como fertilizantes, pesticidas y otros contaminantes (Baker *et al.*, s.f.; EPA, 2001).

Tabla 4. Valores de asignación para factor S

Tipo de suelo	Valoración Rr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Turba	8
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Marga arenosa	6
Marga	5
Marga limosa	4
Marga arcillosa	3
Suelo orgánico	2
Arcilla no expansiva y /o no agregada	1

2.6.5 (T) Topografía

Este parámetro determina el flujo de la escorrentía e influye en los patrones de infiltración.

La pendiente del terreno influye directamente en el flujo de cualquier líquido que sea vertido en la superficie del suelo, condicionando su flujo en las partes inclinadas o su respectivo estancamiento en áreas planas (Aller *et al.*, 1987).

Tabla 5. Valores de asignación para factor T

Pendiente (%)	Valoración Tr
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
>18	1

2.6.6 (I) Naturaleza de la zona no saturada

El impacto que genera la zona no saturada en la atenuación de contaminantes depende del tipo de material que la componga, aspectos como la existencia de capas o formaciones confinantes pueden limitar el avance e intrusión de sustancias.

Procesos como biodegradación, neutralización, filtración mecánica, reacción química, volatilización y dispersión, pueden ocurrir dentro de la zona no saturada atenuando el impacto de los contaminantes (Corona-Ramírez & Iturbe-Argüelles, 2004; González, 2006).

Cabe mencionar que procesos como la biodegradación, la absorción, y la volatilización de gases disminuyen conforme avanza la profundidad hasta la zona saturada.

Tabla 6. Valores de asignación para factor I

Tipo de medio	Rangos Ir	Valor típico Ir
Capa confinante	1	1
Limo - arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica/Ígnea	2 – 8	4
Arena y grava	6 – 9	8
Basalto	2 -10	9
Caliza kárstica	8 - 10	10

2.6.7 (C) Conductividad hidráulica del acuífero

Este parámetro indica la capacidad que tienen los materiales que conforman al acuífero para dejar pasar agua o mejor dicho transmitirla en cualquier dirección, también determina la velocidad a la que fluye el agua bajo un determinado gradiente hidráulico.

Dicha característica de los acuíferos está controlada por la proporción y la conexión que guardan los espacios vacíos, determinados por los niveles de porosidad granular y fracturamiento. Como consecuencia la conductividad hidráulica determinara la velocidad a la que los contaminantes fluyen y se disipan en el medio subterráneo. Acuíferos con altos valores de conductividad hidráulica serán altamente vulnerables porque permitirán que cualquier sustancia disuelta en sus aguas se propague rápidamente en todo el medio.

Tabla 7. Valores de asignación para factor C

Conductividad Hidráulica		Valoración Cr
(m/Día/)	(cm/s)	
0.04 - 4.08	$4.6 \times 10^{-5} - 4.7 \times 10^{-3}$	1
4.08 - 12.22	$4.7 \times 10^{-3} - 1.4 \times 10^{-2}$	2
12.22 - 28.55	$1.4 \times 10^{-2} - 3.4 \times 10^{-2}$	3
28.52 - 40.75	$3.4 \times 10^{-2} - 4.7 \times 10^{-2}$	6
40.75 - 81.49	$4.7 \times 10^{-2} - 9.5 \times 10^{-2}$	8
>81.49	$> 9.5 \times 10^{-2}$	10

2.6.8 Valores de ponderación para cada parámetro

DRASTIC es un modelo empírico creado por un conjunto de expertos, que aplicando un enfoque Delphi¹ dieron origen a una de las metodologías más completas, en la cual se asignan pesos a cada uno de los siete parámetros (Aller *et al.*, 1987).

El panel creador del método, a partir de los resultados de un enfoque Delphi realizado, contempló que los valores de ponderación (w) reflejan para cada parámetro el grado de significancia que ejerce en la estimación de la vulnerabilidad, son constantes y no pueden ser modificados para la aplicación del método. Los pesos relativos varían de 1 a 5, por lo que los factores más significativos tienen pesos de 5; y el menos significativo, un peso de 1.

Tabla 8. Valores de ponderación para cada parámetro del método DRASTIC

Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw
5	4	3	2	1	5	3

2.7 Limitaciones de DRASTIC

La principal limitación de la metodología empleada en esta investigación es que solo considera factores hidrogeológicos que influyen en el potencial de contaminación, no toma en cuenta la información propia de los posibles contaminantes para estimar la vulnerabilidad.

La zonificación de zonas vulnerables en el área de estudio no refleja la capacidad idónea de un sitio para el establecimiento de una actividad o uso del suelo, puede usarse como criterio para tomar decisiones.

¹Técnica de desarrollo metodológico sistemático e interactivo para una predicción basada en un panel de expertos.

2.8 Antecedentes de la zona de estudio

El 7 de febrero de 1952 se decretó el estado de veda para el alumbramiento de aguas subterráneas en los terrenos de la ciudad de Saltillo, abarcando la porción este del acuífero en estudio. No fue hasta el 25 de abril de 1979 en que se decretó el estado de veda para la porción oeste y se declaró de interés público la conservación de los recursos hídricos en dicha zona (DOF, 2011).

La disponibilidad media anual del acuífero Cañón de Derramadero se encuentra publicada en el diario oficial de la federación o en las actualizaciones que emite directamente la CONAGUA, sin embargo, la información de déficits especificados por el diario oficial no refleja lo que sucede realmente, puesto que los volúmenes de agua comprometidos no contemplan los volúmenes de agua extraídos por la empresa Aguas de Saltillo, por lo que los datos reales de los déficits son más elevados y aún más alarmantes (DOF, 2011).

La **Figura 4** muestra la evolución de déficits estimados a partir del año 2003, década en la que empezó a cobrar importancia la delimitación de acuíferos y la estimación de disponibilidades medias anuales.

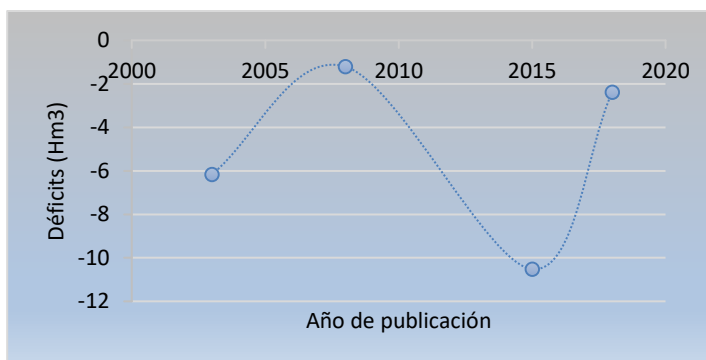


Figura 4. Evolución de los déficits del acuífero

Sin embargo, tal como se mencionó anteriormente estos déficits no contemplan el impacto de los recursos extraídos por Aguas de Saltillo, ya que sus aprovechamientos no se encuentran inscritos en el registro público de derechos de agua, manejados por de la Comisión Nacional del Agua.

Por disposición oficial la CONAGUA tiene la obligación de actualizar las cifras del balance de aguas de cada acuífero, en periodos de cada tres años, esto con el fin de adoptar medidas y regular los aprovechamientos del recurso, principalmente evitando otorgar más concesiones de aprovechamientos o de aumentos en la capacidad de extracción.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

3.1.1 Localización

El acuífero Cañón del Derramadero se ubica en la porción sureste del Estado de Coahuila (**Figura 5**) entre las coordenadas 25°05'00" y 25°21'30" de latitud norte y entre los meridianos 100°53' y 101°26' de longitud oeste (CONAGUA, 2015).

Cubre una superficie total de 954.725 km², que prácticamente está en su totalidad en el municipio de Saltillo y solo una mínima parte en el municipio General Cepeda.

Según el DOF (2011) en el área de influencia existen cerca de 6,437 habitantes, y las principales localidades son Agua Nueva, San Juan de la Vaquería y El Derramadero, ubicadas en el Municipio de Saltillo.

3.1.2 Características físicas

3.1.2.1 Provincias fisiográficas

De acuerdo con la carta de subprovincias fisiográficas Serie I publicada por INEGI (2001) el 70 % de la superficie pertenece a la provincia de los Pliegues de Saltillo-Parras, la cual se caracteriza por un conjunto de bajadas y valles orientados de este a oeste, formados en su mayoría por depósitos sedimentarios aluviales y coluviales sobre los cuales se establecieron los principales usos de suelo y las zonas urbanas.

Un 21 % de la superficie se ubica dentro de la provincia de la gran Sierra Plegada, se ubica al este del acuífero (sur de Saltillo), dominada principalmente por estratos plegados de calizas, con prominentes estructuras anticlinales y sinclinales (INEGI, 1983). En esta parte del acuífero se llevan a cabo los procesos más importantes de recarga.

Una mínima porción al sur del acuífero pertenece a la provincia de las sierras transversales dominada por topofomas anticlinales con menor elevación que las de la gran sierra plegada.

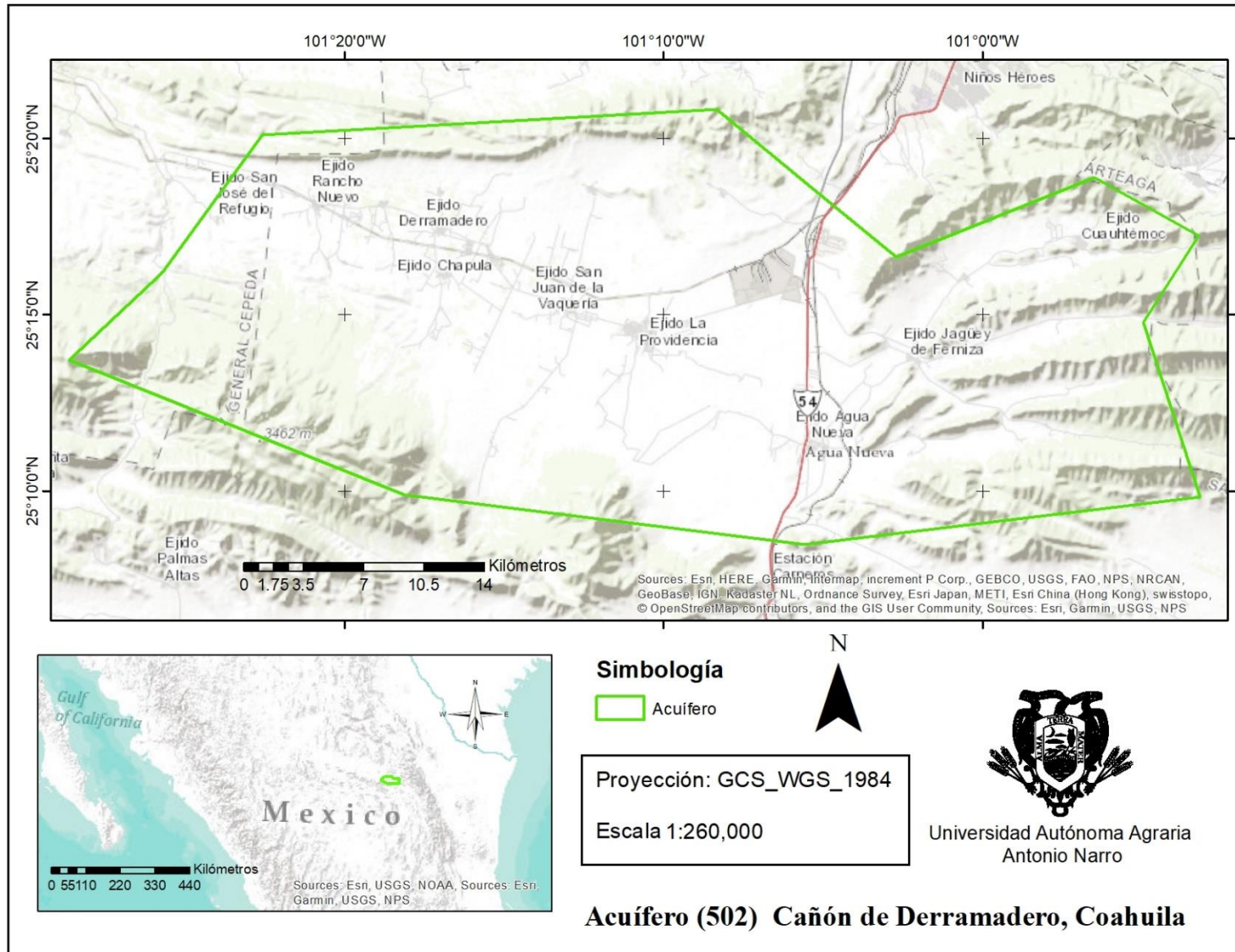


Figura 5. Localización del área de estudio

3.1.2.2 Clima

De acuerdo con García-CONABIO (1998) se puede clasificar al área de estudio en dos subtipos de clima árido:

BS1kw semiárido templado, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias de verano y con un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual

BSohw árido semicálido, con temperatura entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias de verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

De acuerdo con información de la estación meteorológica 5145 dispuesta en San Juan de la Vaquería se tiene una precipitación media anual de 435.9 mm, sin embargo, en la porción este del acuífero cerca de la estación 5146 de Huachichil se reportan hasta 756.1 mm anuales representando el área con los niveles de humedad más altos en la zona de estudio.

Las siguientes graficas presentan los valores medios mensuales de las precipitaciones y temperaturas registradas en la región, se puede apreciar el periodo con mayor humedad ubicado entre los meses de mayo a septiembre, con pocos eventos de lluvia, pero muy intensos.

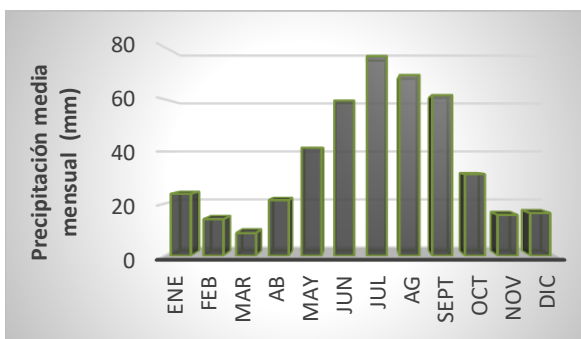


Figura 6. Precipitación media mensual
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN

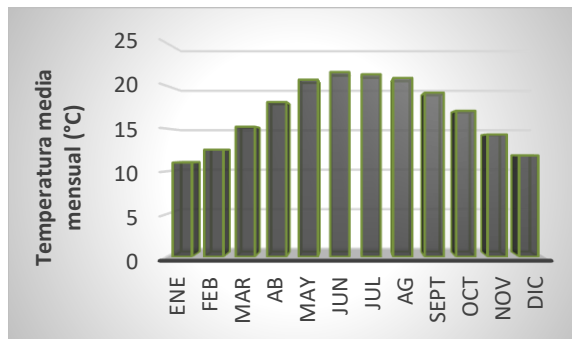


Figura 7. Temperatura media mensual
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN

A diferencia de otras partes de la entidad, en esta región se suelen encontrar temperaturas que oscilan generalmente entre los 11°C y 23°C, y con los periodos más calientes entre los meses de abril a septiembre.

3.1.2.3 Hidrogeología

3.1.2.3.1 Balance de aguas

El 4 de enero de 2018 el diario oficial de la federación emitió los balances de agua subterránea especificando la situación hídrica de los 653 acuíferos delimitados en todo el país. La siguiente tabla especifica los datos del balance de aguas más reciente para el acuífero en estudio.

Tabla 9. Balance de aguas del acuífero

Clave	Acuífero	R	DNC	VEAS	Excedente	Déficit
0502	Cañón del derramadero	32	5.1	28.9	0	-2.3822

Fuente: DOF (04/01/2018)

La recarga total media anual (R) en este acuífero está determinada por la precipitación, la infiltración directa de los escasos cuerpos de agua y principalmente por los retornos de riego que representan gran parte de la infiltración ocurrida en la zona del valle. CONAGUA (2015) menciona que, a pesar de ser un uso consuntivo, alrededor del 20 % del agua destinada al riego de superficies agrícolas, retorna al subsuelo contribuyendo a la recuperación del acuífero.

Las descargas naturales comprometidas (DNC) contemplan los volúmenes de agua concesionados por los manantiales y por caudales base de ríos o arroyos. No obstante, Lesser (2004) menciona que el abatimiento de los niveles estáticos ha reducido la existencia de manantiales en el acuífero, por lo que las descargas naturales que ascienden a los 5.1 Hm³ anuales tienen que ver más con el flujo subterráneo que se da con dirección hacia el acuífero de General Cepeda -Sauceda.

Los volúmenes de extracción de aguas subterráneas (VEAS) contemplan los gastos inscritos en el registro público de derechos de agua (RPDA). Sin embargo, autores como; Cubas *et al.*, (2017) mencionan que el sistema del RPDA es insuficiente para asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos, pues la falta de monitoreo en los aprovechamientos de agua, así como su actualización y aunado a la irresponsabilidad de los civiles frente al apego de las leyes de veda han dado origen a problemas en la falta de generación de agua excedente que permitiría reducir los déficits. Los déficits en este acuífero indican la falta de disponibilidad media anual de agua, y la necesidad de no otorgar nuevas concesiones.

3.1.2.3.2 Formaciones geológicas

El acuífero se caracteriza por tener una evolución de depósitos no consolidados en la parte baja dominados principalmente por rocas de aluvión, sobre las cuales se ha formado un estrato superficial o suelo que ha permitido el desarrollo de actividades como la agricultura de temporal e irrigada y el pastoreo. Conforme aumenta el gradiente de altitud se encuentran secuencias de roca lutita-arenisca, conglomerados y por último en las partes más altas el suelo es ausente o muy somero y se pueden observar los afloramientos de roca caliza como unidad cronoestratigráfica (INEGI, 1988). La mayor parte de las rocas existentes corresponden a sedimentos marinos que han quedado al descubierto y que por efecto de la erosión ahora se pueden observar como afloramientos.

En la siguiente tabla se observan las formaciones geológicas y los periodos en las que los ubica el Servicio Geológico Mexicano.

Tabla 10. Formaciones geológicas

		Formaciones	Litología	Superficie (km²)	Superficie (%)
Periodos	Jurásico	La Caja	Limolita-Caliza	3.43	0.36
		La Casita	Lutita-Arenisca	1.31	0.14
		La Gloria	Caliza-Arenisca	0.11	0.01
		Zuloaga	Caliza	7.83	0.82
	Cretácico	El Muerto	Arenisca-Lutita	3.65	0.38
		Cuesta del Cura	Caliza-Pedernal	8.92	0.93
		Taraises	Caliza-Lutita	14.45	1.51
		Caracol	Arenisca-Lutita	14.67	1.54
		Indidura	Caliza-Limolita	15.69	1.64
		La peña	Caliza-Lutita	22.52	2.36
		Aurora	Caliza-Dolomita	48.98	5.13
		Parras	Lutita-Arenisca	62.78	6.58
		Cerro del Pueblo-Las Encinas	Arenisca-Lutita	87.06	9.12
		Cupido	Caliza	142.17	14.89
	Cuaternario	Depósitos recientes	Aluvial-Coluvial	520.31	54.50
Conglomerados			0.84	0.09	
				954.72	100

Fuente: Carta geológico-minera G14-7 – Monterrey, Escala 1:250000 (SGM, 2000)

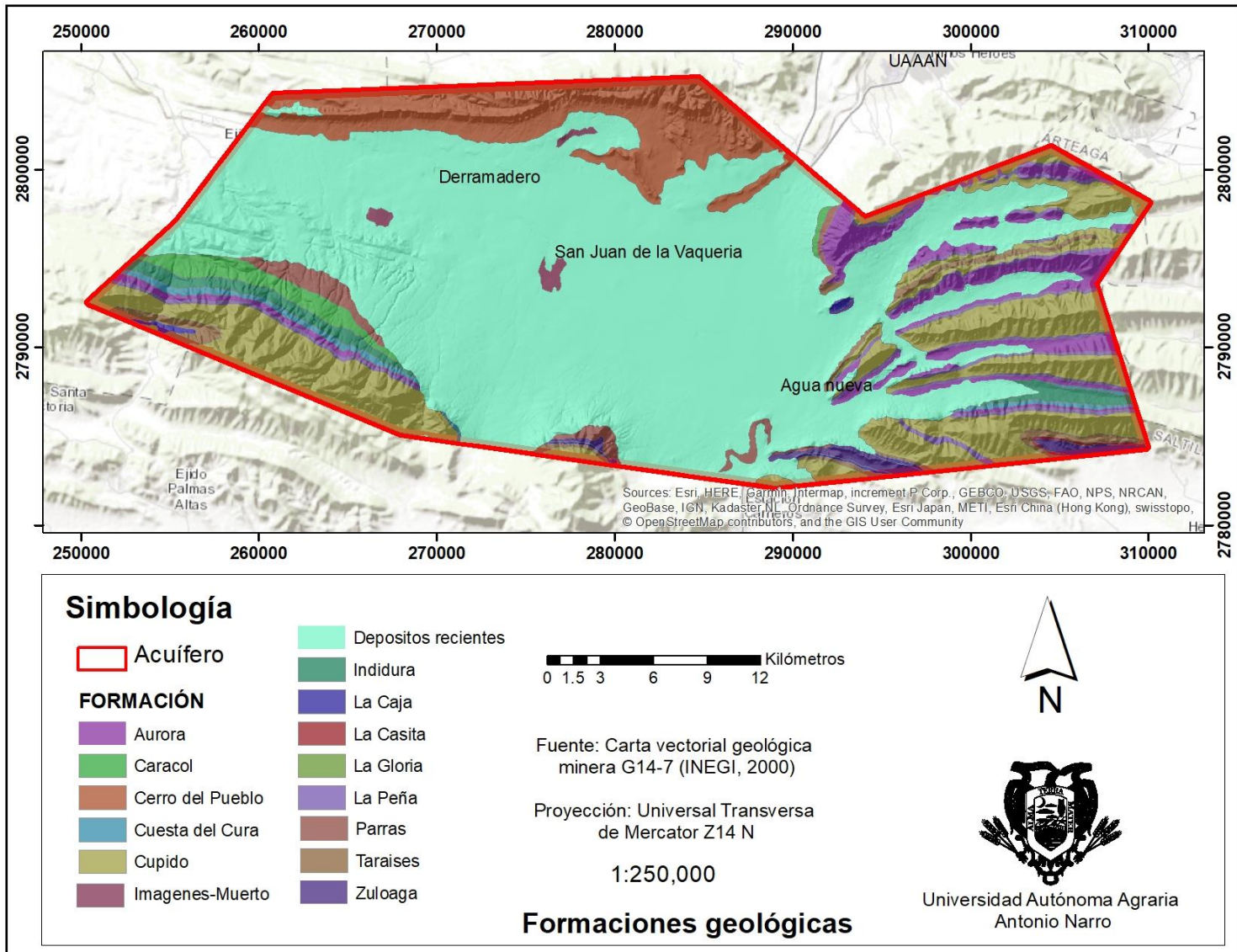


Figura 8. Formaciones geológicas del acuífero

3.1.2.3.3 Zonas hidrogeológicas

Lesser (2005) clasifica al acuífero en dos zonas (**Figura 9**) con base a las características hidrogeológicas de las rocas y a su disposición, la primera corresponde a la “porción del acuífero localizado en el valle” compuesta principalmente por lutitas y areniscas de la Formación Parras y en la cual se ha observado tener un espesor de alrededor de 600 metros sin llegar a la base. Presenta permeabilidad por fracturas en los primeros horizontes, sin embargo, es de bajo rendimiento (pozos que rinden de 5-9 litros por segundo (lps)) debido a la anisotropía vertical y horizontal.

La otra parte del acuífero denominada “porción del acuífero conformada por calizas” se sitúa en la parte alta, alojada sobre gruesos bancos de rocas calizas, las cuales fungen como la principal zona de recarga, puesto que el agua de lluvia se infiltra y circula a través de las fracturas y cavidades formadas por la disolución de la roca. Es la zona con mayor permeabilidad, y con los pozos de mayor rendimiento del acuífero, así mismo contribuye a la recarga y alimentación del acuífero establecido en el valle.

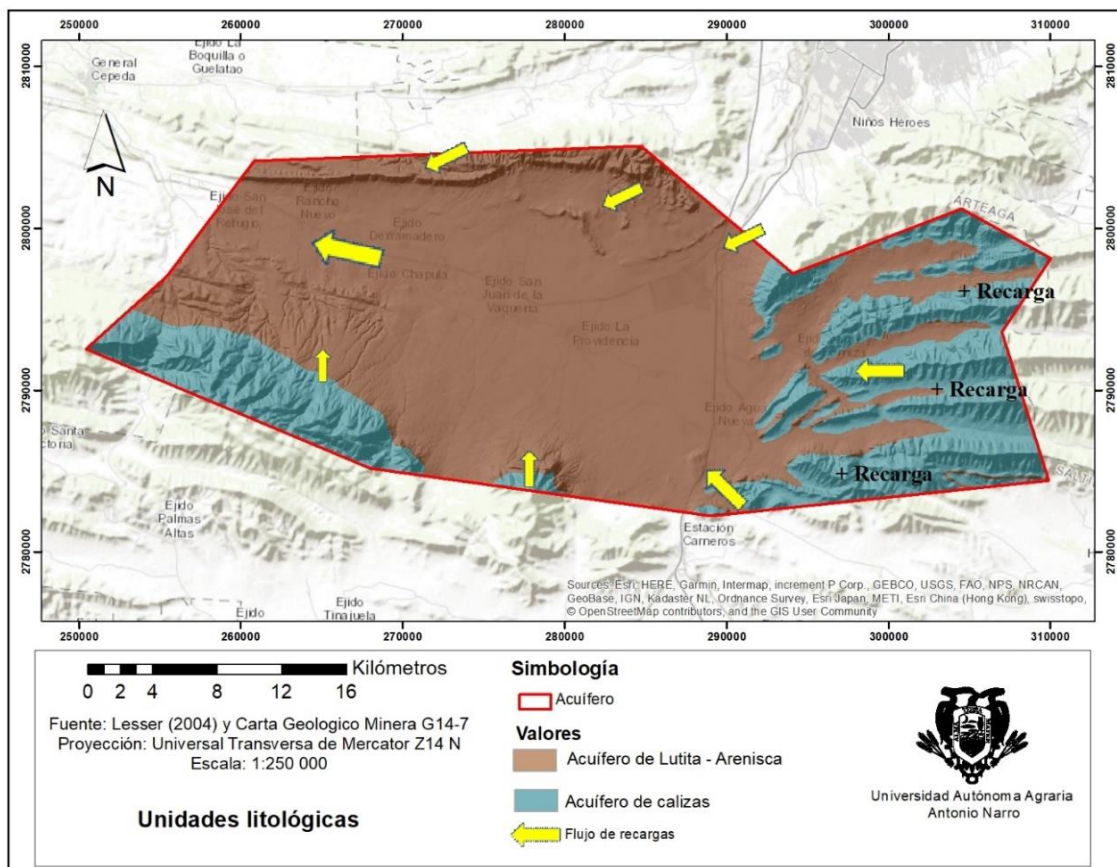


Figura 9. Zonas hidrogeológicas

3.1.2.3.4 Piezometría

De acuerdo con el monitoreo de la red piezométrica realizado por la Comisión Nacional del Agua en el 2017 se observaron valores mínimos de hasta 16 metros en la zona más baja del acuífero (noroeste), sin embargo, la profundidad aumenta conforme aumenta el gradiente de altitud, alcanzando los 70 metros, un caso aislado se encuentra cerca del poblado de Agua Nueva en donde se registran profundidades de hasta 112,128 y 167 metros.

De acuerdo con Lesser (2004) el acuífero del valle; zona en donde están los aprovechamientos, posee diferente comportamiento en el abatimiento de los niveles piezométricos, por lo que se puede clasificar en dos grandes zonas; la zona del poniente (Derramadero) considera abatimientos de 0.5 m/año, debido a la baja conductividad hidráulica y a los consecuentes bajos rendimientos de los pozos. Los bajos rendimientos (5-9 lps) en esta parte del acuífero, han minimizado los efectos de la sobreexplotación de agua extraída para satisfacer la demanda de la agricultura de riego y el uso público.

En la zona del valle ubicada al oriente (por el Parque industrial) casi al pie de las partes altas, la permeabilidad aumenta gradualmente y se tienen pozos con rendimientos medios (1-36 lps), los cuales han generado abatimientos que rondan los 1.5 m/año. Sin embargo, los mejores rendimientos (entre 25 y 57 lps) por pozo se encuentran en los aprovechamientos realizados en los flancos de las sierras con formaciones calizas, localizadas al sur y sureste del acuífero.

Los pequeños anticlinales que afloran al norte y centro oeste del acuífero no tienen potencial para el aprovechamiento debido a su litología conformada por lutitas y areniscas.

La **Tabla 11** presenta la información más actualizada sobre las profundidades a las que se encuentra el nivel freático del acuífero, cabe mencionar que los monitoreos solamente corresponden a las partes del valle y submontañas, puesto que son las zonas en donde se concentran la mayoría de los aprovechamientos.

Tabla 11. Monitoreo piezométrico en 2017

Nombre del Pozo	Longitud	Latitud	Profundidad al N.E. (m)
DE-258	-101.388333	25.3141667	16.13
DE-279	-101.403056	25.3147222	21.63
DE-217	-101.310833	25.2902778	22.12
DE-43	-101.193056	25.2286111	22.44
DE-152	-101.268333	25.2761111	26.3
DE-23	-101.113056	25.1791667	26.36
DE-185	-101.228056	25.2719444	27.12
DE-164	-101.214722	25.2625	27.42
DE-116	-101.2625	25.2527778	28.15
DE-52	-101.171389	25.2369444	29.07
DE-146	-101.251111	25.2633333	30.41
DE-193	-101.288889	25.2886111	30.9
DE-49	-101.195833	25.2447222	32.48
DE-64	-101.161111	25.2519444	34.03
DE-47	-101.205833	25.2597222	34.24
DE-12	-101.09	25.1719444	36.42
DE-71	-101.211111	25.28	37.23
DE-171	-101.283889	25.2694444	38.11
DE-77	-101.270833	25.225	39.46
DE-255	-101.307778	25.305	43.1
DE-277	-101.398333	25.295	43.7
DE-3	-101.133611	25.2141667	44.07
DE-114	-101.256389	25.2408333	45.26
DE-35	-101.105556	25.2494444	66.95
DE-36	-101.106944	25.2258333	70.12
DE-30	-101.098639	25.2116389	112.42
DE-8	-101.074444	25.1844444	128.42
DE-129	-101.066389	25.1922222	167.2

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por CONAGUA

3.1.2.3.5 Calidad del agua en el acuífero

En México la NOM-127-SSA1-1994 de observancia general, especifica los límites permisibles de calidad y los tratamientos a los que se debe someter el agua para su potabilización y consumo público.

CONAGUA (2015) menciona que en cinco pozos del acuífero se presentaron concentraciones de nitratos entre 10.8 y 26.8 mg/l, superando la cantidad de 10 mg/l que establece la norma. Así mismo en el pozo registrado como De-341 se encontraron valores de 241 y 194 mg/l de calcio y magnesio, superando los permisibles de 200 y 150 mg/l propuestos por la OMS.

Para los sólidos disueltos totales, clasificados por la Agencia de Protección Ambiental de los EU (USEPA) como contaminantes secundarios (Singer y Bauder, s.f), la norma antes mencionada establece que la suma total no debe exceder los 1000 mg/l, sin embargo, en las partes más bajas los monitoreos arrojan altos valores de sólidos disueltos superando los límites permisibles (**Figura 10**).

Lo anterior se debe a que gran parte de los materiales carbonatados que conforman las partes altas son lixiviados y arrastrados por la infiltración hasta los espesores inferiores obedeciendo al flujo del agua que se da con dirección sureste a norte y luego al noreste, acumulándose así en la porción del valle (CONAGUA, 2015).

Davis y De Wiest (1971) mencionan que una de las formas más prácticas para clasificar las aguas es la que se realiza con base en las cantidades de sólidos totales disueltos (**Tabla 12**).

Tabla 12. Tipos de agua según la concentración de Sólidos Totales Disueltos

Clasificación	Concentración de STD (mg/l)
Agua dulce	0 – 1000
Agua salobre	1000 – 10 000
Agua salada	10 000 – 100 000

Fuente: Tomado de Davis y De Wiest (1971)

Tomando en cuenta la clasificación anterior, tendríamos que tal como se observa en la **Figura 10** los valores inferiores a 1000 mg/l, que representan al agua dulce se distribuyen desde el centro del acuífero hasta el sur y sureste del mismo, representando las áreas en donde el agua potable es de mejor calidad. Los valores que superan los 1000 mg/l corresponden al agua salobre y se distribuyen en su mayoría en la porción noroeste.

Así mismo, en el mapa se percibe que algo inusual ocurre en la porción sureste cerca del poblado de Agua Nueva, pues se observan valores que van desde los 392 a los 3099. Esto podría guardar relación con las profundidades desde las que se extrae el agua, pues en esta zona los niveles piezométricos son los más profundos registrados, alcanzando cerca de los 170 metros, y lo más importante es que se encuentra al pie de los acuíferos calizos.

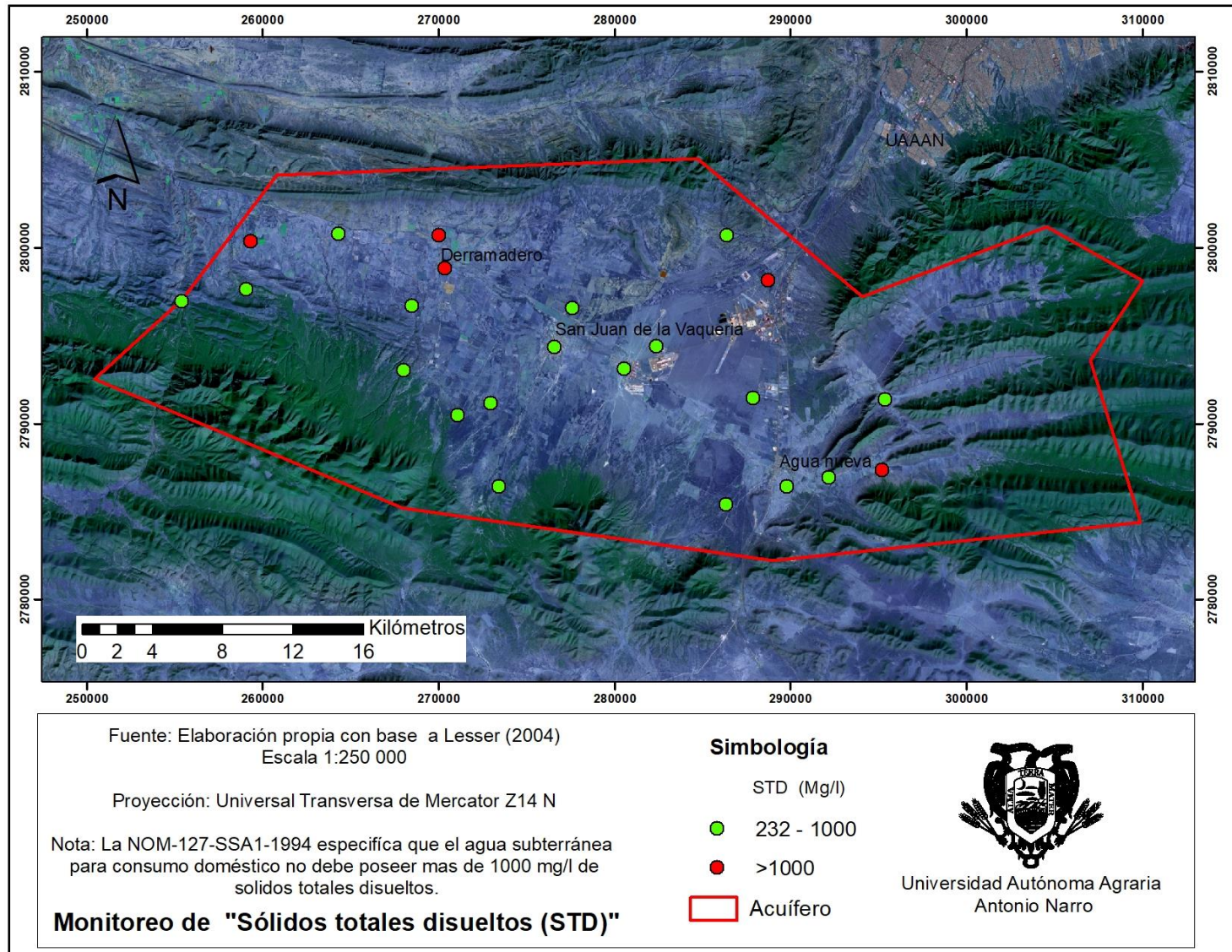


Figura 10. Concentración de Solidos Totales Disueltos

3.1.2.3.5.1 Normas Riverside de calidad del agua para actividades agrícolas

La calidad del agua para su uso en actividades agrícolas está determinada principalmente por los tipos y concentración de sales, por lo que su clasificación parte del reconocimiento de sus propiedades y del posterior efecto que estas tendrán sobre los cultivos sobre los cuales será utilizada (Cantú-Medina *et al.*, 2018).

La carta de aguas subterráneas G14-7 publicada por INEGI (1980) incluye las normas Riverside como un índice de calidad para la caracterización del agua apta para irrigación de zonas agrícolas. Para la región del acuífero se pueden apreciar los siguientes tres tipos de calidad del agua (**Figura 11**):

- Los tipos de agua C2-S1 se definen como aguas de salinidad media y bajas en contenido de sodio, haciéndolas aptas para riego.
- Los tipos de agua C3- S1 se caracterizan por su salinidad alta y bajo contenido en sodio, por lo que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, aunque se deben emplear volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y solo en cultivos muy tolerantes a la salinidad.
- Los tipos de agua C4-S1 son aguas de salinidad muy alta y con bajo sodio, en muchos casos no es apta para el riego, pues sólo puede aplicarse sobre suelos muy permeables y con buen drenaje, así mismo se deben incluir grandes volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo para evitar su acumulación y solo en cultivos muy tolerantes a la salinidad.

De acuerdo con la clasificación anterior se puede deducir que las aguas utilizadas tienen bajo contenido en sodio, por lo que no contribuyen a la modificación de la estructura física del suelo, pues su acumulación sustancial en el suelo satura los espacios vacíos y reduce la aireación (Filho *et al.*, 2003). En contraste, la alta salinidad de estas aguas restringe mucho las actividades agrícolas, pues estas características podrían propiciar en los cultivos un estrés salino que reduce su desarrollo vegetativo y por consiguiente su producción (Garsaball *et al.*, 2007). No obstante, al no existir otras fuentes de abastecimiento se tienen que utilizar estas aguas, por lo que, conociendo las características edáficas y aunado a los grandes volúmenes utilizados se puede deducir que en algunas partes se está dando un proceso acumulativo de sales.

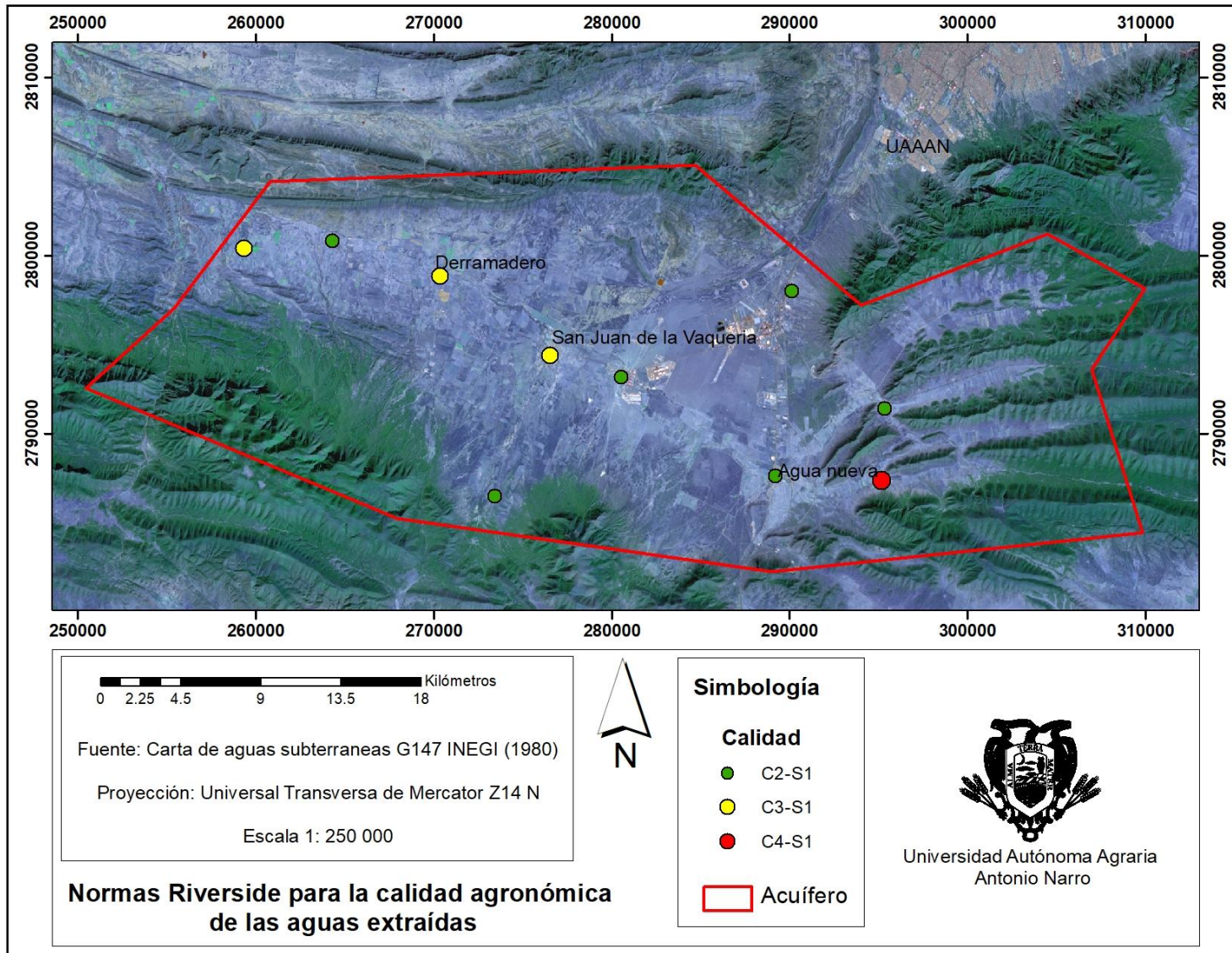


Figura 11. Calidad agronómica de las aguas con las Normas Riverside

3.1.2.4 Edafología

La carta edafológica nacional serie II publicada por el INEGI (2006) describe que la mayor parte de la superficie está dominada por suelos ausentes o muy someros del grupo leptosol en las partes más altas del acuífero, asociados a vegetación del matorral desértico.

Por otra parte, la mayor parte del valle está dominado por suelos más fértiles y desarrollados como: los kastañozem y phaeozem; utilizados principalmente para el establecimiento de cultivos agrícolas temporales y de riego permanente.

Una superficie considerable se encuentra ocupada por grupos de calcisoles: fértiles y productivos cuando son irrigados, asociados a vegetación tolerante a la sequía y a los altos niveles de calcio. Vegetación y cultivos de gramíneas, suelen ser los usos principales, además de que, este tipo de suelos es uno de los mejores para la producción de la mejor calidad de uva, pues los carbonatos de calcio y la falta de agua favorecen la concentración de azúcares en el fruto.

Una mínima porción se encuentra dominada por suelos regosoles, asociados a leptosoles y a vegetación de matorral, desarrollados sobre materiales coluviales depositados en altitudes intermedias del acuífero.

La **Figura 12** especifica la distribución y superficies que cubren los principales tipos de suelos en la zona de estudio.

3.1.2.5 Hidrología

La zona del acuífero se ubica dentro de la Región Hidrológica No. 24 denominada Bravo-Conchos, cuenca hidrológica Río Bravo - San Juan (CNA, 1998).

En la región del valle solo existen corrientes intermitentes o efímeras que se registran tras un evento de lluvia, circulan con dirección al noroeste puesto que aquí se encuentra la zona más baja. Tales escurrimientos son de poca magnitud, aunque por la fragilidad del suelo contribuyen a los procesos erosivos.

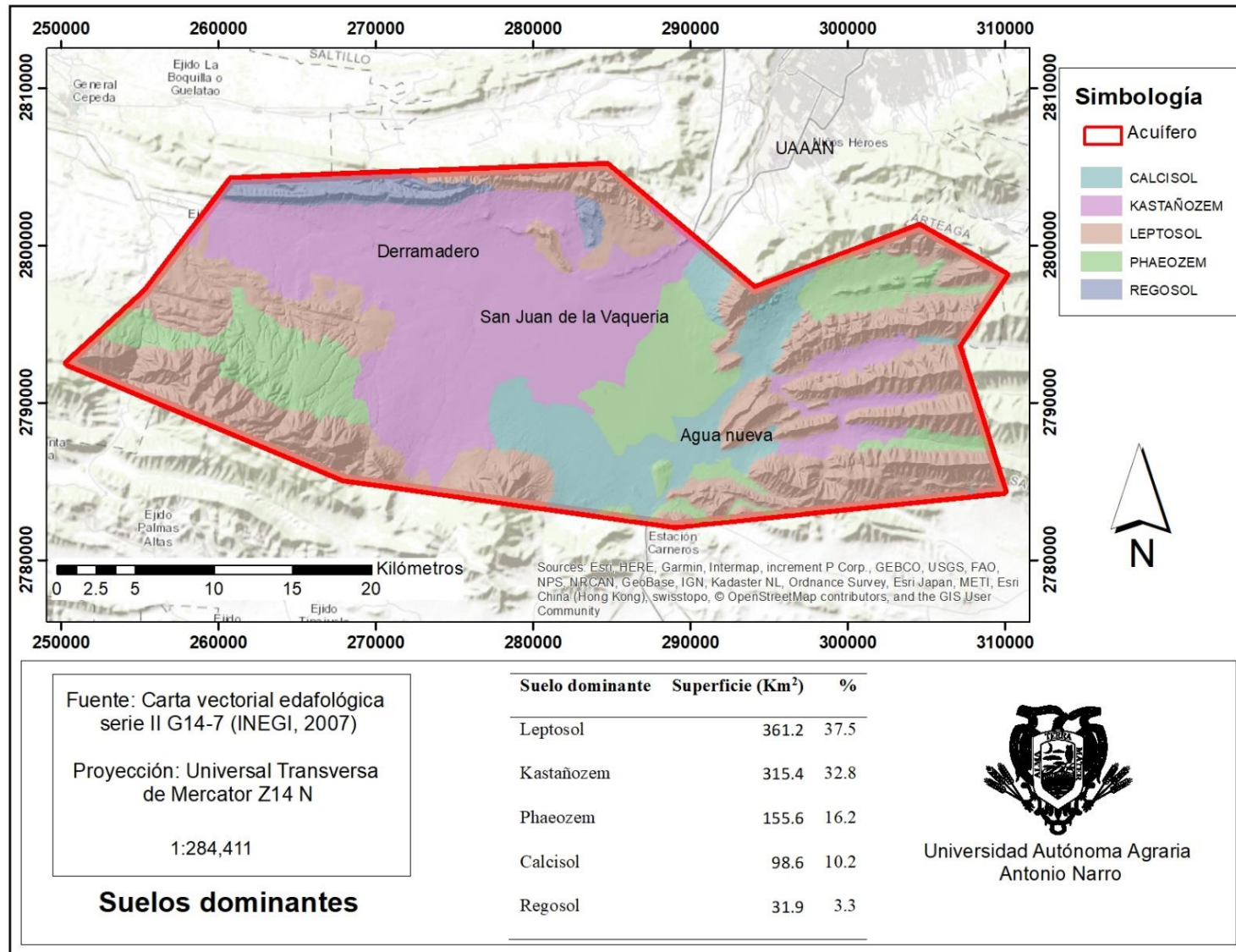


Figura 12. Edafología del acuífero

3.1.3 Características biológicas

3.1.3.1 Vegetación

De acuerdo con la carta de uso de suelo y vegetación serie VI, los principales tipos de vegetación corresponden al bosque de pino en las partes altas de la región, seguido de la vegetación de matorral desértico micrófilo y rosetófilo, así como vegetación arbustiva secundaria del bosque de pino, y una porción de pastizal en el valle (**Figura 13**).

Así mismo el principal uso del suelo que se da tiene fines agrícolas para cultivos temporales anuales y cultivos de riego, que de manera conjunta tienen sometido a la mayor parte del valle.

La siguiente tabla presenta la distribución de superficies por uso de suelo y tipo de vegetación existente en el acuífero, aspectos muy importantes a considerar para evaluar el impacto de las actividades antropogénicas en la calidad del agua subterránea.

Tabla 13. Usos de suelo y tipos de vegetación

Uso del suelo y vegetación	Superficie (Km ²)	%
Agricultura de temporal anual	249.54	26.14
Bosque de pino	180.84	18.94
Matorral desértico micrófilo	168.17	17.61
Matorral desértico rosetófilo	91.54	9.59
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	67.10	7.03
Pastizal inducido	49.08	5.14
Pastizal natural	40.02	4.19
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de Ayarín	33.80	3.54
Bosque de Ayarín	20.52	2.15
Agricultura de riego anual y permanente	18.98	1.99
Agricultura de riego anual	15.89	1.66
Urbano construido	11.53	1.21
Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo	3.30	0.35
Agricultura de riego permanente	2.77	0.29
Chaparral	1.60	0.17
Cuerpos de agua	0.12	0.01
Total	954.78	100.0

Fuente: Usos de suelo y vegetación (INEGI, 2017)

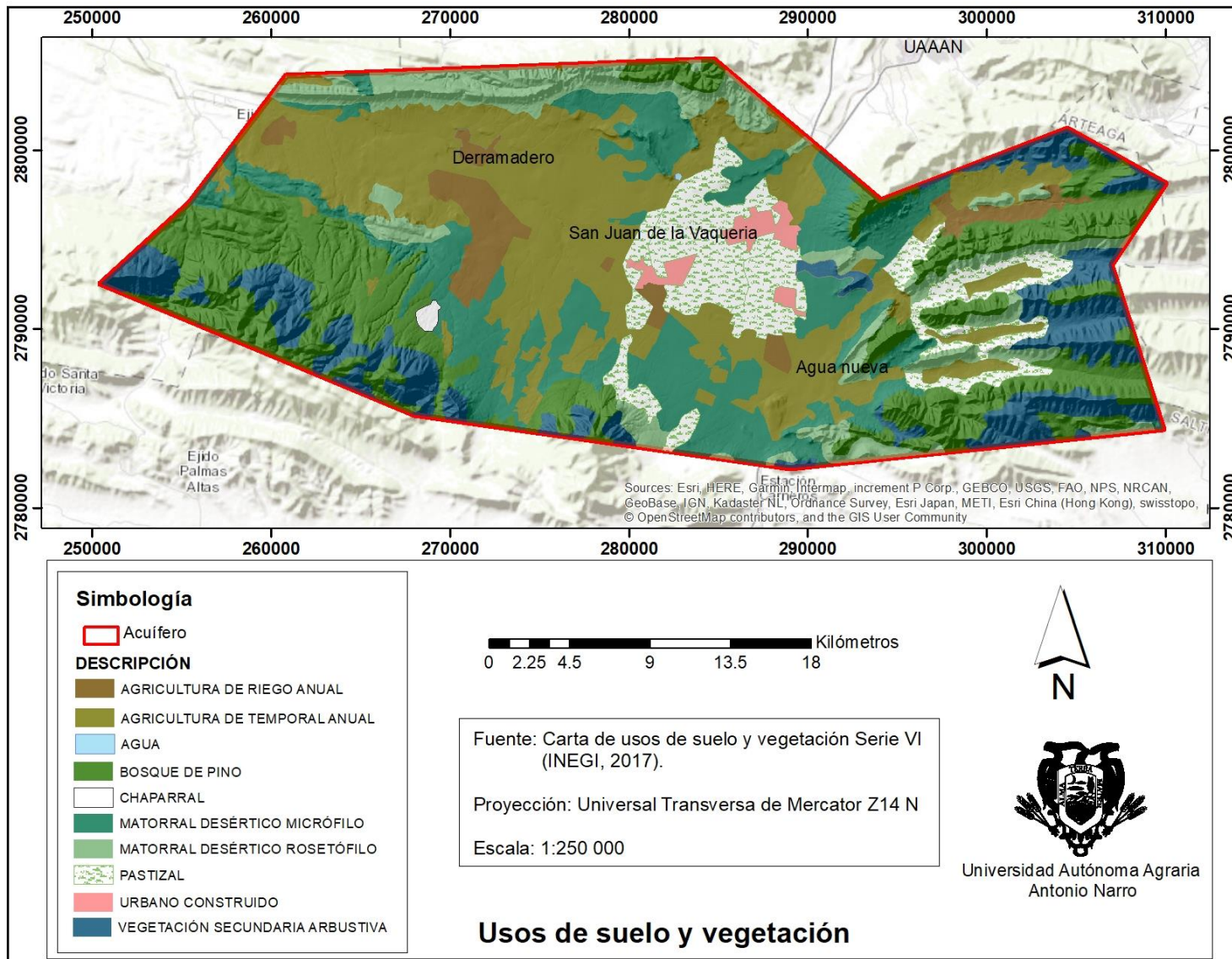


Figura 13. Usos de suelo y vegetación

3.2 Cálculo del Índice de vulnerabilidad DRASTIC

La metodología DRASTIC antes descrita requiere información precisa, pero que puede estar disponible en distintas fuentes y formas.

La recopilación y el procesado de la información vectorial utilizada se realizó utilizando el software ArcMap de ©ArcGIS 10.3, así como para realizar los cortes de información vectorial, reclasificaciones, rasterización y la aplicación del modelo en el álgebra de mapas.

Para la obtención y procesado de los parámetros de DRASTIC, se clasificaron los cortes de la información vectorial según los valores propuestos por Aller *et al* (1987) y posteriormente se rasterizaron.

3.2.1 Obtención del factor D (Profundidad al nivel estático)

Originalmente Aller *et al* (1986) propuso este factor para acuíferos con profundidades al nivel estático menores a 30 metros, por lo tanto, autores como Árcega *et al.*, (2015) han optado por reducir los valores (Dr) en la vulnerabilidad para acuíferos en donde el nivel estático supera los 100 metros de profundidad.

Tomando en cuenta lo anterior, la imagen ráster de la profundidad al nivel estático (**Figura 14**) se generó a partir de una interpolación realizada en ArcMap mediante el método de análisis geoestadístico Co-Kriging, utilizando datos puntuales derivados del monitoreo piezométrico que realizó la Comisión Nacional del Agua en el 2017 (**Tabla 11**) y utilizando la altitud como covariable para mejorar la predicción.

Puesto que las profundidades al nivel freático superan los 30 metros, se agruparon y reclasificaron los valores del ráster, usando los valores asignados en la Tabla 14 en la cual se redujeron los valores (Dr), fluctuando entre 1 a 5, para los menos y más vulnerables.

Tabla 14. Valores utilizados para factor D

Profundidad (m)	Valoración (Dr)
20 - 40	5
40 - 60	4
60 - 80	3
80 - 100	2
>100	1

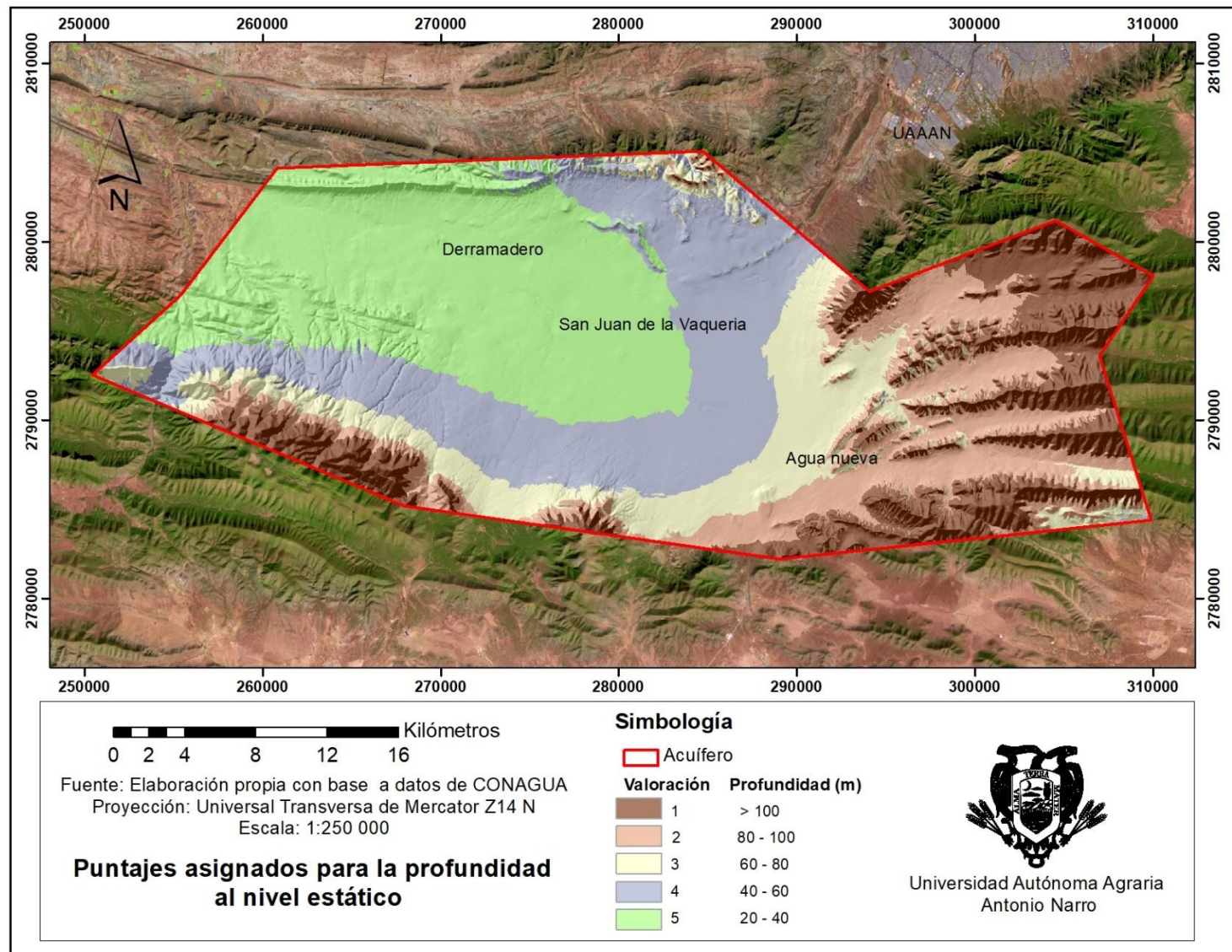


Figura 14. Valores asignados a los distintos rangos de profundidad al nivel estático

3.2.2 Obtención del factor R (Infiltración estimada)

La recarga o tasas de infiltración fueron estimadas a partir de la aplicación del método del balance hidrológico en la superficie del acuífero, a partir de una recopilación de información meteorológica de 10 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional.

En el ámbito de la hidrología este principio establece que, para cualquier cantidad de volumen de agua precipitado en un periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas del sistema estará condicionado por la variación del volumen de agua almacenada (Instituto de Hidrología de España y UNESCO, 1981).

La fórmula general utilizada es la siguiente:

$$P = E_{tr} + E_{sc} + I$$

Dónde:

- (P) es la precipitación total que cae en forma de lluvia durante un periodo específico.
- (ETR) es la evapotranspiración real o pérdida de agua por evaporación directa o por transpiración vegetal
- (Esc) es el escurrimiento superficial del acuífero
- (I) es la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y se incorpora a los depósitos subterráneos.

3.2.2.1 Recopilación de información meteorológica

La información de precipitación y temperaturas se tomó de las estaciones meteorológicas ubicadas en la región, las cuales han reportado datos promedios al Servicio Meteorológico Nacional durante el periodo de 1981 al 2010, se realizó una interpolación de los datos con el método de análisis geoestadístico Kriging, mencionado por Izquierdo y Márquez (2006) como una de las técnicas con mejores resultados para la interpolación de precipitación.

3.2.2.2 Cálculo de la evapotranspiración real

La evapotranspiración real se estimó a partir de la aplicación de la ecuación de Turc, obtenida a partir de la observación en 254 cuencas distribuidas en los diferentes climas del mundo (Custodio y Llamas, 2001; Pereyra *et al*, 2011), cabe destacar que esta ecuación es

ampliamente usada por la CONAGUA cuando desea calcular las pérdidas medias anuales de humedad por evaporación y transpiración de la vegetación.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25(T) + 0.05 (T^3)$$

Dónde:

P = Precipitación media anual (mm)

T = Temperatura media anual en °C

L = Constante de la fórmula

3.2.2.3 Cálculo del escurrimiento medio anual

Por el hecho de que en la NOM-011-CONAGUA no existen coeficientes de escurrimiento para cada tipo de vegetación y uso del suelo presentes en el acuífero, fue necesario utilizar un coeficiente presentado por Custodio y Llamas (2001) calculado por criterios “geohidrológicos”, pues toma en cuenta características geológicas y topográficas.

Tabla 15. Matriz de coeficientes de escurrimiento a partir de la permeabilidad de los materiales y del grado de pendiente

Permeabilidad	Pendiente (%)			Método
	Llana (0-14)	Moderada (14 - 36)	Acusada (> 36)	
Permeable	5%	10%	20%	I
	1%	2%	5%	II / III
Semipermeable	30%	60%	90%	I
	7.50%	10%	20%	II / III
Impermeable	80%	95%	100%	I
	15%	23%	25%	II / III

Tomado de (Izquierdo y Márquez, 2008)

Tomando en cuenta la matriz anterior se estimó el escurrimiento medio anual con un coeficiente de escurrimiento promedio de 50 %, esto considerando que el acuífero de calizas es permeable y tiene pendientes acusadas, y que, por el contrario, el acuífero del valle se consideró como impermeable y llano. Esto a través del primer método, que considera que la precipitación tiende a saturar la reserva del suelo y que, al sobrepasar la capacidad de campo, se generan excedentes o escurrimientos (Izquierdo y Márquez, 2008).

Los métodos II y III consideran al escurrimiento como un porcentaje de la precipitación (Izquierdo y Márquez, 2008), no obstante, estos métodos no fueron utilizados.

3.2.2.4 Cálculo de la infiltración media anual

Las tasas de infiltración en mm anuales se estimaron a partir de la diferencia de precipitación, evapotranspiración y escurrimientos estimados. Para esto, se utilizó el despeje de la fórmula general del balance hídrico antes mencionada.

Fórmula de infiltración ya despejada:

$$I = P - E_{tr} - E_{sc}$$

Estas operaciones se realizaron en el álgebra de mapas de ArcMap, con las respectivas imágenes ráster de las variables del modelo de balance hídrico.

Tras generar la imagen ráster de infiltración se obtuvieron valores que van desde los cinco hasta los 68 mm de recarga estimada, se procedió a reclasificarla y a asignarle los valores (Rr) (**Figura 15**) adecuados a las cifras obtenidas, pero apegándose a los rangos propuestos por Aller *et al.*, (1987).

Tabla 16. Valores utilizados para factor R

Rangos de infiltración (mm)	Valor Rr
5.02 - 15.67	1
15.67 - 26.33	2
26.33 - 36.98	3
36.98 - 47.64	4
47.64 - 58.29	5
58.29 - 68.95	6

La distribución de las tasas de infiltración en el acuífero obedece a los regímenes de precipitación que se presentan, pues los valores más bajos de vulnerabilidad se asignaron a la porción que va desde San Juan de la vaquería hasta la comunidad de Derramadero, los valores más altos se reducen a la porción del extremo oriente en la parte montañosa de la sierra plegada.

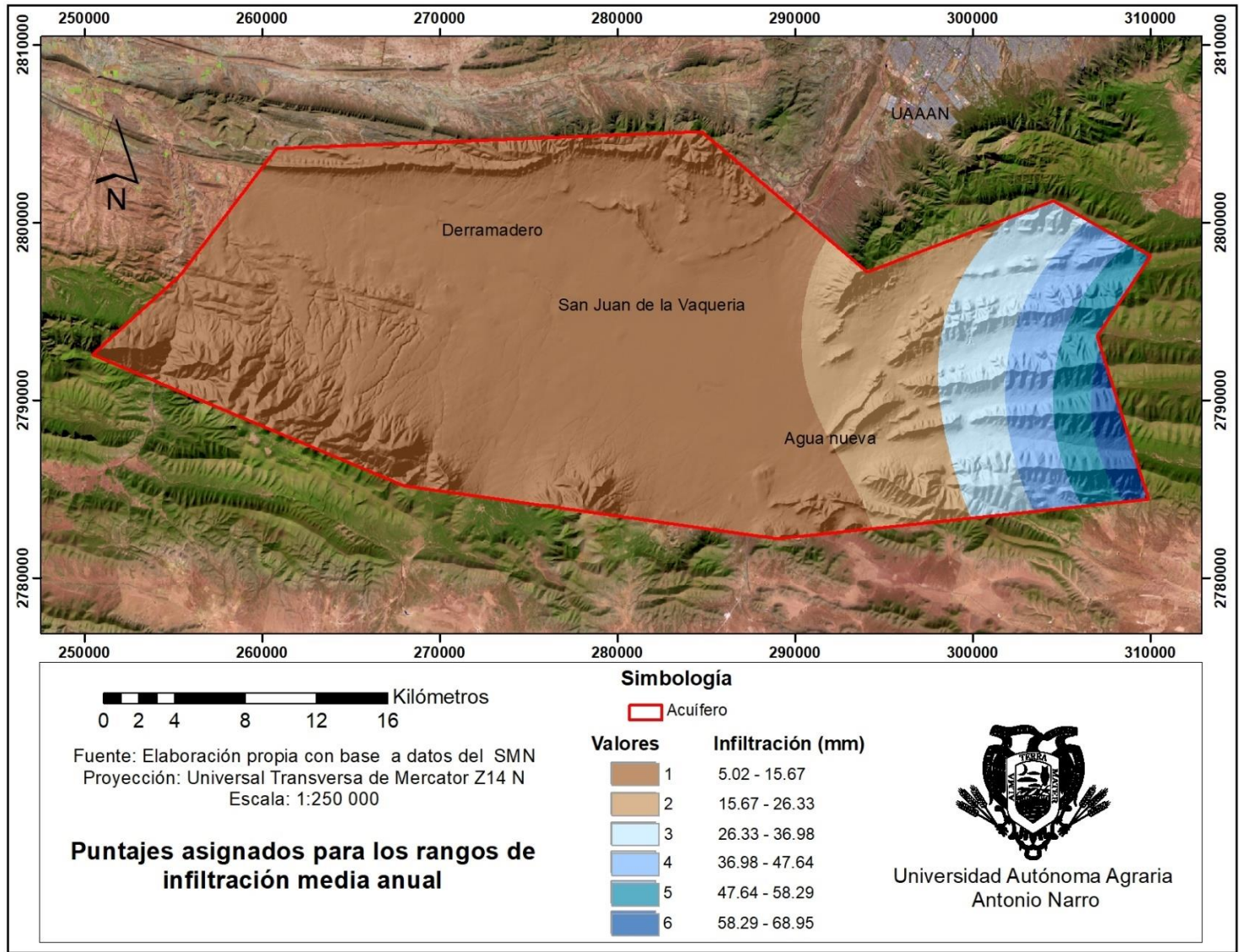


Figura 15. Valores asignados a los rangos de infiltración estimados

3.2.3 Obtención del factor A (*Litología media del acuífero*)

Las formaciones o sistemas acuíferos se describieron a partir de la información presentada por Lesser (2005) y CONAGUA (2015). Para digitalizar la imagen de este parámetro se utilizó el corte de la carta geológica minera G14-7- Monterrey con escala 1:250000, disponible en el portal del Servicio Geológico Mexicano.

De acuerdo con las fuentes consultadas, la unidad hidrogeológica se puede clasificar en dos sistemas acuíferos:

- a) “El acuífero del valle” formado principalmente por secuencias de rocas Lutita-Arenisca, con muy poca permeabilidad y resultando ser la superficie menos vulnerable;
- b) “El acuífero de las calizas” ubicado en las zonas montañosas, tiene un alto potencial de recarga ocasionado por la alta permeabilidad por fracturamiento y por la existencia de cavidades en el medio formadas por el lavado de la roca, que lo hacen muy vulnerable.

La asignación de valores (Ar) detallados en la siguiente tabla permitió la digitalización del mapa de este parámetro (**Figura 16**).

Tabla 17. Descripción y valores de utilizados para factor A

Acuífero	Descripción	Valor (Ar)
Formación de Lutita-Arenisca	Presenta capas o estratos alternados de areniscas y lutitas, a distintas escalas, formando capas permeables-semipermeables. No obstante, la existencia de fracturas o fisuras en las lutitas hace que exista percolación y que el agua fluya y se concentra en las capas de roca arenisca, resultando en altas velocidades de flujo.	5
Formación de Calizas fracturadas	Ubicado sobre bancos de caliza consolidada que, por acción de la lluvia, se ha disuelto hasta el punto de crear pequeñas fisuras y cavidades, que al estar interconectadas forman un sistema altamente permeable y responsable de la mayor parte de las recargas al acuífero.	9

Fuente: Lesser (2004)

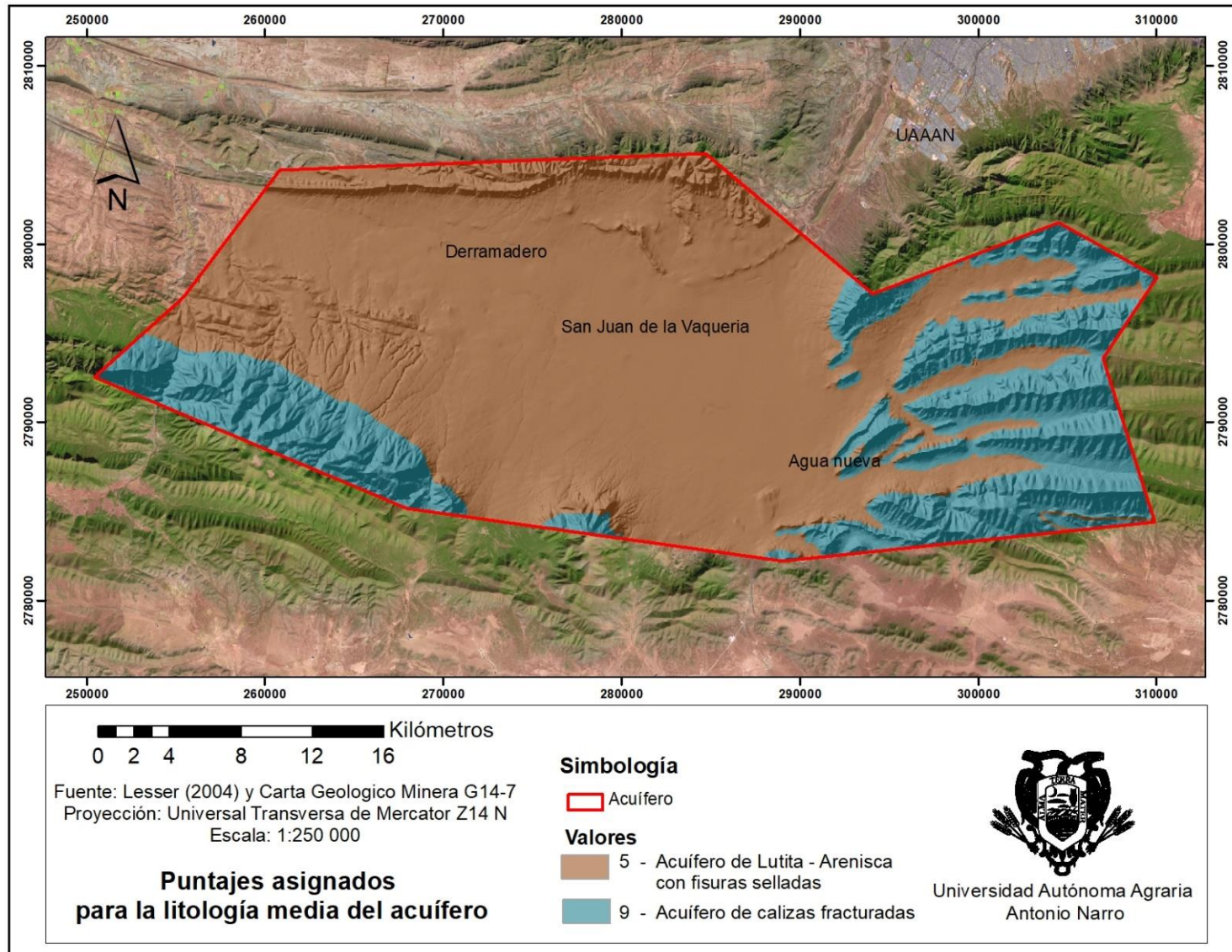


Figura 16. Valores asignados a la litología media de la unidad hidrogeológica

3.2.4 Obtención del factor S (Tipos de suelo)

La imagen ráster de valores de suelos (Sr) se generó a partir de la información del continuo nacional de edafología serie II, publicada por INEGI (2006). Los valores se asignaron de acuerdo con la clasificación de suelos encontrada y a la descripción tomada del diccionario de datos edafológicos publicado recientemente por INEGI (2017).

La siguiente tabla presenta la descripción de los suelos tomada en cuenta para la asignación de valores de vulnerabilidad a los distintos tipos de suelos (**Figura 17**).

Tabla 18. Descripción y valores utilizados para factor S

Tipo de Suelos	Descripción	Valor Sr
Kastañozem	Suelos con horizonte superficial rico en humus, formado sobre depósitos sedimentarios eólicos (limos). Horizonte mólico de espesor medio, sobre horizontes cálcicos o carbonatos. Su potencial para atenuar contaminantes es alto.	2
Phaeozem	Suelos fértiles oscuros y ricos en materia orgánica, porosos e intensamente lixiviados. Presentan horizonte superficial fino, oscuro y rico en humus, pero con alta saturación de bases. Depositados sobre materiales no consolidados como: eólico (limo), y suelen ser muy utilizados en agricultura de temporal y pastizales. Su potencial para atenuar contaminantes es alto.	2
Calcisol	Asociados a depósitos aluviales, coluviales y eólicos, fértiles y productivos con irrigación, presentan horizonte superficial húmico de color pardo pálido, y una cantidad sustancial de carbonatos en los primeros 100 cm, pudiendo estar cementados o no. Su potencial para atenuar contaminantes es medio a alto.	3
Regosol	Suelos muy jóvenes que se desarrollan sobre material no consolidado, de colores claros y pobres en materia orgánica, se asocian con los leptosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Se extienden sobre tierras erosionadas particularmente en áreas áridas y terrenos montañosos. Su potencial para atenuar contaminantes es muy bajo.	9
Leptosol	Suelos muy someros (<25 cm) sobre roca continua, poco desarrollados y extremadamente gravillosos o pedregosos. Ubicados principalmente sobre roca calcárea, y en altitudes medias o altas con topografía disectada. Su potencial para atenuar contaminantes es muy bajo o nulo.	10

Fuente: INEGI (2017)

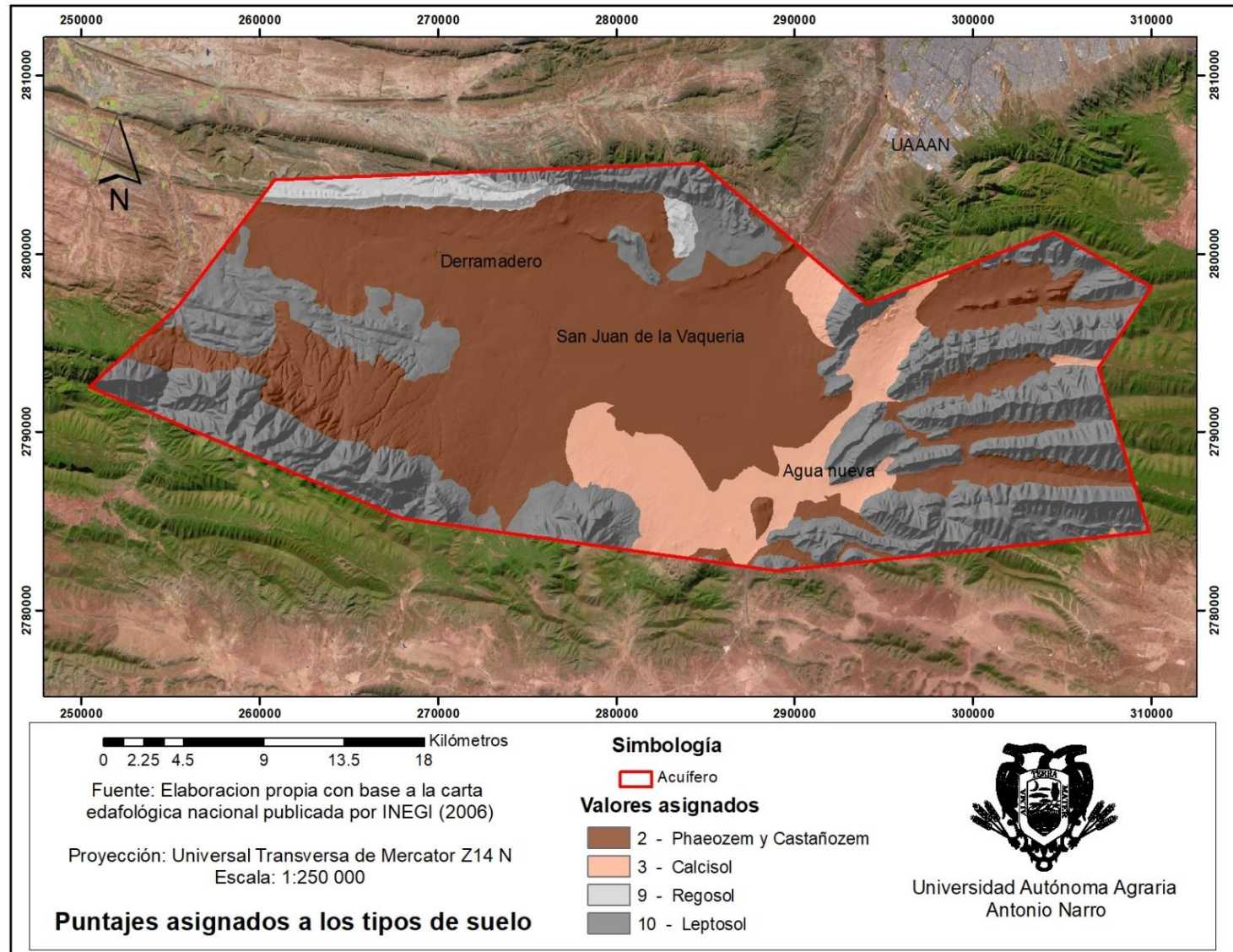


Figura 17. Valores asignados a los distintos tipos de suelo

3.2.5 Obtención del factor *T* (Pendiente del terreno)

El parámetro de topografía con valores de pendiente expresados en porcentaje se generó mediante un análisis de superficie, a partir de un modelo digital de elevación con resolución de 30 metros, obtenido del continuo de elevaciones mexicano disponible en el portal del INEGI.

La asignación de valores para generar la imagen raster (**Figura 18**) se realizó con base a la metodología original presentada en la **Tabla 5**, descrita en el apartado de revisión de literatura.

3.2.6 Obtención del factor *I* (Litología de la zona no saturada)

La digitalización de este parámetro se realizó a partir de la interpretación y recolección de los cortes de litología de la carta geológica minera G14-7- Monterrey. La asignación de valores de vulnerabilidad en la zona no saturada se realizó tomando en cuenta las formaciones estratigráficas y materiales no consolidados, que afloraban en la superficie.

La siguiente tabla muestra los valores que fueron asignados a los distintos tipos de rocas que conforman la zona vadosa (**Figura 19**).

Tabla 19. Valores utilizados para factor *I*

Tipo de unidad	Litología	Valor Ir
Depósitos recientes	Aluvial	8
	Coluvial	
Unidades estratigráficas	Lutita-Arenisca	4
	Limolita-Caliza	4
	Caliza - Limolita	6
	Caliza - Lutita	6
	Caliza	7
	Caliza-Dolomita	7
	Conglomerados	8

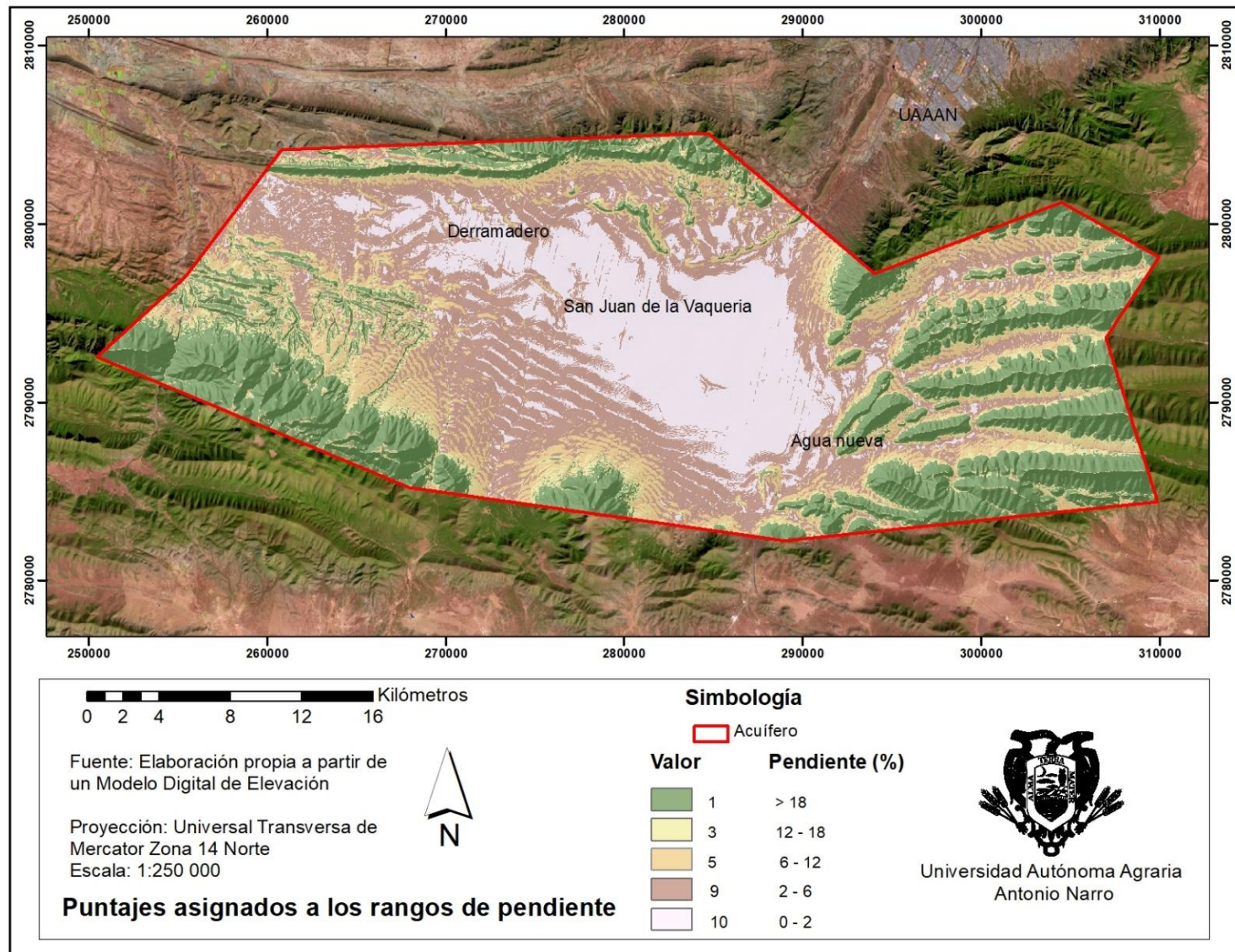


Figura 18. Valores asignados al impacto de los rangos de pendiente

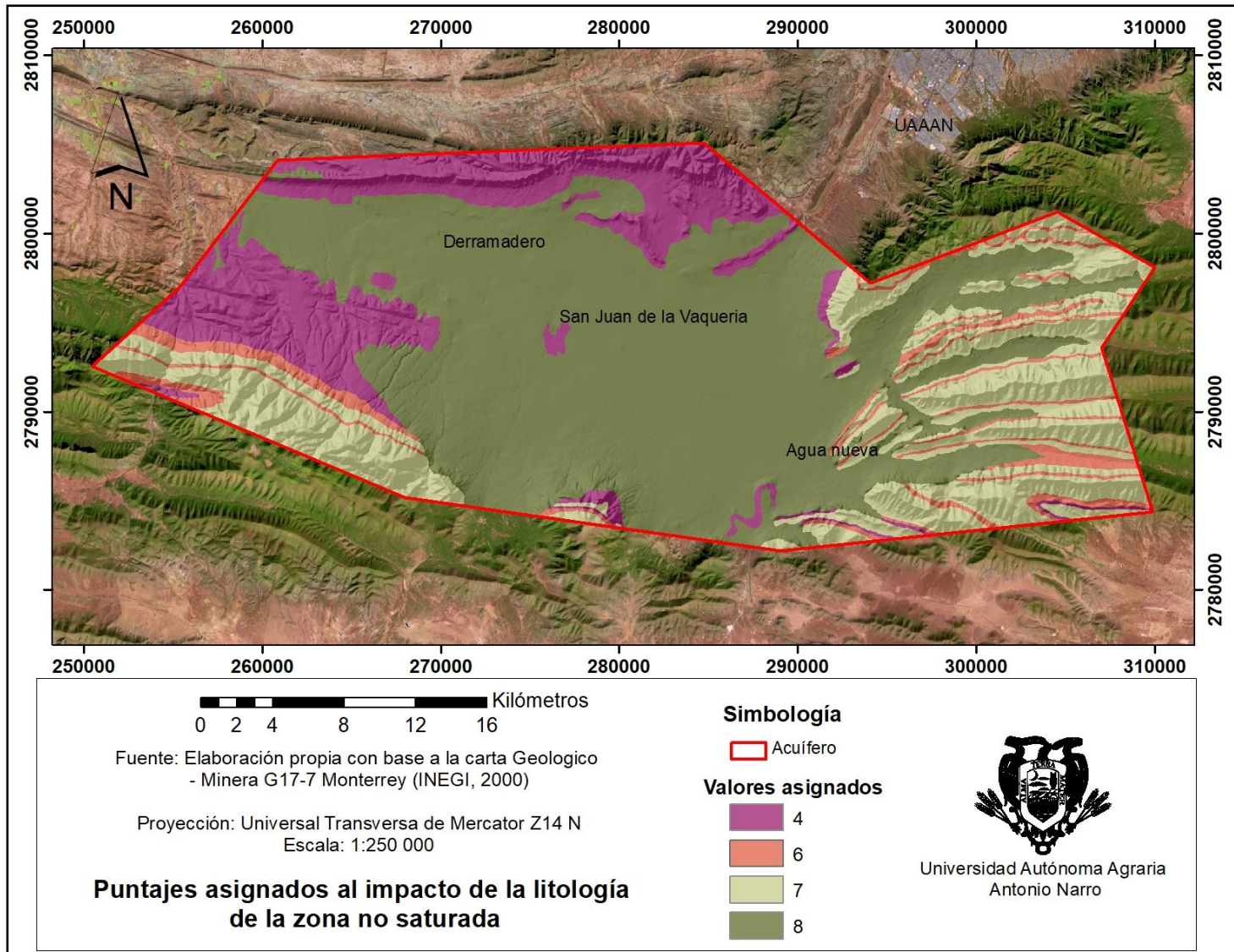


Figura 19. Valores asignados al impacto de la litología de la zona no saturada

3.2.7 Obtención del factor C (Conductividad hidráulica)

La imagen ráster de conductividad hidráulica (**Figura 20**) se generó de acuerdo con los rangos típicos de conductividad hidráulica descritos por Lewis *et al.*, (2006) para las rocas más comunes. Esto considerando que la permeabilidad de las rocas depende directamente de su porosidad y del orden que presentan estos espacios vacíos.

La **Tabla 20** muestra los valores de conductividad hidráulica que Lewis *et al.*, (2006) asignan a las formaciones de calizas y de lutitas-areniscas, principales formaciones que se encuentran en el área de estudio.

Para la asignación de valores de conductividad hidráulica en el acuífero del valle con secuencias de lutita-arenisca, se designó como unidad más importante a las areniscas, debido a que son el medio con mayor espesor, posee mayor permeabilidad y por consecuencia es más vulnerable. Se consideró un valor pequeño porque la existencia de capas de lutita puede llegar a ralentizar o evitar la infiltración y con eso la lixiviación de sustancias.

Para el caso de los medios calizos, Lewis *et al.*, (2006) consideran que tienen el potencial de dejar pasar hasta 100 metros de agua por día, en este sentido estos acuíferos son muy capaces de almacenar y transmitir grandes cantidades de agua, la única limitante será el patrón de precipitaciones que gobierne la región.

Tabla 20. Descripción y valores utilizados para factor C

Sistema acuífero	Consideraciones	Conductividad hidráulica (m/Día/)	Valor Cr
Acuífero de lutitas- Arenisca del valle	Se consideró a los medios areniscos como el principal sistema para agregarle el índice de permeabilidad.	< 20	3
Acuífero de calizas	Las calizas tienen un alto índice de conductividad hidráulica debido a la existencia de fisuras y cavidades de disolución, así como a la interconexión que estas presentan.	< 100	10

Fuente: (Lewis *et al.*, 2006)

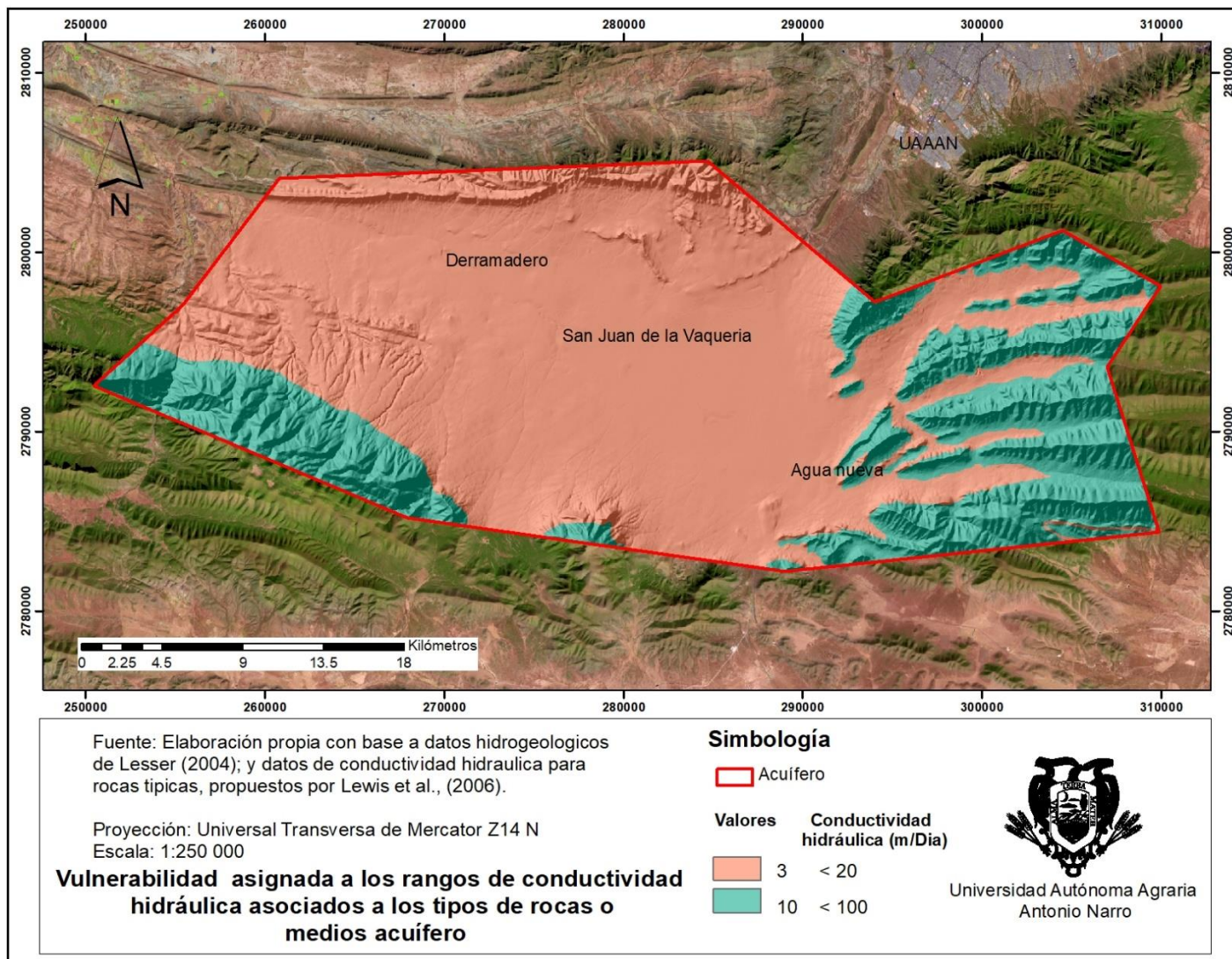


Figura 20. Valores asignados a los rangos medios de conductividad hidráulica

3.2.8 Obtención del mapa final del índice de vulnerabilidad DRASTIC (IVD)

En el álgebra de mapas del software ArcMap se procesaron las imágenes ráster de cada parámetro y se aplicó el modelo general para obtener la imagen total de vulnerabilidad, multiplicando las imágenes ráster con valores (r) con los respectivos valores (w) presentados en la **Tabla 8** y sumando todo:

$$IVD = Dr Dw + Rr Rw + Ar Aw + Sr Sw + Tr Tw + Ir Iw + Cr Cw$$

A la imagen resultante de la operación anterior se le realizó una agrupación de datos con los siguientes rangos cualitativos:

Tabla 21. Clasificación de grados de vulnerabilidad

Grado de vulnerabilidad	
Muy bajo	64 - 84.2
Bajo	84.21 - 104.4
Moderado	104.41 - 124.6
Alto	124.61 - 144.8
Muy alto	144.81 - 165

3.3 Cálculo del Índice específico de riesgo de contaminación (IRC)

Panagopoulos *et al.*, (2006) plantean un índice de riesgo a la contaminación (IRC) partiendo de la relación que guardan las cargas contaminantes de los usos del suelo que se presentan en un acuífero y la vulnerabilidad intrínseca, con el impacto o mejor dicho con la concentración de contaminantes en el agua subterránea, principalmente nitratos (NO₃).

Para el cálculo de este índice se puede utilizar la metodología DRASTIC original (Dávila-Pórcel, 2011) o alguna modificación de DRASTIC tal como lo menciona Panagopoulos *et al.*, (2006), quien eliminó algunos factores del método que no representaban gran influencia en el cálculo de vulnerabilidad intrínseca. En adición a la vulnerabilidad intrínseca, se debe calcular el índice de impacto por uso de suelo (factor US), haciendo una valoración semejante a la de los factores de DRASTIC.

3.3.1 Obtención del factor riesgo por uso de suelo (USr)

Para la obtención del mapa de uso de suelos y vegetación, se realizó una extracción del archivo vectorial del continuo nacional de usos de suelo y vegetación, serie VI, publicado por INEGI (2017).

Se utilizó la valoración planteada por Panagopoulos *et al.*, (2006), quien al igual que Aller *et al* (1987), asigna valores de riesgo que van de 1 a 10 a los diferentes usos de suelo (USr) y vegetación más típicos, y un valor de ponderación de cinco (USw), constante para este parámetro.

La siguiente tabla representa los valores utilizados para caracterizar los niveles de riesgo a la contaminación de los usos de suelo y vegetación presentes, fueron utilizados para clasificar el corte vectorial de USV y poder así rasterizarlo (**Figura 21**).

Tabla 22. Valoración utilizada para el riesgo de contaminación por uso de Suelo

Tipo de uso y vegetación	Valor (USr)
Cuerpos de agua	1
Bosque	1
Vegetación secundaria arbustiva y matorral	2
Pastizal natural	3
Pastizal inducido	4
Cultivos de temporal	8
Cultivos de riego	10
Urbano construido	10

Modificado de Panagopoulos *et al.*, (2006)

3.3.2 Obtención del mapa de índice de riesgo de contaminación (IRC)

El modelo general para obtener el mapa de riesgo a la contaminación utilizado por Panagopoulos *et al.*, (2006) y Dávila-Porcel (2011) se puede resumir de la siguiente forma:

$$IRC = (IVD) + (USr * USw)$$

Dónde:

IRC: Índice de riesgo de contaminación

IVD: Índice de vulnerabilidad intrínseca DRASTIC

USr: valores de vulnerabilidad asignados por uso de suelo en imagen raster

USw: valor de ponderación cinco, constante para el factor de uso de suelo

La aplicación del modelo se realizó en el álgebra de mapas, permitiendo así obtener el mapa final de zonas con riesgo de contaminación por el impacto de las actividades humanas en la región.

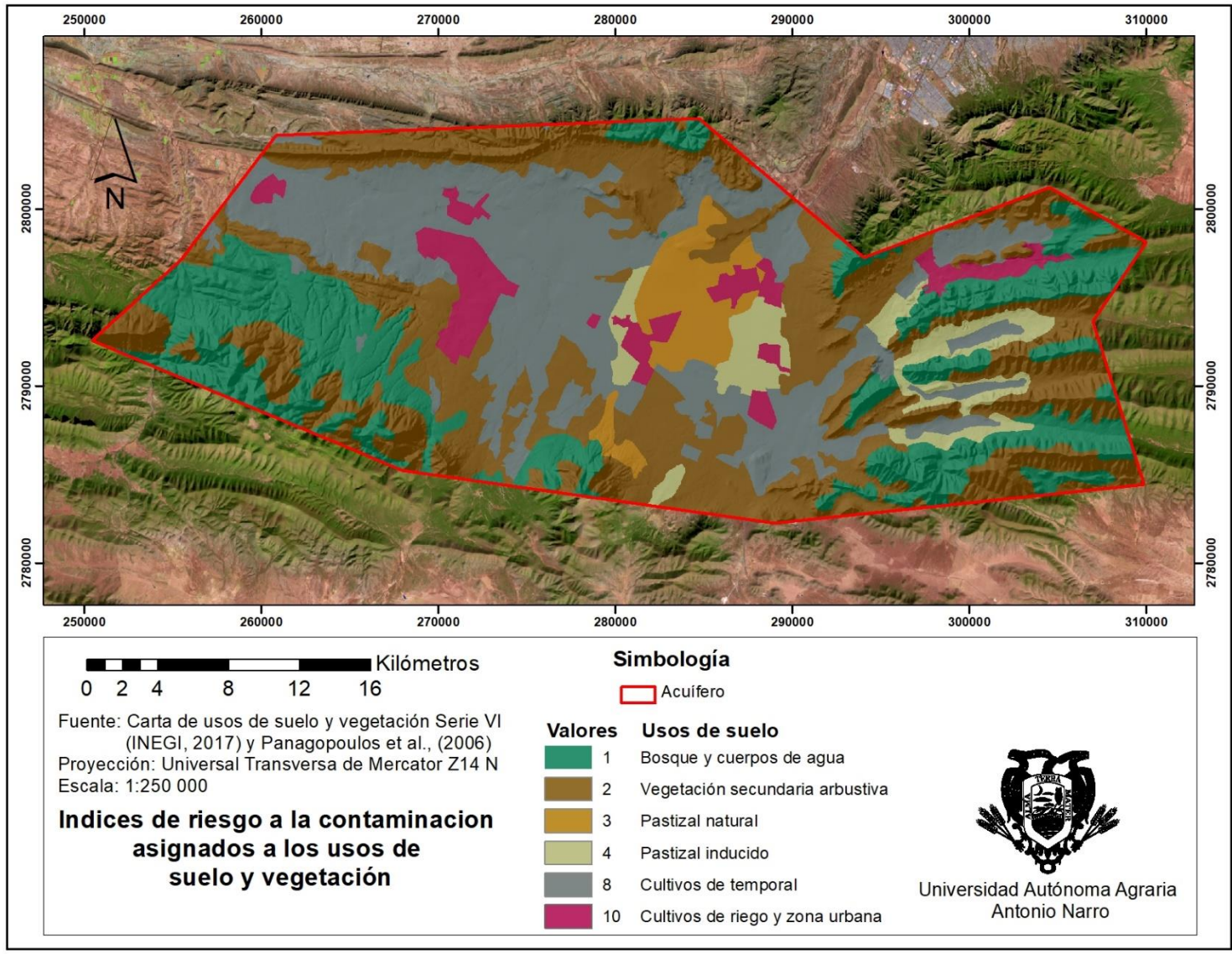


Figura 21. Valores asignados a los usos de suelo y vegetación

IV. RESULTADOS

4.1 Índice de vulnerabilidad DRASTIC

La interacción de los parámetros de DRASTIC dio como resultado una imagen ráster con valores que van desde 64 a 165 unidades en sus celdas. A estos valores se le adecuaron cinco índices (**Figura 22**) que reflejan los niveles de sensibilidad que tiene el acuífero a ser afectado de manera adversa por alguna sustancia que es lixiviada desde la superficie y que es capaz de generar disturbios en la calidad del agua almacenada.

Tabla 23. Índices de vulnerabilidad estimados

Rangos	Índice de vulnerabilidad	Superficie	%
64 – 84.2	Muy bajo	63.73	6.7
84.2 – 104.4	Bajo	404.67	42.4
104.4 – 124.6	Moderado	297.62	31.2
124.6 – 144.8	Alto	181.51	19.0
144.8 - 165	Muy alto	6.02	0.6
	Total	954	100

- I. Las zonas con muy bajo índice de vulnerabilidad representan la mínima parte pues cubren únicamente el 6.7 % del total del acuífero. Los bajos valores representan la nula vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación de sus aguas, son resultado de su localización sobre medios acuíferos y zonas vadosas formadas de lutita-arenisca con baja permeabilidad y conductividad hidráulica, con pendientes moderadas que evitan el encharcamiento y con suelos bien desarrollados que tienden a participar en la atenuación natural de contaminantes.

- II. Las zonas con un bajo índice de vulnerabilidad almacenan valores que van de 84.2 a 104.4, cubriendo un 42.4 % del total de la superficie del acuífero. Están asociadas al incremento de las profundidades al nivel freático, pero principalmente a la existencia del acuífero de lutita-arenisca que se ubica bajo los depósitos sedimentarios, y a los afloramientos de este en el extremo norte y en el centro oeste, el cual tiene poca permeabilidad y mínima conductividad hidráulica.

- III. Las zonas con un índice moderado que contemplan valores que oscilan entre 104.4 y 124.6, ocupan el 31.2 % del total de la superficie. Se agrupan en dos regiones, la zona del valle que se distribuye desde el centro hacia el noroeste está asociada directamente a la disminución de la profundidad al nivel estático y a la escasa o casi nula pendiente del terreno que puede producir encharcamientos y mayor lixiviación. Las pequeñas áreas con vulnerabilidad media que se ubican al pie de las montañas del este y sur del acuífero están asociadas a la ausencia de suelos capaces de influir en la atenuación natural de contaminantes, y principalmente a la existencia de medios acuíferos calizos que tienen un alto potencial de infiltración y conductividad hidráulica.

- IV. Las zonas con un alto índice de vulnerabilidad poseen valores que van desde 124.6 a 144.8 unidades y ocupan el 19 % del total del acuífero. Las principales características que determinan la alta vulnerabilidad son la existencia de medios calizos agrietados que permiten la infiltración, así como, la existencia o ausencia de suelos muy someros, por lo que estas áreas prácticamente no poseen potencial para influir en los procesos naturales de atenuación, por otra parte, el incremento en las recargas que se da en la sierra este influye en el aumento de la vulnerabilidad.

- V. Las zonas con muy alto índice de vulnerabilidad contemplan valores entre 144.8 y 165 unidades, no obstante, su distribución solamente cubre alrededor del 0.6 % del total de la zona de estudio. Se distribuye específicamente en el vértice sureste, en donde los medios calizos convergen con las zonas de mayor recarga, por lo que su vulnerabilidad incrementa.

El trazado y zonificación de áreas sensibles permite identificar rápidamente las zonas prioritarias por su alta o baja vulnerabilidad, ya sea para establecer perímetros con superficies posiblemente afectadas que requieran atención en el monitoreo de la calidad del agua o para crear zonas de protección por ser áreas importantes de recarga o con posible alta calidad en sus aguas.

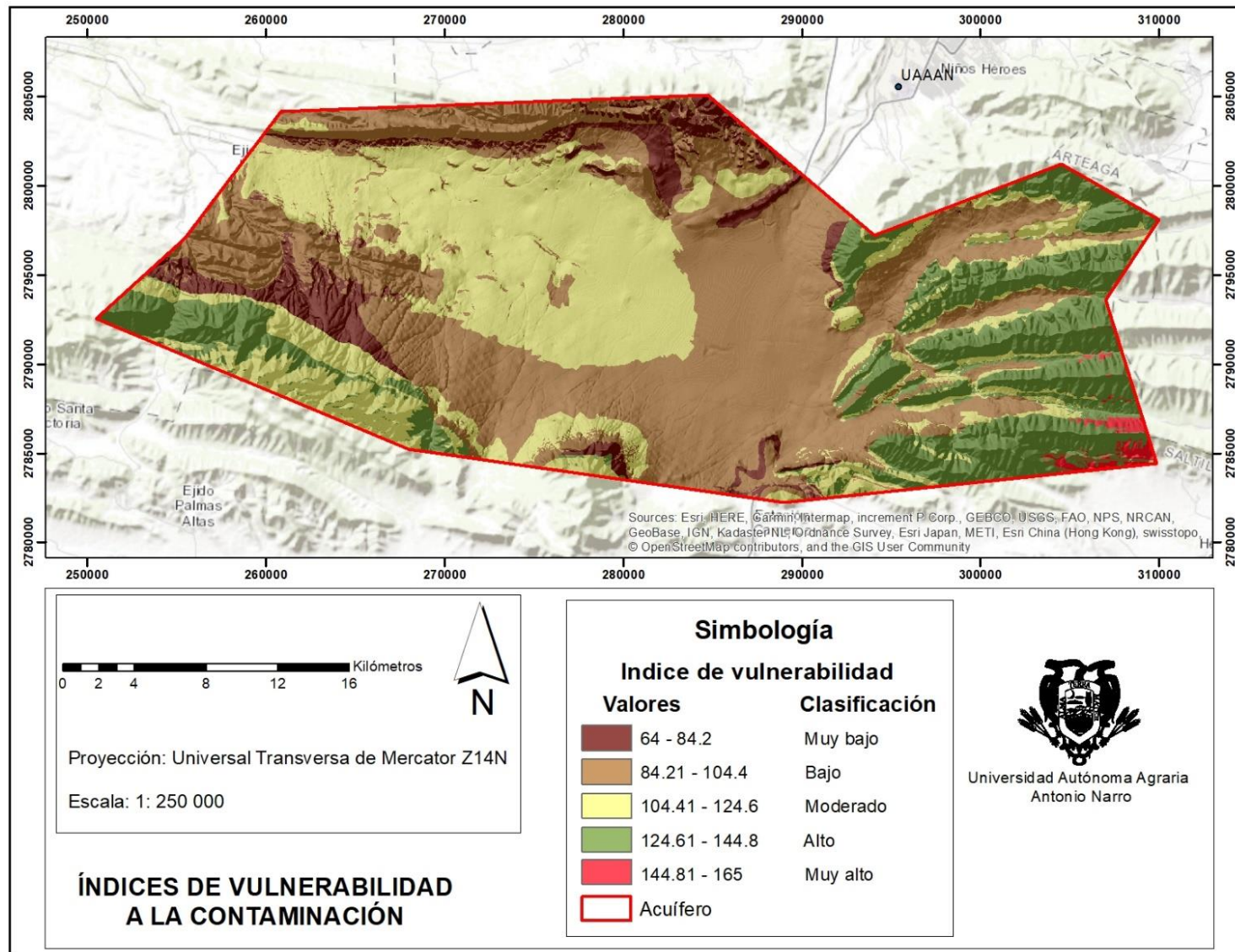


Figura 22. Mapa final de índices de vulnerabilidad

4.2 Índice de riesgo a la contaminación

El complemento que Panagopoulos *et al.*, (2006) hace al método convencional desarrollado por Aller *et al.*, (1987), permite dar origen a un mapa final que representa el índice de riesgo de contaminación, el cual tal como lo menciona Rahman (2008) está basado en las características de la zona vadosa y el medio acuífero, así como en la existencia de posibles contaminantes derivados de los principales usos de suelo.

El mapeo final contempla cinco índices o escenarios de posible riesgo (**Tabla 24**) que son producto de la interacción del mapa de DRASTIC y del factor de uso de suelo:

Tabla 24. Índices de riesgo de contaminación estimados

Rangos	Índice de riesgo	Superficie (Km ²)	%
73- 96.4	Muy bajo o nulo	68.9	7.2
96.41 – 119.8	Bajo	288.3	30.2
119.81 – 143.2	Moderado	345.1	36.2
143.21 – 166.6	Alto	247.5	26.0
166.61 - 190	Muy alto	3.7	0.4
	Total	954	100

- I. Las zonas con muy bajo o nulo riesgo de contaminación contemplan valores del ráster entre 73 y 96.4 unidades, ocupan un porcentaje del 7.2 % del total del acuífero. Estos valores son resultado de la poca vulnerabilidad intrínseca que se presenta en esa misma zona y de la ausencia de posibles contaminantes por la poca perturbación humana y la conservación de la vegetación natural que no representa un peligro.
- II. Las superficies con bajos índices de riesgo presentan valores que van desde los 96.41 a 119.8, y ocupan el 30.2 % del área total. Los bajos valores de vulnerabilidad se combinan con usos de suelo de vegetación secundaria, sobre los cuales no se desarrollan actividades riesgosas y no representan peligro alguno sobre la calidad del agua subterránea.
- III. La superficie con un moderado riesgo a la contaminación está integrada por valores de celda que oscilan entre 119.81 – 143.2 unidades, ocupa la mayor parte de la superficie con un 36 % del total. Aquí ocurre algo muy interesante y es donde se puede apreciar el impacto de los usos de suelo, pues las zonas con baja vulnerabilidad que se combinan con usos de suelo con un alto riesgo como la agricultura de temporal e irrigada aumentan

su riesgo de contaminación, y por el contrario las zonas que poseen media a alta vulnerabilidad intrínseca pero que se combinan con usos de suelo con bajo riesgo resultan en áreas con menor riesgo de contaminación.

- IV. Los altos índices de riesgo de contaminación incluyen los valores que van desde 143.21 a 166.6 unidades en las celdas del ráster, y cubren un 26 % de la superficie total del acuífero. Estos valores son el resultado de la interacción que existe entre los valores medios de vulnerabilidad intrínseca, con usos de suelo agrícola de temporal e irrigados y con establecimientos urbanos, los cuales presentan pesos muy altos en los índices de riesgo. Estos valores se distribuyen en la mayor parte del noroeste del valle como consecuencia del impacto de los usos de suelo, así mismo, las colinas del sureste poseen altos índices de riesgo debido a la alta vulnerabilidad de los medios calizos, no obstante, no existen usos de suelo potencialmente riesgosos.
- V. Las zonas catalogadas como de muy alto riesgo de contaminación contemplan valores de celda que van desde los 166.61 a los 190, sin embargo, tienen una presencia muy reducida pues solamente llegan a ocupar el 0.4 % de la superficie total del acuífero. Estos valores se distribuyen en los valles intermontanos del sureste del acuífero, como resultado de la interacción de medios y altos niveles de vulnerabilidad, con usos de suelo potencialmente riesgosos como las zonas agrícolas temporales y de riego que se ubican ahí mismo.

4.2.1 Sobreposición de nitratos

El mapeo y la generación de cartografía pueden ser las mejores maneras de presentar información referente a la caracterización de la vulnerabilidad y riesgos de contaminación existente en las unidades geohidrológicas. Sin embargo, una de las maneras en las que estos mapas pueden obtener más confiabilidad es comparando los valores mapeados con algún indicador de calidad o concentraciones de algún contaminante ya presente en el agua subterránea (Rueda & Betancur, 2006).

Una de las principales formas de calibrar la cartografía que se ha estado generando en México y otras partes del mundo, tiene que ver con la contrastación de la concentración de nitratos (NO_3), con los niveles de vulnerabilidad y riesgos de contaminación estimados, pues tal como

lo menciona Lathamani (2015) la combinación de métodos como DRASTIC y los análisis hidrogeoquímicos, resulta muy eficaz y practica para la evaluación y análisis del riesgo de contaminación de un acuífero.

Los nitratos son compuestos que tienen como base principal el nitrógeno (N), por lo que pueden tener un origen natural pues autores como Strathouse *et al.*, (1980); Pacheco y Cabrera (2003); Montiel *et al.*, (2014) describen su asociación con actividades volcánicas y con procesos de consolidación de sedimentos, así como el derivarse de la descomposición natural de microorganismos, materiales vegetales y excrementos. No obstante, el origen principal de estos compuestos que representan la principal sustancia encontrada en las aguas subterráneas está asociado a la excedencia de la fertilización agrícola, a la lixiviación de vertederos pecuarios; afluentes industriales; y de desechos urbanos (Perdomo *et al.*, 2001;).

Para el caso del acuífero de Cañón de Derramadero CONAGUA (2015) menciona que las concentraciones de nitratos no tienen un origen antropogénico y que podrían corresponder a sales minerales de nitrato de sodio. Pese a esto, autores como Lozano (2006) y Pérez (2012) ya han señalado a este acuífero por tener un riesgo de contaminación por el uso extensivo de actividades agrícolas.

La **Figura 23** muestra la distribución de algunos datos de concentración de nitratos obtenidos de la Carta de Aguas Subterráneas G14-7 (1980), en donde se puede apreciar que los valores que van de 0-10 mg/l, los cuales se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, se ubican dentro o cerca de áreas con índices de riesgo bajo o moderado. Por el contrario, los valores superiores a 10 mg/l se ubican dentro de áreas con un alto índice de riesgo de contaminación, ya sea por estar sobre una superficie ocupada por actividades agrícolas o dentro de un establecimiento urbano.

Cabe destacar que las máximas concentraciones de nitratos mencionadas en la Carta de Aguas Subterráneas G14-7 (1980) para la zona de estudio, ascienden a 37 mg/l, que a comparación con otros valores como los descritos para la zona noreste de la ciudad de Saltillo que superan los 127 mg/l, los valores del acuífero son menores.

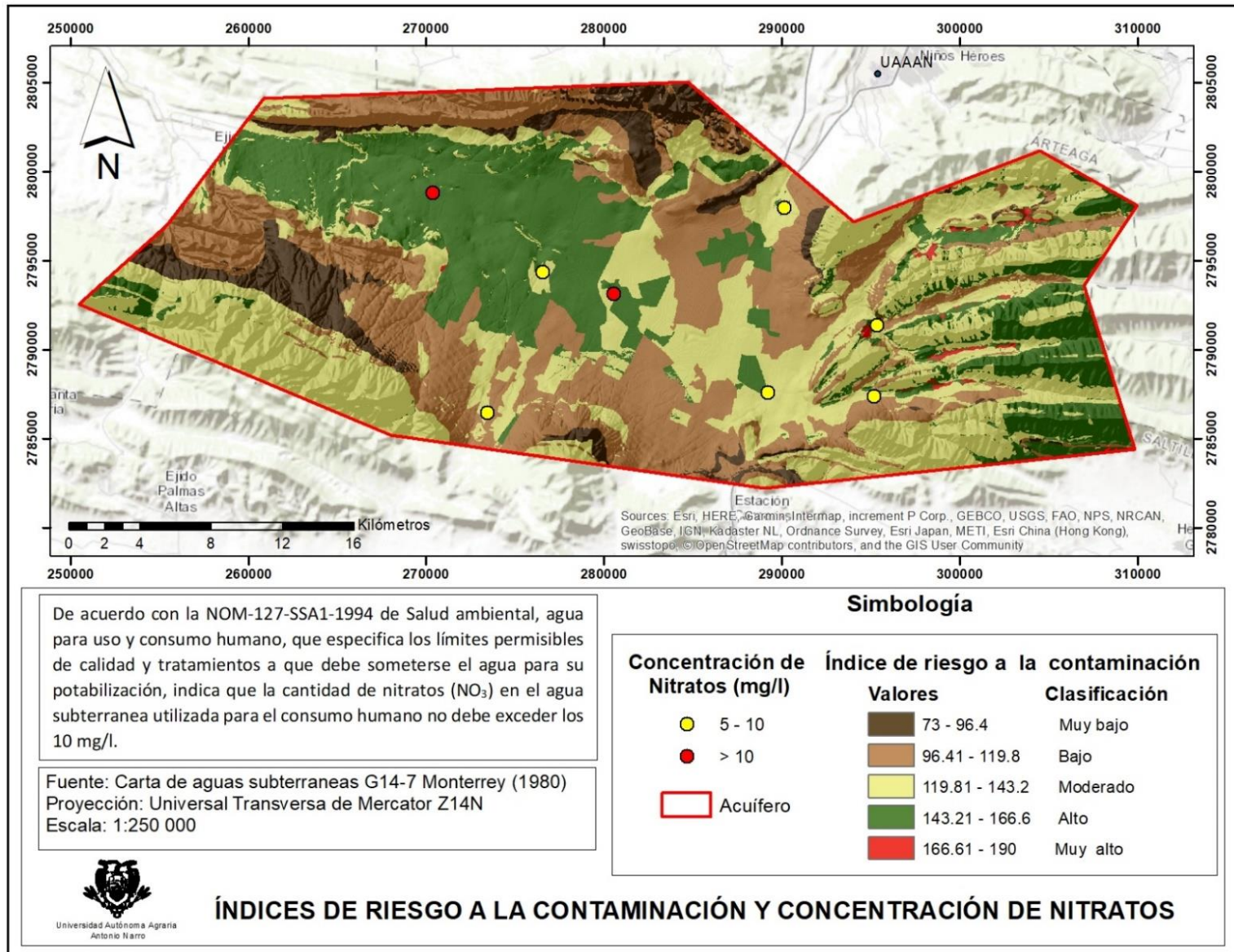


Figura 23. Mapa final de índices de riesgo de contaminación

V. CONCLUSIONES

El modelo estándar de DRASTIC propuesto por Aller *et al.*, (1987) permitió generar cartografía específica para caracterizar la vulnerabilidad del acuífero, información que se podría tomar en cuenta para trazar zonas de protección del medio ambiente y evitar establecer usos de suelo potencialmente riesgosos, así como para establecer zonas prioritarias de monitoreos en la calidad del agua y zonas con aprovechamientos de aguas potencialmente limpias.

DRASTIC resulto ser una metodología muy práctica y eficaz, pues involucra los parámetros que ejercen la mayor influencia en los procesos de atenuación natural de contaminantes. No obstante, autores como Panagopoulos *et al.*, (2006) consideran que parámetros como la conductividad hidráulica y el tipo de suelo no guardan gran relación con la existencia de contaminantes en los acuíferos, por lo que ponen en duda su uso a la hora de calcular la vulnerabilidad. Por el contrario, también se plantea que el contemplar un factor de uso de suelo, junto a los valores de vulnerabilidad intrínseca mejora ampliamente los resultados en el mapeo de zonas con vulnerabilidad y riesgo de contaminación (Awawdeh, 2010; Arcega *et al.*, 2015).

Debemos entender que el comportamiento del flujo hidráulico dentro de los acuíferos suele ser muy heterogéneo y complejo, lo cual afecta el estudio de las relaciones entre los valores de vulnerabilidad y la calidad del agua subterránea, pues la existencia de contaminantes en un punto o pozo puede deberse directamente de la lixiviación vertical desde ese mismo punto en la superficie, o por otro lado pueden haber migrado a ese punto desde otro lugar más alejado pero por influencia del flujo horizontal siguiendo la interconexión de grietas o vacíos y el gradiente de altitud.

Tomando en cuenta lo anterior, podemos decir que el comportamiento del agua subterránea y factores como la infiltración, las épocas agrícolas y los cambios de uso de suelo, suelen ser muy dinámicos, por lo que se podrían generar disturbios temporales en las concentraciones de contaminantes y el hecho de que en nuestro país los monitoreos de su calidad no sean constantes a pesar de que es obligación de las autoridades competentes, los impactos podrían pasar desapercibidos y la afectación sería en los consumidores.

VI. RECOMENDACIONES

Primera parte

Si bien es cierto, las actividades económicas desarrolladas en la superficie del acuífero son necesarias para la autosuficiencia de las comunidades, debemos tener muy bien en cuenta que los recursos hídricos son limitados, y que el ritmo de extracción que actualmente se tiene, puede llegar a un punto en el que la sobreexplotación se convertirá en escasez y en ausencia de calidad para el agua potable, por lo que:

- Se deben regular los cambios de usos de suelo, principalmente en el extremo este del acuífero, debido a que aquí se llevan a cabo los procesos más importantes de recarga.
- La agricultura se podría centrar en la producción de cultivos como la uva, que son idóneos para suelos cálcicos y que al ser sometidos al estrés hídrico mejoran la calidad del fruto, y además permiten disminuir los volúmenes de riego.
- Es importante fomentar la agricultura de temporal puesto que emplea la humedad de la temporada, y disminuye los volúmenes secundarios de riego.

Segunda parte

Tomando en cuenta que los recursos hídricos subterráneos son la fuente de abastecimiento más importante para la región y para la mayor parte del país, es necesario que exista un monitoreo constante de la calidad del agua para evitar problemas de salud en la población, puesto que muchos contaminantes son muy solubles en el agua y casi siempre imperceptibles, lo cual aumenta su peligrosidad.

En varias partes del país no se le ha dado la importancia a los resultados de los estudios de caracterización ambiental de los acuíferos, por lo que no se ejecutan acciones encaminadas a la protección. Con lo que respecta a esto, es importante que las autoridades competentes entiendan que es necesario por el bien del medio natural y de la población que lo habita, entender las causas de los disturbios en la calidad del agua subterránea, para así plantear y ejecutar acciones que contribuyan a la disminución o mitigación de la contaminación en los cuerpos de agua subterráneos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agüero V., J., & Pujol M., R. (2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. VII Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía, (septiembre), 20–22.
- Agüero-Valverde, J., & Pujol-Mesalles, R. (2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. VII Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía, (septiembre), 20–22.
- Aller, L., Hackett, G., Truman, B., & Jay H., L. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Environmental Protection Agency, U.S.A.
- Aragón Sulik, Manuel Dino, Navarro Mendoza, Susana, Belmonte Jiménez, Salvador, & Guevara Torres, María Ladrón de. (2012). Calibration of DRASTIC method in aquifers using nitrate as an indicator. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(2), 21-30.
- Árcega, I., Otazo, E., Galindo, E., Acevedo, O., & Romo, C. (2015). Determinación del índice de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC Caso: Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, (diciembre).
- Bravo-Inclán, L., Saldaña-Fabela, P., Izurieta-Dávila, J., & Mijangos-Carro, M. (2015). La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo.
- Cantu-Medina, F. G., Ventura-Houle, R., Heyer-Rodríguez, L., & Guevara-García, N. (2018). Calidad de agua para riego agrícola en el agua subterránea de la zona árida del suroeste de Tamaulipas, México. *Agro productividad*, 11(1).
- Collazo Caraballo, M. P., & Montañó Xavier, J. (2012). *Manual de Agua Subterránea*. Montevideo, Uruguay: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

- Comisión Nacional del Agua (CNA). (1998). 'Cuencas Hidrológicas'. Escala 1:250000. Catálogo de metadatos geográficos. México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). (2015). Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero (502) Cañón del Derramadero, Estado de Coahuila. Diario oficial de la federación. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). Estadísticas del agua en México 2018. Ciudad de México, México.
- Cubas, F., Llano, M., & Rosenzweig, L. (2017). El misterio del agua subterránea en México. Retrieved from <https://agua.org.mx/biblioteca/misterio-del-agua-subterranea-en-mexico/>
- Dávila P, R. A., & De León G, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 63, núm. 3, 2011, p. 463-477
- Davis, S. N., & De Wiest, R. J. (1971). Hidrogeología. Ariel.
- Diario oficial de la Federación (DOF). (04/01/2018). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos. México.
- Diario oficial de la Federación (DOF). (11/10/2011). Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de los acuíferos 0502, 0505, 0510 y 0511, en el Estado de Coahuila. México.
- Estrada Godoy, F., Silva García, J. T., Ochoa Estrada, S., Moncayo Estrada, R., Cruz-Cárdenas, G., Villalpando Barragán, F., Nava Velásquez, J. (2013). Aplicación del método SINTACS para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la cuenca del Río Duero, Michoacán, México Francisco. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 29(4), 235–248.

- Filho, F. L. B., Guerra, H. O. C., & Gheyi, H. R. (2003). Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2), 403-407.
- Foster S. e Hirata R. (1991). Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., Delia, M., & Paris, M. (2003). Protección de la calidad del agua subterránea. Banco Mundial.
- Gárfias, J., Franco, R., & Llanos, H. (2002). Análisis de la vulnerabilidad intrínseca y su adecuación mediante un modelo de flujo con trazado de partículas para evaluar la vulnerabilidad del acuífero del curso alto del río Lerma, estado de México. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, 2, 115–126.
- Garsaball, J. A. L., Natera, J. R. M., & Mayz-Figueroa, J. (2007). Efecto de la salinidad del suelo sobre la germinación de semillas de maíz de diferentes pesos en el oriente venezolano. *Temas Agrarios*, 12(2), 62-73.
- González M.S. (2007). Contaminación difusa de las aguas. *Tierra adentro*.
- Hernández, G., Haro, J., & Mahlknecht, J. (2004). Generación de índices de vulnerabilidad para acuíferos: Comparación de métodos. Centro de Estudios del Agua–Instituto Tecnológico de Monterrey. México.
- Instituto Nacional de Estadística Y Geografía (INEGI). (1988). Conjunto de datos vectoriales Geológicos. Carta G14-7, Escala 1:250 000. Serie I, Monterrey, N.L. México.
- Instituto Nacional de Estadística Y Geografía (INEGI). (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1 000 000. Serie I (Subprovincias fisiográficas). México.

- Instituto Nacional de Estadística Y Geografía (INEGI). (2006). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000 Serie II (Continuo Nacional). México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI). (1983). Síntesis Geográfica del Estado de Coahuila. México, D.F.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI). (2017). Diccionario de datos edafológicos Escala 1:250 000 (Versión 4). México.
- Izquierdo, T., & Márquez, A. (2006). Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias). *Geo gaceta*, 40(0213–683X), 307–310.
- Izquierdo, T., & Márquez, A. (2008). Cálculo de la recarga de la isla de La Gomera (Islas Canarias) en un SIG mediante un balance hídrico mensual. *Geo-Temas*, 10 (May 2014), 1–4.
- Jiménez C. B.E. 2001. La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C, Instituto de ingeniería de la UNAM y FEMISCA.
- Lathamani, R., Janardhana, M. R., Mahalingam, B., & Suresha, S. (2015). Evaluation of aquifer vulnerability using drastic model and GIS: a case study of Mysore city, Karnataka, India. *Aquatic Procedia*, 4, 1031-1038.
- Lesser I, J. M. (2005). Estudio geohidrológico del acuífero Cañón del derramadero, Coahuila". V Congreso de aguas subterráneas, Hermosillo, Son. México.
- Lewis M. A, Cheney C. S., Ódochartaig High B. É. 2006. Guide to Permeability Indices. British Geological Survey, Open Report, CR/06/160N. 29pp.
- Lozano G., D. F. 2006. Ordenamiento Ecológico de la Región Cuenca de Burgos. Universidad Autónoma de Tamaulipas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tecnológico de Monterrey, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Pronatura.

<http://albers.mty.itesm.mx/proyectos/web/oeburgos/index.html>. (20 de marzo de 2010).

Machiwal, D., Kumar, M., Singh, V. P., & Mohan, C. (2018). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185(August), 901–927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>

Montiel Palma, S., Armienta Hernández, M. A., RODRÍGUEZ CASTILLO, R., & Domínguez Mariani, E. (2014). Identificación de zonas de contaminación por nitratos en el agua subterránea de la zona sur de la Cuenca de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 149-165.

Ordóñez Gálvez, J. J. (2011). *Aguas Subterráneas-Acuíferos*. Sociedad Geográfica de Lima (Primera). Retrieved from http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Aguas_Subterranneas.pdf

Pacheco Ávila, J., & Cabrera Sansores, A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 7(2).

Perdomo, C. H., Casanova, O. N., & Ciganda, V. S. (2001). Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencia-Sitio en Reparación*, 5(1), 10-22.

Pereyra D., D., Cruz Torres, D. G., & Pérez Sesma, J. A. A. (2011). La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Investigaciones Geográficas*, (75), 37–50.

Pérez Ceballos, Rósela, Pacheco Ávila, Julia, Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería [en línea]* 2004, 8 (enero-abril): [Fecha de consulta: 27 de enero de 2019] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780104>> ISSN 1665-529X

Pérez Miranda, R., Cruz Bello, G. M., Moreno Sánchez, F., González Hernández, A., & Romero Sánchez, E. M. (2012). Cambios de vegetación y uso de suelo en la Cuenca Río

Bravo-San Juan, Coahuila (1993-2008). *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(10), 25-40.

Rahman A (2008) A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography* 28: 32-53.

Ríos R., L., & Vélez O., M. V. (2008). Vulnerabilidad a la contaminación, zona sur acuífero del valle del cauca, Colombia. *Boletín de ciencias de la tierra*, Vol. 23, Pág. 69–84.

Rueda, O. M., & Betancur, T. (2006). Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en el bajo Cauca antioqueño. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (13), 71-88.

Sainz, J., & Becerra, M. (2003). Los conflictos por el agua en México. *Gaceta ecológica*, (67), 61-68.

Sigler, A., & Bauder, J. (s.f.). Alcalinidad, pH, y Sólidos Disueltos Totales. Obtenido de http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS%202012-1115SP.pdf