



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DE LA  
VULNERABILIDAD A LA  
CONTAMINACIÓN ACUÍFERA EN  
EL MUNICIPIO DE SALAMANCA,  
GUANAJUATO MEDIANTE LA  
METODOLOGÍA DRASTIC**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**INGENIERO GEOLÓGO**

**P R E S E N T A**

JOSE EDUARDO OLAN FLORES

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. JOSÉ IVAN MORALES  
ARREDONDO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

Al creador, por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida 5 años después de iniciar este viaje universitario, gracias Dios mío.

A mi mamá Ana. Por creer en mí, por ser una gran mamá, por darme ánimos para seguir adelante cuando no, por haberme hecho la persona que soy ahora, por haberme hecho tan soñador, me seguiré esforzando mamá, te lo juro, eres y siempre serás mi fuerza para seguir adelante y seguir soñando en grande y como siempre te lo digo mamá, ya veraz que te sentirás más orgullosa de mí.

A Manuel. Gracias por las enseñanzas en el pasado me han ayudado a fortalecerme como persona y a tratar de ser una mejor persona cada día.

A mi hermana Alondra. Espero tomes lo mejor de mí y seas mucho mejor, recuerda siempre soñar en grande y nunca dejes de esforzarte.

A mis tíos Rosy e Iván. Gracias por apoyarme tanto y por haberme dado ánimos y apoyo de que intentara entrar a la UNAM. Las palabras de agradecimiento no son suficientes, pero seguiré esforzándome, los quiero mucho y los admiro demasiado. Tío Iván gracias por ser mi sinodal de manera indirecta y haberme apoyado en mi último trabajo siendo universitario.

A mi abuelita Angelina. Gracias por darme muchos ánimos para siempre creer en mí.

A mi tía Alejandra. Gracias por acompañarme y apoyarme en mis años universitarios, recuerda seguir soñando.

A mi tío José gracias por tus consejos para mejorar como persona.

Gracias familia por tanto, los amo, los admiro, agradezco a Dios que ustedes sean mi familia. Dios los bendiga. Gracias por ayudarme a cumplir mi sueño.

A mis amigos de la facultad por haberme brindado su amistad así como su apoyo incondicional a lo largo de los 5 años en los que, coincidimos.

***Al director de esta tesis.***

Dr. José Iván Morales Arredondo

Muchas gracias por todo el apoyo, en especial le agradezco mucho haber sido mi asesor y guiarme en este camino, le agradezco su tiempo, amistad, entrega e ideas, que me ayudaron a desarrollar este trabajo y alcanzar mi objetivo de ser ingeniero.

***A mis sinodales.***

Ing. Alberto Arias Paz.

M.C Sergio Salinas Sánchez.

M.I Alejandrina Castro Rodríguez.

Dra. Isabel Pérez Martínez.

Gracias por sus comentarios, apoyo e ideas, que enriquecieron de una manera excelente este trabajo. Les agradezco mucho su tiempo, así como su pasión por la ciencia.

Al Comité Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Salamanca (CMAPAS), por la información brindada. En especial a la Dirección de Estudios y Monitoreo de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG).

Al programa de becas para egresados de alto rendimiento que me brindo la UNAM, por el otorgamiento de la beca para mi titulación.

A la UNAM por haberle brindado a este chico de provincia, el sueño de estudiar en la mejor universidad de México, sin duda un gran orgullo y un sueño cumplido que llevaré el resto de mi vida.

A mí querida facultad de ingeniería por haberme formado en sus aulas y a cada uno de los 52 profesores o más que ayudaron en mi formación, hasta llegar a mi titulación como ingeniero geólogo.

***Parte del viaje es el final.***

**¡GRACIAS TOTALES!**

# CONTENIDO

I. ABSTRACT .....	I
II. RESUMEN .....	I
III. ÍNDICE DE FIGURAS .....	III
IV. ÍNDICE DE TABLAS .....	V
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>1</b>
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción de la zona de estudio .....	1
1.2 Hipótesis .....	4
1.3 Objetivo .....	4
1.4 Objetivos específicos .....	4
1.5 Justificación.....	5
1.6 Alcances.....	6
1.7 Limitaciones .....	6
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>7</b>
2. Antecedentes .....	7
2.1 Ubicación .....	7
2.2 Vías de acceso.....	8
2.3 Aspectos socioeconómicos .....	8
2.4 Clima y temperatura .....	9
2.5 Precipitación.....	10
2.6 Hidrografía .....	11
2.7 Fisiografía .....	12
2.8 Geología regional.....	14
2.9 Marco estratigráfico .....	15
2.10 Geología estructural .....	21
2.11 Geología local .....	22
2.12 Hidrogeología del acuífero Irapuato-Valle.....	25
2.13 Hidroestratigrafía del acuífero Irapuato Valle .....	26
2.14 Tipo de acuífero .....	27
2.14.1 Medio Granular. ....	27
2.14.2 Medio Fracturado. ....	28
2.15 Acuífero local de Salamanca, Guanajuato .....	30

2.16 Falla en Salamanca por subsidencia .....	33
2.17 Contaminantes principales reportados en Salamanca .....	36
<b>CAPITULO 3</b> .....	<b>39</b>
3. Marco Teórico .....	39
3.1 Vulnerabilidad de acuíferos .....	39
3.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera .....	41
3.22 Métodos matriciales (MS).....	43
3.23 Métodos de índice y superposición (RS) .....	44
3.24 Métodos de conteo de puntos (PSCM) .....	45
3.24.1 Método SINTACS .....	45
3.24.2 Método EPIK.....	46
3.24.3 Método DRASTIC .....	47
3.24.4 Pesticida DRASTIC .....	48
3.3 Estudios de vulnerabilidad a la contaminación acuífera en México .....	50
<b>CAPITULO 4</b> .....	<b>53</b>
4. Metodología .....	53
4.1 Metodología DRASTIC .....	53
4.2 Software de apoyo .....	57
4.3 Profundidad al nivel estático (D).....	57
4.4 Recarga neta (R) .....	59
4.5 Medio acuífero (A) .....	60
4.6 Suelo (S) .....	64
4.7 Topografía (T).....	67
4.8 Zona vadosa o no saturada (I) .....	67
4.9 Conductividad hidráulica (C) .....	69
<b>CAPITULO 5</b> .....	<b>71</b>
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
5.1 D (PNE).....	71
5.2 R (Recarga neta) .....	74
5.3 A (Zona saturada).....	77
5.4 S (Suelo) .....	80
5.5 T (Topografía) .....	81
5.6 I (Zona no saturada) .....	82

5.7 C (Conductividad hidráulica) .....	85
5.8 Índice DRASTIC.....	87
5.9 Índice Drastic e índice Pesticida Drastic .....	88
5.10 Índice reclasificado y zonas de vulnerabilidad .....	91
5.11 Índice Drastic 2000 e Índice Drastic 2019.....	93
<b>CONCLUSIONES</b> .....	96
6.1 Conclusiones .....	96
6.2 Recomendaciones .....	98
Bibliografías .....	100
<b>ANEXOS</b> .....	108

## **I. ABSTRACT**

Vulnerability to water pollution is an extremely important issue for Mexico because 105 of its 653 aquifers are overexploited, and some contaminated, so they have a vulnerability map that would allow for better planning. The destination maps serve as a tool to manage, regulate and order the territory, in the same way that it is used to redefine the use of the water resource, having an idea of the distribution and care of the resource where it is most vulnerable. Salamanca, Guanajuato has had serious pollution problems both in its air quality and water quality, its aquifer has a history of pollution and extraction problems that have generated abatement, subsidence and failures due to the same subsidence in relation to the characteristics geological and hydrogeological and hand in hand with the development activities of the area. During the development of this work, an index of modification was obtained through the DRASTIC methodology, finding the most vulnerable area of the city of Salamanca in places close to failures caused by subsidence, in an area with high population density and with greater industrial development activities where the refinery, thermoelectric and pesticide industries are located.

The results of this work define the areas with great vulnerability to pollution, mainly in the urban area, where there is more information.

## **II. RESUMEN**

La vulnerabilidad a la contaminación acuífera es un tema de extrema importancia para México debido a que 105 de sus 653 acuíferos se encuentran en sobreexplotación, y algunos contaminados, por lo que contar con un mapa de vulnerabilidad permitiría una mejor planificación. Los mapas de vulnerabilidad sirven como una herramienta para gestionar, regular y ordenar el territorio, de la misma forma que se utiliza para redefinir el uso del recurso hídrico, teniendo una idea de la distribución y cuidado del recurso donde sea más vulnerable. Salamanca, Guanajuato ha tenido graves problemas de contaminación tanto en su calidad de aire, como en la calidad de agua, su acuífero tiene antecedentes de contaminación y problemas de extracción que han generado abatimiento, subsidencia y fallas por la misma subsidencia en relación a las características geológicas e hidrogeológicas y de la mano de las actividades de



desarrollo de la zona. Durante el desarrollo de este trabajo se obtuvo un índice de vulnerabilidad mediante la metodología DRASTIC, encontrando la zona más vulnerable de la ciudad de Salamanca en sitios cercanos a fallas provocadas por subsidencia, en una zona con densidad poblacional alta y con mayores actividades de desarrollo industrial donde se encuentran la refinería, la termoeléctrica e industrias de pesticidas.

Con los resultados de este trabajo se logró definir las zonas con gran vulnerabilidad a la contaminación, principalmente en la zona urbana, donde hay mayor información.

### III. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Localización del municipio Salamanca, en el estado de Guanajuato. ....	7
Figura 2.2 Principales vías de acceso de Salamanca. Tomado de CONABIO, (2012). ....	8
Figura 2.4 Clima y temperatura de Salamanca, Gto. Datos tomado de SEBIO-GTO, (2012)....	10
Figura 2.5 Precipitación de la zona de zona de estudio. Datos de SEBIO-GTO, (2012), CONABIO, (2012). ....	10
Figura 2.6 Hidrografía de Salamanca, Gto. Datos de SEBIO-GTO, (2012), CONABIO, (2012). ....	12
Figura 2.7 Provincias y subprovincias de la zona de estudio. Tomado INEGI, (2001). ....	13
Figura 2.8 Marco geológico regional., modificado de SEBIO-GTO, (2012) y Atlas, (2012). Escala 1:120,000. En negritas, Salamanca, Gto. ....	14
Figura 2.11 Geología local de Salamanca, Gto. Tomado, SBIO-GTO, (2012), Atlas, (2012). ....	24
Figura 2.112 Columna estratigráfica de la región salamanca-Aldama, a la izquierda el propuesto por Cerca-Martínez y a la derecha por Nieto Samaniego, 2012. Tomado de Nieto Samaniego et al., (2012). ....	25
Figura. 2.13 Mapa Hidrogeológico donde se muestran las litologías, según el tipo de roca, descrito en (Atlas nacional., 2006). Tomado en CONABIO (2012). ....	27
Figura 2.15 Simbología de la seccion CEAG,(2018) y ubicación de las secciones <b>A-A´</b> y <b>B-B´</b> . ....	32
Figura 2.151 Sistema acuífero de Salamanca, donde el rio Lerma es el que delimita el sistema acuífero de la zona, diferenciando las unidades con diferente comportamiento hidráulico al sur y al norte. Extraído de Rodríguez et al., (2003). ....	32
Figura 2.152 Perfil geológico, (CEAG., 2018) ....	33
Figura. 2.16 Mapa donde se observan los dos sistemas de fallas (en morado). La más larga asociado a subsidencia, inicia desde el NE reportada desde los 90s. Se extiende desde Cerro gordo y muestran un rumbo N60E, SE. (Tomado de Presidencia municipal de Salamanca, 2018). ....	35
Figura. 4.1 Ecuación Drastic. Tomado de Ramos, (2002).....	55
Figura 4.12 Mapa conceptual de la metodología. ....	56
Figura 5.1 Profundidad del nivel estático al 2016, modificado de CEAG, (2018). ....	72
Figura 5.11 Índice de vulnerabilidad (D). ....	73
Figura 5.2 Recarga neta evaluada del 2005-2015 e índice de vulnerabilidad (R). ....	76
Figura 5.3 Cortes litológicos recopilados. ....	77
Figura 5.31_Mapa que muestra el índice de vulnerabilidad de la zona saturada (A), por Interpolación Thiessen.....	78
Figura 5.32 Mapa que muestra el índice de vulnerabilidad de la zona saturada (A), por interpolación IDW.....	79

Figura 5.4 Tipos de suelos en Salamanca de acuerdo con el prontuario, INEGI., 2009 y el mapa de vulnerabilidad de suelos (S).....	80
Figura 5.5 Pendiente topográfica del municipio de Salamanca, Gto y su índice de vulnerabilidad (T).....	81
Figura 5.6 Índice de vulnerabilidad mediante Polígonos de Thiessen de la zona no saturada (I). .....	83
Figura 5.61 Índice de vulnerabilidad mediante IDW evaluadas de la zona no saturada (I).....	84
Figura 5.7 índice de vulnerabilidad (C). .....	86
Figura 5.9 Muestra el índice DRASTIC que va desde 67 hasta 156 unidades .....	89
Figura 5.91 Muestra el índice PESTICIDA DRASTIC que va desde 93 hasta 193 unidades. ...	90
Figura 5.10 Muestra 5 zonas en el municipio que van desde 2 hasta 10 para el Índice DRASTIC original. ....	92
Figura 5.101 Muestra 5 zonas en el municipio que van desde 2 hasta 10 para el Índice pesticida DRASTIC.....	92
Figura 5.11 Mapa final de vulnerabilidad elaborado por el Dr. Ramiro Rodríguez (2000). Extraído de Rodríguez et al, (2000),The salamanca case 3.....	94
Figura 5.111 Mapa final de vulnerabilidad DRASTIC, elaborado para esta tesis.....	95

## IV. ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.14.1</b> Principales Unidades del medio granular (Guysa., 1998) Tomado de Lesser., 2000 pp15). .....	28
<b>Tabla 2.14.2</b> Principales unidades del medio fracturados (Guysa., 1998) Tomado de Lesser., 2000 pp 16. ....	29
<b>Tabla 3.1</b> Diferentes definiciones de “Vulnerabilidad de acuíferos”. (Tomado de Mena López & Montes García., 2010). ....	39
<b>Tabla 3.2</b> Principales metodologías paramétricas usadas para vulnerabilidad a la contaminación donde MS; Métodos matriciales, RS Métodos de índice y superposición y PSCM: Métodos de conteo de puntos. ....	43
<b>Tabla. 3.22</b> Clasificación de (E). ....	43
<b>Tabla 3.221</b> Clasificación de (Kv) con su índice correspondiente. ....	43
<b>Tabla 3.222</b> Matriz para el método EKV. ....	44
<b>Tabla 3.24.3</b> Pesos de los parámetros DRASTIC (Aller et al, 1987). ....	48
<b>Tabla 3.24.4</b> Pesos de los parámetros pesticida DRASTIC (Aller et al 1987). ....	49
<b>Tabla 4.3</b> Valores para el parámetro D (Aller et al 1987) en conjunto con los modificados por Ramos ,(2002). ....	58
<b>Tabla 4.4</b> intervalos propuestos por Aller et al, (1987), para la recarga neta. ....	60
<b>Tabla 4.5</b> Intervalos propuestos por Aller et al, (1987), para el medio acuífero así como la valoración típica. ....	61
<b>Tabla 4.51</b> Intervalos por Aller et al (1987), para el medio acuífero de la zona de estudio. Tomado de Goya, (2011) y Zapata, (2013). ....	63
<b>Tabla 4.6</b> Intervalos por Aller et al, (1987) para el suelo de la zona de estudio, tomado de Goya, (2011) y Zapata, (2013). ....	66
<b>Tabla 4.7</b> Valores para el parámetro T de acuerdo a Aller et al, (1987). ....	67
<b>Tabla 4.8</b> Intervalos propuestos por Aller et al, (1987). Tomado de Goya, (2011) y Zapata, (2013). ....	68
<b>Tabla 4.9</b> Conductividades hidráulicas usadas de acuerdo a los 71 cortes. ....	70
<b>Tabla. 4.91</b> Valores para la conductividad hidráulica de acuerdo a Aller, (1987). ....	70
<b>Tabla 5.2</b> Precipitación y temperatura media anual de las estaciones climatológicas de Salamanca y sus alrededores (2005-2015) (Datos tomados de CLICOM, 2015. ....	74
<b>Tabla 5.21</b> Recarga neta (Rn) evaluada de las estaciones climatológicas de Salamanca y sus alrededores. ....	74

# CAPITULO 1

## 1. Introducción

### 1.1 Descripción de la zona de estudio

El agua es necesaria para el desarrollo de las actividades humanas por lo que una buena gestión es imprescindible ya que es indispensable para la vida. En México el uso del agua, tiene la siguiente distribución: el uso agropecuario tiene el 76%, energía eléctrica 4.7%, 14.4 % abastecimiento público y 4.9% el uso industrial; del total del agua usada el 61% es agua superficial y el 31% es agua subterránea (CNA., 2018). Para el estado de Guanajuato que ocupa el segundo lugar en déficit hídrico detrás de Baja California Sur (WRI., 2019) el uso de agua se divide en 68.84% para agua subterránea y el 31.16 a agua superficial (CEAG., 2015) donde destaca el uso del sector agrícola para el agua subterránea en un 71.11 %, 13.16% para servicios, 14.08% para servicios urbanos, el 1.66% para uso industrial, el restante para otros servicios. En cuanto al uso de agua superficial, Guanajuato tiene la siguiente distribución: 93.36% para el uso agrícola, el 6.61% para uso urbano y el restante para uso industrial (CEAG., 2015). Guanajuato cuenta con 20 acuíferos donde 18 se encuentran en sobreexplotación, destacan los acuíferos: Irapuato-Valle, Celaya y Silao-Romita siendo los más importantes en cuanto a disponibilidad de agua y agricultura, dado las condiciones geográficas y topográficas de la zona. Otro aspecto muy importante es la contaminación que existe en las corrientes fluviales del estado; de acuerdo con la información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, en el estado se cuenta con 3 de los ríos más contaminados del país: río Turbio, río Temascalío y río Lerma, que atraviesa la ciudad de Salamanca. Aun cuando se han efectuado numerosos proyectos y campañas para mitigar el daño derivado de la contaminación, no se ha visto una mejora sustancial en la calidad del agua de estas corrientes (CEAG., 2015).

La ciudad de Salamanca, ubicada en el estado de Guanajuato, cuenta con 334 localidades de las cuales 7 (si contamos Salamanca) cuentan con una población mayor a los 2500 habitantes cada una, el resto de las localidades se encuentra por debajo de este valor, siendo Salamanca la zona más urbanizada (Periódico oficial del gobierno del estado de Guanajuato., 2016). Salamanca se encuentra en una zona industrial

localizada en el centro del país, al SW de Guanajuato, que cuenta con una refinería (PEMEX), una termoeléctrica (CFE) e industrias de pesticidas, la agricultura es otra de las actividades más importantes que se desarrollan en la zona (Periódico oficial del gobierno del estado de Guanajuato., 2016).

Salamanca ha sido afectado ambientalmente por estas industrias a tal grado de ser un tema de preocupación local, regional y nacional desde hace algunos años (Periódico oficial del gobierno del estado de Guanajuato., 2016).

De hecho, una de las mayores preocupaciones ambientales recae en la calidad del acuífero, el cual es utilizado para el desarrollo de todas las actividades antropogénicas de la zona. El Acuífero Irapuato-Valle forma parte de casi todo el municipio de Salamanca, éste acuífero está ubicado en la región hidrogeológica no.12 (CNA., 2018) y es uno de los principales acuíferos de Guanajuato con sobreexplotación (CEAG., 2019).

Del total de habitantes (273,271) en Salamanca (INTERCENSO., 2015) más del 90% hacen uso del agua subterránea para desarrollar todas sus actividades cotidianas, el acuífero abarca los municipios de Irapuato, Valle de Santiago, Pueblo Nuevo, Juventino Rosas por mencionar los importantes (CEAG.,2018). El acuífero ha tenido un alto régimen de extracción para usos tanto industriales como de uso urbano, lo que ha provocado procesos de subsidencia en la mancha urbana, desde los 80s (Mejía et al., 2001), esta subsidencia ha ocasionado la formación de fallas que han agravado el proceso de subsidencia en la zona y propiciado la contaminación del acuífero.

Cabe recalcar que en las zonas donde no existe el servicio de agua potable, se recurre al uso de agua embotellada, algunos habitantes han consumido agua directo de la llave, y han presentado casos graves de salud, esto también ocurre al NE en donde los habitantes de la ciudad reportaron un extraño olor así como sabor a hidrocarburo del agua en 1992 (Rodríguez et al., 2000) llevando a la clausura de un pozo de agua en 1998.

Otro de los graves problemas ambientales detectados en la zona es la contaminación del río Lerma, debido a que durante muchas décadas han sido arrojados al río diversos residuos y desechos, así como agua residual sin ningún tratamiento, trasportando aguas residuales e incluso industriales (Rodríguez et al., 2000). La presencia de este río tiene

gran importancia ambiental en la zona, pues atraviesa la ciudad de Salamanca, que actúa como una barrera hidráulica que divide en dos a la ciudad. En la zona norte se encuentran las industrias así como pozos de extracción de agua profunda, y la contaminación reportada es más grave. En la zona sur donde están ubicados los botaderos de desechos de la ciudad, así como los pozos de agua somera no es distinto (Rodríguez et al 2000., Mejía et al., 2001).

Otra de las fuentes de contaminación en Salamanca es la intensa agricultura que se desarrolla en la zona. Este municipio lo conforma el distrito de riego no.11, en toda la zona los campos agrícolas se han regado con aguas residuales además se ha hecho uso de pesticidas, por ende, es posible que el agua utilizada está siendo infiltrada en el subsuelo lixiviando los productos químicos y migrando al acuífero, lo que se traduce en contaminación acuífera, el uso doméstico que abastece a la población y el industrial representado por la refinería (PEMEX) y la central termoeléctrica (CFE) instalada en la zona NE de la ciudad (Rodríguez., 2004).

Gracias a estudios previos, se ha detectado en la zona, fuentes puntuales de contaminación del acuífero, de hecho se han evaluado problemas por solutos provenientes de diferentes fuentes, tanto naturales como antropogénicas. Arsénico, plomo y benceno están entre los contaminantes reportados (Berlin et al., 2000) así como la presencia de hidrocarburo en fase libre en un pozo de agua reportado en los 90s (Rodríguez et al., 2000). Previamente se hizo una evaluación de vulnerabilidad mediante los métodos DRASTIC y AVI. En estos trabajos se realizó la zonificación de entornos vulnerables, además, con ayuda de la ubicación de fuentes potenciales de contaminación y los resultados de una encuesta, realizaron un análisis de riesgo. Todos estos factores influyeron en la cancelación de 3 pozos de agua, por la interacción de diferentes solutos asociados a los hidrocarburos, manejados en la refinería, pasivos ambientales industriales y componentes naturales como el arsénico y el flúor (Mejía y Sandoval., 2004).

Tanto la calidad de agua como la salud de los habitantes es de suma importancia. Evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de los acuíferos, con los datos más actualizados que se puedan obtener de la zona, junto con la integración

de las características particulares del acuífero, estudios previos sobre la vulnerabilidad a la contaminación en Salamanca, la presencia de las fallas ocasionadas por la sobreexplotación y un río que cruza la mancha urbana que proporciona características específicas al sistema, así como las sobre posición de fuentes contaminantes de la mano del hombre, se vuelve obligatorio y nos permite conocer de mejor manera la dinámica de los contaminantes en el acuífero así como las zonas vulnerables.

## **1.2 Hipótesis**

En el municipio de Salamanca, Guanajuato existen zonas que, por sus características hidrogeológicas, geológicas, tectónicas y por las actividades antropogénicas que se desarrollan, son vulnerables a la contaminación acuífera, principalmente por algunos compuestos o elementos químicos que no son retenidos en el suelo y cuyo medio de transporte directo es el agua.

## **1.3 Objetivo**

Determinar el grado actual de vulnerabilidad a la contaminación acuífera de la ciudad de Salamanca, Guanajuato, por medio de la metodología DRASTIC donde se obtendrá la zona más vulnerable en donde se tendrán los mayores valores.

## **1.4 Objetivos específicos**

- Determinar la vulnerabilidad del acuífero en el municipio de Salamanca con la metodología DRASTIC (Índice DRASTIC).
- Establecer la zona más vulnerable en la ciudad de Salamanca.
- Análisis de cortes litológicos para evaluar zona saturada, no saturada y conductividad hidráulica por medio de las conductividades hidráulicas teóricas así como las medidas directas en Río Turbio, Guanajuato.
- Evaluación de la recarga neta 2005-2015 a partir de los datos de las estaciones meteorológicas por medio de la fórmula de Turc (1954).
- Elaborar 7 mapas de vulnerabilidad para los distintos parámetros de la metodología DRASTIC.
- Obtener el Índice pesticida Drastic.
- Adaptar algunos parámetros intrínsecos a los que se tienen en la zona de estudio.



- Validar el mapa final de vulnerabilidad con información antropogénica (fuentes contaminantes)

## **1.5 Justificación**

La preocupación sobre la contaminación de las aguas subterráneas aumentó en todo el mundo desde hace algunas décadas. En México se tienen pocos estudios a escala nacional y local, sobre la contaminación de los acuíferos y las zonas susceptibles a la contaminación a las aguas subterránea, donde de los 653 acuíferos, existen 105 acuíferos en sobreexplotación (CNA.,2018). La infiltración del agua residual sin tratamiento hacia los acuíferos raramente se planea y se evalúa, sin embargo, esta práctica representa simultáneamente el potencial de un recurso benéfico y un riesgo de contaminación (Foster et al., 1988).

La evaluación de la contaminación del acuífero en la ciudad de Salamanca se debe a hidrocarburos, metales y compuestos orgánicos, estos han sido reportados desde finales del siglo pasado, así como la detección de As y Pb presentes en el agua de uso cotidiano (Rodríguez., 2001), que ha afectado la salud de la población, esto posiblemente de la mano del régimen de extracción de agua en la ciudad (Rodríguez., 2000, Mejía., 2001 y Berlín., 2001) y la combinación de los factores asociados a la presencia de hidrocarburos, pasivos ambientales y arsénico y flúor en 3 pozos de agua.

Los estudios existentes se realizaron a principios del 2000 estos abrieron las puertas para tratar de evaluar la contaminación del acuífero en la ciudad, sin embargo es necesario actualizar la información, con una mayor cantidad de información para que sea posible seguir monitoreando las zonas vulnerables conocidas o las zonas en peligro donde la contaminación pueda estar relacionada a fuentes difusas o puntuales de contaminación que se encuentran en la ciudad.

Para obtener un mapa de evaluación a la vulnerabilidad acuífera con los datos actualizados y una mayor cantidad de información siendo una necesidad en Salamanca, lo que serviría para planear estrategias de protección y mitigación de ciertas zonas de extracción de agua del acuífero cercano a lugares donde existan fuentes que contaminen y hagan uso del agua subterránea para sus fines.

Las repercusiones que ha tenido este problema a la población de Salamanca desde finales del siglo pasado son graves en varios sentidos, por lo que este trabajo podría significar un seguimiento futuro a las condiciones de vulnerabilidad del agua subterránea en ciertas zonas de la ciudad de Salamanca, siendo este el principal aporte a la sociedad por parte de la presente tesis.

## **1.6 Alcances**

Contar con la información de 7 mapas de vulnerabilidad de acuerdo al acrónimo que forma parte de la metodología Drastic, que permitan su evaluación, análisis e interpretación para finalmente tener un mapa representativo de la zona de estudio con su índice de vulnerabilidad, generando un sistema de información geográfica (SIG) para futuras actualizaciones o seguimiento del caso Salamanca. El estudio se limitó solo a la ciudad de Salamanca de acuerdo a la mayor cantidad de información donde subyace parte del acuífero Irapuato valle, que es el principal a estudiar con diferente comportamiento hidráulico en la zona, la metodología utilizada para el procesamiento de información recolectada y las herramientas para elaborar la recarga neta mediante la información anual de las estaciones ubicadas en Salamanca y a sus alrededores.

## **1.7 Limitaciones**

Este trabajo se realizó en gran parte con información proporcionada por estudios anteriores y con información reciente de instituciones públicas, páginas gubernamentales, tesis, así como estudios específicos de la zona.

## CAPITULO 2

### 2. Antecedentes

#### 2.1 Ubicación

Salamanca, Gto se localiza en el suroeste del estado (Figura 2.1). Limita al norte con los municipios de Irapuato y Guanajuato, al noreste con San Miguel de Allende, al este con Santa Cruz de Juventino Rosas y Villagrán, al sureste con Cortázar y al sur con Jaral del Progreso y Valle de Santiago, al oeste con una parte de Irapuato nuevamente y Pueblo Nuevo. Se encuentra entre las coordenadas  $-101^{\circ} 11' 39''$  de longitud W y, los  $20^{\circ} 34' 22''$  de latitud N. Su altura sobre el nivel del mar es de 1,721 metros. El municipio ocupa una superficie de 774 km<sup>2</sup>, representa el 2.5 % del total del territorio del estado (INEGI., 2009).

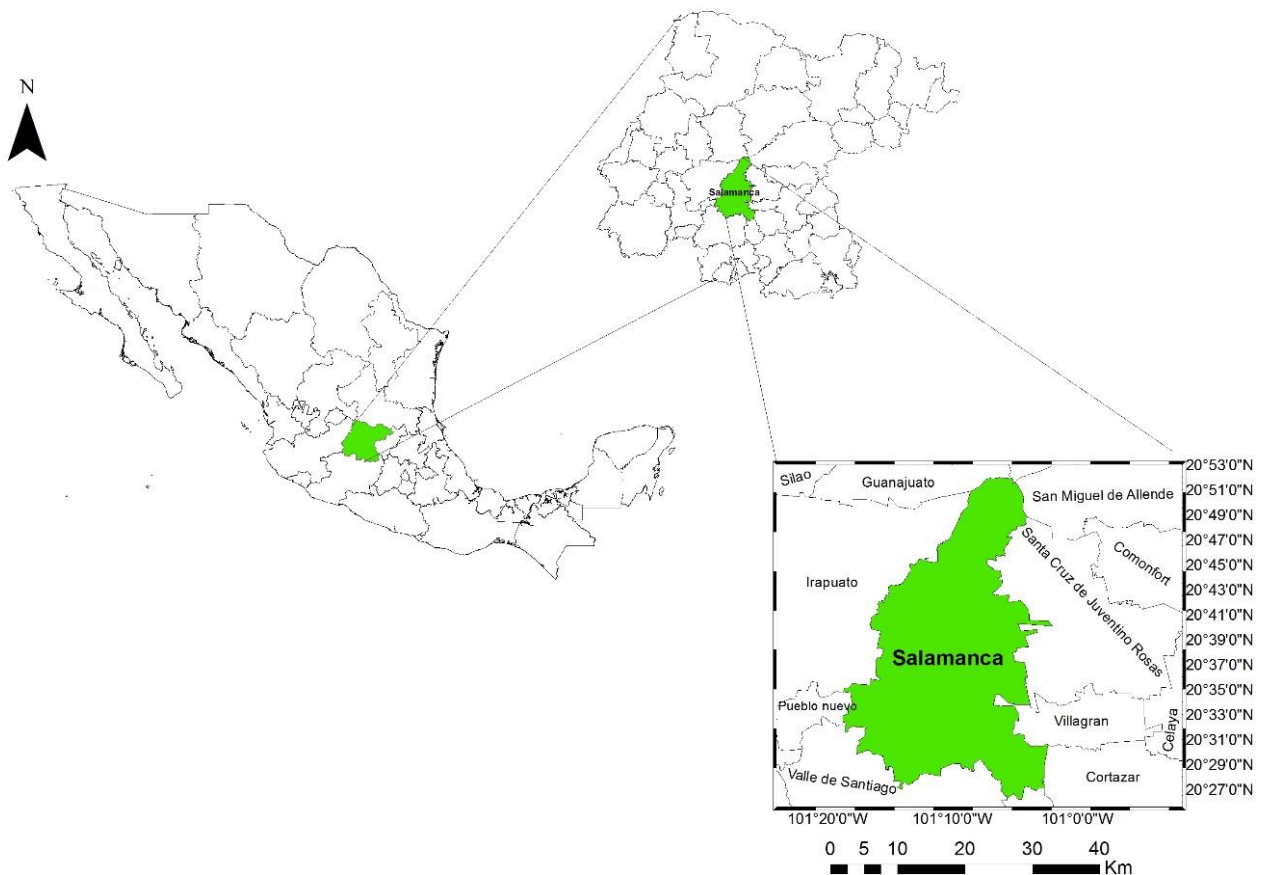


Figura 2.1 Localización del municipio Salamanca, en el estado de Guanajuato.

## 2.2 Vías de acceso

Las carreteras de mayor importancia son: La carretera federal no.45 Querétaro-León que conecta la cabecera municipal de Salamanca con Celaya e Irapuato, al sur de ciudad se encuentra la carretera federal no.43 Morelia-Salamanca que conecta con la ciudad de Valle de Santiago. También existen brechas y terracerías que conectan con las localidades alrededor de la cabecera municipal. Por último la línea de ferrocarril México-Cd. Juárez que actualmente sirve para trenes de carga como se muestra en la Figura 2.2

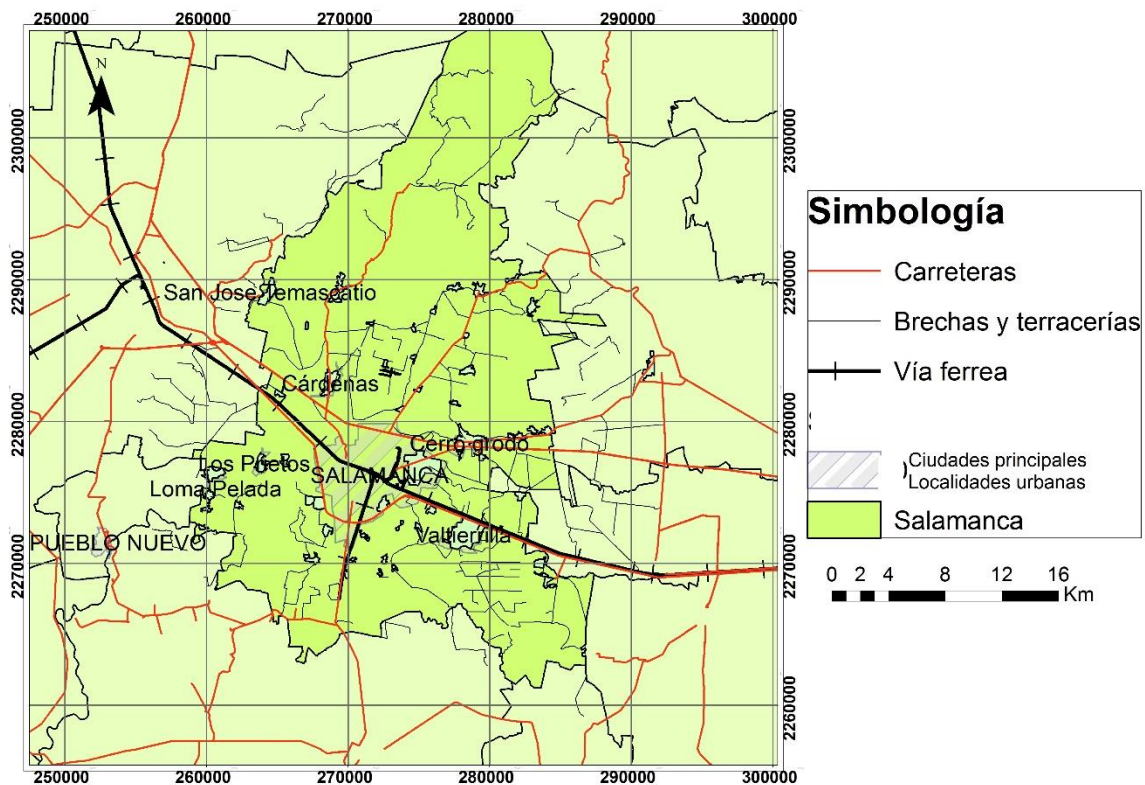


Figura 2.2 Principales vías de acceso de Salamanca. Tomado de CONABIO, (2012).

## 2.3 Aspectos socioeconómicos

Las principales actividades de la zona son la industria y la agricultura; entre los principales sectores industriales se encuentran: generación de energía eléctrica, refinación de petróleo, industria petroquímica y química de alimentos. La generación de energía eléctrica y la refinación de petróleo son las principales actividades industriales del municipio. También hay industrias de transformación, extractivas, de construcción y

maquiladoras y las múltiples industrias de pesticidas ubicadas en la zona urbana de Salamanca (Rodríguez., 2003).

La agricultura de riego tiene gran importancia los principales cultivos son trigo, sorgo y alfalfa. Este Municipio, tiene una destacada importancia en la agricultura ya que la superficie de uso de suelo agrícola constituye cerca del 80% de la superficie, misma que abarca suelo con posibilidades de establecer cultivos agrícolas de riego y temporal, un 0.8% corresponde a pastizal natural, el 1.2 % es de bosque ubicado al norte del municipio, en donde se localiza el área natural protegida Temazcatío, el restante 18 % corresponde a superficie cubierta de matorrales. (INEGI., 2009, Mejía., 2007). Su suelo es considerado como uno de los más productivos y ricos desde el punto de vista agrícola tanto del Bajío Guanajuatense como del país. Por otra parte, derivado de las prácticas agrícolas, se presentan comúnmente la quema de esquilmos, así como el uso de pesticidas y fertilizantes en las diferentes actividades agrícolas que se llevan a cabo. La ganadería se practica en forma extensa principalmente con el ganado vacuno y caprino.

#### **2.4 Clima y temperatura**

El clima dominante es semiárido subhúmedo (Figura 2.4) con lluvias en verano, de humedad baja en un 92.3% del Municipio, tanto en el centro como al sur, con una temperatura media anual de 18°C a 20°C. En el resto de la superficie el clima es subtemplado húmedo con lluvias en verano, de humedad media, esta zona se encuentra en la parte norte del Municipio (Presidencia municipal Salamanca, 2018). Mientras que la temperatura media anual para el acuífero Irapuato-Valle es de 19.16° C, la temperatura media máxima es de 29.1° C. y la temperatura media mínima 12.9° C (Conagua., 2015).

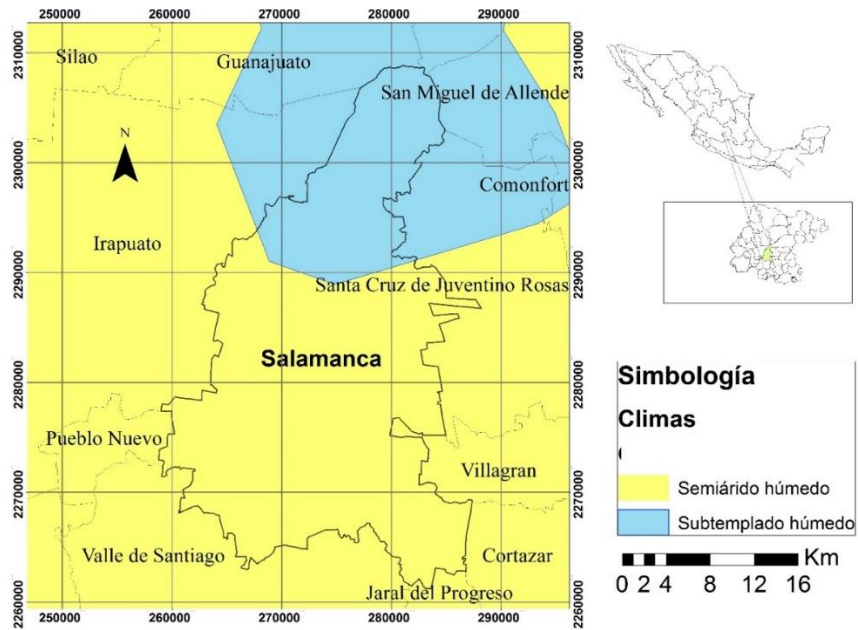


Figura 2.4 Clima y temperatura de Salamanca, Gto. Datos tomado de SEBIO-GTO, (2012).

## 2.5 Precipitación

El régimen de lluvias correspondiente al municipio durante el verano y parte del otoño tiene un promedio anual de 750 mm. Las precipitaciones se dividen en 3 zonas (Figura 2.5) al noroeste y sur, suroeste con una precipitación menor a los 700 mm, al noreste mayor a los 800 mm y centro y occidente entre estos dos extremos (Presidencia Municipal Salamanca., 2018).

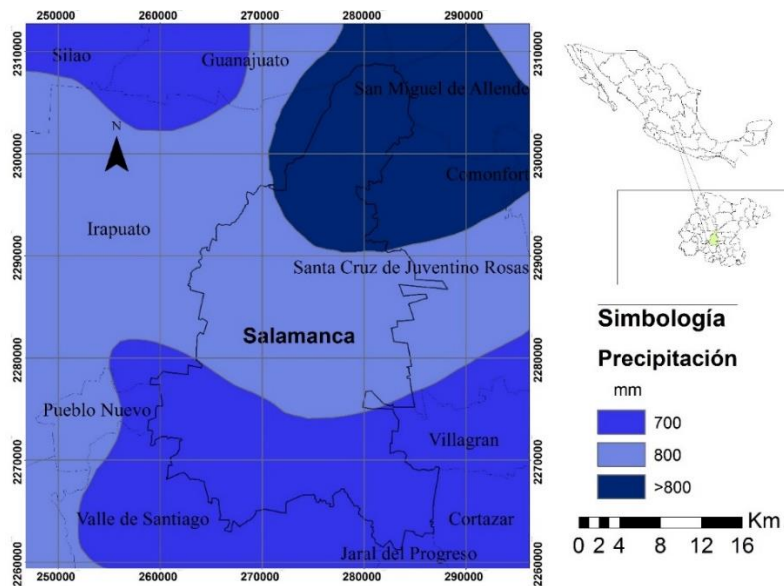


Figura 2.5 Precipitación de la zona de zona de estudio. Datos de SEBIO-GTO, (2012), CONABIO, (2012).

## 2.6 Hidrografía

El área de estudio se localiza en la región hidrogeológica no.12 denominada “Lerma Santiago-Pacífico” dentro de la cuenca del alto río Lerma y una pequeña porción de la cuenca del río Laja. El acuífero que se encuentra en esta zona es el Irapuato-Valle (1109), el más importante de la zona y uno de los más sobreexplotados (Conagua., 2015, CEAG., 2019).

El acuífero de Irapuato–Valle (Figura. 2.6) se encuentra actualmente sobreexplotado, si se considera que la cantidad de agua que se obtiene del subsuelo, es mayor que la que recibe o que recarga debido al uso intensivo del agua subterránea, ha provocado problemas de abastecimiento en ciudades como Irapuato y Salamanca, y conllevó a su vez, algunas manifestaciones superficiales de la extracción intensiva, como la subsidencia en zonas urbanas que han causado daños en la infraestructura (Arias., 2016).

El río Lerma constituye la corriente superficial más importante en la zona de estudio, de hecho atraviesa el municipio de este a oeste, formando una de las cuencas hidrológicas más importantes del Estado: la cuenca "Lerma- Santiago" (Presidencia Municipal Salamanca., 2018).

En el norte del municipio se localizan los arroyos: Potrerillos, La Joya, Peña Prietas, el Bordo y Ortega; todos ellos afluentes al río Temascalatío, que a su vez constituye límites políticos con Irapuato (Figura 2.6).

En el territorio del municipio se ubican varios canales para riego agrícola siendo el principal el Antonio Coria, que ingresa al oriente del Municipio a la altura del poblado Santa Rita y continua por el poblado de Cerro Gordo, de ahí traza al norte hasta la comunidad la Compañía y a partir de ahí, continua al poniente hasta los límites del municipio de Irapuato. Al este de la Comunidad de Valtierra se encuentra el Canal Bajo Salamanca con traza al norte hasta cerca de la Comunidad del Conejo donde cambia su trayectoria con rumbo noroeste hasta la Comunidad del Fuerte, ahí avanza hacia el oeste y cruza la carretera y vía del ferrocarril en el punto conocido como Chico. El Canal Sardinas se ubica en el lado norte de la zona urbana con traza de oriente a poniente. El

Canal El Alacrán es afluente del río Lerma a la altura de la comunidad de Mancera, siendo su origen desde el norte del municipio donde se ubican los cerros Coecillos y Lobos (Presidencia municipal Salamanca., 2018).

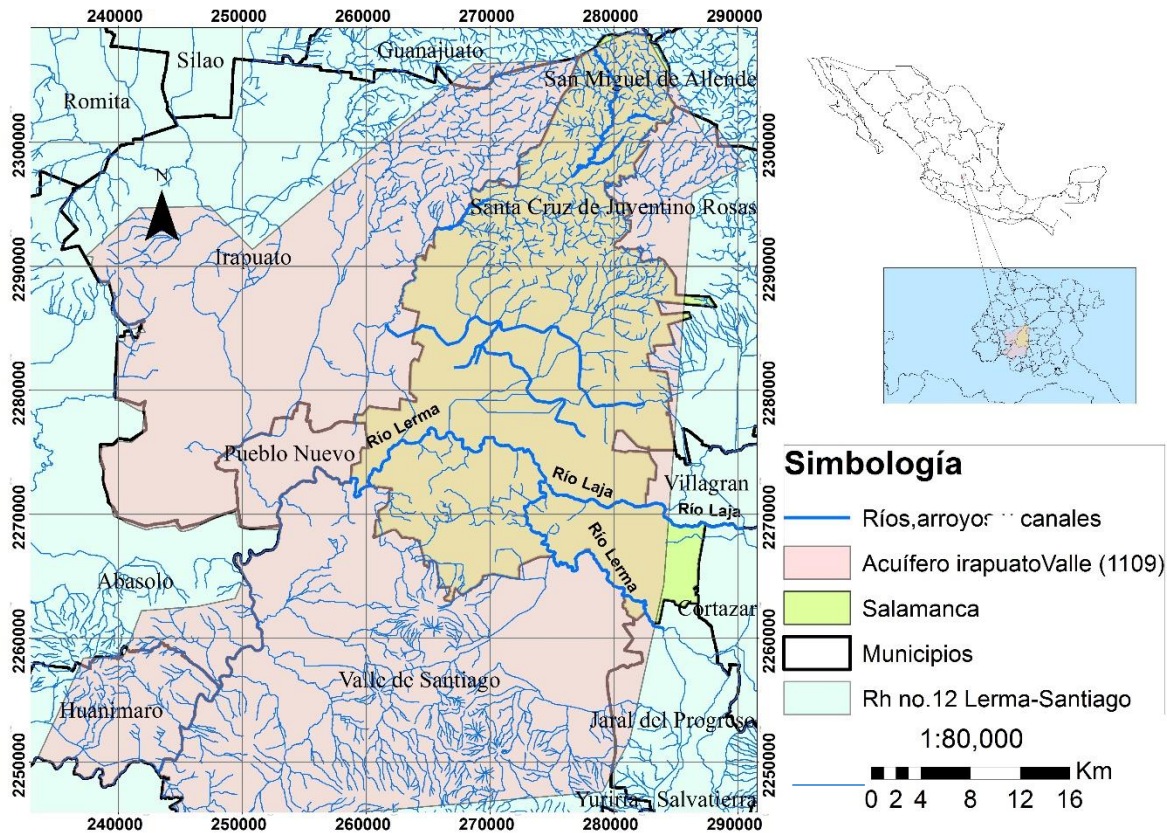


Figura 2.6 Hidrografía de Salamanca, Gto. Datos de SEBIO-GTO, (2012), CONABIO, (2012).

## 2.7 Fisiografía

De acuerdo con INEGI, (2009) la región de Salamanca, Gto se encuentra entre las provincias geológicas; Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y la Mesa Central (MC).

Tal como se muestra en la Figura 2.7 la FVTM es parte de un 90.6% de Salamanca mientras que la MC un 9.35 % (INEGI, 2009). La FVTM es un arco volcánico continental del Mioceno-Cuaternario de composición andesítica (Ferrari et al., 2000). Mientras que en la Mesa central afloran rocas de un arco volcánico del Paleógeno principalmente de composición ácida (Nieto Samaniego et al., 2005).

En cuanto a subprovincias, Salamanca está dominada por el Bajío Guanajuatense en un 90.2% seguido de sierras y llanuras del norte de Guanajuato (9.7%) y sierras y bajíos michoacanos (0.1%) (INEGI., 2009).



La Sierra del Bajío Guanajuatense se caracteriza por tener sierras de laderas tendidas, mesetas, lomeríos aislados y llanuras aluviales, correspondiendo al sur del municipio, las elevaciones de esta subprovincia se encuentran entre 1750 y 2100 msnm. En cuanto a la subprovincia de llanuras del norte de Guanajuato se caracterizan por tener sierras altas con mesetas periféricas que colindan con la porción sur del municipio de Guanajuato, las elevaciones oscilan entre 2000 y 2500 msnm. (INEGI., 2009).

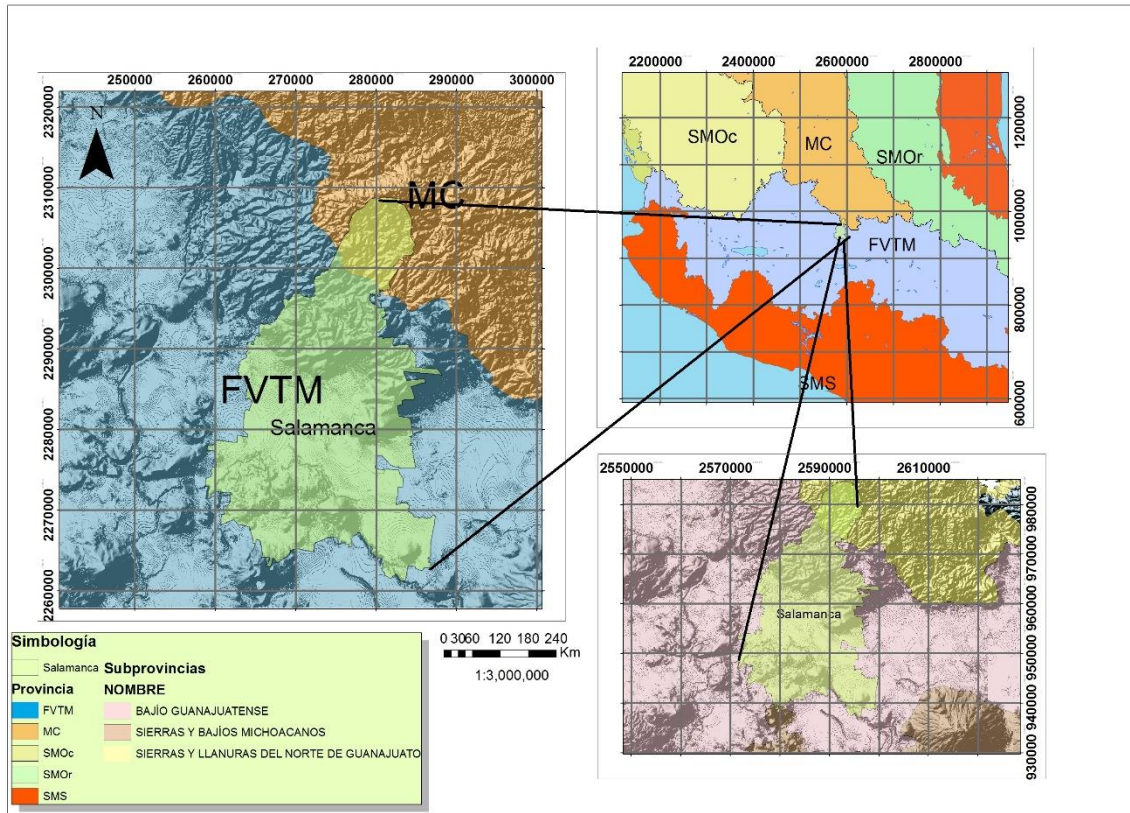


Figura 2.7 Provincias y subprovincias de la zona de estudio. Tomado INEGI, (2001).

## 2.8 Geología regional

De acuerdo con la reconstrucción tectónica del pacifico mexicano la fase terminal del choque de la placa de Farallón con la placa de Norteamérica, marca una etapa de esfuerzos extensivos, que originaron con ello el desarrollo de pilares y fosas tectónicas, (a manera de Horst y Graben), que finalmente llegaron a formar las cuencas hidrológicas y principales sistemas acuíferos en el territorio mexicano (Mejía et al 2001). Posteriormente, con la culminación de los choques de Placas iniciaron los eventos volcánicos del Cenozoico, tanto de la Sierra Madre Occidental (SMOc) como de la FVTM; en lo que respecta a la geología regional se han descrito una serie de eventos volcánicos que datan desde el Oligoceno y van hasta el reciente, conteniendo rocas de composición ácido y finalizando con básicos. En sincronía se emplazaron depósitos de rellenos sedimentarios como producto de la erosión de las rocas preexistentes de la SMOc conocidos como Terciario granular indiferenciado (sedimentos continentales) que llegan a presentar intercalaciones con los derrames lávicos (Figura 2.8). De esta manera la zona de estudio se encuentra rodeadas/sobre rocas volcánicas y material de relleno sedimentario que datan del Mesozoico hasta reciente (Mejía., 2007).

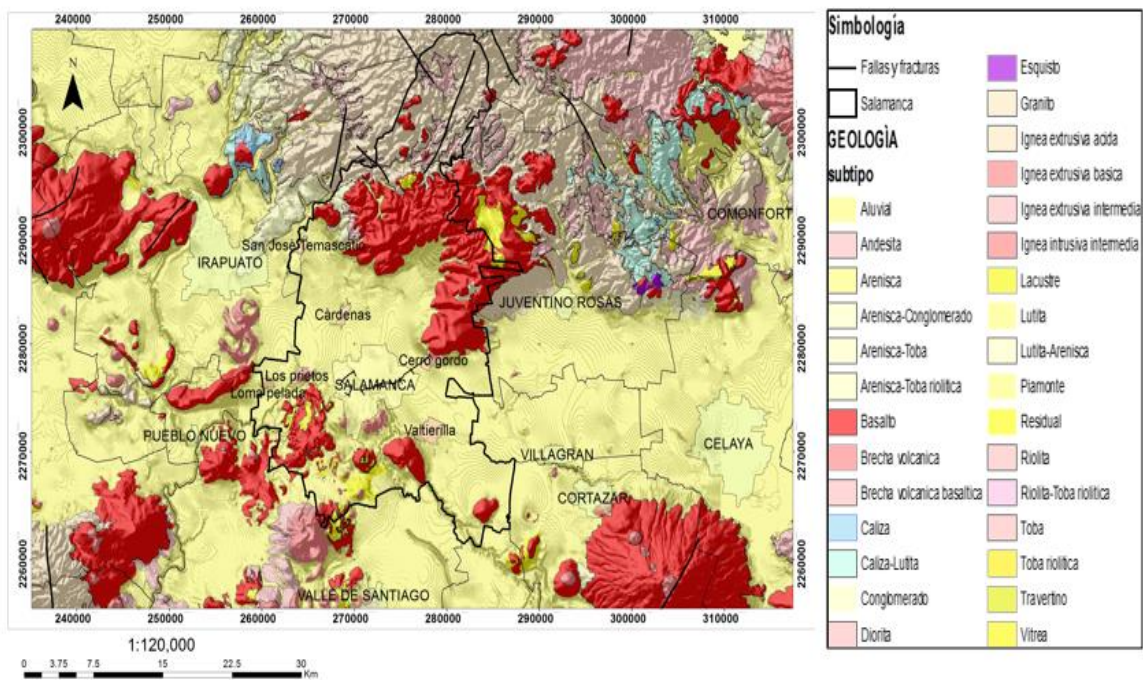


Figura 2.8 Marco geológico regional., modificado de SEBIO-GTO, (2012) y Atlas, (2012). Escala 1:120,000. En negritas, Salamanca, Gto.

## **2.9 Marco estratigráfico**

La zona de estudio se encuentra en un amplio valle aluvial en el cual las unidades geológicas aflorantes son principalmente productos volcánicos del Terciario y Cuaternario. Sin embargo, en el subsuelo se considera que se encuentran secuencias de materiales diversos, reportando edades desde el Mesozoico hasta el Reciente (Guysa., 1998).

### **1a. Rocas Mesozoicas**

De acuerdo con Nieto Samaniego et al (2012), las rocas mesozoicas afloran al norte y oriente de la zona de estudio (Salamanca, Gto). Se ha reportado la presencia de estas rocas en subsuelo donde se describen como rocas marinas vulcanosedimentarias deformadas por acortamiento, que se presentan en muchas localidades con metamorfismo de bajo grado en facies de esquisto verde (Martínez-Reyes., 1992).

### **2b. Rocas Cenozoicas del Terciario**

La sobre posición de las rocas del Cenozoico en la región está relacionada a los procesos orogénicos y el emplazamiento de dos arcos volcánicos que afectaron el centro del país (Nieto Samaniego et al., 2012).

Los eventos comienzan desde el Paleógeno.

### **3c. Terciario (Paleógeno/Neógeno)**

#### ***A. Conglomerado Guanajuato (Oligoceno temprano)***

Con este nombre se agrupa a una secuencia de sedimentos clásticos continentales, localizados en las cercanías de la ciudad de Guanajuato, que se extiende hasta la Sierra de Guanajuato, Hernández (1991), los relaciona a los afloramientos de conglomerados localizados en la Sierra de León, que otros autores denominaron informalmente como Conglomerado Duarte o conglomerado rojo de Guanajuato. Esta unidad no aflora en la zona de estudio, pero por su amplia distribución en la región es posible que se encuentre a profundidad cubierta por los materiales vulcanosedimentarios más recientes (Conagua, 2015).

### ***B. Andesita Bernalejo (Oligoceno temprano)***

Martínez-Reyes (1992) y Quintero (1992) designan con este nombre a un cuerpo de lava de composición andesítica de textura porfídica y de color gris oscuro; contiene cristales de augita y plagioclasa, aflora en los alrededores del poblado Bernalejo, 5 km al nordeste de Comanja , ubicado al noroeste de la zona de estudio.

Cerca Martínez (1998) Menciona que la extensión de estas rocas es menor y se encuentra en superficie con erosión o fallamiento describiéndose rocas altamente fracturadas de color gris y tonos violáceos. Esta unidad se encuentra subyaciendo a las unidades ignimbríticas, no se presenta en el área de estudio, pero se infiere se encuentra en el subsuelo (Guysa., 1998).

### ***C. Ignimbrita cuatralba (Mioceno Temprano)***

Quintero (1992) y Martínez-Reyes (1992) propusieron el nombre de Ignimbrita Cuatralba para una sucesión de ignimbritas que forman grandes mesetas en las cercanías de la Sierra de Guanajuato. Quintero (1992) describe esta unidad como un depósito piroclástico moderadamente consolidado, con fenocristales de feldespatos potásico y cuarzo y estructuras tipo fiamme. .

Cerca Martínez (1991) dividió en dos miembros respectivamente:

Miembro superior: Descrita como una roca ignimbrítica con espesor variable y textura porfirítica con abundante fenocristales de cuarzo, sanidina y escasa plagioclasa inmersas en una matriz muy fina, aunque en algunas porciones ésta es vítrea. Una de las principales características de este miembro son las estructuras fluidas vesiculares, además de diaclasas verticales de tipo columnar. Este miembro aflora en la depresión Salamanca-Querétaro, en la Sierra de Guanajuato y Graben de Penjamillo.

Miembro Inferior. Constituido por tobas de composición félsica sin soldar, con poca consolidación de color café claro a crema, compuesta por cenizas, fragmentos líticos y pómez sin colapsar, varía de masiva a bien estratificada. Este miembro en ocasiones no se presenta debido a la poca resistencia que tiene.

En los alrededores de Salamanca esta unidad se encuentra al NE, principalmente la parte SE de la Sierra de Guanajuato. De acuerdo con la descripción Quintero (1992) define estos afloramientos como parte del miembro superior.

Gross, (1975), dataron entre  $37\pm 3$  y  $32\pm 1$  ma (Oligoceno Temprano) a las rocas riolíticas que constituyen los domos del distrito minero de Guanajuato, con los que se pudiese asociar a esta unidad. Hernández (1986) correlaciona estructuralmente con la Falla del Bajío, la cual está asociada con la mineralización de la Veta Madre en el distrito minero de Guanajuato, cuya mineralización fue fechada por Gross, (1975), con una edad de emplazamiento de  $29\pm 1$  ma, por lo tanto si la falla afectó a esta unidad esta debe de ser más antigua.

Finalmente Nieto Samaniego (1990) y Pasquaré (1991) mencionan que la edad del vulcanismo ácido es del Oligoceno-Mioceno.

#### ***D. Conglomerado Xonocostle (Mioceno Temprano-Pleistoceno)***

El conglomerado Xoconostle fue descrito por Pasquaré et al (1991), como el producto de la erosión de las rocas volcánicas de la SMOc. No aflora en el área de estudio, pero aflora al norte de la zona de estudio en los alrededores de la Sierra de Guanajuato. Ha sido definido como un conglomerado poligmítico de estructura masiva constituido por clastos gruesos de ignimbritas y en menor proporción de fragmentos andesíticos, subredondeados a redondeados, además de horizontes de rocas areniscas alternadas con limolitas pobremente cementadas, interestratificadas con capas de conglomerado. El color que presentan varía de blanco a rosa, llegan a presentar en ocasiones de color rojo, lo que hace que se confunda con el Conglomerado Rojo de Guanajuato.

No se cuenta con evidencias paleontológicas que permitan asignarle una edad, pero relacionarlo con los eventos tectónicos del Plioceno, se le asigna una edad del Mioceno, esto por la similitud de las descripciones de las unidades Ignimbríticas y los sedimentos continentales (Guysa., 1998).

Esta unidad de conglomerados se ha clasificado dentro de la secuencia sedimentaria denominada Terciario Granular Indiferenciado, nombre que se ha propuesto informalmente para todo el material sedimentario continental, excepto el aluvión, que se

encuentra rellenando las depresiones (Salamanca-Querétaro) causadas por los esfuerzos extensivos del Terciario. Ocupa un 20% del total de la extensión estatal en forma de terrazas aluviales y lomeríos redondeados. De acuerdo con sus características litológicas se ha dividido en 3 paquetes:

1. Areniscas y limolitas: presentan una interestratificación de areniscas de color rojizo a crema, con limolitas de color crema a amarillo, con un fracturamiento superficial rellenado por material arcilloso; presenta compactación variable y estratificación delgada, con una estructura laminar.

2. Lutitas: su color es variable y va de verde a amarillento, son compactas y se presentan en láminas de hasta 1 cm de espesor.

3. Calizas y margas: Las calizas varían de microcristalinas a arenosas o arcillosas, y en algunas partes se pueden considerar como margas, con algunos intraclastos subredondeados; el color de las calizas va de crema a café claro, y en algunos lugares presenta una coloración verde, debido al alto contenido arcilloso, presentan una estratificación muy marcada y una buena compactación.

Algunos conglomerados constituidos de rocas del Oligoceno y afectados por el tectonismo del Plioceno, se consideran de una edad pliocénica, lo cual queda corroborado con los estudios realizados a base de diatomeas. La edad de los sedimentos calcáreos fue determinada por Guysa., (1998), para los sedimentos del área de San Miguel de Allende y corresponde al Pleistoceno.

Los ambientes de depósito representados por materiales granulares, de acuerdo con el tamaño del grano, corresponden con zonas fluviales (a lo largo del valle) y lacustres (las cuales se llegan a presentar hacia la parte central del valle, de una manera local).

### ***E.-Secuencia Volcánica del Mioceno Tardío (Mioceno-Plioceno)***

Pasquaré et al., (1991) agrupa una serie de rocas volcánicas básicas e intermedias, en ocasiones riolíticas. Sus mejores afloramientos se encuentran en los alrededores de la ciudad de Querétaro; así mismo definen a esta secuencia como la base de la FVTM, ya que son materiales que definen un Arco Volcánico con un rumbo E-O. Las unidades agrupadas en ésta secuencia son:

1. Basaltos río Lerma
2. Basaltos Villa Morelos
3. Basaltos Querétaro (Localidad Majadas de Ancón)
4. Andesitas y basaltos Tarimbaro
5. Andesita la Ordeña (Localidades San Felipe, San José de Mendoza y la Ordeña)
6. Sedimentos lacustres asociados al emplazamiento de cuencas endorreicas

De manera general se describen flujos de lavas basálticas y basáltico-andesíticas, que se encuentran en forma masiva al sur de Salamanca.

Además de la andesita Ordeña también se encuentran los basaltos Querétaro que corresponden con basaltos de olivino (ol), estos ocupan la mayor extensión superficial en la parte de la Sierra de Guanajuato, descrita en los alrededores del poblado Majadas de Ancón.

De acuerdo con las descripciones hechas por Guysa (1998), las localidades San Felipe, Cerro Gordo, Banco de Material, La Ordeña y San José de Mendoza corresponde a Basaltos andesíticos, los cuales corresponden con la unidad denominada andesita la Ordeña al NE de Salamanca.

Con base en dataciones radiométricas y por correlación estratigráfica con los conos de composición andesítica, la secuencia se encuentra en el Mioceno Tardío.

#### **4d. Cuaternario**

##### ***F. Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG-Plioceno Tardío-Holoceno)***

Este campo cuenta con aproximadamente 900 conos cineríticos y 100 volcanes de otros tipos, tales como conos, domos y gruesos derrames de lava no asociados, conos y maares, además de estos se han reportado 300 volcanes de tamaño medio, abarcan una superficie de aproximadamente 40,000 km<sup>2</sup> (Guysa., 1998).

Las unidades que se distinguen dentro del campo son las siguientes:

1. Conos Cineríticos Villa Escalante (fuera del área de estudio).
2. Volcanes de Escudo y Pequeños Conos de Lava.
3. Domos Andesíticos Pátzcuaro (fuera del área de estudio).
4. Domos del Pleistoceno (Domos Riolíticos y Dacíticos El Oro).
5. Domos Riolíticos y Dacíticos Puruandiro (fuera del área de estudio).
6. Volcanes Mono genéticos.

De acuerdo con las descripciones de Guysa (1998) se dividen en miembro inferior y superior, en los cuales en el miembro inferior los conos cineríticos afloran al sur de Salamanca, la composición de estos conos está formada en su totalidad por cenizas, donde contienen fragmentos líticos de basalto color negro con vesículas que pueden llegar a medir hasta 60cm de diámetro. El color que presenta la toba es amarillo oscuro, con estratificación delgada. Las edades reportadas por Hasenaka y Carmichael (1985) van del Plioceno al Cuaternario.

El miembro superior que igual aflora en la parte sur de Salamanca, está conformada por volcanes monogenéticos con derrames de basalto vesicular, con fenocristales de plagioclasa. Los conos de escoria no presentan cráter. Cada volcán tiene derrames basálticos de lava vesicular oscuros que forman mesetas. Los derrames a veces presentan tanto estructura de tipo aa como pahoehoe. Los volcanes están alineados aproximadamente siguiendo el rumbo de la falla El Bajío. La edad de esta unidad también es Plioceno-Cuaternario (Hasenaka y Carmichael., 1985).



### **G. Aluvión (Cuaternario)**

Guysa (1998) agrupa esta unidad como los depósitos originados a partir de la erosión e intemperismo de las rocas que afloran en las porciones altas y bajas en la región. La zona de exposición de esta unidad es muy amplia localizándose en las partes bajas de los valles, desde la región Celaya-Salamanca-Irapuato. El espesor es muy variable, disminuye en la zona de Salamanca e Irapuato respecto a la zona de Celaya.

La composición de esta unidad es variada y su granulometría abarca desde sedimentos finos como son limos y arcillas, hasta las arenas mal clasificadas, desde finas a gruesas, y algunos fragmentos del orden de las gravas (Guysa., 1998).

Se distribuye en la mayor parte del área de estudio y de acuerdo con la posición estratigráfica en la cual se encuentran, al contenido litológico y a la poca consolidación de este material, a esta unidad se le ubica en el Cuaternario. Los materiales de esta unidad corresponden principalmente a ambientes de tipo fluvial y aluvial (Guysa., 1998).

### **2.10 Geología estructural**

La actividad volcánica de la SMOc y la FVTM se encuentran muy relacionada a los eventos estructurales que actuaron regionalmente durante el Cenozoico caracterizando la región en forma fragmentada, donde la deformación extensiva dio lugar a la formación de grandes bloques limitados generalmente por fallas normales (grabens y horst). Asimismo, el desarrollo de arcos volcánicos, como la SMOc en el Mioceno y la FVTM en el Plio-cuaternario, originaron el depósito de grandes volúmenes de materiales volcánicos, formando cuencas cerradas que con la continuación de los eventos tectónicos y por los procesos erosivos han permitido la formación de amplios valles con importantes espesores permeables (Mejía et al., 2001).

Por lo tanto la estructura geológica de la zona, presenta características comunes con los territorios afectados por procesos extensivos, en donde la distribución de las diferentes unidades litológicas está controlada por el fracturamiento asociado al tectonismo del Plio-Cuaternario (Conagua., 2015).

En el marco regional, CONAGUA, (2015) y Lesser, (2000), citan una descripción del contexto regional de una amplia zona de aproximadamente 113 km, de largo por 30 km,

de ancho, denominada depresión Salamanca - Querétaro, formó un amplio valle dominado por conos cineríticos, volcanes de escudo, maars y flujos de lavas de diversa composición, la orientación de la estructura es este-oeste siguiendo la orientación de la falla el bajío que forma parte de la sierra de Guanajuato.

### **2.11 Geología local**

Mejía et al, (2001), indican que las condiciones de los sedimentos y el marco geológico regional han creado dos ambientes geológicos locales a la ciudad de Salamanca, uno localizado al norte del cauce del río Lerma y otro al sur, siendo el río Lerma una división en la geología de la zona. En la parte norte la estratigrafía está representada principalmente por una secuencia heterogénea tanto vertical como en la horizontal de sedimentos finos con espesor variable. Donde predominan materiales arcillo-arenosos, que cambian localmente a areno-arcillosos, se presentan intercalaciones de estratos delgados de arcillas, arenas y gravas de granulometría variable. Generalmente la geometría de los materiales gruesos es lenticular lo que probablemente corresponda a paleocanales. Su distribución es dispersa ya que intervinieron en su depósito procesos fluviales. Además de los depósitos granulares se tienen materiales fracturados principalmente ígneos (basaltos), los cuales se presentan en forma de coladas; el espesor del material de relleno es de alrededor de los 100m, en tanto que las rocas fracturadas pueden sobrepasar los 200 m.

En la parte sur, de acuerdo con la información de los cortes recabados en los últimos años (Cano., 2011, Rosales., 2001) disminuye notablemente el espesor del material de relleno, presentándose coladas de materiales volcánicos a menores profundidades con respecto a la parte norte. En esta zona debajo de las rocas fracturadas se reportan materiales granulares que de acuerdo con su granulometría son clasificados como arcillas y arenas que llegan a tener un espesor considerable ya que algunos de los pozos no llegan a la base de los mismos.

De manera general la geología del municipio de Salamanca está caracterizado por una distribución de rocas ígneas que comprende andesita-basalto, rolita, toba, brecha volcánica, y rocas sedimentarias en casi todo el municipio como lo son los depósitos continentales aluviales constituidos por arcilla, arena, grava, conglomerado y mezclas de

las mismas (Figura 2.11). La roca más antigua de la zona es un conglomerado continental poligmítico que se correlacionó con el conglomerado rojo de Guanajuato pero solo aflora en muy pequeños puntos en las localidades de Joya de cortes y potrerillos, al norte de la ciudad de Salamanca sobre esa unidad se encuentra la andesita el Cedro y subyaciéndola, hay domos y lavas riolíticos que se correlacionaron con la riolita Chichindaro del volcanismo de la Mesa Central con una edad del Oligoceno (Nieto Samaniego et al 2012). Al NE de Salamanca en la localidad de Cerro Gordo se encuentran basaltos y flujos de lava basálticos productos asociados a los eventos de la SMOc. Se identificaron también tres unidades ignimbríticas con edades Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano, las cuales se consideran que son parte de la cubierta ignimbrítica de la Mesa Central intercaladas con andesita ubicadas al norte de Salamanca (localidad Potrerillos), forman parte de la sierra de Guanajuato. Subyaciendo las ignimbritas aparecen dos unidades de andesita-basalto, una constituye los depósitos asociados a la caldera La Ordeña (localidad la Ordeña) y la otra forma mesetas de lava distribuidas en buena parte del área de estudio (al sur de la ciudad de Salamanca). Adicionalmente se identifican aparatos volcánicos monogenéticos y derrames de lava que fueron agrupados como volcanismo perteneciente a la FVTM estos últimos ubicados al SE del río Lerma, se tienen 2 conos de escoria de composición basáltica y brechas volcánicas. Al SE del río se encuentran rocas basálticas del Cuaternario de la CVMG donde subyacen rocas residuales del paquete granular (al SW de Valtierilla) Nieto Samaniego et al (2012), Mejía et al (2001) y Cerca Martínez (1998).

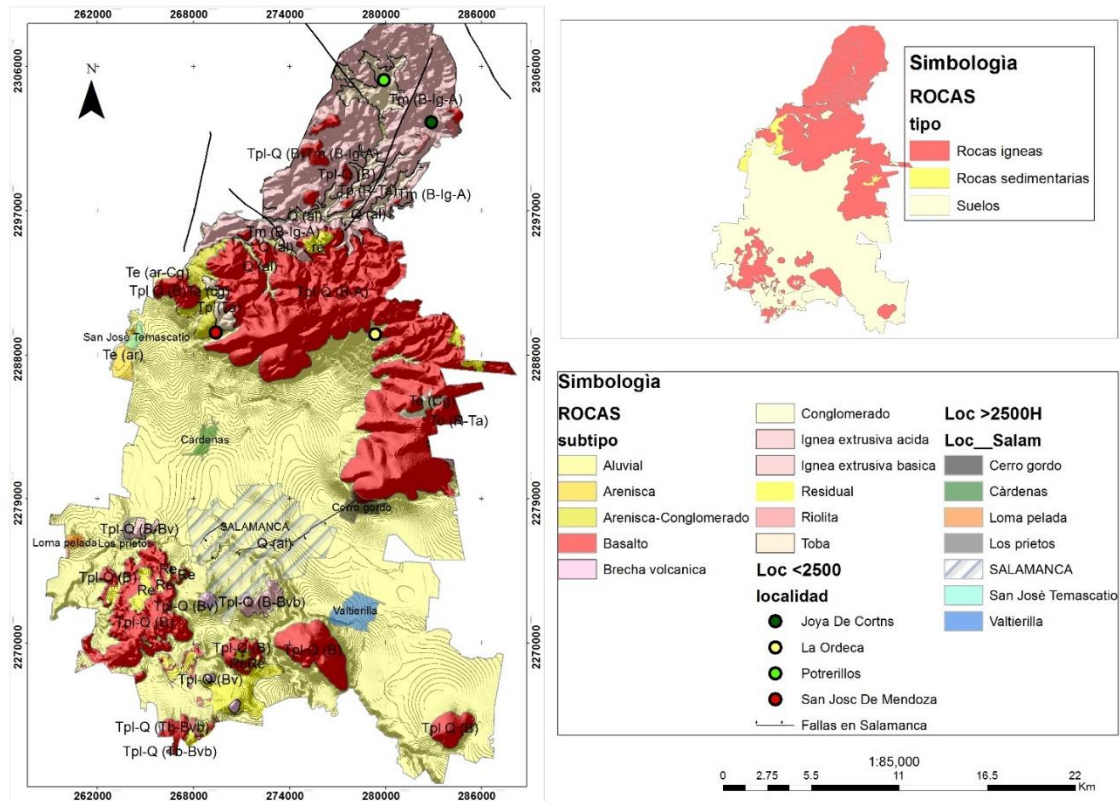


Figura 2.11 Geología local de Salamanca, Gto. Tomado, SBIO-GTO, (2012), Atlas, (2012).

Finalmente la columna geológica propuesta por Nieto Samaniego et al., (2012) obtenida de la cartografía geológica a escala 1:50,000 en la región Salamanca-Aldama, distingue 16 unidades geológicas. Sin embargo no todas las unidades afloran en el municipio de Salamanca (Figura. 2.112).

Las fallas más antiguas cartografiadas tienen una dirección NO-SE y se localizan en la parte noreste del área de estudio, esas fallas solo cortan a los derrames y domos riolíticos de edad oligocénica de la Mesa Central. Otro conjunto de fallas tiene direcciones que van de NE a ENE y corta a las unidades ignimbríticas.

En la parte sur del área de estudio se observaron algunas fallas normales de rumbo N-S que cortan a las rocas de la Faja Volcánica Transmexicana, de edad Plioceno-Cuaternario.

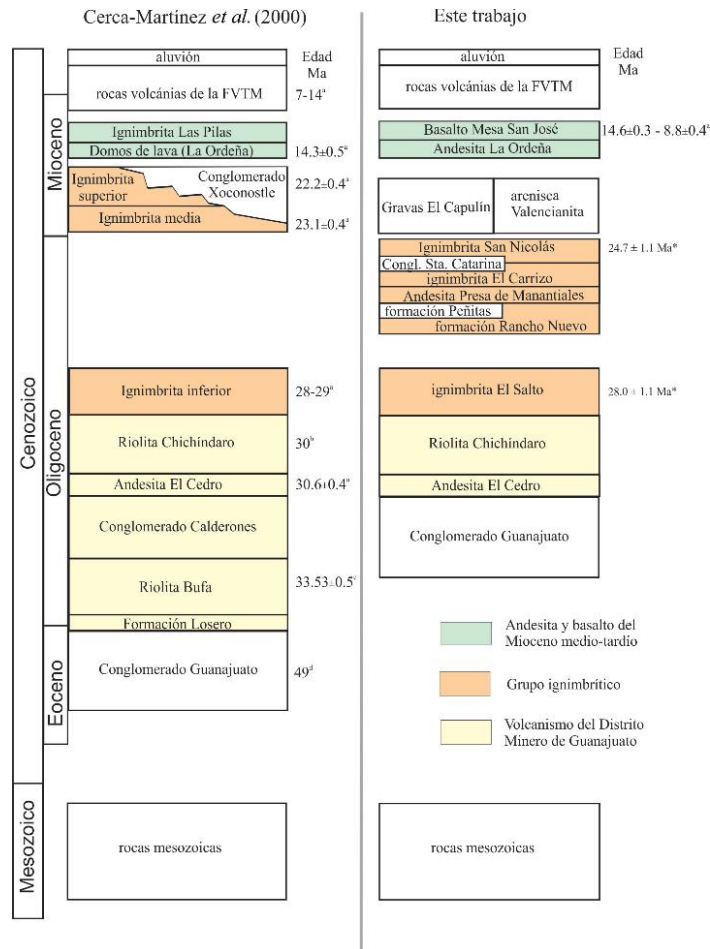


Figura 2.112 Columna estratigráfica de la región salamanca-Aldama, a la izquierda el propuesto por Cerca-Martínez y a la derecha por Nieto Samaniego, 2012. Tomado de Nieto Samaniego et al., (2012).

## 2.12 Hidrogeología del acuífero Irapuato-Valle

Las propiedades hidrogeológicas de los materiales que constituyen el área de estudio, se encuentran directamente relacionadas con las características texturales y estructurales de las rocas así como con los sedimentos que forman parte del ambiente hidrogeológico del acuífero. De manera general en las zonas planas la infiltración se considera baja o nula, debido a la presencia de horizontes semipermeables o impermeables. Para la zona norte del acuífero se considera como una importante zona de recarga, esta se encuentra constituida por rocas que permiten su circulación e infiltración del agua en el subsuelo, dando a un extenso acuífero de alto rendimiento (Arias., 2016).

El acuífero Irapuato-Valle se caracteriza por ser un acuífero libre de tipo granular-fracturado compuestas por rocas volcánicas y fluviales que mantienen la continuidad hidráulica regional (CEAG., 2018).

### **2.13 Hidroestratigrafía del acuífero Irapuato Valle**

De acuerdo con los trabajos de Rosales (2001), el Atlas Nacional Hidrogeológico (2006) junto con la información de las unidades geológicas, cortes litológicos y sus características petrofísicas teóricas, es posible dividir los materiales de la columna estratigráfica del área de estudio en las siguientes unidades hidrogeológicas que se observan en la Figura 2.13 y se describen a continuación:

#### ***I) Depósitos granulares fluviales y lacustres no consolidados de media a alta conductividad hidráulica. ( $k < 1\text{m/d}$ , PLEISTOCENO A RECIENTE)***

Depósitos que integran la porción superior del valle (Zona centro del acuífero) constituidos por una diversidad de material granular que van desde arcillas hasta gravas. Dentro de esta unidad hidrogeológica se encuentran los sedimentos del Terciario Granular Indiferenciado y el aluvión reciente.

#### ***II) Secuencia volcánica Plio- Cuaternaria con alta conductividad hidráulica ( $K > 1\text{m/d}$ , CENOZOICO MEDIO)***

La conductividad hidráulica está dada principalmente por el grado de fracturamiento que presentan las rocas. Por lo que esta unidad agrupa las rocas con alto fracturamiento. De acuerdo con lo anterior, los basaltos Cuaternarios del CVMG son agrupados dentro de esta unidad hidrogeológica (Atlas Nacional Hidrogeológico., 2006).

#### ***III) Rocas ígneas de baja conductividad hidráulica. ( $K < 1\text{m/d}$ , CENOZOICO SUPERIOR)***

Esta unidad al igual que la anterior, la conductividad hidráulica define el grado de fracturamiento, pero en este caso agrupa a los materiales volcánicos poco fracturados, y está representada principalmente por los depósitos de naturaleza piroclástica del Mioceno a reciente, de composición félsica, que aflora en la parte sur-oriental de la Sierra de Guanajuato. Las características litológicas de las unidades geológicas, así como la

interpretación de las propiedades hidrogeológicas fueron utilizadas para definir los materiales por donde tiene lugar el movimiento del agua subterránea. (Conagua., 2015)

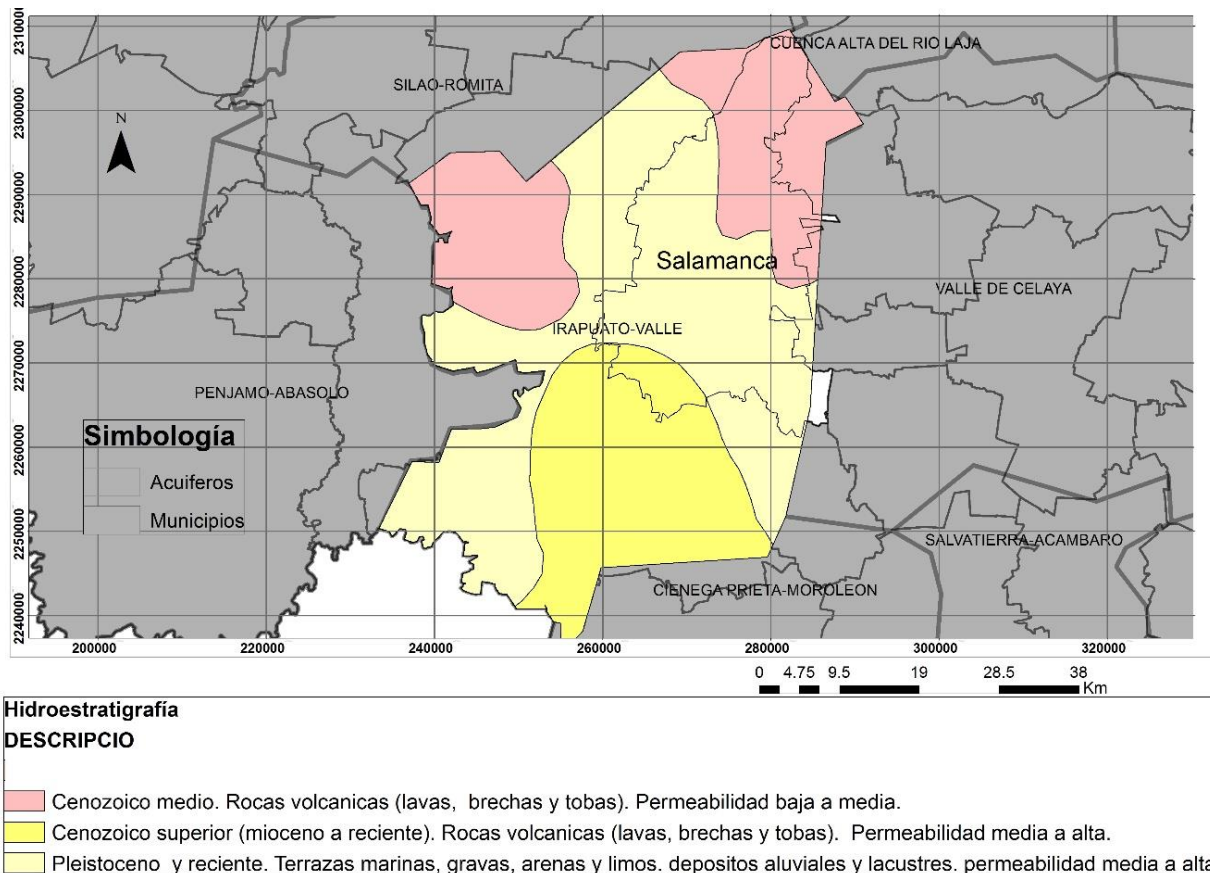


Figura. 2.13 Mapa Hidrogeológico donde se muestran las litologías, según el tipo de roca, descrito en (Atlas nacional., 2006). Tomado en CONABIO (2012).

## 2.14 Tipo de acuífero

El acuífero Irapuato-Valle tiene un comportamiento Granular-Fracturado así como diferentes propiedades hidrogeológicas relacionado con la profundidad y con el medio geológico que domina. A continuación se describen sus características de acuerdo con los trabajos de (Gusa., 1998, Lesser., 2000 y CEAG., 2018).

### 2.14.1 Medio Granular.

Gusa (1998) definió el medio granular a aquellos con contenido de sedimentos clásticos que caracterizan el medio, el cual se desarrolla prácticamente en el sistema acuífero del área y las facies que lo conforman son arcillosas, arenosas y gravosas, (Tabla 2.14.1). Estos permiten la entrada de agua a través de los espacios

intergranulares. Los intervalos conformados por arcillas y horizontes de clásticos finos, forman un medio que llega a provocar el semiconfinamiento de las aguas subterráneas. Todo el conjunto de estos sedimentos corresponden con ambientes fluviales y lacustres cubiertos en tiempos recientes por secuencias aluviales, y está conformado por paquetes de sedimentos cuyo espesor es en promedio de 180 m en la porción central del valle.

Tabla 2.14.1 Principales Unidades del medio granular (Guysa., 1998) Tomado de Lesser., 2000 pp15).

Medio Granular			
Unidad geológica	Espesor	Descripción Geológica	Ubicación y propiedades generales
Aluvión (Qal)	Variable de 6 a 50 metros.	Depósitos formados por depósitos fluviales compuestos por clásticos heterogéneos y con mala clasificación, de granulometría de suelos residuales.	Se observa hasta en un 70% del área de estudio los espesores son variables y se relacionan según la topografía del terreno, es posible que los mayores espesores se presenten a lo largo del curso del río Lerma.
Depósitos fluviales	Menor a 100 metros, puede ser mayor en zonas de arroyos.	Arenas y gravas con limitado contenido de limos y arcillas.	Se presenta en asociación a los cauces de los principales ríos (Río Lerma, Río Laja, Río Guanajuato Arroyo Temascalío, entre otros).
No diferenciada	Se registró hasta los 700 metros en el pozo Salamanca de la CFE.	Probablemente depósitos sedimentarios.	Probables depósitos de conglomerados con arenas finas y arcillas.

### 2.14.2 Medio Fracturado.

Se caracteriza por productos volcánicos del Mioceno tardío -Holoceno, constituidos por coladas de basaltos alterados y fracturadas (andesita Ordeña), e intercalaciones de materiales piroclásticos se muestran en la Tabla. 2.14.2 (Conagua., 2015).

La permeabilidad de estas unidades está en función del proceso eruptivo que originó las unidades, así como con la intersección de los planos de fracturas y diaclasas que presenta la roca, por lo que se relaciona tanto al factor estructural como al tipo de emplazamiento y composición del magma (Lesser., 2000).



Considerando las características de permeabilidad, que ha sido desarrollada por su alta densidad de fracturamiento, se considera que esta media forma parte de un acuífero en el que se esperarían buenos caudales de extracción. (Mejía., 2007).

Se requiere de mayor información respecto a la geología del subsuelo para identificar con mejor detalle, la importancia de este tipo de medio y su repercusión con la circulación del agua subterránea, y su relación con el comportamiento hidráulico de los pozos. (Conagua., 2015)

Tabla 2.14.2 Principales unidades del medio fracturados (Guysa., 1998) Tomado de Lesser., 2000 pp 16.

Medio fracturado			
Unidad geológica	Espesor	Descripción Geológica	Ubicación y propiedades generales
Lavas básicas y depósitos piroclásticos (CVMG)	Variable desde 30 hasta 350 m.	Depósitos volcánicos de tipo coladas basálticas, basalto-andesita y materiales asociados a volcanes monogenéticos.	Se exhiben en el centro del acuífero Irapuato Valle y al extremo sur suroeste, volcanes escudo, conos cineríticos y derrames de lava (al SE de Salamanca).
Ignimbrita riolítica	Variable desde 50 hasta 500 m, se presenta de manera discontinua.	Depósitos volcánicos de tipo explosivo, ignimbritas, tobas y algunas intercalaciones de material volcaniclastico.	Afloran al extremo noroeste del área de estudio, corona la Sierra de las Codornices (registrado por perforaciones entre 300 y 400 m de profundidad -Pozo 1b-Salamanca).
Coladas de lava y depósitos volcaniclasticos (Secuencia volcánica mioceno tardío)	Variable de 50 hasta 500 m.	Coladas basálticas alteradas interdigitados por material volcanoclastico del tamaño de arenas gruesas.	Se relaciona como un miembro de la secuencia volcánica del mioceno tardío relacionada con la unidad que aflora en la localidad (Andesita Ordeña) Kh es menor o igual a 1.

Con base en la interpretación de las secciones estructurales elaboradas, se ha establecido que la columna estratigráfica que se encuentra en el subsuelo del área de estudio se compone principalmente de la base a la cima por una serie de derrames volcánicos de tipo básico a intermedio, intercalados con depósitos de materiales

granulares. Las rocas volcánicas terciarias y cuaternarias (Ignimbritas del Mioceno, Andesita la Ordeña, Basaltos Querétaro y parte de las unidades que constituyen el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato) forman parte del medio fracturado; en tanto que los materiales cubiertos por las rocas volcánicas, intercalados o asociados con una red de canales entrelazados de ambientes fluviales y abanicos aluviales, considerados en parte como Terciario Granular Indiferenciado y Cuaternario Aluvión, forman parte del medio granular. De acuerdo con el grado de compactación y al fracturamiento que llegan a presentar las rocas del Terciario Granular Indiferenciado, estas también llegan a formar parte del medio fracturado (Mejía., 2007).

Es importante aclarar que es difícil establecer la diferencia entre los materiales del Terciario Granular Indiferenciado y los del Aluvión, del Cuaternario por lo que se considera que los materiales que se encuentran rellenando el valle son Cuaternarios. De acuerdo con los datos constructivos de algunos de los aprovechamientos revisados, la mayor parte de éstos extraen agua del medio fracturado (Conagua., 2015).

### **2.15 Acuífero local de Salamanca, Guanajuato**

En la ciudad de Salamanca se tienen 2 perfiles (Figura 2.15) para conocer un poco la geología del subsuelo. El cauce del río Lerma delimita el sistema acuífero local así como la falla asociadas con subsidencia (Figura 2.151) que dividen de norte a sur la geología del acuífero. En Salamanca se presentan 3 tipos de acuífero de acuerdo con su profundidad. Cada uno con diferentes características geológicas, al norte del río Lerma así como al sur del mismo se tienen una formación somera, una intermedia y una profunda (Rodríguez et al, 2000). Donde el nivel freático del acuífero somero varia de 18 a 20 m de profundidad (Mejía et al., 2001). El nivel freático en el acuífero intermedio es de 30 a 35. Finalmente para el acuífero profundo varia de 70 a 80 m (Rodríguez., 2004).

En la zona norte, el acuífero somero está parcialmente comunicado con la formación permeable intermedia y ésta con la formación profunda. No se encontró información detallada sobre el comportamiento piezométrico del sistema acuífero. Aunque se puede asegurar que las formaciones colgadas no mantienen comunicación hidráulica con el acuífero en explotación (somero) o de existir ésta, no es relevante (Mejía et al., 2001).

La hidroestratigrafía local de la zona norte, está fuertemente controlada por alternancias irregulares de material de grano muy fino a grueso, secuencia que incluye paleocanales de diferentes geometrías y magnitudes. La permeabilidad de estos facilita la movilidad de flujos someros. Capas de arcilla impermeable pueden sostener “acuíferos colgados”, de dimensiones variables con cierta uniformidad en la ciudad de Salamanca. No se conoce con precisión los espesores de esta unidad somera y como ya se mencionó su composición geológica corresponde a aluvión así como en gran parte del acuífero Irapuato Valle (Mejía et al., 2001).

En la zona sur, la composición superficial ocupa los márgenes del cauce del río con material semejante a los del acuífero somero e intermedio de la zona norte. El material permeable que predomina es de rocas volcánicas fracturadas. La profundidad al nivel del agua para el municipio de Salamanca, es de 13 a 126 metros de profundidad, esta última se localiza al sur del municipio, en la localidad la Tinaja (CEAG., 2018).

Debido al perfil que se elaboró por estudios geofísicos de Tams (Figura 2.152) por encargo de la CEAG (2018) se conoce más la geología del subsuelo. El acuífero principalmente está dominado por rocas vulcanosedimentarias del Terciario-Cuaternario en la mayor parte de Salamanca, le sigue un derrame de basaltos-andesitas del Plioceno-Pleistoceno que puede encontrarse fracturados y varían a tipo granular, dependiendo del medio así como su profundidad. Al norte en los límites de la mesa central y la FVMT le siguen rocas volcánicas del Terciario así como andesitas, riolitas, tobas e ignimbritas del Plioceno relacionados a los eventos volcánicos de la FVTM como de la SMOc (Figura 2.152).

**Qal:** Depósitos aluviales.

**Ts Oc:** Terciario superior Cuaternario depósitos volanosedimentarios.

**Tsa:** Andesitas del Plioceno.

**Tpl o:** Basaltos y andesitas y productos volcánicos del Plioceno-Pleistoceno.

**Tmb:** Basaltos y piroclastos del Mioceno.

**Tvr:** Riolitas, brechas volcánicas, tobas riolíticas e ignimbritas. Del Terciario.

**Kpc:** Caliza y lutitas.

**Kcse:** Complejo metamorfozido de la sierra de Guanajuato.

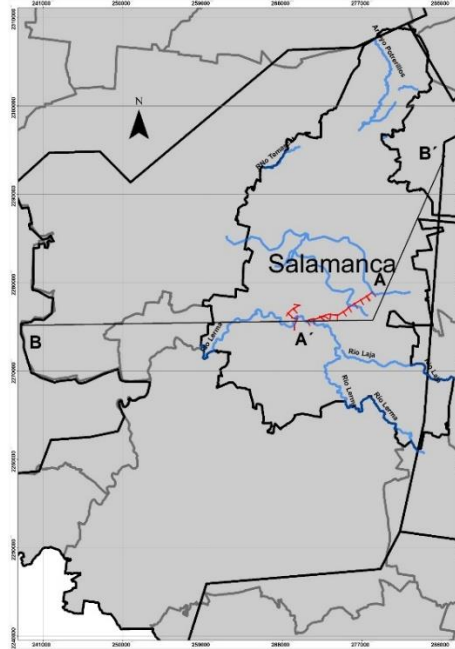


Figura 2.15 Simbología de la sección CEAG,(2018) y ubicación de las secciones **A-A'** y **B-B'**.

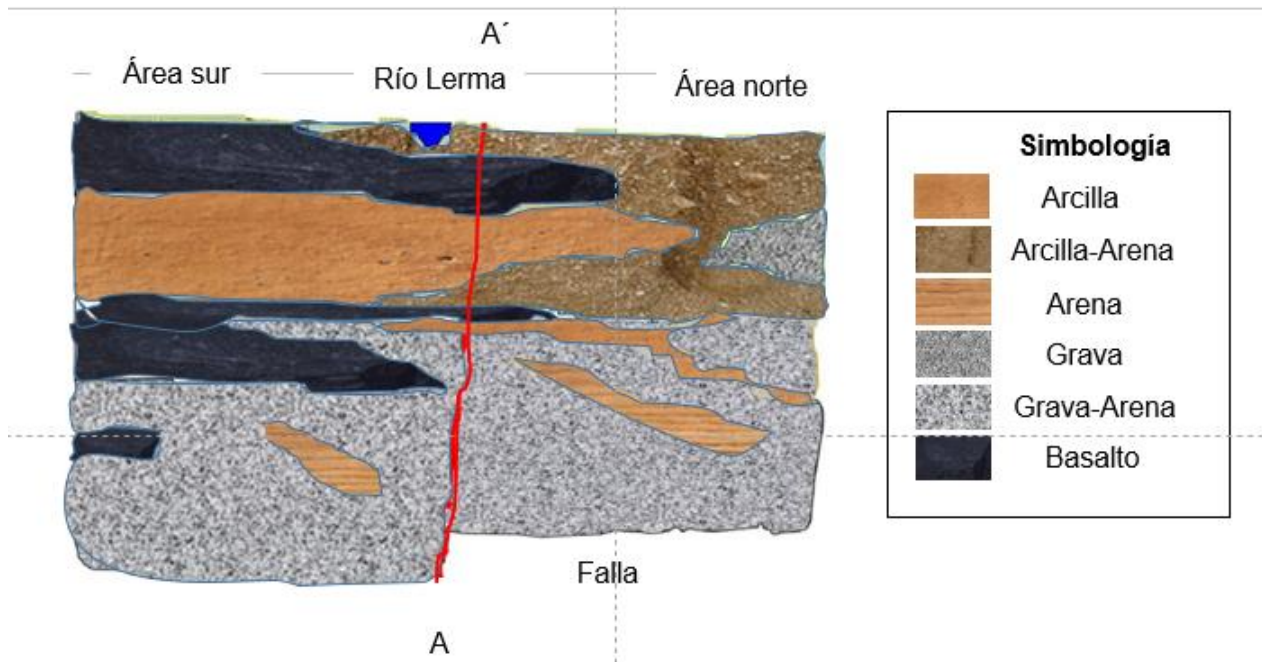


Figura 2.151 Sistema acuífero de Salamanca, donde el río Lerma es el que delimita el sistema acuífero de la zona, diferenciando las unidades con diferente comportamiento hidráulico al sur y al norte. Extraído de Rodríguez et al., (2003).

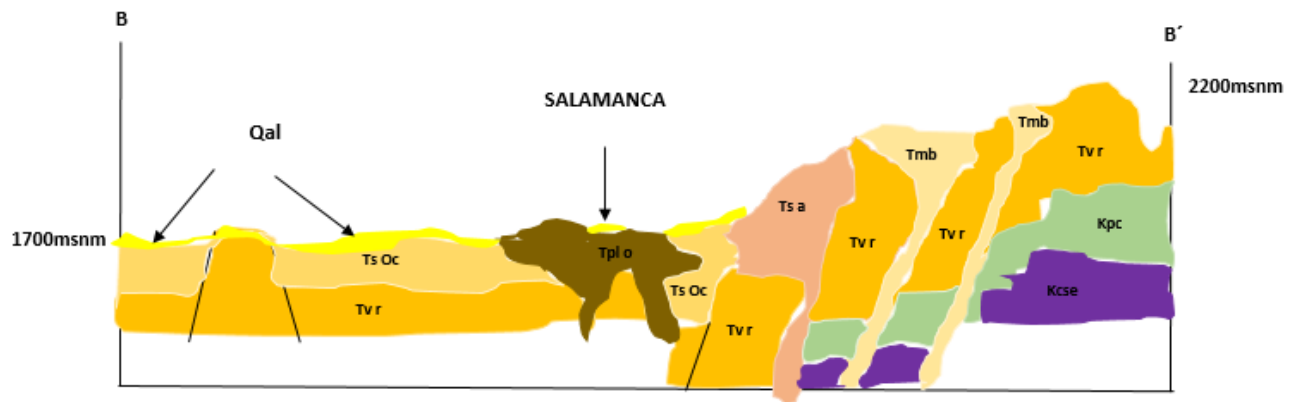


Figura 2.152 Perfil geológico (CEAG, 2018).

## 2.16 Fallas en Salamanca por subsidencia.

Debido a la gran dependencia de Salamanca por el agua subterránea, su sobre extracción ha provocado subsidencias en los terrenos cercanos. Este proceso va acompañado de la aparición en superficie de fracturas algunas de las cuales, por su extensión, típicamente se les denomina localmente como fallas (Rodríguez et al., 2006).

Se han documentado fracturas activas relacionadas con la subsidencia en muchas localidades de El Bajío y regiones cercanas, tales como Querétaro, Celaya, Salamanca, Abasolo, Silao e Irapuato (Aranda Gómez et al., 2013, Mejía y Sandoval., 2004).

La subsidencia no sólo afecta la infraestructura visible sino también tuberías, drenajes y cableado eléctrico. La ruptura de tuberías de agua potable incorpora rápidamente cloro residual a través del fracturamiento del terreno a formaciones acuíferas someras. Desde los drenajes rotos, migran fácilmente microorganismos y materia orgánica. Además, cuando las fallas interceptan poliductos se pueden producir derrames de hidrocarburos en el subsuelo. Los edificios de uso público con estructuras debilitadas por las fracturas deben ser considerados en riesgo ya que son fácilmente afectados por sismos o inundaciones. Igualmente edificios y monumentos históricos se han dañado, como es el caso del Ex-Convento de San Agustín en Salamanca y del Puente Guadalupe en Irapuato, Gto (Rodríguez., 2006). Las fallas pueden facilitar también la migración de gas radón hacia la superficie. Aunque su vida media es relativamente corta, del orden de días,

la exposición por periodos prolongados al mismo puede afectar seriamente la salud (Rodríguez et al., 2006).

El proceso de subsidencia ha originado fallas y fracturas que actúan como conductos para contaminantes superficiales del acuífero local de Salamanca el cual es la única fuente de abastecimiento de la ciudad. La subsidencia está relacionada en la ciudad de Salamanca con dos variables físicas particulares, la principal es la condición geo - hidrológica que indica que la ciudad se encuentra en una depresión del nivel estático que aumenta con el paso del tiempo de la mano de la segunda variable, la cual es la sobreexplotación del acuífero Irapuato Valle (Periódico oficial del gobierno del estado de Guanajuato., 2016). Es así como existen dos sistemas de fallas geológicas de importancia en el municipio de Salamanca como se muestran en la Figura 2.16 La primera originada por los movimientos tectónicos y orogénicos y la segunda debido a la subsidencia en el acuífero.

Una vez establecido este hecho, la falla por subsidencia cruza la ciudad desde el NE (Cerro Gordo) de litología ígnea con un largo cercano o mayor a los 12 km (Garduño et al., 2001, Aranda Gómez et al., 2013) pasando por la refinería que es una sucursal que procesa, transporta y comercializa gas natural, hidrocarburos líquidos y productos petroquímicos básicos, tales como etano, gasolina y azufre y terminando cerca del río Lerma de naturaleza lacustre o palustre (Fig. 2.16). La falla ha causado daño en infraestructuras, tuberías y drenajes de la ciudad. Es considerada una falla normal con rumbo N60E y un echado SE (Nieto Obregón., 2016). Se ha estimado un área de influencia de falla, de 50 metros, con velocidades de subsidencia reportadas de 6 cm/año (Garduño et al., 2001).

Se han reportado presencia de hidrocarburos que fueron detectados en un pozo cercano a la falla a mediados de los 90s (Rodríguez et al, 2000). El papel de la falla de subsidencia en la vulnerabilidad de los acuíferos ha sido investigado por varios investigadores. Rodríguez (2004) encontró que la conductividad hidráulica aumenta significativamente en la traza de la falla donde tomó 70 mediciones de permeabilidad en la falla, con aumentos en las conductividades hidráulicas de (0.00216 m/d - 0.05184 m/d) a (691.2m/d - 5.184 m/d). Además de dañar edificios y el pavimento, la falla también rompe las

tuberías de agua potable así como de aguas residuales. Las estimaciones de volumen de fugas están en del orden del 25 y 30% para agua potable y alcantarillado, respectivamente. Cabe señalar que Salamanca se encuentra en una zona semiárida donde la infiltración y recarga local es muy baja como consecuencia de escorrentía y evapotranspiración.

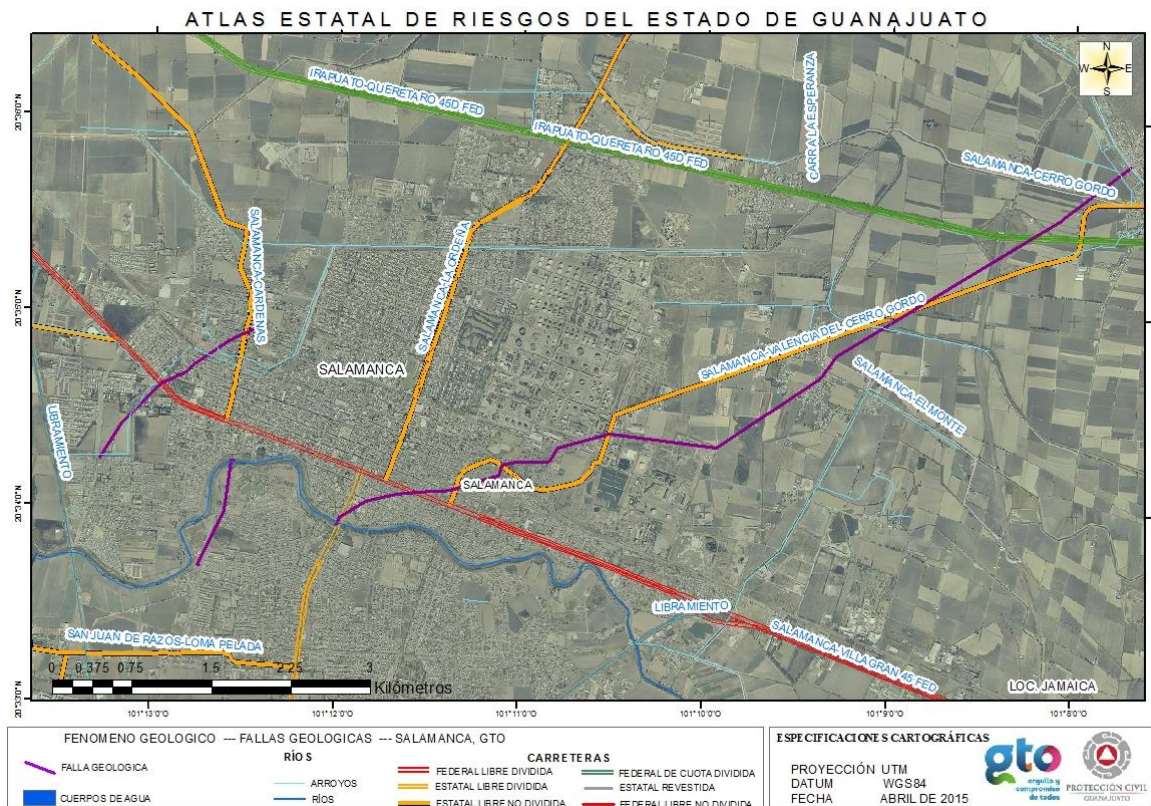


Figura. 2.16 Mapa donde se observan los dos sistemas de fallas (en morado). La más larga asociado a subsidencia, inicia desde el NE reportada desde los 90s. Se extiende desde Cerro gordo y muestran un rumbo N60E, SE. (Tomado de Presidencia municipal de Salamanca, 2018).

## **2.17 Contaminantes principales reportados en Salamanca**

Se sabe que en las zonas industriales conviven distintos usos de suelo, en aquellos de uso agrícola y agropecuario es factible encontrar fuentes potenciales de contaminación acuífera. Estas van desde fugas en los sistemas de agua potable y en las tuberías de los drenajes hasta lixiviación de contenedores de residuos industriales, además de almacenamientos temporales de insumos o residuos tirados a los ríos. Los terrenos agrícolas que usan agroquímicos como pesticidas o plaguicidas, representan fuentes de contaminación potencial de tipo difuso y puntual como las industrias. Éstas juegan un papel importante en la incorporación de compuestos orgánicos solubles a los sistemas acuíferos locales (Mejía et al., 2001).

Esta situación se complica cuando existe una empresa generadora de productos para diversos tipos de industria, como sería el caso de una refinería así como una termoeléctrica. Estas empresas adicionalmente representan una contaminación puntual y difusa; las fugas en ductos y poliductos. Las fugas pueden tener una gran diversidad de orígenes: rupturas accidentales; fugas provocadas por el robo de hidrocarburos, afectaciones a las líneas de conducción por fenómenos naturales como sismos, inundaciones, actividad volcánica, reactivación de fallas geológicas, fallas por subsidencia (Mejía et al., 2001)

Cuando se tiene un caso con diversas fuentes de solutos iguales o similares es bastante difícil diferenciar el origen de los mismos. Se tiene que analizar la evolución espacial y temporal de las concentraciones de los solutos considerados como representativos para asociarlo a la actividad de una fuente potencial, lo que tampoco garantiza que se tenga la certeza de que esa es la fuente que originó el soluto. Si se trata de compuestos orgánicos se tiene la complicación adicional de que, en muy contadas ocasiones se tienen análisis químicos en donde se reporte la presencia de éstos, en parte por su costo, pero sobretudo porque no existen muchos laboratorios en el sector público que realicen estos análisis químicos.

La calidad del agua subterránea del sistema acuífero de Salamanca Guanajuato, está siendo afectada por solutos provenientes de diferentes fuentes naturales como antropogénicas. Arsénico, plomo y benceno están entre los contaminantes reportados así



como la presencia de hidrocarburos. Las áreas más críticas están relacionadas con una falla por subsidencia, la cual actúa como canal preferencial para los contaminantes, particularmente de hidrocarburos. En Salamanca, Gto los contaminantes se han dividido en dos principales grupos; metales y compuestos orgánicos (Mejía et al., 2001).

De acuerdo con Mejía et al., (2001), Berlin et al., (2001) los metales y compuestos orgánicos pueden tener un origen común relacionada a contaminación puntual de fracciones solubilizadas de hidrocarburos, aunque el arsénico pudiera ser de origen natural. Esta separación obedece también a la fenomenología que gobierna su migración en el agua subterránea. Los BTEX son los hidrocarburos aromáticos que más fácilmente se incorporan al agua subterránea debido a su alta solubilidad, 1.8 mg/l y 100 mg/l respectivamente (Zemo y Graf., 1993). Una vez incorporados al agua, los hidrocarburos tienden a reaccionar, dando lugar a productos diferentes a los originales. Los procesos que controlan estos cambios son: evaporación, solubilización y oxidación, tanto química como biológica.

Las variaciones en el régimen de extracción juegan un papel importante en la migración de LNAPL's. La hidrodinámica de los LNAPL's como el diesel y la gasolina en medios con cambios laterales de conductividad hidráulica es bastante compleja. Las depresiones piezométricas facilitan que los LNAPL's migren hacia los mínimos piezométricos.

Los LNAPL's no presentan "mojabilidad" debido a su característica hidrofóbica, lo que hace que prácticamente no interactúen con la matriz de la roca y se lleguen a desplazar más fácilmente que el agua.

Los DNAPL's pueden migrar incluso en dirección contraria a la del flujo del agua subterránea, cuando se tienen altas porosidades y baja velocidad del agua.

La distribución de Pb, As y B en el agua subterránea indica que localmente el acuífero somero, el intermedio y el profundo están comunicados hidráulicamente (Rodríguez et al., 2001). El contenido de As en el acuífero somero es menor que en el intermedio, mientras que el del Pb es mayor en el somero, en el área cubierta por los piezómetros, que en el intermedio (Berlín et al., 2001), aunque hacia el centro de ciudad de Salamanca parece ser mayor en el intermedio que en el somero, no se cuenta con un conjunto

suficientemente grande de datos, pero las configuraciones de As y Pb muestran un gradiente desde el área de la falla hacia los lados, lo que señala a ésta como el área fuente de estos solutos. La presencia de boro en el somero, el intermedio y el profundo que se midió en el pozo 9 de la CFE sugiere contribuciones del profundo hacia las formaciones superiores. La movilidad de estos contaminantes no parece obedecer a mecanismos de transporte controlados por el flujo preferencial del agua, advectivos, ni por fenómenos dispersivos o difusivos (Berlín et al., 2001).

La conformación de los sedimentos cuaternarios también explica en parte la hidrodinámica del flujo y de los contaminantes. Hay evidencias superficiales de antiguos cauces que convergían hacia el río Lerma. En obras excavadas se han encontrado manifestaciones de paleocanales que seguramente están actuando como canales preferenciales de contaminantes. Al flotar los LNAPL's pueden generar residuales que se desplazan con cambios en las superficies piezométricas a consecuencia de variaciones en el régimen de extracción. Los contaminantes reportados en Salamanca, Gto datan con un periodo de monitoreo de 1995-2005, donde solo As y Pb fueron monitoreados (Mejía et al., 2001), con esta información de pozos se sabe que se encuentran fuera de la norma mexicana. Los retos son grandes, debido a una falta de actualización de información, de una zonificación de vulnerabilidad así como ubicación de fuentes potenciales de contaminación tanto difusa como puntual en el municipio y una nueva encuesta de análisis de riesgo así como análisis químicos de una mayor cantidad de pozos, pueden responder algunas de las preguntas anteriores.

## CAPITULO 3

### 3. Marco Teórico

#### 3.1 Vulnerabilidad de acuíferos

El hidrogeólogo francés Margat, (1968) introdujo el concepto de vulnerabilidad para acuíferos, sin embargo el concepto más aceptado fue definido por Foster e Hirata, (1988) como aquellas características intrínsecas del estrato que separan la zona saturada de la zona vadosa (o zona no saturada), lo cual determina su atenuación a una carga contaminante que es aplicada en la superficie. En un principio solo se tomaba aspectos cualitativos de la contaminación, hoy en día se pueden determinar también aspectos cuantitativos y de calidad de agua subterránea (Ramos., 2000). Es así como la vulnerabilidad se define generalmente como la sensibilidad de un acuífero a ser afectado por un contaminante, se refiere a la probabilidad de que las aguas subterráneas en un acuífero se contaminen en cantidades que suponen un riesgo para la salud humana o para el medio ambiente (Árceaga et al., 2015). El concepto ha sido discutido por varios autores (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Diferentes definiciones de “Vulnerabilidad de acuíferos”. (Tomado de Mena López & Montes García., 2010).

<b>Definición Vulnerabilidad de acuíferos</b>	<b>Autor</b>
Propiedad intrínseca del agua subterránea que depende de la sensibilidad de este a los impactos humanos y naturales.	<i>Vrba &amp; Zaporcec, 1994.</i>
Es la sensibilidad para ser afectado por una carga contaminante impuesta en el medio acuífero.	<i>Foster e Hirata, 1988.</i>
Vulnerabilidad a la polución, expresa la incapacidad del sistema para absorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales.	<i>Custodio &amp; Llamas, 1998.</i>
Tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por encima del acuífero más somero.	<i>Carbonell, 1993.</i>
Facilidad con la que un contaminante puede acceder al acuífero, a través del suelo y de la zona no saturada.	<i>Balairón, 2000.</i>
Vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida: como la facilidad con que un contaminante aplicado en la superficie puede alcanzar al acuífero, en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica.	<i>Environmental Protection Agency (EPA), 1991.</i>
Tendencia o la probabilidad de que los contaminantes puedan llegar a una posición específica en el sistema de aguas subterráneas, después de la introducción de contaminantes en algún lugar por encima del acuífero superior.	<i>National Research Council, 1993.</i>

El concepto de vulnerabilidad se basa en el supuesto de que el medio ambiente geológico, puede proporcionar un cierto grado de protección a las aguas subterráneas naturales de un impacto antropogénico, la contaminación de la atmósfera particularmente, el suelo y la escorrentía superficial.	<i>Zektser, 2000.</i>
La susceptibilidad del acuífero se relaciona con la posibilidad de contaminación, es decir, los acuíferos que tienen un alto grado de vulnerabilidad son los que están en zonas de alta densidad poblacional.	<i>Pettyjohn et al., 1991.</i>
Considera a la vulnerabilidad como un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación.	<i>Auge, 2005.</i>

De acuerdo con lo anterior se han identificado dos tipos de vulnerabilidad según su desarrollo;

- Vulnerabilidad Intrínseca: Se utiliza para definir la vulnerabilidad de las aguas subterráneas donde se toma en cuenta las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área, pero es independiente a los contaminantes (Daly et al., 2002, Vías et al., 2006).
- Vulnerabilidad específica: Depende de un contaminante o diferentes, tomando en cuenta las características del contaminante y su relación con los distintos componentes de la vulnerabilidad intrínseca. (Gogu & Dessargues., 2000, Goya., 2011).

La vulnerabilidad no es más que una propiedad semicuantitativa que mide la susceptibilidad del agua subterránea a contaminarse. Esto puede ser por una fuente natural o antropogénica, que incremente la cantidad de cierto contaminante con diferentes propiedades y que pueda afectar la calidad del agua subterránea.

Sin embargo, esta incorporación del contaminante puede verse atenuada por la zona vadosa (zona no saturada), por lo tanto depende de las reacciones químicas, la actividad biológica y el tipo de material presente. Evidentemente la profundidad del agua tendrá una importancia clara, debido a que en los niveles más someros el contaminante llega más rápido, no es así en niveles profundos donde el contaminante tendrá tiempo suficiente para degradarse, transformarse o incorporarse en el medio, de acuerdo con la cantidad de contaminante y el tipo (Ramos Leal., 2000, Zapata., 2013).

Respecto a lo anterior Evren, (1998) menciona que al identificar las características geológicas/hidrogeológicas de la zona y sobreponer la ubicación de las fuentes de contaminación se crea un mapa de vulnerabilidad. En este sentido los mapas de vulnerabilidad deben servir como una herramienta para gestionar, regular y ordenar el territorio de la misma forma que se utiliza para redefinir el uso del suelo.

### **3.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera**

Vrba Y Zaporocec, (1994), describen los métodos para la evaluación de la vulnerabilidad en 3 tipos:

1. Métodos de marco y complejo hidrogeológico.
2. Métodos paramétricos sistemáticos.
  - Sistema matriz (SM).
  - Sistemas de puntuación (RS).
  - Modelos de sistema de punto de conteo (PCSM).
3. Métodos que utilizan modelos numéricos y relaciones analógicas.

Goldscheider, (2002), los clasifica en 5 categorías, donde las 3 primeras son idénticas a las citadas por Vrba y Zaporocec, (1994), en donde la cuarta y la quinta clasificación se conocen como:

4. Métodos matemáticos
5. Métodos estadístico

**1. Métodos de marco y complejo hidrogeológico:** Evalúan la vulnerabilidad de acuerdo al ambiente hidrogeológico (litología y permeabilidad) de una forma cuantitativa, y utiliza una superposición de variables (en mapas temáticos).

**2. Métodos paramétricos:** Estos se dividen en 3 los cuales se describen a continuación:

- Métodos de sistema de matriz (SM)

Estos se utilizan con un número restringido de parámetros elegidos, donde para obtener la vulnerabilidad se realiza una combinación de los mismos que refleja una vulnerabilidad en ciertas zonas del estudio. El resultado numérico final es dividido en intervalos que expresan el grado de vulnerabilidad. (Gogu y Dessargues., 2000).

- Métodos de índice y de superposición (RS)

Combinan en conjuntos de características del suelo, la zona no saturada y los acuíferos a los cuales se les asignan un valor numérico según su importancia en la evaluación de su vulnerabilidad.

- Métodos de sistema de puntos de conteo (PCSM)

Se le asigna un peso asignado a cada parámetro, una vez calificando sus diferentes clases. La calificación de cada parámetro se multiplica por su peso correspondiente y se suma para obtener la puntuación fina en esa área, el sitio con mayor puntuación será el de mayor vulnerabilidad.

**3. Métodos que utilizan modelos numéricos y relaciones analógicas:** Utilizan modelos matemáticos para analizar y simular los procesos que gobiernan el transporte del contaminante desde la superficie.

**4. Métodos estadísticos:** Utilizan grupo de variables que condicionan la vulnerabilidad de la contaminación de los acuíferos.

Con respecto a lo anterior se han desarrollado muchas metodologías en los últimos años esto para proteger el medio acuífero, sin embargo el proceso de valoración es dinámico e iterativo donde se debe tomar en cuenta el propósito de la valoración, la selección del método, disponibilidad y calidad de datos (muy importante) así como la utilidad final que se le dará a la información obtenida de la valoración por lo tanto los métodos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca utilizados comúnmente son métodos paramétricos (también conocidos como MS,RS y PSCM). A continuación se mencionan los más relevantes (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Principales metodologías paramétricas usadas para vulnerabilidad a la contaminación donde MS; Métodos matriciales, RS Métodos de índice y superposición y PSCM: Métodos de conteo de puntos.

MÉTODOS (MS)	MÉTODOS (RS)	MÉTODOS PSCM	AUTOR
Ekv			Auge., 1995
	GOD		Foster e Hirata., 1988
	AVI		Van Stempvoort et al., 1993
		DRASTIC	Aller et al., 1987
		SINTACS	Civita y de Maio.,1997
		EPIK	Doerfliger.,1997

### 3.22 Métodos matriciales (MS)

#### Método EKV

Ekv (Auge, 1995) es un método usado para acuíferos libres que considera la profundidad de la superficie piezométrica (E) y la permeabilidad vertical de la zona saturada (Kv) a estos parámetros se les asigna un valor de 1 para vulnerabilidad baja y 5 para vulnerabilidad alta (Tabla 3.22 y 3.221)

Tabla. 3.22 Clasificación de (E).

	Espesor de la zona saturada (E)				
(m)	>30	>10-30	>5-10	>2-5	<2
Índice	1	2	3	4	5

Tabla 3.221 Clasificación de (Kv) con su índice correspondiente.

	Permeabilidad vertical de la zona saturada (Kv)				
m/día	<1E10-03	>1E10-03-0.01	>0.01-1	>1-50	>50-500
Índice	1	2	3	4	5

Los valores de cada parámetro se suman mediante el uso de una matriz resultando de un índice final con un intervalo de 2 a 10, asignando vulnerabilidad baja a valores entre 2 y 4, vulnerabilidad media de 5 a 7 y finalmente vulnerabilidad alta de 8 a 10 (Tabla 3.222).

Tabla 3.222 Matriz para el método EKV.

Kv	1	6	5	4	3	2
	2	7	6	5	4	3
	3	8	7	6	5	4
	4	9	8	7	6	5
	5	10	9	8	7	6
		5	4	3	2	1
	E					

### 3.23 Métodos de índice y superposición (RS)

#### Método GOD

Foster e Hirata, (1988), desarrollaron el método **GOD** cuya virtud es la tratar de ser simple y sistemático. Éste se considera el primer paso para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades. El método determina la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante.

Los factores que considera el método son: La profundidad del nivel del agua, el tipo de substrato litológico y la ocurrencia del agua subterránea o confinamiento del acuífero. El método se basa en la asignación de índices entre 0, 1 y 3 variables que son las que denominan el acrónimo:

- **G (ground water occurrence - tipo de acuífero)**
- **O (overall aquifer class - litología de la cobertura)**
- **D (depth - profundidad del agua o del acuífero)**



## Método AVI

El AVI (Van Stempvoort et al., 1993), es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos para cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material sobre el nivel del agua.

Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero por medio de la resistencia hidráulica “c” al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero. La resistencia hidráulica “c” se calcula por la expresión:

$$c = \sum [b_i / K_i] \text{ para las capas } 1,2,3,\dots,i$$

Donde:

- $b_i$  - Es el espesor de cada capa sobre el acuífero
- $K_i$  - Es la conductividad hidráulica de cada capa
- $C$  - Es la resistencia hidráulica total (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga, que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero. A mayor resistencia hidráulica  $c$ , menor vulnerabilidad.

### 3.24 Métodos de conteo de puntos (PSCM)

#### 3.24.1 Método SINTACS

SINTACS (Civita y Maio., 1997), es una derivación del DRASTIC (Aller et al., 1987) desarrollado en Italia el nombre es un acrónimo que deriva de:

- **S (Soggiacenza - profundidad del agua)**
- **I (Infiltrazione - infiltración)**
- **N (Non saturo - sección subsaturada - zona no saturada)**
- **T (Tipologia de la copertura - tipo de suelo)**
- **A (Acquifero - características hidrogeológicas del acuífero)**
- **C (Conducibilità - conductividad hidráulica)**
- **S (Superficie topografica - pendiente topográfica).**

Este método presenta una estructura compleja, tanto para la entrada de datos como para la salida, por lo que su operación se realiza mediante un programa preparado especialmente para el mismo. A las variables mencionadas, que influyen en la vulnerabilidad intrínseca, se les puede añadir la incidencia del agua superficial y el uso del suelo. La ecuación de índice SINTACS es parecida a DRASTIC

$$\text{Índice SINTACS} = P_s W_s + P_I W_I + P_N W_N + P_T W_T + P_A W_A + P_C W_C + P_S W_S$$

Donde:

SINTACS = índice de vulnerabilidad del método SINTACS

P (1,7) = puntaje de cada uno de los siete parámetros.

W (1, n) = peso asociado a cada parámetro.

### 3.24.2 Método EPIK.

Es un método paramétrico desarrollado por Doerfliger y Zwahlen, (1997), para acuíferos kársticos. El acrónimo EPIK significa:

- ***E (Epikarst-)***
- ***P (Protective cover- Cubierta protectora )***
- ***I (Infiltration conditions- Condiciones de infiltración )***
- ***K (Karst network development – Desarrollo karstico)***

Se entiende por epikarst a una zona de Intensa karstificación y una elevada permeabilidad cercana a la superficie (Triper et al., 1997).

El índice de vulnerabilidad se calcula mediante la ecuación  $V_i = (\alpha * E_i) + (\beta * P_i) + (\gamma * I_i) + (\delta * K_i)$  Donde:

- $V_i$  es el índice de vulnerabilidad
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  son los parámetros de ponderación para cada parámetro del método EPIK
- $E_i, P_i, I_i, K_i$  son los valores relativos de los parámetros EPIK

El índice de vulnerabilidad de un medio kárstico varía con un valor de 9 para vulnerabilidades altas y para vulnerabilidades bajas valores de 34

### **3.24.3 Método DRASTIC.**

El método usado para este estudio es DRASTIC (Aller et al., 1987). DRASTIC es un método empírico patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA., 1991). Este método busca caracterizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada. Esta técnica es denominada así por los siete factores que se toman en cuenta para la determinación de la vulnerabilidad por sus siglas en inglés. Estos factores son:

- **(D) Profundidad al nivel estático**
- **(R) Recarga neta**
- **(A) Tipo de acuífero (Medio acuífero)**
- **(S) Tipo de suelo**
- **(T) Topografía**
- **(I) Geología zona no saturada (Zona vadosa)**
- **(C) Conductividad hidráulica**

Cada una de estas variables son ponderadas y procesada en el álgebra de mapas dentro de un SIG para obtener 7 capas, que posteriormente son evaluados dando como resultado un mapa temático, donde se mostraran las zonas más vulnerables a ser contaminadas, de acuerdo a los 7 parámetros que se describieron (Tovar.,2015). Para aplicar este método debe asumirse que el contaminante tiene la misma movilidad en el medio, que el agua, es decir donde se introduce por la superficie del terreno y se incorpora al agua subterránea mediante la recarga (lluvia y/o retorno de riego) (Martínez y Delgado., 1998).

El método DRASTIC asume los siguientes puntos al evaluar de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación:

- El contaminante se libera desde la superficie plana.
- El contaminante se mueve con la velocidad del agua.
- El contaminante se descarga en el agua subterránea a través de la precipitación.

- El área bajo investigación debe al menos 0.405 Km<sup>2</sup> con el fin manejar un flujo a nivel regional.

El índice DRASTIC es calculado con la suma de los 7 parámetros hidrogeológicos mencionados, que forman la siguiente ecuación:

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w = \text{índice Drastic}$$

Los subíndices “r” representan rangos que van de 1 a 10 dependiendo de su importancia a la vulnerabilidad, los subíndices w representan pesos, estos son constantes que han sido asignados por la EPA,1991 de 1 a 5,. El Índice DRASTIC varía entre 23 y 230 está repartido en 8 clases haciendo corresponder a cada clase de un determinado color. Cuanto mayor sea el índice asignado a un área determinada, mayor es su vulnerabilidad a la contaminación (Aller et al., 1987). Cabe mencionar que los intervalos de vulnerabilidad o riesgo para cada parámetro, se definen en función de la aplicación y las condiciones de la zona de estudio, así como sus antecedentes de contaminación. Los pesos para cada propiedad del acuífero que se muestran en la Tabla.3.24.3

Tabla 3.24.3 Pesos de los parámetros DRASTIC (Aller et al, 1987).

	Parámetro	Peso	Peso General (%)
<b><i>Profundidad al nivel estático</i></b>	<b><i>D</i></b>	<b><i>5</i></b>	<b><i>21.74</i></b>
<b><i>Recarga neta</i></b>	<b><i>R</i></b>	<b><i>4</i></b>	<b><i>17.39</i></b>
<b><i>Medio acuífero</i></b>	<b><i>A</i></b>	<b><i>3</i></b>	<b><i>13.04</i></b>
<b><i>Tipo de suelo</i></b>	<b><i>S</i></b>	<b><i>2</i></b>	<b><i>8.7</i></b>
<b><i>Topografía</i></b>	<b><i>T</i></b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>4.35</i></b>
<b><i>Medio de la zona no saturada</i></b>	<b><i>I</i></b>	<b><i>5</i></b>	<b><i>21.74</i></b>
<b><i>Conductividad hidráulica</i></b>	<b><i>C</i></b>	<b><i>3</i></b>	<b><i>13.04</i></b>

### 3.24.4 Pesticida DRASTIC

Pesticida Drastic (Aller et al, 1987) se diseñó para ser utilizado en donde la actividad dominante fuera el uso de pesticidas en un área. Representa un caso especial de DRASTIC donde la única diferencia con DRASTIC es la asignación de los pesos relativos (w) para los siete factores ya mencionados, toda la metodología es idéntica, las clases, clasificaciones e instrucciones. Si el usuario está preocupado por la contaminación del agua subterránea potencial de un área por pesticidas. Este método designa la siguiente distribución de los pesos (Tabla 3.24.4).

Tabla 3.24.4 Pesos de los parámetros pesticida DRASTIC (Aller et al 1987).

	Parámetro	Peso	Peso General (%)
<b><i>Profundidad al nivel estático</i></b>	<b><i>D</i></b>	<b>5</b>	<b>19.23</b>
<b><i>Recarga neta</i></b>	<b><i>R</i></b>	<b>4</b>	<b>15.38</b>
<b><i>Medio acuífero</i></b>	<b><i>A</i></b>	<b>3</b>	<b>11.54</b>
<b><i>Tipo de suelo</i></b>	<b><i>S</i></b>	<b>5</b>	<b>19.24</b>
<b><i>Topografía</i></b>	<b><i>T</i></b>	<b>3</b>	<b>11.54</b>
<b><i>Medio de la zona no saturada</i></b>	<b><i>I</i></b>	<b>4</b>	<b>15.38</b>
<b><i>Conductividad hidráulica</i></b>	<b><i>C</i></b>	<b>2</b>	<b>7.69</b>

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w = \text{índice Pesticida Drastic}$$

Pesticida DRASTIC fue creado para abordar los procesos importantes que compensan específicamente el uso y el transporte de pesticidas en el suelo. Sin embargo, pueden no ser tan significativos al asignar ponderaciones a los factores DRASTIC para actividades no agrícolas. Así mismo, al comparar los pesos entre los parámetros de DRASTIC y pesticida DRASTIC se puede observar que para las actividades no agrícolas el tipo de suelo tiene asignado un peso de 2, mientras que para el Pesticida DRASTIC modificado, el tipo de suelo pasa a un peso de 5 típico para los usos del suelo con actividades agrícolas, en topografía, medio de la zona no saturada y la conductividad hidráulica del acuífero también son ligeramente diferentes donde aumentan según la importancia que tenga un pesticida. Al hacer estas modificaciones el comité (EPA., 1991) que lo revisó abordó las condiciones especiales que influyen el potencial de contaminación de aguas subterráneas por plaguicidas. Es importante tener en cuenta que la relación relativa entre los factores DRASTIC no considera que sea suficiente para justificar el desarrollo de cualquier otro índice DRASTIC modificados. Se debe recordar al usuario que los pesos de DRÁSTIC no se deben de modificar. Estos pesos relativos forman la base de la metodología y cualquier cambio hará que el sistema no sea válido (Aller et al., 1987).

Actualmente hay muchas modificaciones al método DRASTIC en la selección, exclusión y modificación de rangos y pesos de sus factores, han sido propuestas por diversos investigadores con base en la disponibilidad de la información, las características geográficas, geológicas e hidrogeológicas de la región. También con el objetivo de

obtener resultados más confiables en la determinación de la vulnerabilidad sin embargo siguen siendo modificaciones y propuestas a los originales. Entre su principal desventaja y dado que estudia la vulnerabilidad intrínseca hay que tomar estos resultados con cautela ya que como señala Baalousha, (2006), el índice DRASTIC provee solo una evaluación relativa de la contaminación y no está diseñado para realizar una evaluación absoluta, solo para tener una idea.

Los métodos mencionados anteriormente así como DRASTIC el cual es el fin de esta tesis, es posible de realizarse mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que han probado ser una herramienta de fácil uso y efectiva en las determinaciones de la vulnerabilidad intrínseca para los diferentes métodos. Esto por su capacidad de analizar, manipular y representar gráficamente la naturaleza espacial de los datos.

### **3.3 Estudios de vulnerabilidad a la contaminación acuífera en México**

En México existen pocos estudios que aborden temas de vulnerabilidad intrínseca o específica y mucho menos que se realicen comparaciones entre los métodos, por lo que se mencionan los siguientes.

*Rodríguez et al., 2000 realizaron la evaluación de la vulnerabilidad por contaminación al acuífero en Salamanca Guanajuato, México. Afectado por solutos provenientes de diferentes fuentes naturales y antropogénicas. Los métodos DRASTIC y AVI fueron los elegidos para la ciudad de Salamanca, determinaron la ubicación de fuentes potenciales de contaminación y añadieron una encuesta a la población que permitió efectuar un análisis de riesgo. Las áreas más críticas las relacionaron con una falla por subsidencia, la cual actuó como canal preferencial para los contaminantes, particularmente residuales de hidrocarburos. Los resultados arrojaron, por la metodología DRASTIC, que la zona más vulnerable corresponde a la traza de la falla con un índice máximo de 125. Las bajas vulnerabilidades se asociaron a la presencia de paquetes arcillosos de muy baja conductividad, así como pozos muy profundos. El mapa AVI también refleja valores de alta vulnerabilidad a lo largo de la falla. Los terrenos de la refinería se localizan sobre áreas de muy baja vulnerabilidad, pero la falla que los cruza en su porción sudeste hizo vulnerable esa zona.*

**Aragón M., et al., 2002** realizaron una comparación de métodos que evaluaron la vulnerabilidad del acuífero de Oaxaca mediante los métodos DRASTIC, AVI y GOD. Se usaron métodos geofísicos resistivos para determinar el espesor de la zona no saturada en donde no se tenían pozos de monitoreo. Los mapas de vulnerabilidad intrínseca y del sistema local de abastecimiento indican la existencia de tres zonas vulnerables. Cada método tiene un diferente criterio de ponderación de los parámetros involucrados; el método GOD asigna un igual peso para cada característica hidrogeológica, y considera un rango más amplio de variación para la profundidad al nivel freático. El método AVI solamente toma como importante a la zona no saturada; sin hacer caso de la porosidad que tiene dicha zona. El método DRASTIC por su parte considera de mayor importancia los parámetros correspondientes al tipo de suelo, profundidad al nivel freático, impacto en la zona vadosa y la recarga al acuífero, como consecuencia se obtienen diferentes mapas de vulnerabilidad; Sin embargo, existen algunas áreas afines entre los métodos. Los mapas de vulnerabilidad muestran que el acuífero presenta una vulnerabilidad de media a alta. Concentrándose los principales riesgos en la parte central y hacia la ciudad de Oaxaca, en donde se ubica la mayoría de los pozos, así como otras zonas importantes desde el punto de vista de abastecimiento.

**Limón Hernández Lina G y Berelleza Haro J.,C., 2006** realizaron la comparación de 4 métodos de vulnerabilidad acuífera (GOD,AVI,DRASTIC y SINTACS) donde la zona de estudio fue la cuenca media del río Conchos, Chihuahua. Se hizo uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para establecer las zonas vulnerables una vez realizado las metodologías y así mostrar las áreas de mayor riesgo de contaminación para los acuíferos de los cuales se abastece la población. De donde se puede observar que las metodologías que involucran solo los parámetros intrínsecos del acuífero como el GOD y el AVI son los más parecidos en vulnerabilidad, mientras que, aun cuando el SINTACS es una derivación del DRASTIC, la diferencia en la valoración de los parámetros genera resultados muy distintos, siendo el SINTACS el que reporta mayores valores de vulnerabilidad del acuífero.

**Torres Díaz María C., et al 2014** realizaron la evaluación a la vulnerabilidad de la zona de "Semicírculo de cenotes" y "Zona costera" en el estado de Yucatán, México. La vulnerabilidad se evaluó con base en las siete variables que integran el método DRASTIC. La información para la aplicación de esta metodología se obtuvo de fuentes públicas y a través de una revisión bibliográfica. El mapa final de vulnerabilidad se elaboró con base en las fuentes potenciales de generación de residuos peligrosos de la región de estudio. Los resultados mostraron que existe una vulnerabilidad clasificada como alta, muy alta y extrema; asimismo, se observó que la vulnerabilidad fue mayor para los municipios de Mérida, Progreso y Dzidzantún representando un riesgo muy alto de contaminación para el acuífero.

**Árceaga Ingrid et al., 2015** aplicaron la metodología DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad del acuífero de Tulancingo, donde se modificó el parámetro suelo (s) relacionado al uso del suelo por actividades antropogénicas en la zona de estudio. También se añadieron datos hidrogeoquímicos los cuales determinaron las características del agua. El mapa final de vulnerabilidad arrojó los índices (130-160) más altos que se ubican en la zona urbana del municipio de Tulancingo, Hdgo las zonas con índices bajos (60-100) se tienen al SW de la zona y al SE dónde se encuentran las zonas de recarga y en las zonas de descarga un índice de vulnerabilidad media (101-129).

**Velazquez Aldo et al., 2017** aplicaron la metodología SINTACS con un enfoque por la aplicación de plaguicidas en los suelos del acuífero local de Villa Guerrero, ubicado en el Estado de México. Se identificaron las zonas donde se aplicaba plaguicidas donde los índices indicaron una vulnerabilidad de baja a media. Desde 101 hasta 120 [rangos que representan vulnerabilidad baja (81-105) y vulnerabilidad media (106-140)]. Los mapas de vulnerabilidad fueron desarrollados usando el software ArcGIS 10.2. Las zonas del acuífero donde se destacaron los mayores niveles de vulnerabilidad específica corresponden a la región central del municipio, debido a las características de las unidades hidrogeológicas.



## CAPITULO 4

### 4. Metodología

#### 4.1 Metodología DRASTIC

La metodología usada para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación acuífera de Salamanca Guanajuato es descrita en la Figura 4.1 y así como los pasos para elaborar el trabajo (Figura 4.12).

El primer paso para la elaboración del presente estudio fue la recopilación de información lo que permitió compilar una base de datos con datos relacionados a la geología e hidrología del área de estudio. Algunas de las instituciones de donde se obtuvo información fueron el Subsistema Estatal de Información de Biodiversidad y Recursos naturales de Guanajuato (SEBIO-GTO., 2012), de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO., 2012) y Atlas de riesgo del estado de Guanajuato., (2012).

La información existente se integró a una base de datos, que correspondió a cada parámetro evaluado de la metodología DRASTIC, más adecuada a los intereses del trabajo. Se optó por aplicar la metodología DRASTIC, debido a la calidad y cantidad de la información existente recopilada ya que no habría problemas en su procesamiento.

El siguiente paso consistió en procesar, en un Sistema de Información Geográfica (SIG) la información recopilada. El SIG permitió crear capas, una por cada parámetro que constituye el acrónimo DRASTIC.

Para el parámetro de profundidad al nivel estático o PNE (D), se utilizó la información proporcionada por la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG., 2018); para la recarga neta o Rn (R) se elaboró una base de datos con información de las estaciones meteorológicas controladas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), extraídas de la base de datos climatológico nacional (CLICOM., 2015). En esta última se recopiló información de 13 estaciones meteorológicas, de la zona de estudio y sus alrededores, para los años 2005-2015. El periodo de tiempo utilizado se debió a que hasta ese año, se encuentran actualizados los datos de temperatura mínima, máxima y precipitación anual, requeridos para la evaluación. Posteriormente los parámetros fueron interpolados

mediante el proceso de polígonos de Thiessen, esto con el objetivo de obtener el área de influencia en teoría de las estaciones meteorológicas. Los parámetros del medio acuífero (A), la zona vadosa (I) y conductividad hidráulica (C) fueron evaluados con el uso de los 71 cortes litológicos recopilados por: CFE, CMPAS, CEA, PEMEX; donde los primeros 26 fueron recopilados del trabajo de Cano, (2011). Al conocer sus coordenadas UTM, **(Ver anexo 1)** fue posible determinar sus profundidades en donde se encuentra el agua, para cada corte, estableciéndose las zonas saturadas y no saturadas, con información evaluada al año 2016 (CEAG., 2018). Una vez realizado esto se buscó interpolar mediante polígonos de Thiessen esto y por el método de distancia inversa ponderada (*Inverse Distance Weighing- IDW*). Esto para definir la zona de influencia de la mayor cantidad de datos en comparación a los datos más dispersos afectados por estas interpolaciones y conocer su distribución y variación.

El parámetro Suelo (S) fue revisado con los datos obtenidos de la carta edafológica de INEGI, (2014), y obtenidos del mapa de suelos del prontuario de Salamanca (INEGI., 2009). El parámetro topografía (T) se generó con la integración de las curvas de nivel 1:50,000 (INEGI., 2015) con curvas de nivel a cada 10 metros. El parámetro de conductividad hidráulica (C) se evaluó de la misma forma que los parámetros A e I donde se usaron las conductividades teóricas así como las medidas por Rodríguez & Ramos, (1998), en río Turbio aplicando a cada estrato del corte una vulnerabilidad y así obtener la vulnerabilidad de la conductividad hidráulica de los 71 cortes, para la zona saturada.

Finalmente obtenidos los 7 mapas de vulnerabilidad de cada parámetro DRASTIC (Figura 4.1), se multiplicó cada uno de ellos por su peso correspondiente tanto  $w$  y  $wP$  los cuales son los pesos DRASTIC originales y PESTICIDA DRASTIC. Estos valores de pesos ( $w$ ) así como sus clases ( $r$ ) asignados para característica evaluada, fueron tomados de los propuestos por Aller et al, (1987). Con la herramienta álgebra de mapas del SIG se generaron los mapas índice. Al multiplicar las siete capas DRASTIC, así como PESTICIDA DRASTIC por un peso constante, que refleja la importancia en cuanto a vulnerabilidad, definidas en la metodología DRASTIC (Figura 4.12), se generaron los índices DRASTIC.

Por último se propone un proceso de reclasificación del mapa final, con valores de 2 a 10 para clasificar la zona de vulnerabilidad baja, moderada, alta, muy alta y extrema, validándolo con las fuentes puntuales de contaminación de la zona de estudio y los valores obtenidos de los índices.

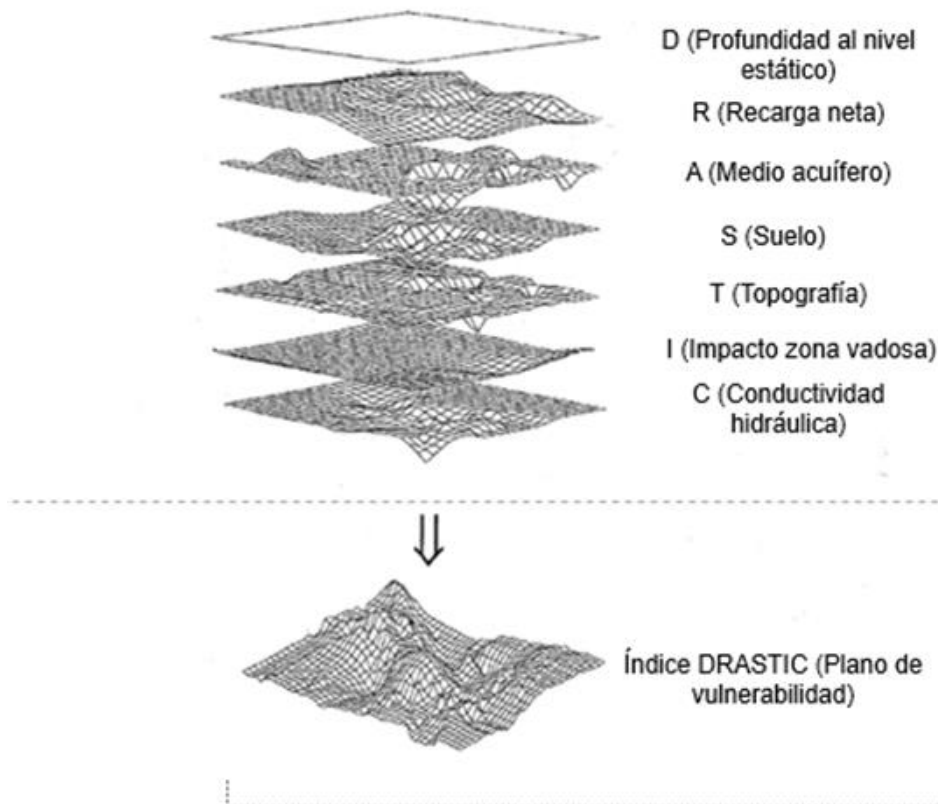


Figura. 4.1 Ecuación Drastic. Tomado de Ramos, (2002).

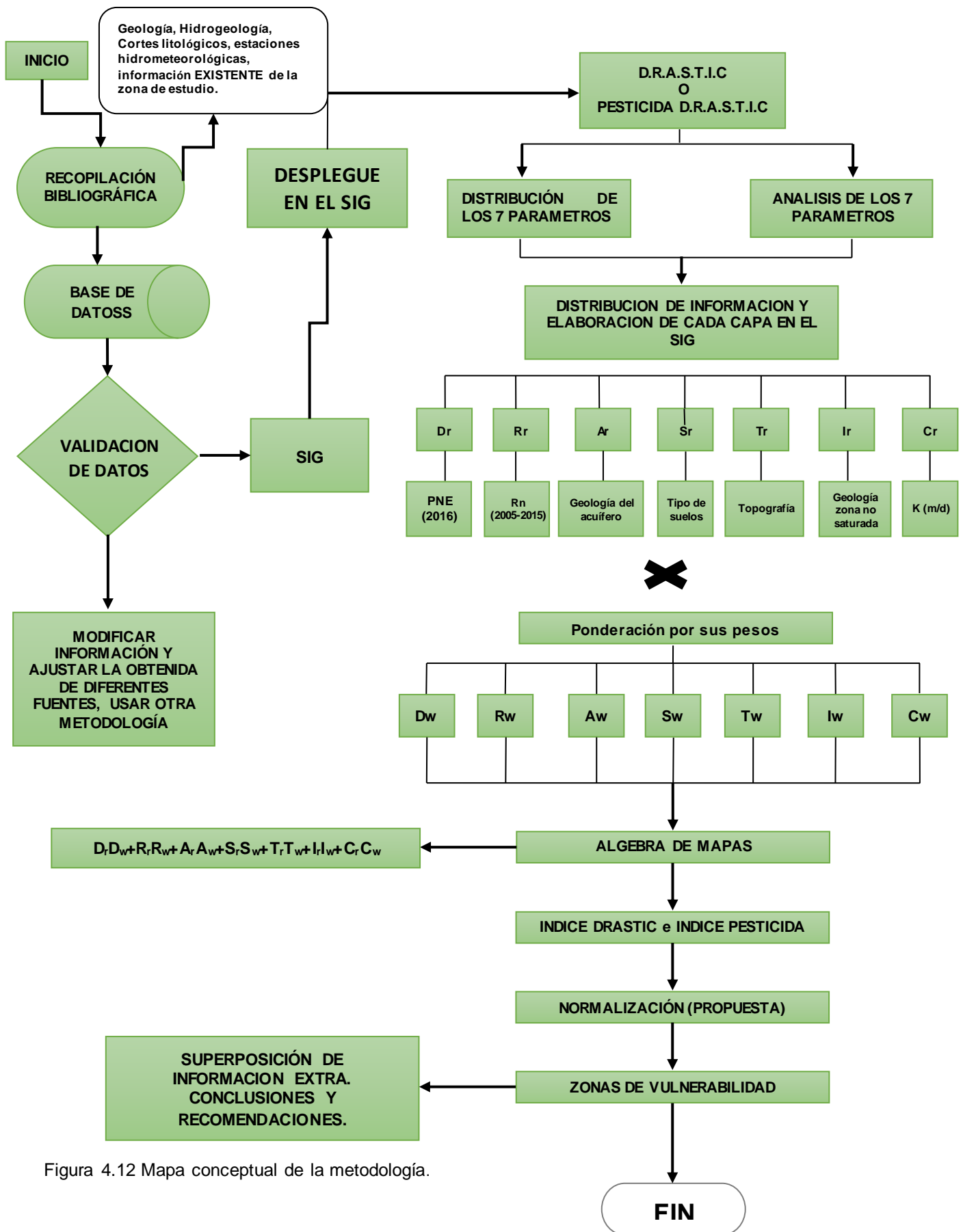


Figura 4.12 Mapa conceptual de la metodología.

## **4.2 Software de apoyo**

El software de apoyo utilizado en este proyecto fue Arcmap 10.5 (ESRI., 2016). Es un sistema de información geográfica que permitió recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir, desplegar la información y procesar cada característica que forma parte de la metodología DRASTIC. El modulo utilizado para el álgebra de mapas fue *Raster Calculator* (calculadora raster).

Para el caso de la interpolación de la PNE se utilizó Surfer 10.1 (Golden software., 2011) en el cual se calcularon las isolíneas de profundidad que posteriormente fueron procesadas en Arcmap (Esri., 2016), mediante el método de interpolación geo estadística *Kriging* (técnica que considera la distancia y el grado de variación entre los puntos de información conocida). De esta manera fue posible asociar la información y evaluar los parámetros de Medio acuífero (A), zona vadosa (I) y conductividad hidráulica (C).

Para el caso de los cortes litológicos se necesitó información de las litologías en los diferentes intervalos de espesores. Con esto se obtuvo la vulnerabilidad del medio acuífero, zona vadosa y conductividad hidráulica en relación a la litología descrita, y a la vulnerabilidad propuesta por Aller, (1987), para cada parámetro. Los cortes se realizaron en el software Strater (Golden Software, 2015) el cual es un programa que realiza columnas litológicas con sus intervalos; su simbología permite la visualización de los cortes.

## **4.3 Profundidad al nivel estático (D)**

La profundidad al nivel estático (PNE) es un parámetro importante porque determina la profundidad del material que forma la zona no saturada del acuífero, a través del cual debe viajar un contaminante para llegar al acuífero (zona saturada). Mientras más profunda este el agua el espesor de la zona no saturada será mayor y el tiempo de tránsito para un contaminante en alcanzar el agua subterránea, también será mayor, lo que proporciona una mayor posibilidad de atenuación de una cierta carga contaminante por degradación o retención natural. La presencia de capas de baja permeabilidad que limitan los acuíferos también limita el viaje de contaminantes a un acuífero. Los rangos y clases del parámetro “D”, tal como se define en el sistema DRASTIC, se han determinado con base en las profundidades, el peso de 5 por la importancia que le dieron los autores a su

influencia sobre la vulnerabilidad acuífera (Tabla 4.3). Este parámetro considera la profundidad del nivel estático o freático en el caso de un acuífero libre o del techo del acuífero para uno confinado. En general la vulnerabilidad disminuye con más profundidad (Aller et al., 1987 y Vargas., 2010). Los valores asignados (Tabla 4.3) fueron modificados por Ramos, (2002), debido a que el método original fue desarrollado para acuíferos que no rebasaban los 30 m, sin embargo en México se tienen situaciones de contaminación acuífera a profundidades mayores a 30 m (Ramos., 2007 e Hirata y Reboucas., 1999).

Tabla 4.3 Valores para el parámetro D (Aller et al 1987) en conjunto con los modificados por Ramos, (2002).

<b>PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTATICO (Dw = 5) (DwP=5)</b>		
<b>Intervalo Original (mts)</b>	<b>Intervalo Modificado (mts)</b>	<b>Clase</b>
0-1.5	0-7.5	10
1.5-4.5	7.5-23	9
4.5-9.1	23-45.5	7
9.1-15.2	45.5-76	5
15.2-22.9	76-114.5	3
22.9-30.5	114.5-152.5	2
>30.5	>152.5	1

La obtención de este parámetro se realizó con el análisis de la variación espacial y temporal de la profundidad del nivel estático del acuífero Irapuato-Valle (2000-2016) a fin de conocer el comportamiento temporal de la profundidad del agua, y observar la vulnerabilidad del parámetro D en Salamanca para su clasificación.

Para el análisis de este parámetro se contó con una base de datos elaborada por la CEAG, (2018) la cual mostraba isolíneas de profundidades para todo el acuífero Irapuato-Valle (1109), evaluados desde el 2000 hasta el 2016. Los datos solo incluyen las líneas de profundidad por lo que se acudió a la georreferenciación para poder obtener isolíneas con valores de 30 hasta 150 m de PNE. Una vez realizado este paso se cambió a formato *raster* para usar el software Surfer (2011), donde se interpolaron las isolíneas de profundidad por medio del método Kriging (**Ver anexo 3**).

#### 4.4 Recarga neta (R)

La recarga neta (R) depende de la evapotranspiración real y de la precipitación (Aller et al., 1987, y Civita y De Maio., 1997). Los valores utilizados son del promedio de agua de lluvia que se infiltra al acuífero desde la superficie, por un periodo de tiempo determinado (Tabla 4.4). El peso (Rw) Drastic es de 4 e igual para RwP. El proceso de infiltración del agua hasta el acuífero puede contener diferentes sustancias que se encuentra en su paso incluida el agua, convirtiéndose la recarga en un vehículo para la lixiviación y el transporte de contaminantes líquidos y sales, donde la capacidad de la infiltración estará relacionada con el material geológico de la zona. Cuanto mayor es el volumen de recarga, más fácilmente puede ser transportada la carga contaminante. Por tanto, un acuífero tendrá alta vulnerabilidad a la contaminación si existe un volumen de recarga alto y la zona no saturada es de poco espesor. Con la excepción de que el volumen de la recarga sea tan grande que el contaminante se diluya hasta concentraciones permisibles (Vargas., 2010). Es así como para calcular la recarga neta se siguen las siguientes formulas:

$$R_n = PP - EVT$$

Donde:

- $R_n$ = Recarga neta (mm)
- $PP$ = Precipitación media anual (mm)
- $EVT$ = Evapotranspiración (mm)

La  $EVT$  se calculó con la expresión empírica de Turc (1954), la cual está en función de la temperatura ( $^{\circ}C$ ) y la precipitación con unidades mm/año.

$$EVT = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde  $L$  depende de la temperatura media anual la cual es calculada con la resta de la temperatura máxima menos la mínima y se evalúa mediante la siguiente ecuación

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0.05 \cdot T^3$$

Tabla 4.4 intervalos propuestos por Aller et al, (1987), para la recarga neta.

<b>RECARGA NETA (<math>R_w = 4</math>)(<math>R_wP=4</math>)</b>	
<b>Intervalo (mm)</b>	<b>Clase</b>
0-50	1
50-102	3
102-178	6
178-254	8
>254	9

La recarga neta fue estimada a partir de datos climatológicos del 2005 y hasta el 2015, reportadas por las estaciones climatológicas de la zona de estudio. Los datos como precipitación, temperatura máxima y mínima, necesarios para la recarga neta fueron obtenidos del sistema CLICOM, (2015), el cual es una base de datos de información libre de todas las estaciones climatológicas del país, contiene información actualizada hasta el 2015. Se ocuparon 13 estaciones, se colectaron sus respectivas coordenadas, y se aplicó la fórmula de Turc (1954), para conocer su Evapotranspiración (EVT), Seguido de esto, se restó la precipitación anual para poder conocer la recarga neta de cada estación. Después se realizó la interpolación de polígonos de Thiessen el cual, consiste en obtener el área de influencia de cada una de las estaciones climatológicas en relación a su  $R_n$  (**Ver anexo 4**).

#### **4.5 Zona saturada (A)**

La zona saturada o medio acuífero se refiere a la roca consolidada o no consolidada donde se encuentra el acuífero. Aller et al, (1987), consideraron el medio acuífero como un medio homogéneo, sin embargo, en los acuíferos es común encontrar estratificación de diferentes tipos de roca que lo constituyen. Esta característica ejerce un notable control sobre la trayectoria de los contaminantes una vez en él. La dirección y velocidad con la que un contaminante puede alcanzar la superficie del agua subterránea, está fuertemente influenciado por las fracturas o grietas presentes en las rocas y que muchas veces pueden proporcionar un fácil acceso al agua subterránea (Ramos., 2002).

En general, cuanto mayor sea el tamaño de grano y más fracturado este el medio, mayor será la permeabilidad, menor la capacidad de atenuación del contaminante y mayor la vulnerabilidad del acuífero (Aller et al., 1987). La Tabla 4.5 muestra los intervalos y su



respectiva clase de acuerdo a lo propuesto por Aller et al, (1987), para el medio acuífero donde su peso ( $A_w$ ) Drastic es de 3 y el mismo para PESTICIDA DRASTIC ( $A_wP$ ).

Tabla 4.5 Intervalos propuestos por Aller et al, (1987), para el medio acuífero así como la valoración típica.

<b>Medio acuífero (<math>A_w=3</math>)(<math>A_wP=3</math>)</b>		
<b>Litología</b>	<b>Clases</b>	<b>Clase típica</b>
Lutita masiva	1-3	2
Ignea Metamorfica	2-5	3
Ignea metamórfica alterada	3-5	4
Till glacial	4-6	5
Arenisca estratificada , Caliza, Lutitas	5-9	6
Arenisca masiva	4-9	6
Caliza masiva	4-9	6
Arena y grava	4-9	8
Basaltos	2-10	9
Caliza Kárstica	9-10	10

Para el cálculo de este parámetro se tomaron como base 71 cortes litológicos encontrados en la revisión bibliográfica, se recopilaron los cortes con información litológica y sus respectivas coordenadas UTM. Una vez obtenida la información se realizaron las columnas geológicas de cada pozo con ayuda de Strater (Golden software., 2015), esto para visualizar los diferentes intervalos geológicos de cada corte. Para poder evaluar la zona saturada con ayuda de la información obtenida del parámetro “D” que se obtuvo la PNE en cada corte evaluando, de esta manera la vulnerabilidad de cada litología que se encontraba debajo de la línea de PNE, fue ubicada gracias a las profundidades obtenidas en el apartado 4.3. Una vez identificada la PNE del parámetro D para cada corte litológico, se realizó la ponderación de porcentaje que representa el espesor de cada corte con respecto a la profundidad desde la PNE hasta la profundidad del pozo representando la zona saturada o el medio acuífero. Una vez realizado esto, se pasó a la evaluación de cada litología en la zona saturada. Una vez evaluada cada litología se sumaron las vulnerabilidades para así obtener un valor para cada corte (**ver anexo 2**). Los valores de vulnerabilidad se ajustaron a los propuestos por Aller et al, (1987). Debido a litologías que no se encontraban en la tabla 4.5, se partió de las

siguientes definiciones y con apoyo de modificaciones, se revisó la vulnerabilidad para cada litología de los 71 cortes.

**Lutita masiva:** Es una roca sedimentaria compuesta por partículas de tamaño arcillas que por lo general, solo producen pequeñas cantidades de agua de las fracturas y que tienen un bajo potencial de contaminación. El potencial de contaminación está influenciado por el grado de fracturas.

**Ígnea/Metamórfica :** Material consolidado de origen metamórfico o de origen ígneo que contiene poca o ninguna porosidad primaria y que produce agua sólo de fracturas dentro de la roca. El potencial de contaminación relativa es una función del grado de fracturamiento, con un porcentaje de porosidad 0,01 a 1%.

**Ígnea / Metamórfica meteorizada:** Rocas sin consolidar de fragmentos de roca, que descansa sobre una roca sólida denominada regolito, que contiene porosidad primaria. La contaminación está muy influenciada por la cantidad de material de arcilla presente; cuanto mayor sea el contenido de arcilla, menor será el potencial de contaminación.

**Arenisca, caliza y lutita:** Capas delgadas de secuencias de rocas sedimentarias con porosidad primaria. El grado de fracturamiento controla la vulnerabilidad.

**Arenisca masiva:** Lechos de roca arenisca consolidados con porosidad total de 5 a 35%, además de poseer depósitos más gruesos en secuencias de piedra arenisca, caliza y pizarra. El potencial de contaminación es en gran parte controlado tanto por el grado de fracturamiento como por la porosidad primaria de la arenisca.

**Arena o grava:** Partículas mezcladas de material no consolidado y con gran cantidad de finos se depositan en terrenos secos con ligera cohesión que fácilmente pueden ser erosionadas por el viento. Las gravas que tienen solo pequeñas cantidades de material fino se denominan "limpias". En general, cuanto más limpio y más grueso sea el acuífero, mayor será el potencial de contaminación.

**Basalto:** Roca volcánica extrusiva consolidado que en general contiene, fracturas y porosidad vesicular. El potencial de contaminación es influenciado por la cantidad de aberturas interconectadas que están presentes en el material.

Finalmente en la Tabla 4.51 se muestran las clases de las litologías presentes en los cortes recabados para este estudio y relacionados a cada litología propuesto por Aller et al (1987).

Tabla 4.51 Intervalos por Aller et al (1987), para el medio acuífero de la zona de estudio. Tomado de Goya, (2011) y Zapata, (2013).

<b>MEDIO ACUÍFERO (Aw=3)(AwP=3)</b>			
<b>Litología</b>	<b>Clases</b>	<b>Material en el área (Cortes)</b>	
Lutita masiva	1-3	Arcilla	1
		Tepetate	2
		Tezontle	4
Ígnea Metamórfica	2-5	Andesita	2
		Riolita	2
Ígnea metamórfica alterada	3-5	Margas	2
Till glacial	4-6	Arcillas/Limo	3
Arenisca estratificada , Caliza, Lutitas	5-9	Ceniza volcánica	3
Arenisca masiva	4-9	Arcilla arena	4
Caliza masiva	4-9	Caliza	4
Arena y grava	4-9	Arena	4
		Grava	9
		Conglomerado,	4
		Aluvión	6
		Boleos	6
Basaltos	2-10	Toba	4
		Ingnimbrita	5
		Basalto	8
		Basalto fracturado	10
Caliza Karstica	9-10	Aglomerado	5

Una vez realizada la evaluación de vulnerabilidad de litología reportada en los cortes se realizó la ponderación a cada intervalo, se evaluó toda la zona saturada como un 100% y calculó el espesor y vulnerabilidad de cada litología con ayuda de la Tabla 4.51. Para poder obtener la información de cada corte puntualmente ya con una vulnerabilidad dada, se colocaron en el *software* Arcmap, (Esri, 2016), donde se realizó una interpolación por el método de polígonos de Thiessen e IDW, de esta manera se muestra la zona de

influencia de vulnerabilidad para cada pozo, con lo que se evaluó solo la zona saturada **(Ver anexo 5)**.

#### **4.6 Suelo (S)**

Este parámetro se refiere al material no consolidado ubicado en la parte superior de la zona no saturada teniendo muy poca profundidad; contiene materia orgánica y se encuentra en superficie, es decir la descripción de su edafología. En la Tabla 4.6 se muestran los valores que toma la metodología Drastic para el suelo (S), así como los materiales que fueron ajustados a los suelos presentes en el área de estudio de acuerdo a su textura o cantidad del limo, arena, arcilla propuestos por Aller et al, (1987). Entre más fino este parámetro la vulnerabilidad es más alta con relación a la cantidad de arcilla dado que menos vulnerable Su peso (Sw) Drastic es de 2 respectivamente y su peso pesticida Drastic (SwP) es de 5.

“S” se calculó con base en los suelos que existen en el municipio de Salamanca, haciendo uso del mapa de suelos del prontuario de Salamanca, INEGI, (2009). Se determinó la distribución espacial de los tipos de suelos los cuales son: vertisol (V), regosol (R), cambisol (C) y phaeozem (H/Hs).

La descripción se obtuvo de la clasificación del sistema FAO-UNESCO, (1976) y con apoyo de la base referencial mundial del uso de suelo, (2008), se obtuvieron sus características:

#### **Vertisol (V)**

*“Del latín vertere, voltear. Suelo que se revuelve son suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. Se caracterizan por su estructura masiva y su textura arcillosa, la cual es expandible, por lo tanto, estos suelos se encogen a medida que se secan y se hinchan cuando se mojan. Cuando están secos, los vertisoles forman grietas grandes que pueden tener más de un metro (tres pies) de profundidad y varios centímetros o pulgadas de ancho. El movimiento de estos suelos puede agrietar los cimientos de los edificios y doblar las carreteras. Los vertisoles son altamente fértiles debido a su alto contenido de arcilla; sin embargo, el agua tiende a acumularse en sus superficies cuando se mojan. Ocupan gran parte de*

*importantes distritos de riego en Sinaloa, Sonora, Guanajuato, Jalisco, Tamaulipas y Veracruz. En estos suelos se produce la mayor parte de caña, cereales, hortalizas y algodón. Tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización”.*

### **Rgosol (R)**

*“Los Regosoles (del griego reghos, manto). Son suelos muy jóvenes que se desarrollan sobre material no consolidado de textura fina, colores claros y pobres en materia orgánica. Se encuentran en todos los climas, con excepción de zonas de permafrost, y en todas las elevaciones, y son particularmente comunes en las regiones áridas, semiáridas (incluyendo los trópicos secos) y zonas montañosas. En México, las mayores extensiones se encuentran en la Sierra Madre Occidental y del Sur y en la Península de Baja California. Los Regosoles de zonas áridas tienen escasa vocación agrícola, aunque su uso depende de su profundidad, pedregosidad y fertilidad”.*

### **Cambisoles (C)**

*“Del latín, cambiare, cambiar; connotativo de cambios de color, estructura y consistencia resultantes de la meteorización in situ.). Los Cambisoles combinan suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente. Son jóvenes y pocos desarrollados y se pueden encontrar en cualquier clima excepto en zonas áridas. Con textura de fina a media. La transformación del material parental (Aluvión, coluvión) es evidente debido a la formación de estructura y decoloración principalmente parduzca, esto relacionado al incremento de arcilla, y/o remoción de carbonatos”.*

### **Phaeozem ( H/Hs)**

*“Los Phaeozem (del griego phaios, oscuro y del ruso zemlja, tierra) se forman sobre material no consolidado de textura media a fina. Se encuentran en climas templados y húmedos con vegetación natural de pastos altos o bosques. Son suelos oscuros y ricos en materia orgánica, por lo que son muy utilizados en agricultura sin embargo, las sequías y la erosión son sus principales limitantes. Se utilizan intensamente para la producción de granos (soya, trigo y cebada). En México, se distribuyen en porciones de la FVTM la*

*Sierra Madre Occidental, la Península de Yucatán, Guanajuato y Querétaro, principalmente”.*

Una vez definidos los tipos de suelos en la zona de estudio, se evaluó de acuerdo a la descripción hecha por la FAO, INEGI y la base de referencia mundial del suelo (2008) en conjunto con los intervalos propuestos por Aller et al, (1987).

Tabla 4.6 Intervalos por Aller et al, (1987) para el suelo de la zona de estudio, tomado de Goya, (2011) y Zapata, (2013).

<b>Suelos (Sw= 2) (SwP=5)</b>			
Material Original /Textura	Clase	Material en zona de estudio	Clase
Arcilla no agregadas y material compacto	1		
Arcilla margosa	3		
Limo margoso	4		
Marga	5		
Arenisca Margosa	6		
Agregado arcilloso o comprimido	7	Vertisol	7
Arena	9	Phaeozem	9
Fino o ausente	10	Regosol	10
Grava	10	Cambisol	10

Se definieron los valores de vulnerabilidad para los 4 tipos de cobertura edafológica ya mencionados y como lo indica la Tabla 4.6, el valor de menos vulnerabilidad en este caso corresponde a 7, esto debido a la cantidad de arcillas ya que tienen un papel importante que influye en la transmisión de los contaminantes a través de aquellos horizontes de suelo con arcillas y relacionado a su comportamiento físico. El valor más alto en este caso 10, es para los suelos con material fino, que no contienen arcillas y por ende son más vulnerables como se ha explicado en los puntos anteriores. Posteriormente se hizo uso del mapa de suelos del prontuario, INEGI, (2009), para la zona de estudio. En él se asignaron los valores de vulnerabilidad, para posteriormente rasterizarlo y así obtener el mapa de vulnerabilidad con el parámetro S de la zona de estudio.

#### 4.7 Topografía (T)

La topografía se refiere a la pendiente y su variación en el terreno. El nivel de la pendiente va determinar la cantidad de la escorrentía de los posibles contaminantes y su tiempo de infiltración. La topografía ayuda al control de la probabilidad de que un contaminante salga o permanezca en la superficie de una zona, pues influye en la dirección y velocidad de flujo del agua infiltrada o del contaminante según la pendiente del terreno. En la Tabla 4.7 se tiene los intervalos propuestos por Aller et al, (1987), para este parámetro en donde su peso (Tw) Drastic es de 1 y Pesticida Drastic de 3 (TwP).

Tabla 4.7 Valores para el parámetro T de acuerdo a Aller et al, (1987).

TOPOGRAFÍA (Tw=1)(TwP=3)	
Intervalo (%)	Clase
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Para el cálculo de este parámetro se utilizaron las cartas topográficas de INEGI serie III (2015), que constituyen una representación digital de los valores de elevación de la superficie de la tierra en intervalos horizontales espaciados regularmente. Para este caso se utilizaron las cartas F14: C52, C53, C62, C72, C82, C83, C73 y C63 que abarcan la zona de estudio. Una vez descargados, se montaron en ArcMap (Esri, 2016) para hacer uso de la herramienta “merge” y así poder tener todas las cartas en una sola, posteriormente se interpolaron y enseguida se calculó su pendiente con el procesamiento de “Slope” en porcentaje. Con esta resolución se obtuvieron buenas configuraciones que se ajustaron a la metodología. Después se clasificaron los valores de acuerdo a la vulnerabilidad, presente en la Tabla 4.7

#### 4.8 Zona vadosa o no saturada (I)

Este parámetro tiene un comportamiento temporal y espacial similar al tratado en el medio acuífero (A), de igual forma, en escenarios con diferentes estratificaciones y estructuras presentan complicaciones en la selección de intervalos de material, que puede producir una estimación inapropiada de los índices de vulnerabilidad.

Los valores asignados a este parámetro se obtuvieron de los 71 cortes litológicos mencionados en el apartado 4.5, con base al ajuste de la litología descrita en los cortes con los intervalos propuestos por Aller et al, (1987). El procedimiento fue igual al descrito en el parámetro A. Donde una vez identificado la PNE con ayuda del mapa del parámetro D para cada corte litológico, se realizó la ponderación de porcentaje que representa el espesor de cada corte con respecto a la profundidad desde la superficie hasta la PNE. Posteriormente se asignaron valores de vulnerabilidad a cada intervalo geológico, que se evaluaron en los cortes. Una vez realizado esto se obtuvo un solo valor de vulnerabilidad para cada corte evaluado, después se interpolaron en Arcmap, (Esri, 2016) con el método de polígonos de Thiessen y el IDW. El método IDW se basa en la influencia relativa de un punto a otro y este disminuye conforme la distancia de los puntos y al punto a crear es más alejada. Los valores se presentan en la Tabla 4.8, en donde su peso (lw) Drastic es de 5 puntos y de 4 para lwP (Ver anexo 6).

Tabla 4.8 Intervalos propuestos por Aller et al, (1987). Tomado de Goya, (2011) y Zapata, (2013).

<b>MEDIO ACUÍFERO (lw=5)(lwP=4)</b>			
<b>Litología</b>	<b>Clases</b>	<b>Material en el área</b>	
Capa confinante	1	Arcilla	1
Limo/Arcilla	2-6	Limo/Arcilla	2
		Tepetate	2
		Tezontle	3
Lutita	2-5	Ceniza volcánica	
Caliza	2-7	Margas	3
Arenisca	4-8	Andesita	3
Caliza estratificada, arenisca, lutita	4-8	Arcilla/ arena	4
Arena grava con limo, arcilla	4-8	Caliza	4
		Conglomerado	6
		Aluvión	7
		Boleos	6
Ígnea /Metamórfica		Toba	
Arena y Grava	6-9	Arena	6
		Grava	9
Basalto	2-10	Basalto	6
		Basalto fracturado	8
Caliza Kárstica	8-10		



#### **4.9 Conductividad hidráulica (C)**

Este parámetro muestra la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua. En general, conductividades elevadas están asociadas a una vulnerabilidad alta, debido a que el contaminante se puede mover más rápido de un punto a otro una vez dentro del medio acuífero.

Los datos para el parámetro C que se procesaron fueron tomados de los 71 cortes que se obtuvieron del acuífero Irapuato Valle, donde se realizó la ponderación de cada litología de acuerdo con las conductividades teóricas del medio acuífero (zona saturada) que se muestran en la Tabla 4.9. Se adecuó el dato de K (m/d) de acuerdo con los valores que Aller et al, (1987), propusieron (Tabla 4.91). Una vez obtenido el puntaje de vulnerabilidad de cada corte se montó en Arcmap, (Esri., 2016) en donde se interpolaron por medio del método IDW y así obtener las zonas de baja y alta vulnerabilidad. Su peso (Cw) Drastic es de 3 y de 2 para pesticida Drastic (CwP) **(Ver anexo 7)**.

Tabla 4.9 Conductividades hidráulicas usadas de acuerdo a los 71 cortes.

		CONDUCTIVIDADES HIDRAULICAS TEORICAS Y MEDIDAS						
		Domenico&Schwartz (1998)	Ramos y Rodríguez (1998) Río Turbio Gto.	Custodio llamas (1998)	Flores Román et al (1996)	Drastic Aller et al (1987)		
Litología	Intervalo Km/d	K promedio (m/d)	K medida (m/d)	K medida (m/d)	K (m/d)	Vul Usada1	Vul usada2	Vulnerabilidad promedio
Gravas	2.59E+0 - 25.9E+0	1.31E+03	120.96			10*	1	10
Arenas			3.136	5 a 10 promedio 7.5		1	2	2
Arcillas	8.64E-07 - 4.06E-04	0.00020347	0.00023328			1*	1	1
Conglomerado poligmítico				1 a 1000 promedio 500.5		10	1	10
Aluvión (Limos, arcillas, arenas mal clasificadas, y pocas gravas)	7.78E-02 - 5.18E+02	259	0.02592			1*	10	10
Boleos (Grava,arena,arcillas)			3.1968			1*	1	1
Tepetate (muy arcilloso y aislante)					<0.01	1	1	1
Tezontle (guarda calor, impermeable)						1	1	1
Basalto	1.73E-06 - 3.63E-02	0.01814486				1	1	1
Basalto fracturado o rolita fracturada	0.0346- 1.730	864.01	1.65 a 112.32 promedio 56.98			10	1	8
Toba			3.1968			1*	1	1
Riolita	2.59E-09 - 1.73E-05	0.00000864				1	1	1
*Nota= Se decidió usar en algunos casos la medición hecha por Ramos& Rodríguez (1998) río Turbio, Gto debido a la litología similar de Guanajuato.					**Nota= Para los casos en donde no se encontró información se recurrió a diferentes autores. Se decidió usar los valores maximos o minimos. (Vul usa1) (Vul usa2) y finalmente una vul promedio, para reducir incertidumbre. Finalmente se hizo uso de "VUL 1".			

Tabla. 4.91 Valores para la conductividad hidráulica de acuerdo a Aller, (1987).

Conductividad hidráulica (Cw=3)(CwP=2)	
Intervalo (m/d)	Clase
0.040-4.0746	1
4.0746-12.2238	2
12.2238-28.522	4
28.522-40.746	6
40.746-81.492	8
>81.491	10

## CAPITULO 5

### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La vulnerabilidad se definió a partir de la metodología Drastic (Aller et al., 1987), sin embargo, para la PNE se realizó una modificación en la escala de profundidades. Esto para incorporar las PNE presentes en la zona, según lo propuesto por Ramos (2002). En los parámetros “A”, “I” así como “C” se utilizó una suma aritmética de los diferentes espesores de los cortes geológicos ponderando cada espesor y dependiendo de si se encontraban en la zona saturada o no saturada, para así obtener un valor de vulnerabilidad para cada pozo con el que se contaba (71 cortes). Una vez obtenido los índices Drastic y Pesticida Drastic se obtuvieron 3 mapas finales de vulnerabilidad: 1) uno usando interpolación de Thiessen para las variables R, A e I, 2) otro con una interpolación IDW para las variables A e I, esto para observar la variación de las interpolaciones y 3) aplicando la metodología Pesticida Drastic, debido a la importancia agrícola del municipio de Salamanca, dando mayor peso a los tipos de suelos reportados así como la pendiente nula presente en la ciudad. Finalmente en la discusión se comparan los 2 mapas obtenidos con el mapa de estudios previos, realizado en la ciudad de Salamanca obtenido en estudios previos de la ciudad de Salamanca (Rodríguez et al., 2000; mapa índice Drastic), con la finalidad de reconocer si los resultados obtenidos previamente con el tiempo o han variado (ya sea aumentar o disminuir), una de las diferencias en este estudio es que se pudieron obtener los parámetros individualmente y esto, nos ayuda a evaluar cuál es el parámetro más significativo y la zona más vulnerable.

#### 5.1 D (PNE)

La PNE en Salamanca, Gto se muestra en la Figura 5.1. Una vez realizado el proceso para obtener PNE (**Ver anexo 3**) se observó que el rango reportado varía de los 11 m hasta los 135 m. Se sobrepusieron los pozos de monitoreo del acuífero Irapuato-Valle (en rojo, Figura 5.1), junto a los cortes litológicos recopilados (en negro, Figura 5.1). La profundidad para las zonas urbanas de mayor población, en este caso la ciudad de Salamanca, va ligada a la sobreexplotación del acuífero en zonas profundas. Los pozos que existen en esa zona reportan que extraen agua a grandes profundidades (>90 m), lo que se puede apreciar en el mapa, como zonas con cotas muy profundas. En general

en la zona centro y norte el agua se encuentra a profundidades mayores a 65 m. Las partes con menor profundidad se encuentran al SW y SE del municipio mostrando colores azules donde la profundidad en estas zonas no rebasa los 60 m.

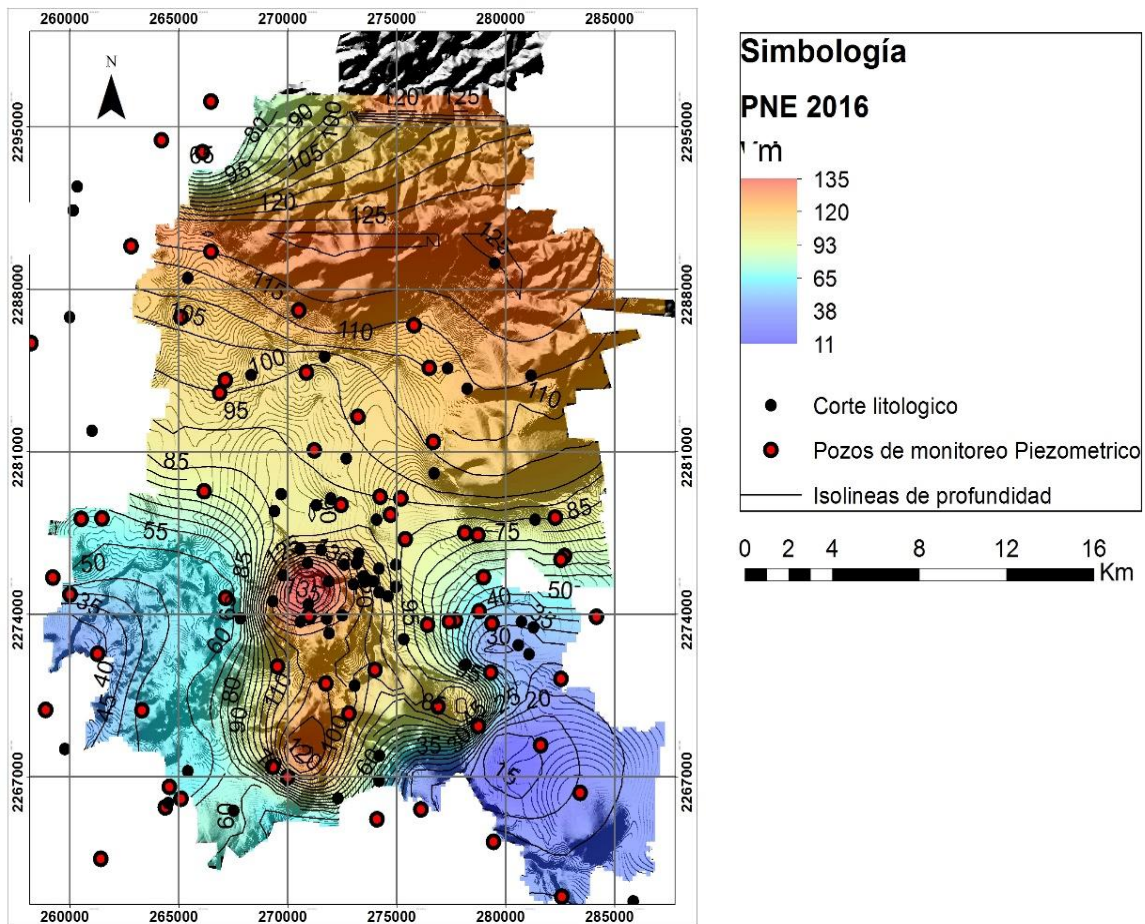


Figura 5.1 Profundidad del nivel estático al 2016, modificado de CEAG, (2018).

Una vez obtenidas las profundidades se clasificaron de acuerdo con las clases modificadas por Ramos, (2002), debido a que sobrepasó las clases definidas por Aller et al, (1987). Es así como la Figura 5.11 muestra un rango de vulnerabilidades de 2 a 9 observándose desde una baja hasta una alta vulnerabilidad. Las zona más vulnerables se ubican al SE y SW del municipio. Al SW se encuentran los poblados de Valtierra, Los Prietos y Loma pelada, donde se nota una vulnerabilidad que va desde 7 hasta 9 debido a la baja profundidad del agua, la cual oscila desde los 11 m hasta los 60 m aproximadamente.

En la zona norte y centro del municipio los rangos de vulnerabilidad son bajos (2-3) debido a la gran profundidad a la que se encuentra el agua como se observa en el acercamiento a la ciudad de Salamanca (Figura 5.11) donde es evidente una gran relación en la disminución de la vulnerabilidad conforme aumenta la PNE (Figura 5.1) y la pendiente topográfica disminuye. En la zona centro, la razón principal de la baja vulnerabilidad se debe a la gran explotación del agua que se maneja en la ciudad, donde el agua se encuentra a profundidades muy grandes y ha tenido a través de los años un abatimiento de 2 a 3 m en promedio según la CEAG., (2019).

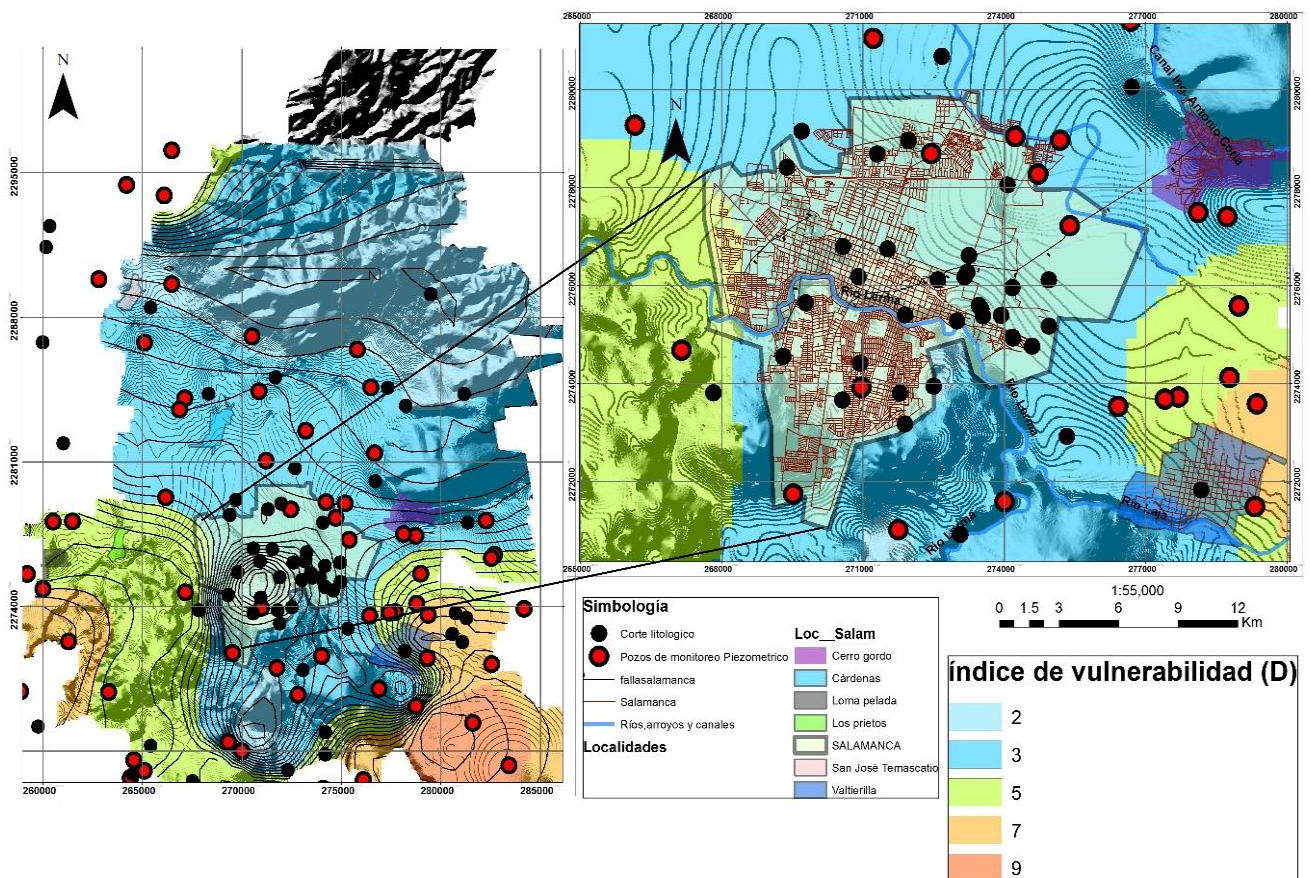


Figura 5.11 Índice de vulnerabilidad (D).

## 5.2 R (Recarga neta)

La recarga neta se evaluó con 13 estaciones climatológicas distribuidas en el municipio de Salamanca y sus alrededores. Los valores fueron interpolados mediante el método de polígonos de Thiessen. Las medidas recopiladas de precipitación y temperaturas, comprenden un periodo de 10 años y que se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Precipitación y temperatura media anual de las estaciones climatológicas de Salamanca y sus alrededores (2005-2015) (Datos tomados de CLICOM, 2015).

No. Estación	ESTACIONES	Precipitación (mm)	Temperatura media anual (°C)	Periodo 10 años
11052	LOS PERICOS	614.91	17.24	2005-2015
11137	PURISIMA	642.40	15.85	2005-2015
11134	EL CONEJO	717.73	18.25	2005-2015
11079	VALLE DE SANTIAGO	713.25	16.76	2005-2015
11028	IRAPUATO	671.83	16.58	2005-2015
11150	SAN JOSE, EL ALTO	738.85	17.64	2005-2015
11124	EL CHAPIN	685.43	17.73	2005-2015
11060	SALVATIERRA	683.30	18.06	2005-2015
11085	DOS ARROYOS	680.25	16.20	2005-2015
11013	CORTÁZAR	640.68	14.67	2005-2015
11146	LAS JÍCAMAS	608.89	13.90	2005-2015
11014	CUERÁMARO	644.21	16.78	2005-2015
11160	SAN ISIDRO	545.38	20.80	2005-2015

Los valores de recarga neta evaluados con la fórmula de Turc (1954) se muestran en la Tabla 5.21 (Ver anexo 3).

Tabla 5.21 Recarga neta (Rn) evaluada de las estaciones climatológicas de Salamanca y sus alrededores.

No. Estación	ESTACIONES	Rn 2005-2015 (mm)	Elevación (msnm)
11052	LOS PERICOS	73.04	1772.00
11137	PURISIMA	102.20	1840.00
11134	EL CONEJO	101.85	1740.00
11079	VALLE DE SANTIAGO	122.67	1790.00
11028	IRAPUATO	105.65	1729.00
11150	SAN JOSE, EL ALTO	120.79	1775.00
11124	EL CHAPIN	95.43	1853.00
11060	SALVATIERRA	90.01	2059.00
11085	DOS ARROYOS	115.27	2241.00
11013	CORTAZAR	118.15	1730.00
11146	LAS JICAMAS	112.85	1859.00
11014	CUERAMARO	90.71	1732.00
11160	SAN ISIDRO	21.66	1649.00

Como se nota en la tabla anterior (Tabla 5.21), los valores de la evaluación de la recarga neta son muy variables en el tiempo, debido a los cambios bruscos que pueden haber en un año hidrológico. La recarga puede variar de 300 mm/a 10 mm/a en otro, es así como puede pasar de 9 a 1 en cuanto a vulnerabilidad. También puede estar relacionada a los altos topográficos, debido a que por lo general son zonas de recarga para el acuífero aunque esto puede variar, así como el impacto del tipo de clima en la zona. La recarga neta tiene un comportamiento similar a la precipitación. No se tomó en cuenta infiltraciones de agua residual, así como la evaporación de la recarga al acuífero, aportarían mayores datos a la recarga neta. Esto debido a la complejidad del mismo parámetro. La estimación de la recarga neta es un proceso muy complejo y puede que se necesite realizar un proyecto independiente a este trabajo. La complejidad técnica y de campo que se necesita, es mayor.

Es así como en la Figura 5.2 se observan los valores de recarga neta que van desde los 73 mm hasta los 122.67 mm, en el periodo de 10 años, calculado para las estaciones que lograron abarcar el municipio. Los valores medios a altos de precipitación se distribuyen desde el norte hasta el centro del municipio y abarcan las estaciones del norte hasta la estación San José, con valores desde los 95 mm (el Chapín) hasta los 120mm en las zonas altas. La zona centro donde se encuentra la ciudad de Salamanca y todo el sur del municipio muestran una recarga neta baja de 73 mm esto debido a que solo se tomó la información de la única estación cercana a la ciudad de Salamanca (Pericos).

En estudios previos el valor de la recarga neta ha sido estimado en valores cercanos a los 55 mm (Guysa., 1998). Si se contara con estaciones meteorológicas en el centro, es posible que todo el centro del municipio contara con una recarga neta similar a la de Pericos. Esta afirmación se fortalece por el hecho de que se sabe que existe poca precipitación en la zona centro, sin embargo, debido a este problema la interpolación con Polígonos de Thiessen, trató de abarcar las zonas de influencia de cada estación, siendo zonas “irreales”, debido a la falta de información desde las zonas altas en donde se tiene grandes cantidades de precipitación.

Finalmente al tomar clases para la Recarga Neta se obtuvieron valores de 3 y 6 en el territorio municipal (Figura 5.2), el valor que corresponde al centro del municipio fue de 3, cabe señalar que es la más poblada de la zona.

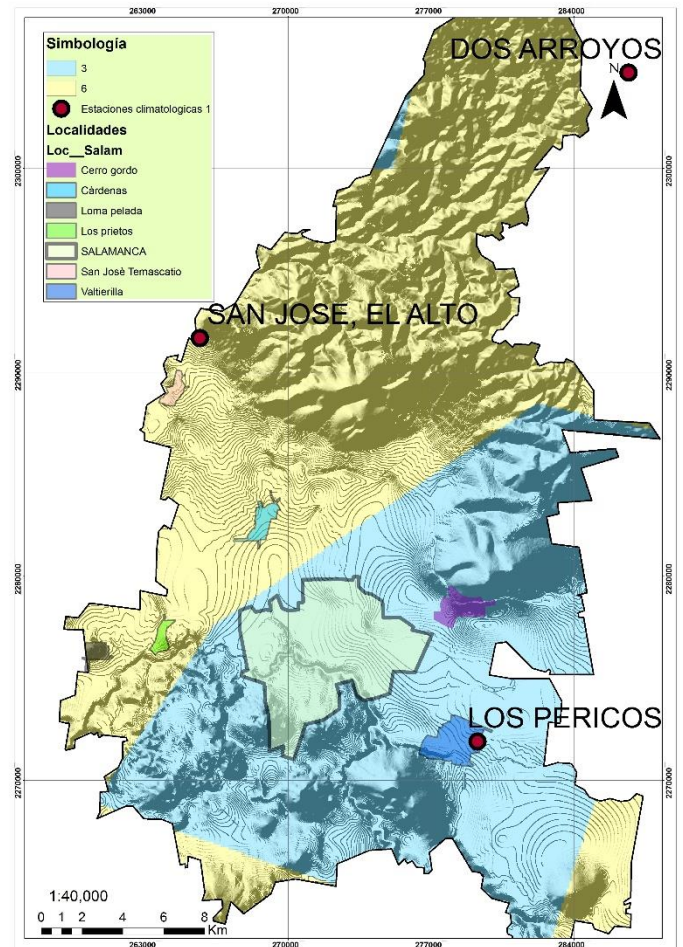
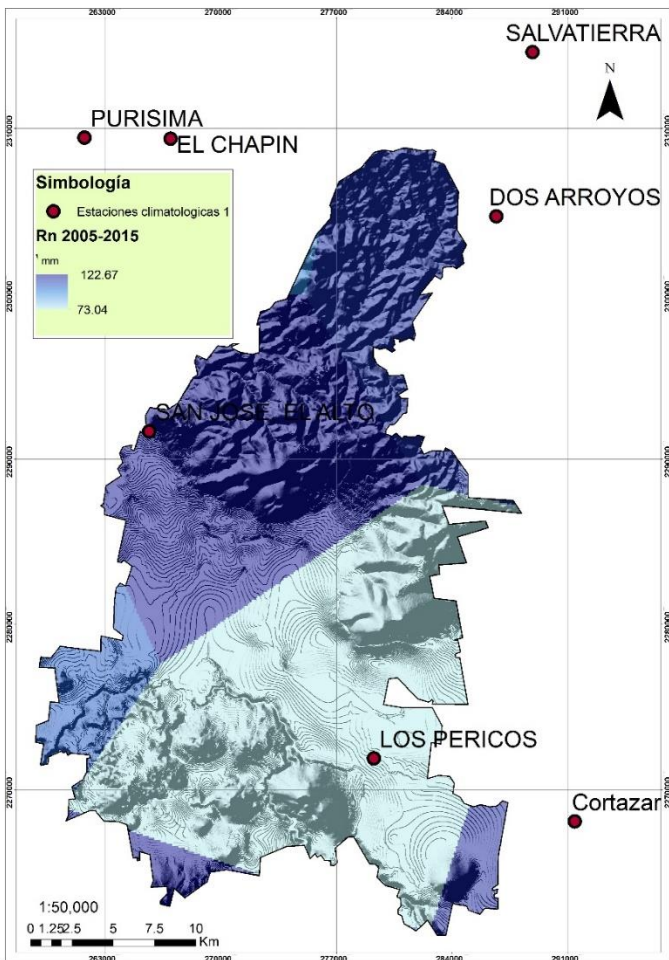


Figura 5.2 Recarga neta evaluada del 2005-2015 e índice de vulnerabilidad (R).



### 5.3 A (Zona saturada)

Los cortes empleados para evaluar el parámetro del medio acuífero (A), zona vadosa (I) y conductividad hidráulica (C) se muestran en la Figura 5.3. En total se tiene 71 cortes de diferentes fuentes de procedencia, diferente litología así como espesor, donde cada corte tiene asignado un valor de vulnerabilidad de acuerdo a la metodología del apartado 4.5 (**Ver anexo 2**), posteriormente se interpolaron por los métodos de Polígonos de Thiessen e IDW. De esta manera se analizó la cantidad de información y su agrupamiento, que posiblemente afecta las diferentes interpolaciones, los resultados mostraron la dispersión y tendencia de los datos.

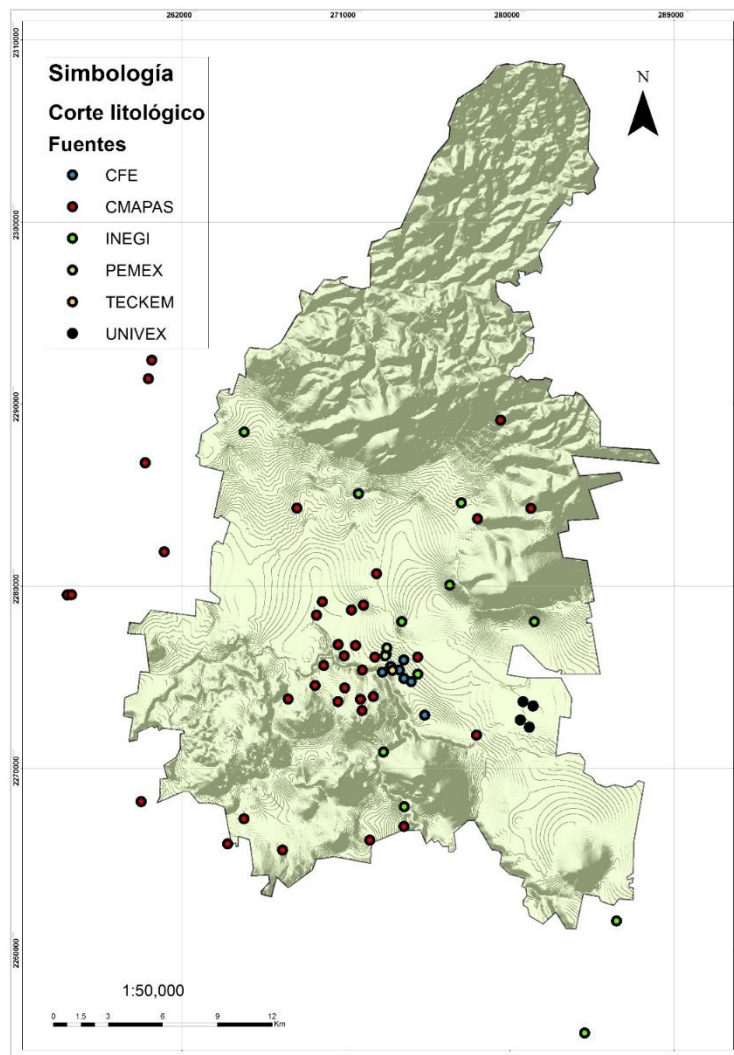


Figura 5.3 Cortes litológicos recopilados.

El índice de vulnerabilidad (Figura 5.31) muestra vacíos de información producto del método de interpolación, presenta grandes zonas dominadas por la evaluación de un solo corte, cuando esto no sería real, ya que la geología del subsuelo cambia constantemente por las diferentes texturas que presentan. Por esta razón se aplicó un acercamiento en la zona con mayor resolución, en la ciudad de Salamanca. De manera general, se nota que de acuerdo a la litología y las estratificaciones, la vulnerabilidad es afectada, tal es el caso del centro del municipio, en donde los cortes evaluaron rocas ígneas, pocas gravas y mucha presencia de arenas y arcillas, por lo que se obtuvieron valores de vulnerabilidad diversos que van desde 1 hasta 7 (Figura 5.31). Las variaciones son debidas a la presencia de arcillas impermeables que afectan el rango, que ocasiones que disminuyan en valores de (1-2). Para la parte oeste, la vulnerabilidad disminuye de (1-2) evitando el paso de los contaminantes en el acuífero. Al este las altas vulnerabilidades de (5-7) se deben a que en los cortes hay rocas volcánicas fracturadas o alteradas así como gravas, que presentan una puntuación muy alta de vulnerabilidad, debido a su poca consolidación y fracturamiento, dominando el corte y en teoría permitiendo el paso de algún contaminante, donde los paquetes de arcillas se notaron de igual manera en los cortes de esa zona.

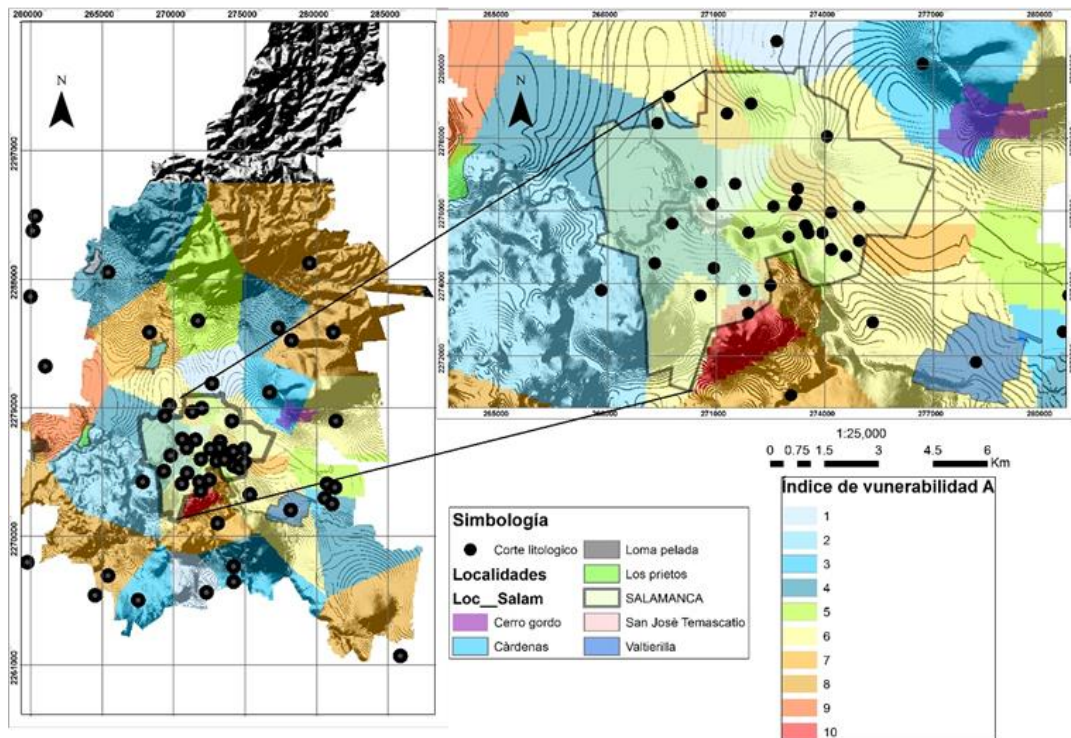


Figura 5.31 Mapa que muestra el índice de vulnerabilidad de la zona saturada (A), por Interpolación Thiessen.

En la Figura 5.32 se muestra el índice de vulnerabilidad con una interpolación IDW. Lo primero que resalta es que esta interpolación no exageró las zonas donde se tenía poca información de cortes, lo cual se concentró en la distribución de la información, en donde se encontraba la mayor. Se observa que la vulnerabilidad en la zona es variada desde 1 hasta 7, siendo, los puntos negros, los cortes dominados por una roca de alta vulnerabilidad, relacionado con la litología que presenta cada corte, ya que como se mencionó los cortes no son homogéneos y existen interdigitaciones de gravas, arenas, rocas volcánicas fracturadas que afectan de cierta manera aumentando o disminuyendo la vulnerabilidad, de acuerdo a los espesores. Sin embargo, se muestra la misma distribución y tendencia que en la interpolación anterior. Al hacer el acercamiento a la ciudad de Salamanca, la zona menos vulnerable se asocia con los cortes donde los espesores de arcilla dominan en el acuífero con valores entre (1-2), en la parte oeste de la ciudad y gran parte del centro del municipio, y por ende la vulnerabilidad disminuye. La parte este de la ciudad muestra un cambio en la litología con rocas más vulnerables con valores de (5-7), como arenas, gravas y rocas fracturadas presentes en los cortes de esa zona (Figura 5.32), sin embargo la presencia de arcillas sigue afectando la zona.

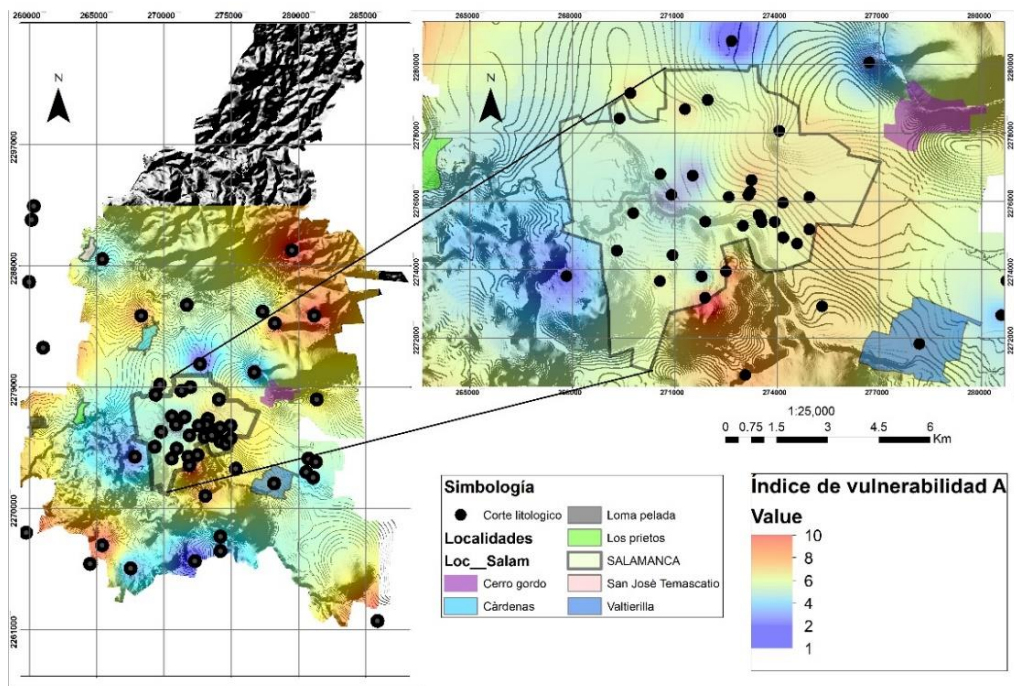


Figura 5.32 Mapa que muestra el índice de vulnerabilidad de la zona saturada (A). Por interpolación IDW.

## 5.4 S (Suelo)

Los suelos de Salamanca presentan un valor muy alto de vulnerabilidad, los rangos se encuentran entre 7 y 10, y están relacionados con su composición y textura (Figura 5.4). Los valores obtenidos se basan en el tipo de suelo de la carta edafológica INEGI., 2009). Toda la zona centro y sur de Salamanca se encuentra formada por vertisoles teniendo un valor de vulnerabilidad de 7 de acuerdo con las clases y con la importancia de la agricultura del municipio, ya que por la cantidad de arcilla es un suelo muy fértil, además su ubica en una zona plana, topográficamente. Sin embargo se desconoce el comportamiento del vertisol, por lo que se le asignó un valor de vulnerabilidad teórico, descrito en el apartado 4.6, en donde se logra la clasificación de los suelos, que componen el material entre la superficie y la zona vadosa. En la zona norte donde se encuentran los altos topográficos, el suelo está dominado por phaeozem, cambisol y regosol, que son suelos muy finos depositados sobre material no consolidado y con materia orgánica, así como volcánica y por ende tienen una vulnerabilidad muy alta que va de 9 a 10.

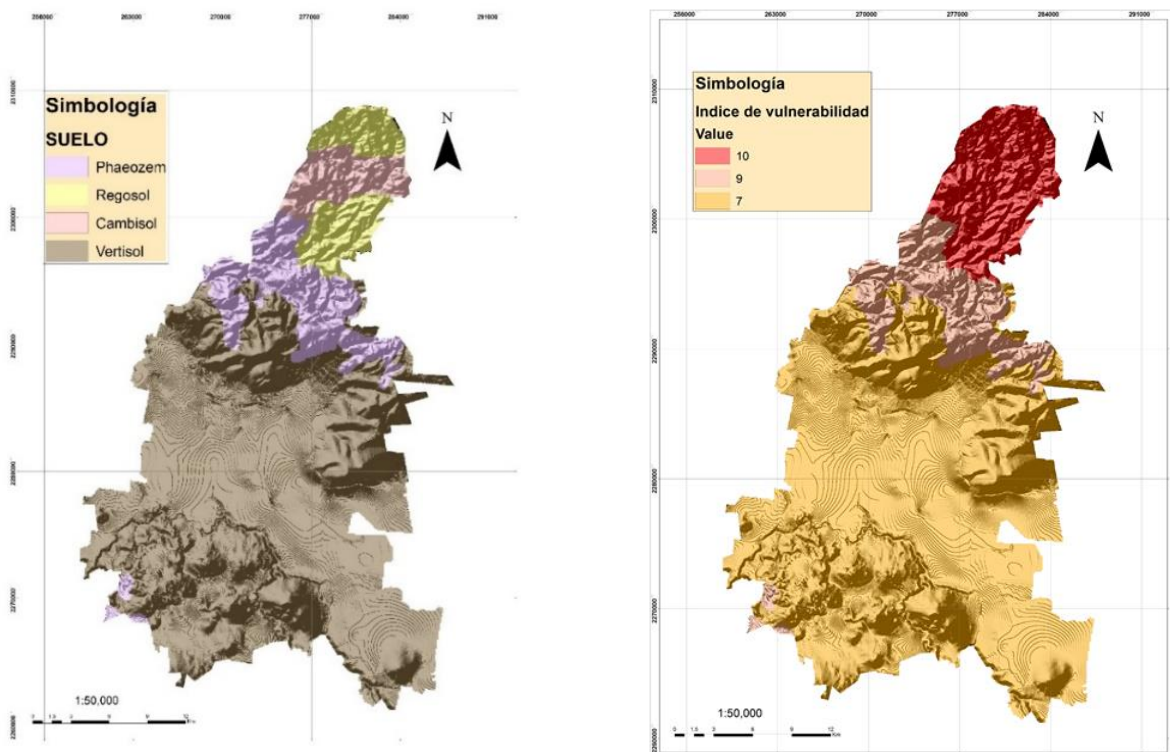


Figura 5.4 Tipos de suelos en Salamanca de acuerdo con el prontuario, INEGI., 2009 y el mapa de vulnerabilidad de suelos (S).

## 5.5 T (Topografía)

La vulnerabilidad de la topografía se encuentra relacionada con la pendiente, donde una inclinación mayor tiene baja vulnerabilidad a comparación de una zona donde la pendiente es plana, tal es el caso de Salamanca como se muestra en la Figura 5.5. Todo el valle de Salamanca, también conocido como depresión Salamanca-Querétaro, muestra una zona plana; la vulnerabilidad se encuentra con valores de 9 a 10, siendo esta la dominante. En teoría aquí, un contaminante alcanzaría sin problemas al acuífero, esto sin tomar en cuenta las características del medio.

Para la zona norte la vulnerabilidad se encuentra muy baja debido al aumento de la topografía, esto debido a que forma parte de la Sierra de Guanajuato, con vulnerabilidades de 1 hasta 5, por ser zonas muy altas.

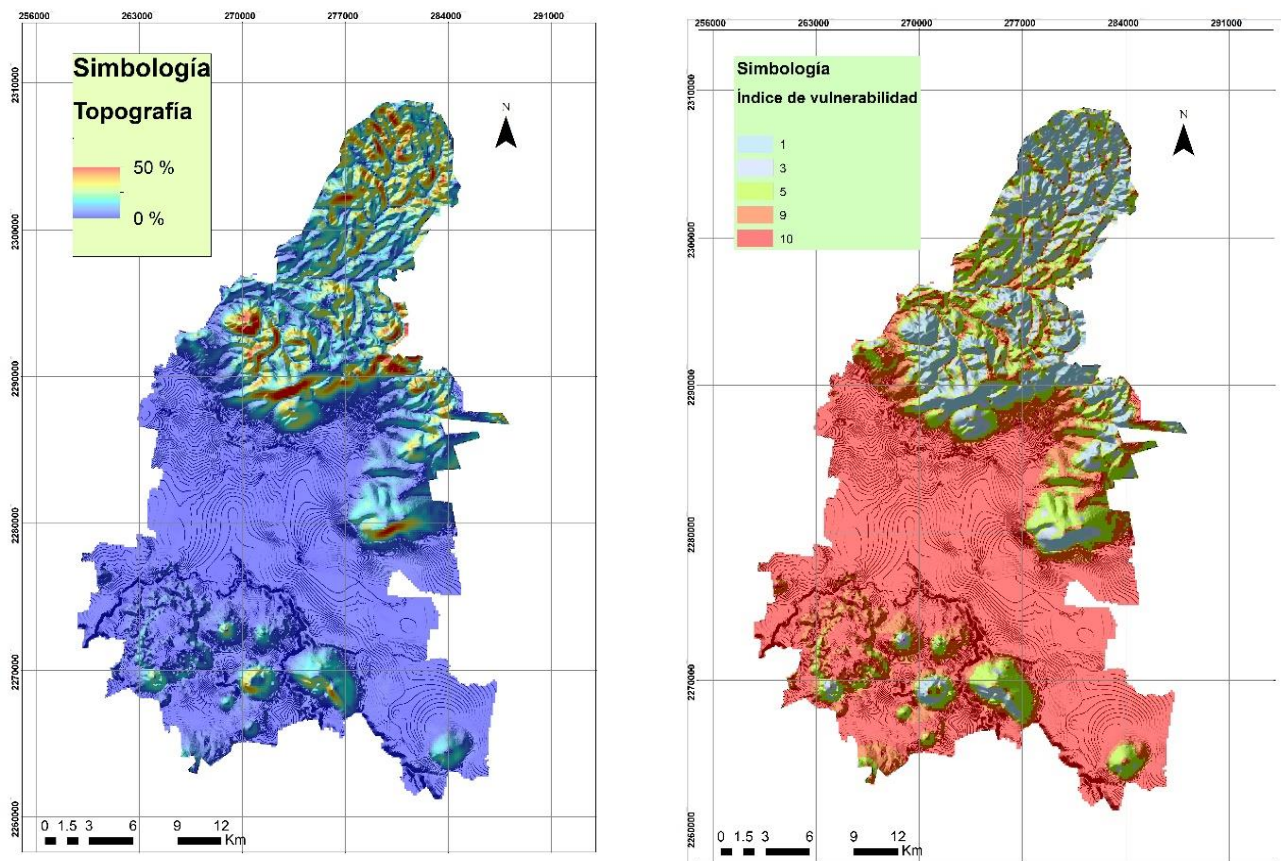


Figura 5.5 Pendiente topográfica del municipio de Salamanca, Gto y su índice de vulnerabilidad (T).

## 5.6 I (Zona no saturada)

El índice de vulnerabilidad de la zona no saturada refleja la vulnerabilidad de los primeros metros del material geológico antes de llegar al acuífero, es la principal protección del mismo, de igual manera cada corte litológico presentó diferentes materiales geológicos, los cuales estaban en diferentes espesores, que variaron el resultado de la vulnerabilidad. De igual manera que en el apartado 5.3, se presentan dos mapas con diferentes interpolaciones (Polígonos de Thiessen e IDW). La cantidad de información jugó un papel importante en la muestra y tendencia de las vulnerabilidades. Para el método de polígonos de Thiessen (Figura 5.6), los valores de vulnerabilidad muestran bajos valores (2-4), que se deben a la gran presencia de arcillas, principalmente por la baja permeabilidad de los depósitos, sería necesario considerar la presencia de tepetate y tezontle evaluado en algunos cortes, debido a su composición arcillosa. Las zonas de vulnerabilidad media-alta (5-7) se presentan en general en materiales como tobas, arenas, conglomerados, boleos, andesitas e ignimbritas. Las zonas de vulnerabilidad alta (8) presentan gravas derivados de la erosión así como basaltos fracturados que se observaron en algunos cortes analizados.

Para la zona en donde se tiene la información, en la ciudad de Salamanca, la parte oeste de la ciudad presenta de bajas vulnerabilidades a moderadas (2-5). Para la parte este, en donde se encuentra la falla que viene desde Cerro Gordo se observan vulnerabilidades altas (6-7) debido a la presencia en los cortes de rocas sin consolidar o volcánicas fracturadas (gravas, basaltos fracturados).

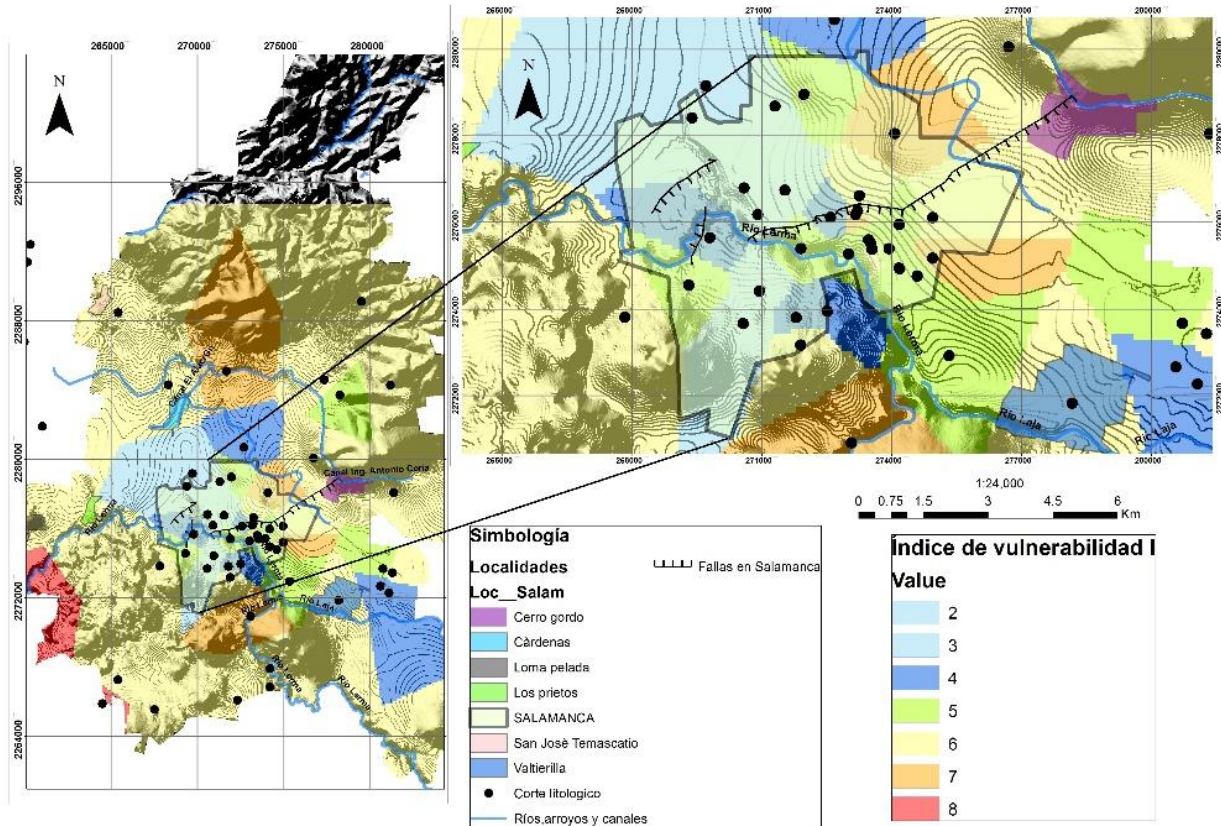


Figura 5.6 Índice de vulnerabilidad mediante Polígonos de Thiessen de la zona no saturada (I).

Para la interpolación por IDW, la mayor cantidad de información repercutió en la distribución y tendencia, la muestra buenos valores y cierto parecido, en la ciudad de Salamanca. Al igual que con el método anterior las bajas vulnerabilidades a moderadas (2-5) se localizan en la parte oeste de la ciudad (Figura 5.61) y vulnerabilidades media a altas (6-7) en la zona este donde se encuentra la falla. De esta manera se relaciona la litología que existe en las zonas de cada corte.

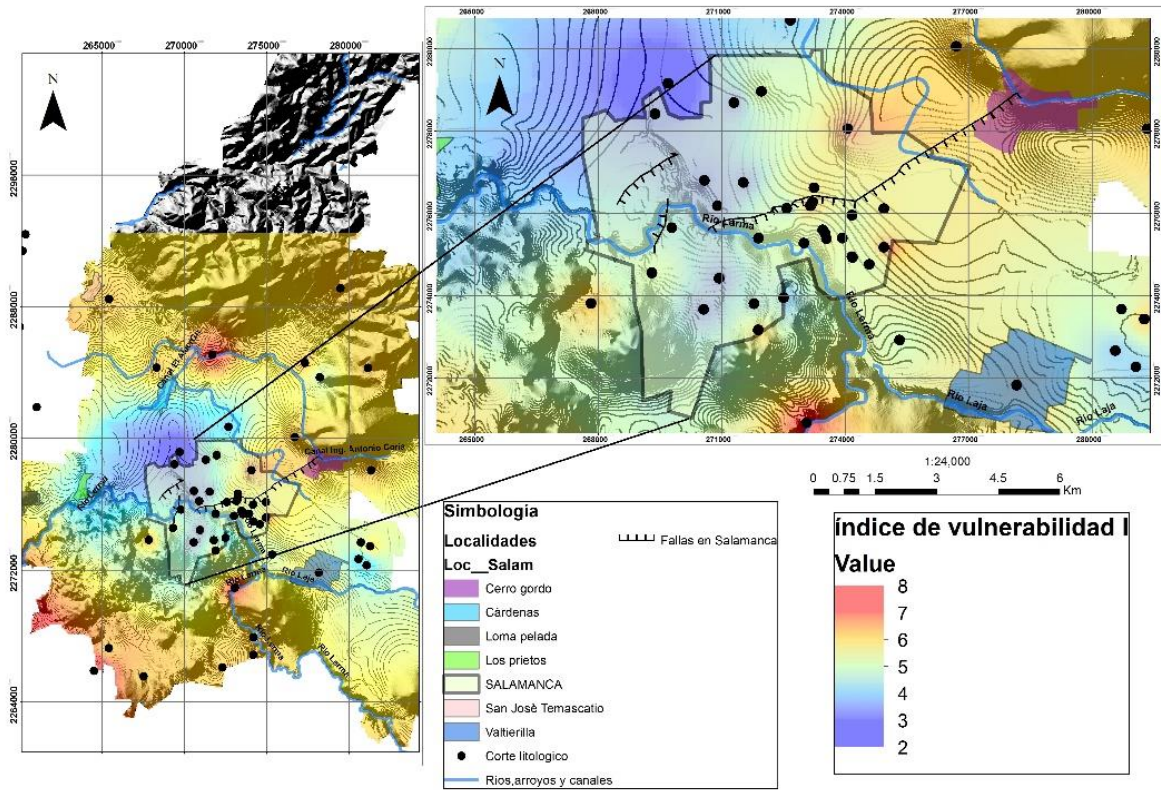


Figura 5.61 Índice de vulnerabilidad mediante IDW evaluadas de la zona no saturada (I).



### 5.7 C (Conductividad hidráulica)

Como se mencionó en la metodología para obtener la conductividad hidráulica se recurrió al análisis de la zona saturada de los 71 cortes litológicos que se analizaron y así aplicar la ponderación de vulnerabilidad para cada corte, con sus respectivas conductividades hidráulicas teóricas, de acuerdo a la litología en apoyo de diferentes autores y algunas medidas reales que se tomaron cerca de la zona. Sin embargo debido al conocimiento de la geología del municipio y los datos de conductividad tomados de río Turbio, Gto (Ramos y Rodríguez., 1998), siendo lo más cercano al área de estudio por la similitud en la geología se optó por la opción número uno (**VUL 1**), descrito en la Tabla 4.9.

Una vez realizado este paso, se obtuvo la vulnerabilidad teórica de todo el acuífero que resultó de baja a moderada con un valor de 1-4 para gran parte del municipio como se muestra en la Figura 5.7. Los valores bajos de vulnerabilidad de conductividad hidráulica (1-2), se refieren a rocas impermeables por su grado de compactación, como rocas volcánicas: como basalto, tobas, riolitas y rocas sedimentarias como: arcillas, arenas, tepetate, tezontle, y el paquete aluvial (limos, arcillas, arenas mal clasificadas) analizados en los cortes con texturas compactas que cubren gran parte del centro del municipio. De acuerdo con la ponderación y el análisis de los 71 cortes, la zona sur y gran parte del centro, presentan baja vulnerabilidad en relación a la litología dominante para la porción este del municipio, donde se encuentra la falla que viene desde Cerro Gordo. Los rangos de vulnerabilidad de 3 a 4 están relacionados con el paquete aluvial (arcilla, limos, pocas gravas) que predomina en la zona centro oeste, conocida como depresión Salamanca-Querétaro. El aumento de la vulnerabilidad se observó al este donde predominan grandes espesores de grava así como algunos basaltos fracturados interdigitados entre las arcillas y rocas compactas, debido a que son impermeables aumenta un poco el rango de vulnerabilidad (3-4). Las vulnerabilidades altas al norte se encuentran entre 5-9 y se relacionan a rocas sin consolidar (Gravas, conglomerados,) así como grandes espesores de basalto fracturado (**Ver anexo 7**). Esta situación generó un aumento en la vulnerabilidad, por lo que en el mapa de conductividad se muestran como zonas puntuales y distribuidas al norte y una zona al sur, que de acuerdo a los estudios previos estas son las principales zonas de recarga del acuífero (Figura 5.7). Esto puede estar

relacionado con la interpretación de cada especialista para clasificar cada intervalo de los cortes.

Es necesario tener pruebas de bombeo para poder obtener una vulnerabilidad más cercana a la realidad, o para evaluar el grado de representatividad de los valores que se obtuvieron en este trabajo, pues solamente se consideró la conductividad hidráulica teórica en algunos, así como las reportadas por (Ramos y Rodríguez., 1998). Como se ha mencionado, la conductividad hidráulica depende de las características de las estructuras geológicas por donde migra el agua, aumentado de una manera considerable en sitios específicos como en la falla por subsidencia que atraviesa Salamanca. Las fallas geológicas presentes también, jugarían un papel importante en el aumento de la conductividad, sin embargo por ser un tema que necesita más estudio a detalle se optó por hacer uso de la literatura y datos tomados en lugares cercanos para incertidumbre y obtener un mapa de vulnerabilidad de la conductividad hidráulica.

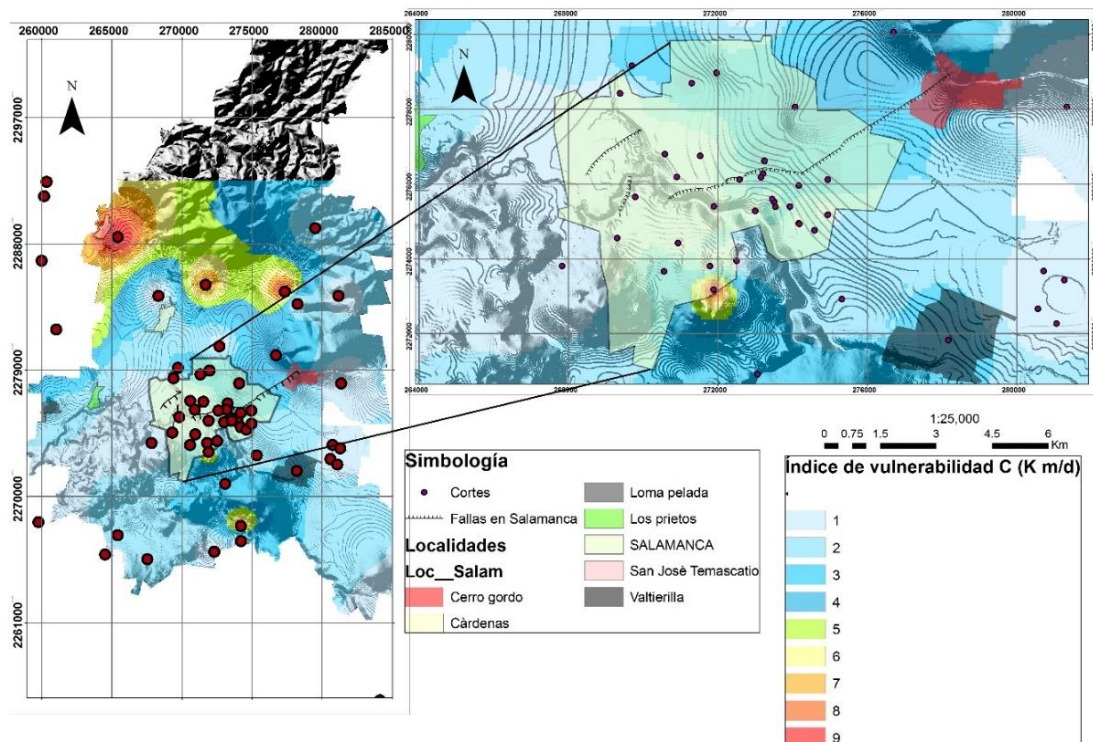


Figura 5.7 índice de vulnerabilidad (C).

## 5.8 Índice DRASTIC

Una vez elaborado los 7 mapas de vulnerabilidad de cada parámetro, se hizo uso de la herramienta “*Raster calculator*” para realizar el álgebra de mapas, con ayuda de la ecuación índice Drastic y pesticida Drastic, las cuales son el paso final del DRASTIC (Aller et al., 1987), para obtener los Índices DRASTIC de vulnerabilidad.

$$5D_rD_w + 4R_rR_w + 3A_rA_w + 2S_rS_w + 1T_rT_w + 5I_rI_w + 3C_rC_w = \text{índice Drastic}$$

$$5D_rD_w + 4R_rR_w + 3A_rA_w + 5S_rS_w + 3T_rT_w + 4I_rI_w + 2C_rC_w = \text{Pesticida índice Drastic}$$

El índice DRASTIC original contempla valores que van desde 23 hasta 230 (Aller et al., 1987), representan vulnerabilidad muy baja hasta una vulnerabilidad extrema respectivamente. Sin embargo, para este trabajo se tomó en cuenta la situación del área de estudio para proponer el rango de vulnerabilidad una vez obtenido el índice DRASTIC con los mayores valores y posteriormente ajustarlo en intervalos iguales. Se obtuvieron valores de 67 como mínimo hasta 156 como máximo. Para el índice Pesticida DRASTIC se obtuvieron valores mínimos de 93 y máximo de 193. Es así como solo se proponen dos índices, el índice, el DRASTIC original y el INDICE PESTICIDA DRASTIC. Los dos índices fueron elaborados con las interpolaciones por polígonos de Thiessen así como IDW para los parámetros R, A e I, debido a la buena distribución espacial que obtuvieron los datos, ya que con IDW se observó la misma distribución del índice (**ver anexos 8 y 9**) para los índices DRASTIC, mostrando las zonas vulnerables para la ciudad de Salamanca, esto reflejó muy buena resolución para la ciudad de Salamanca. Debido a lo similar que fueron los casos, se concluyó que la falla se incluía de forma implícita dentro de la misma metodología propuesta por Aller et al., (1987).

## 5.9 Índice Drastic e índice Pesticida Drastic

En el mapa final de vulnerabilidad DRASTIC (Figura 5.9) se observan los siguientes valores de vulnerabilidad. Las zonas de bajo a alto rango de vulnerabilidad se distribuyen en la parte centro del municipio y también al norte, muestran colores azul-amarillo en el mapa 5.9 (rango de valor 67-125). La distribución de los resultados se puede deber al parámetro PNE (D), ya que tienen un mayor peso ( $D_w$ ), el agua en esta zona se encuentra en zonas muy profundas ( $> 80$  m) en donde se obtuvo un rango de vulnerabilidad bajo. En las zonas altas topográficamente, se tienen valores medios lo cual puede estar dominado por el peso asignado de 4 que le corresponde a la recarga neta (R) que aportó mayor vulnerabilidad, así como el parámetro del medio acuífero ya que en las zonas altas se encuentran las rocas volcánicas de la Sierra de Guanajuato, para las zonas que van de medias a altas ( $>119$ ) corresponden a la parte este, al centro del municipio, así como al SW, es posible que estén dominadas por el parámetro de la zona no saturada (I), debido a la litología dominante, relacionadas a grandes paquetes de rocas sin consolidar o fracturadas que se evaluaron en los cortes puntuales, interdigitados con arcillas. Las zonas con el índice extremo (156) se encuentra en los extremos Este-Oeste del municipio, mostrando colores rojos (Figura. 5.9), esto se debe a la poca o nula información, que se tuvo en esas zonas, así como tal vez a un parámetro de DRASTIC con mayor peso (PNE, zona vadosa o medio acuífero).

En la ciudad de Salamanca (Figura 5.9) los valores de vulnerabilidad para la zona oeste son de 80 a 91, esto puede estar relacionado a la poca recarga neta que existe de acuerdo a los parámetros evaluados, además de encontrarse en una zona donde el agua está muy profunda, así como la topografía plana de la zona, en conjunto con la geología de los cortes, los cuales contienen grandes paquetes de arcilla. El valor aumenta hacia el este donde se encuentra la falla por subsidencia (hasta un valor de 125). Otros parámetros que afectaron de una manera moderada a alta esa zona de la ciudad, como la presencia de rocas más vulnerables además del tipo de suelo (vertisol) y topografía que dio valores de 91 hasta 125. Siendo esta zona la más vulnerable de la ciudad de acuerdo a los valores del índice.

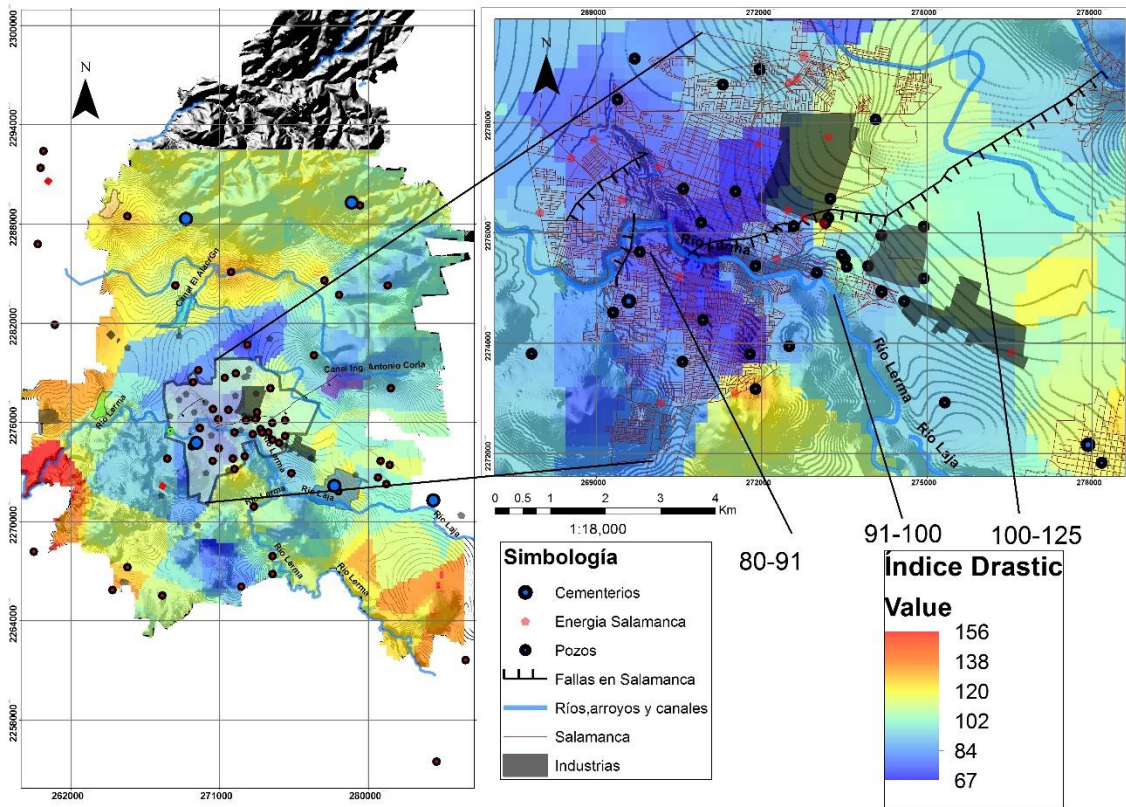


Figura 5.9 Muestra el índice DRASTIC que va desde 67 hasta 156 unidades.

Para el mapa final de vulnerabilidad de Pesticida Drastic (Figura 5.91) los valores así como la distribución del índice de vulnerabilidad aumentaron notablemente desde 93 hasta 193. Debido a que esta metodología tiene implícitamente el efecto de la agricultura y los pesticidas, el peso del suelo (S) con un valor de 5, así como la topografía (3) se ven muy afectados. El mapa elaborado con este método muestra la misma distribución de los valores, en todo el municipio, la diferencia se observa al norte en los altos topográficos con una vulnerabilidad que cambia sus valores (89-146). Esto debido al tipo de suelo dominante en el norte. En la zona de mayor cantidad de datos (Ciudad de Salamanca) se obtuvo la misma distribución presentada en el índice DRASTIC, sin embargo los valores obtenidos incrementaron, ya que aumentó de 100 a 155. La vulnerabilidad en la zona de la falla también incrementó (140-155).

Una vez teniendo con los dos índices las fuentes potenciales de contaminación juegan un papel importante en el aumento de las vulnerabilidades, las zonas industriales, el río, las residencias, gasolineras, la falla, afecta de manera implícita la zona. De acuerdo a

los mayores valores del índice la zona más vulnerable es la parte este de la ciudad, al igual que en el índice Drastic.

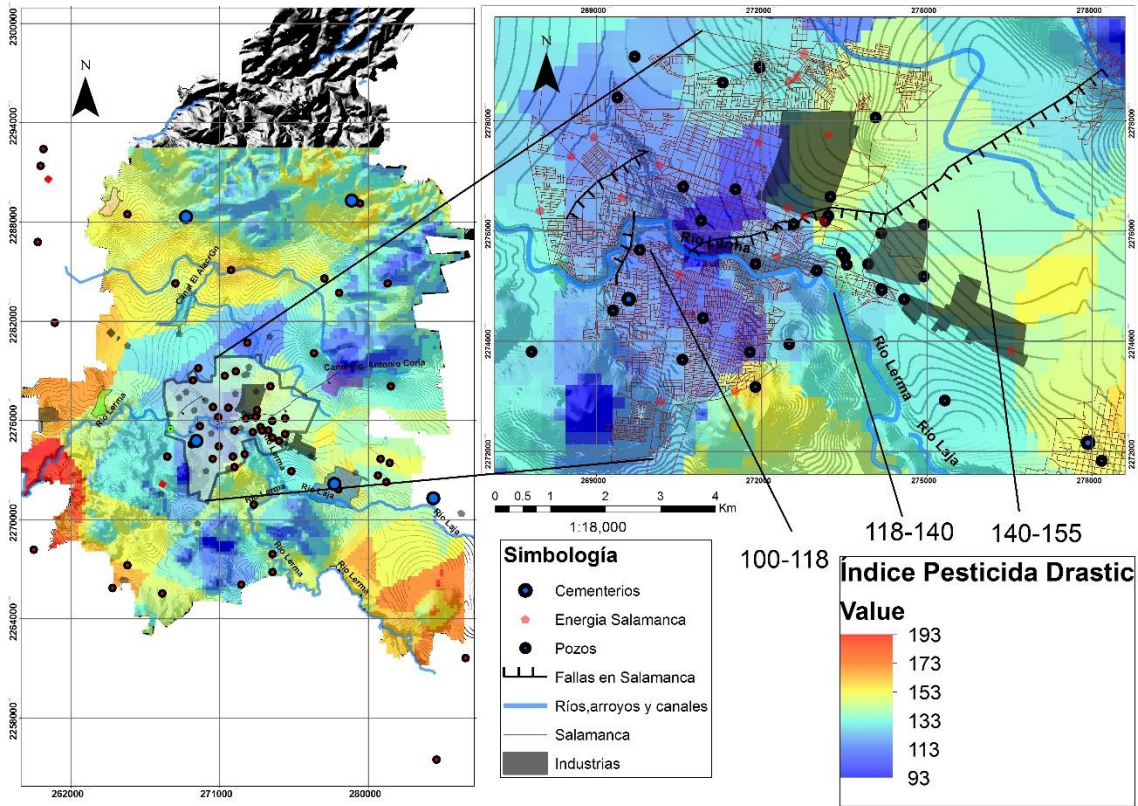


Figura 5.91 Muestra el índice PESTICIDA DRASTIC que va desde 93 hasta 193 unidades.

### **5.10 Índice reclasificado y zonas de vulnerabilidad**

Se propuso reclasificar los 2 índices DRASTIC en intervalos iguales (**Ver anexo 10**). Esto con el objetivo de poder proponer 5 zonas de vulnerabilidad que fueran desde 2 hasta 10, referente a una baja vulnerabilidad hasta una vulnerabilidad extrema. Muy pocas personas han hecho uso de esta normalización o reclasificación (Goya, 2011, Zapata, 2013, Choza, 1997), sin embargo pueden clarificar zonas vulnerables de acuerdo a los estudios reales que se tengan así como los antecedentes de la zona, en relación a la distribución y valores que mostraron los mapas de índice Drastic.

La Figura 5.10 muestra la reclasificación en intervalos iguales para el índice Drastic en todo el municipio. Como se observa la vulnerabilidad alta a muy alta (6-8) es la que dominan en las localidades de San José Temazcatío, Cárdenas, Loma Pelada, Los Prietos y Valtierra; se mencionan estos municipios debido a que son los que muestran >2500 habitantes. A pesar de estar reclasificadas la zona fuera de la ciudad de Salamanca tiene muy poca información y cierta ambigüedad, debido a los pocos datos que se evaluaron, por lo que la vulnerabilidad fuera de esta resulta general.

Es por eso mismo que para la ciudad de Salamanca se observan zonas de baja a alta vulnerabilidad (2-6) distribuyéndose en el centro y este-oeste de la ciudad (Figura 5.10). Al oeste la vulnerabilidad muestra valores de 2-4, la vulnerabilidad baja domina el centro de la ciudad y una zona moderada en la periferia al oeste. Para la parte este de la ciudad la zona muestra una vulnerabilidad media a alta (4-6), aquí es donde se encuentran los mayores rangos de vulnerabilidad. Se encuentra la zona industrial, así como la falla por subsidencia. La falla cruza la refinería, pasa por el sur de la planta, esto puede tener una influencia en los procesos de contaminación mostrando una vulnerabilidad alta para la zona este de la ciudad.

Para el índice Pesticida DRASTIC (Figura 5.10), se observa un ligero aumento en la distribución de las zonas de vulnerabilidad, en general es evidente un valor de moderado a alto (4-6) al este de la ciudad, debido a que en esta zona se encuentran los mayores valores de vulnerabilidad, donde la zona este, actúa con una alta vulnerabilidad.

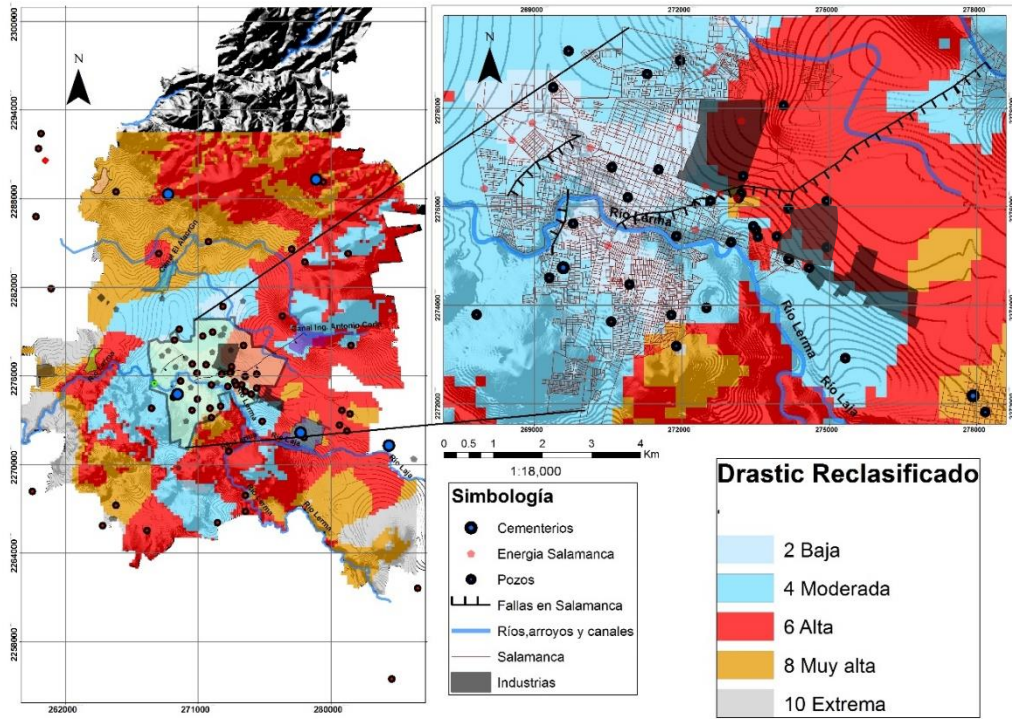


Figura 5.10 Muestra 5 zonas en el municipio que van desde 2 hasta 10 para el Índice DRASTIC original.

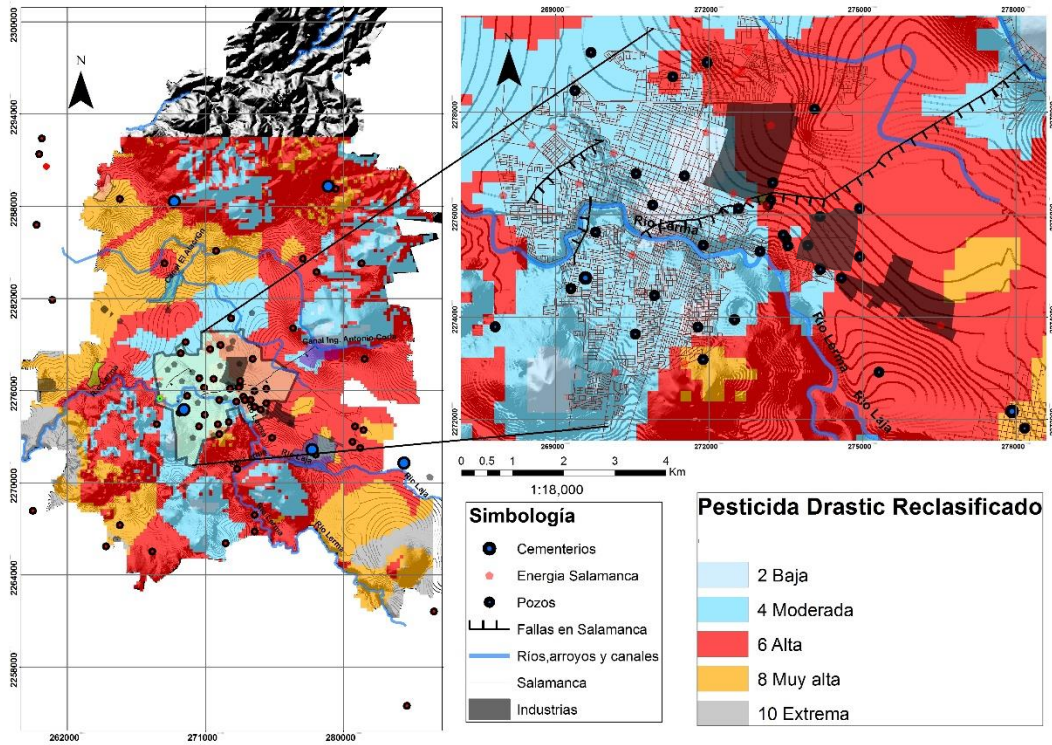


Figura 5.101 Muestra 5 zonas en el municipio que van desde 2 hasta 10 para el Índice pesticida DRASTIC.



### 5.11 Índice Drastic 2000 e Índice Drastic 2019

La diferencia entre los dos mapas no solo son las unidades máximas del índice DRASTIC, con el valor de 125 para el año 2000 (Rodríguez et al., 2000) y 156 (2019) del presente trabajo la cual fue una diferencia de 31 unidades, también hay una diferencia en la cantidad de cortes que se evaluaron ya que para el primero fueron 25 cortes, mientras que en el presente trabajo se consideraron 71 cortes. Se trató de abarcar todo el municipio, pero limitado por la poca información (**Ver anexo 11**), se definió la vulnerabilidad de la ciudad de Salamanca. Se menciona la gran importancia que tienen los cortes ya que una vez obtenida la zona no saturada, aportó a la metodología mayor evaluación, ya que disminuye la vulnerabilidad misma, por los grandes paquetes de arcilla evaluados en los cortes. De acuerdo con Rodríguez et al., (2000) la vulnerabilidad con mayor valor (125) fue la misma falla. Estos datos fueron aportados por los valores de conductividad que se obtuvieron de manera directa, siendo esta zona del municipio la zona con alta vulnerabilidad.

Para el presente trabajo se usó las conductividades hidráulicas teóricas de diferentes litologías así como las medidas reportadas en río Turbio, Gto (Ramos y Rodríguez., 1998). Finalmente se optó por ubicar las fuentes potenciales como se realizó en el primer mapa de vulnerabilidad de la ciudad de Salamanca, Rodríguez et al., (2000) (Figura 5.11).

Se consideraron como fuentes potenciales de contaminación, cementerios, fallas geológicas, gasolineras, edificaciones, zonas industriales así como las zonas residenciales que de manera implícita afectan al acuífero, es así como es posible señalar cuales zonas pueden realmente estar en riesgo.

Mediante la sobre posición de fuentes potenciales así como sus antecedentes, es posible validar el mapa de vulnerabilidad, en este caso es evidente que la refinería puede liberar contaminantes que pueden ser transportados y potencialmente incrementar su presencia y distribución por la falla presente en la zona, además de las tuberías afectadas por la misma.

La zona más vulnerable (Figura 5.11) corresponde a lo que se encuentra en la zona de la falla. Las bajas vulnerabilidades se asocian a la presencia de paquetes arcillosos de

muy baja conductividad para la parte oeste de la ciudad. Los valores que aportaron la falla, aumentaron el rango de vulnerabilidad para la zona este.

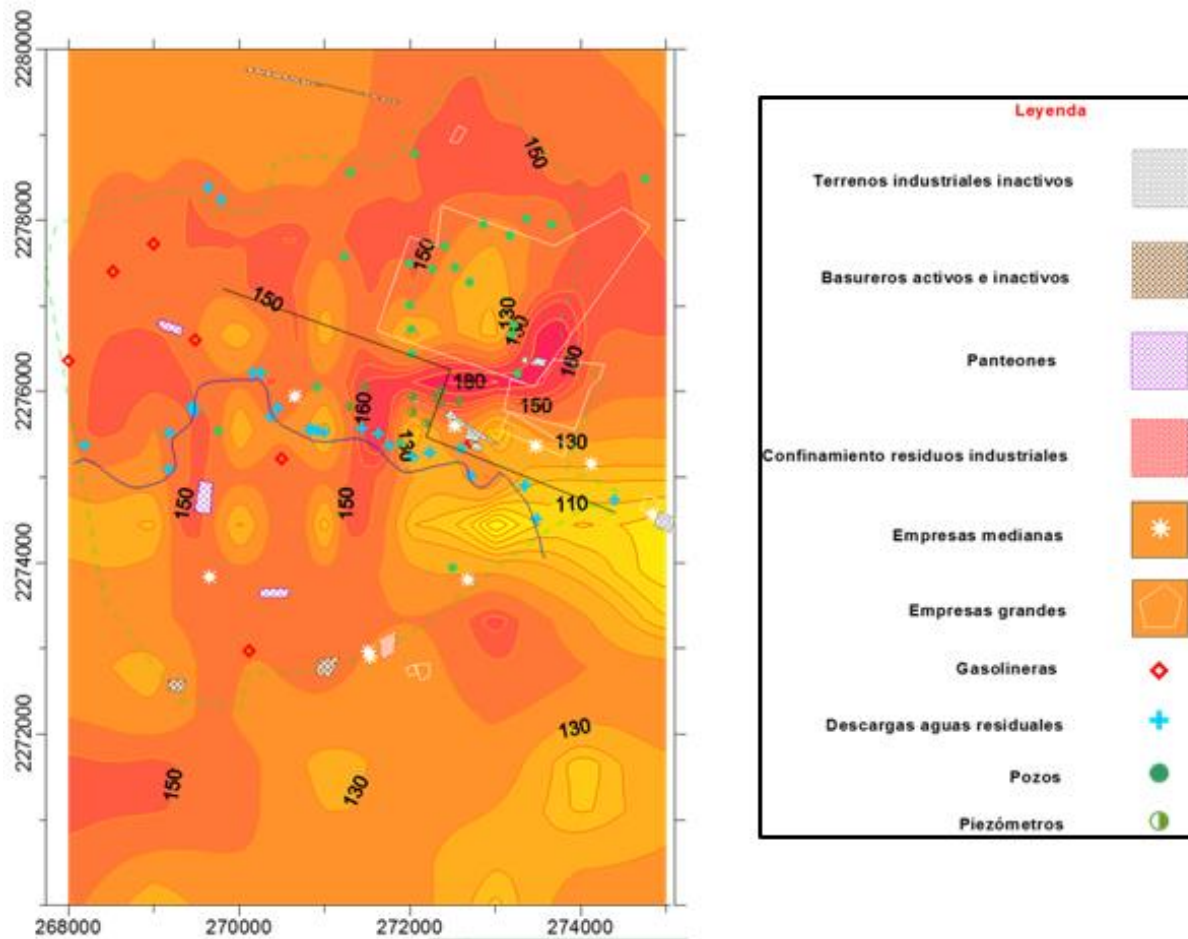


Figura 5.11 Mapa final de vulnerabilidad elaborado por el Dr. Ramiro Rodríguez (2000). Extraído de Rodríguez et al, (2000), The salamanca case 3.

Para el caso de la ciudad de Salamanca, las vulnerabilidades altas se encuentran en la zona industrial (al este) que abarca la falla por subsidencia (100-125 aprox.). Aunque la falla no fue un parámetro que se computó en el modelo, los valores de vulnerabilidad alta aparecen sobre la falla, por lo que debe considerarse como una variable que puede acelerar la lixiviación de posibles contaminantes y aumentar ciertos parámetros como la conductividad hidráulica (C) y la zona vadosa (I). La información de cortes litológicos, aparentemente jugó un papel importante en el cálculo de la vulnerabilidad, debido a que se evaluaron las diferentes intercalaciones presentes en los más de 30 pozos ubicados

en la ciudad, y se conocieron los espesores de acuerdo a las profundidades para la zona no saturada, (**Ver anexo 2**). Los diferentes paquetes litológicos en el subsuelo aportaron distintas vulnerabilidades, además los cortes mostraron sitios en donde se extrae agua a grandes profundidades. El tipo de suelo, la recarga que existe al acuífero, la topografía plana de la zona y la conductividad de las rocas así como la mayor cantidad de información, definen mejor la vulnerabilidad para un estudio, las cuales fueron cruciales para obtener un modelo confiable.

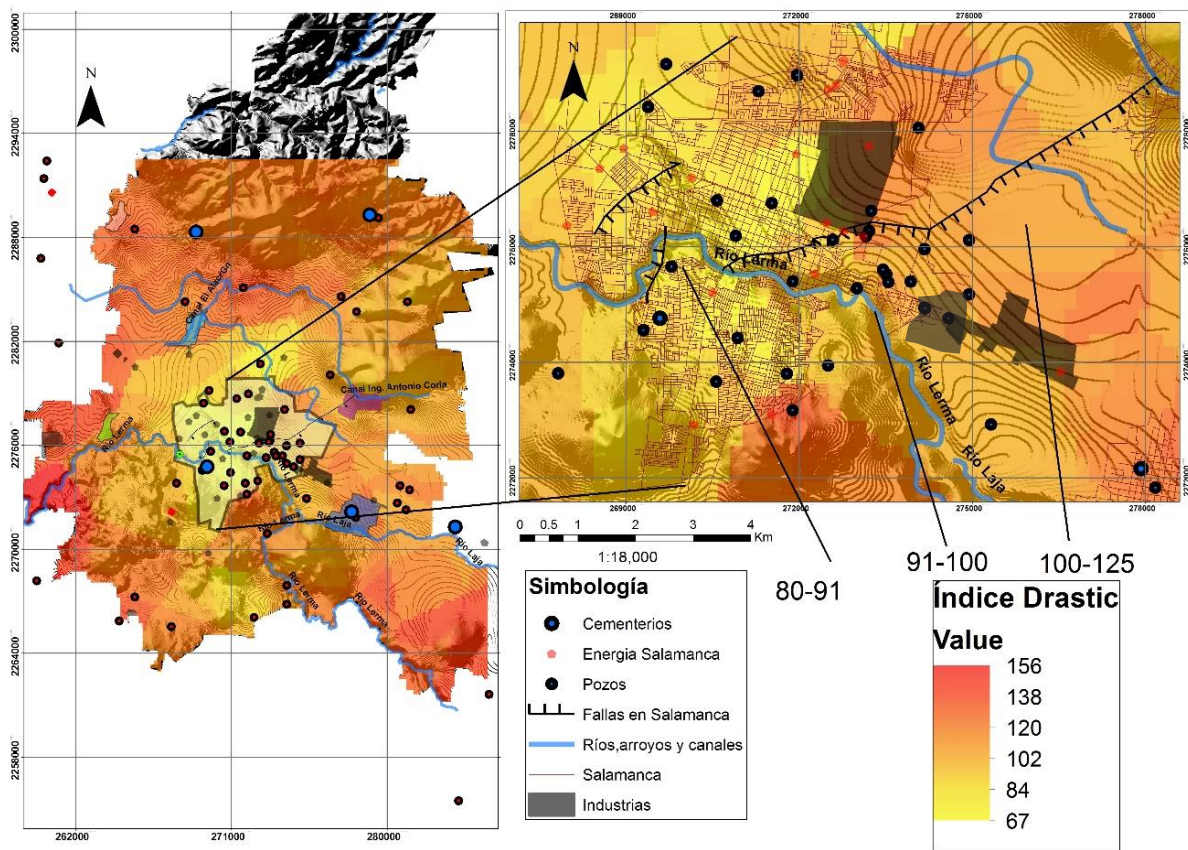


Figura 5.111 Mapa final de vulnerabilidad DRASTIC, elaborado para esta tesis.

# CONCLUSIONES

## 6.1 Conclusiones

Para la ciudad de Salamanca el índice Drastic se encuentra entre los rangos de vulnerabilidad 80-125. El índice DRASTIC ha persistido en los rangos mostrando un ligero aumento y buena evaluación en cuanto a la cantidad de información actualizada con una diferencia de 15-16 años (Información recopilada para los parámetros D.R.A.S.T.I.C) debido a las diferentes características geológicas del sitio, así como los grandes paquetes de arcilla que disminuyen la vulnerabilidad, zonas planas topográficamente, el tipo de suelo, la poca recarga neta de la zona y la baja conductividad hidráulica además de la presencia de rocas impermeables en los cortes analizados. En la zona industrial, es la que presenta alta vulnerabilidad, en parte debido a la presencia de la falla por subsidencia donde se tienen un índice de vulnerabilidad de 125 sin la necesidad de haber incorporado datos in situ de permeabilidad como la evaluación de Rodríguez et al, (2000). Así que la zona puede tener mayor impacto de vulnerabilidad en toda esa zona, por lo que extraer agua de esas zonas puede ser peligroso, debido a las características geológicas, ya que hay rocas sin consolidar como gravas y algunos basaltos fracturados analizados en los cortes que aportaron mayor vulnerabilidad y en conjunto con la falla pueden favorecer el transporte de algún contaminante y con esto transportar más fácil un fluido que pueda llegar al acuífero donde se extrae agua en dicho sitio. Las fuentes potenciales de contaminación como edificaciones, cementerios, tuberías, zonas industriales afectan y puedan aumentar la vulnerabilidad en zonas moderadas así como zonas de alta vulnerabilidad.

Es así como de manera puntual se menciona los siguientes logros de este trabajo

- El índice DRASTIC ha aumentado con la información recolectada hasta el 2015-2016 siendo 156 puntos evaluados en todo el municipio, pero con ciertas ambigüedades debido a la falta de información fuera de la ciudad principal, pero dando pauta a una vulnerabilidad general para el municipio.
- Cada mapa de vulnerabilidad representa valiosa información de acuerdo con las necesidades en la que cada parámetro evalúa la vulnerabilidad.

- La mayor cantidad de información hace que la evaluación de este método funcione y sea correcto para la ciudad de Salamanca.
- Para la ciudad de Salamanca que es donde se encuentra la mayor información, la zona industrial al este de la ciudad, presenta un alto rango de vulnerabilidad (100-125).
- El índice Pesticida Drastic aumentó sus unidades de vulnerabilidad (100-155) dando mayor importancia al peso del suelo y topografía clave en una zona agrícola, como lo es Salamanca. La zona vulnerable de igual manera fue la industrial.
- La ciudad de Salamanca muestra una recarga baja (73 mm) evaluado desde el 2005 hasta el 2015 esto nos dice que existe muy poca recarga al acuífero, siendo esto una variable para que disminuya la vulnerabilidad y se relacione con el déficit de agua en la zona.
- La zona oeste de la ciudad así como parte del centro, el subsuelo tiene presencia de grandes paquetes de arcilla, que disminuyen la vulnerabilidad debido a sus características, hacia el este se tienen presencias de rocas sin consolidar así como rocas fracturadas, arcilla entre otras compactas en esta zona ,se encuentra la zona industrial.
- Las zonas más vulnerables del índice DRASTIC están relacionadas con la parte este de la ciudad donde se encuentra la zona industrial así como la falla por subsidencia esto de manera implícita en conjunto con sus características geológicas ya mencionadas que aportan mayor vulnerabilidad en esta zona.
- La cabecera municipal sigue mostrando una tendencia de vulnerabilidad alta en la zona industrial de acuerdo con el trabajo de (Rodríguez., 2000).
- Las fuentes potenciales como edificaciones, tuberías, gasolineras, plantas industriales, zonas de desechos pueden aumentar de moderada a alta una zona vulnerable debido al cambio en el entorno geológico que podría hacer un residuo de estas fuentes.

## 6.2 Recomendaciones

- La primera es mejorar la cantidad de la información recopilada de la zona de estudio para cada parámetro de la metodología, así como generar información actualizada, mediante estudios en el área.
- Aporte individual de cada mapa con un enfoque técnico- económico- académico.
- Actualizar la encuesta de riesgo sobre el uso de agua, en la ciudad de Salamanca, esto generaría la percepción actual sobre el agua.
- Profundizar en estudios de vulnerabilidad absoluta o específica en la zona industrial para obtener una vulnerabilidad más concreta.
- Actualizar la información calidad de agua de los pozos y obtener si la contaminación reportada se ha distribuido a más zonas de la ciudad. (Lnapl, Napls, Pb, As, B, etc). Mayor estudio en calidad de agua.
- La falla por subsidencia puede aumentar la distribución de la vulnerabilidad debido a su área de influencia reportada (50 m) así como los cambios que pueda ocasionar en su entorno.

Profundizar en la evaluación de cada parámetro de la metodología la cuales son:

**D:** Lograr obtener la información de los pozos de monitorio piezómetro en el acuífero Irapuato Valle.

**R:** Obtener la información de las 3 estaciones que no pudieron recopilar información ubicadas en Salamanca, esto habría delimitado bien la zona de recarga neta y tendría más sentido con las zonas de recarga al acuífero, siendo una recarga baja para la zona centro-aluvial y alta para las zonas altas topográficamente.

**A:** Más información de cortes litológicos para poder evaluar toda la zona del medio acuífero, en donde los cortes se pudieran encontrar relativamente más cerca uno de otros.

**S:** Mayor estudio a detalle sobre el comportamiento del suelo, vertisol en Salamanca.

**T:** Tal vez a futuro mayor resolución entre las curvas de nivel, para tener más exactitud en la evaluación del parámetro.

**I:** Uno de los parámetros más importantes, debido a que la zona vadosa es la principal protección del acuífero, por lo que se necesitan de igual más cortes litológicos a detalle en la zona, tener bien definida la geología, así como correctas suposiciones sobre el nivel estático de acuerdo a los niveles piezométricos.

**C:** Resulta que este parámetro define la velocidad de movimiento de un fluido así como la recarga de agua a través de las rocas, así que se necesitarían los datos de conductividad de hidráulica de los pozos de monitoreo, como pruebas de bombeo de pozos.

## Bibliografías

Aller, L.T. Bennet, J. H. Lehr, R. J. Petty, and G. Hackett, 1987. DRASTIC; A Standard System for Evaluation Groundwater Pollution using Hydrogeologic Setting, Publication EPA/600/2-85/081 US EPA, 622 pp.

Arias G., Andrea J., González R., 2016. Análisis espacio temporal de la piezometría en el acuífero de Irapuato valle de Santiago. Divulgación científica, vol. 2. No 1, pp 6-10.

Árcega, I., Otazo, E., Galindo, Eric., Acevedo, O, & Romo C, 2015. Determinación del índice de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC Caso: Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo, México, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo, Tulancingo, Hgo.; México. pp 39-48

Aragón S., M., Belmonte J.S.I., y Bautista B.A. (2002). "Evaluación de la capacidad de atenuación de contaminantes del acuífero del Valle de Zaachila, Oax".

Aranda Gomez, 2013 Active sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca and Celaya.

Atlas nacional de riesgos, Guanajuato México, 2012.

<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-estatales.html>

Atlas nacional Hidrogeológico, 2006.

Auge M, 1995 Primer curso de posgrado de hidrogeología ambiental.

Auge M ,2004. Vulnerabilidad de acuíferos. Revista Latino-Americana de Hidrogeología (4): pp 85-103.

Baalousha H., 2006, Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC, Environmental Geology, 50, 405-414.

Base referencial mundial del recurso del suelo, 2008

Berlin J., Rodríguez R. & Mejía J. A., 2001. Metal tendency analysis, As and Pb, in an urban aquifer system. The Salamanca case 2.

Cano Sánchez, A, 2011. (Tesis de grado) Conformación de la información litológica del acuífero Irapuato-Valle de Santiago. Irapuato, Gto. Universidad de Guanajuato

Características del tezontle y tepetate. Consultado en

<https://www.nosmudamos.net/noticias/caracteristicas-del-tezontle-y-el-tepetate/>



Cerca Martínez L, M, 1998. Relación estratigráfica y geocronológica entre el volcanismo de la sierra madre occidental y el cinturón volcánico mexicano en la parte sur de la sierra de guanajuato. Implicaciones geocronológicas y tectónicas.

CLICOM 2015. Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE, (<http://clicom-mex.cicese.mx>)

CNA, 2018. Estadísticas del agua en México, Ciudad de México.

CONAGUA ,2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Irapuato-Valle (1119), Estado de Guanajuato. Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación.

Choza,L.A, 1997. Estrategia de protección para las aguas subterráneas en la subcuenca oriental del acuífero de Managua. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA). Managua, Nicaragua

Civita M. y De Maió, 1997 SINTACS Un Sistema Parametrico per la Valutazione e la Cartografia della Vulnerabilitá Degli Acquiferi A Winquinamento, Metodología & Mutomatizzazione e Pitagora Editrice Bologna pp191.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, 2012. Geo portal. Sistema nacional de información sobre biodiversidad.

Comisión Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG), 2015. Programa estatal hidráulico de Guanajuato <http://agua.guanajuato.gob.mx/pdf/resumenejecutivo.pdf>

Comisión Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG), 2019. Situación hídrica y disponibilidad en el estado de Guanajuato.

[http://expoagua.guanajuato.gob.mx/pdf/fuentes\\_consulta/situacion\\_agua\\_gto\\_extensa.pdf](http://expoagua.guanajuato.gob.mx/pdf/fuentes_consulta/situacion_agua_gto_extensa.pdf)

Comisión estatal de agua de Guanajuato, CEAG, 2018. Compendio del Agua subterránea en Guanajuato, Gobierno del estado de Guanajuato.

Custodio, E., & Llamas, M. Tomo 1, 1998. Hidrológica subterránea. Barcelona: Ediciones Omega, S.A. Recuperado en <https://es.scribd.com/document/372359532/Custodio-Llamas-Tomo-1>

Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., et al., 2002. Main concepts of the“European Approach” for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal 10(2): pp. 340–345.

Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1998. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, 2nd Ed., 528 pgs. pp 39.

Doerfliger, N. and Zwahlen, 1997. F.: EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment, in: International symposium and field seminar on "karst waters and environmental impacts", edited by: G"unay, G. and Jonshon, A. I., Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 117–123.

EPA, 1991. A review of methods for assessing the sensivity of aquifers to pesticide contamination.

ESRI, 2016. Arcmap, 10.5

Evaluación de Recursos Naturales, S. EVREN. 1998. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanísticas en la comunidad valenciana.

FAO. Major soils of the world. World reference base for soil resources, 1976. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as360s/as360s.pdf>

Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, C., Petrone, C., Manetti, P., 2000. Late Miocene mafic volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt: Tectonophysics, 318, 161-185.

Flores Román, D., Alcalá Martínez, J., R., González Velásquez, A. and Gama-Castro, J, E., 1996. Duripans (Tepetate) in the subtropical and temperate subhumid climate of the Trans-Mexico Volcanic Belt: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. pp 228-239

Foster Stephen, Hirata Ricardo; 1988. Groundwater pollution risk evaluation assessment: a methodology using available data.

Garduño V. H., Arreygue E y Rodríguez G., 2001. Mapa de riesgos de Salamanca. Reporte Técnico. Municipio de Salamanca, Univ. Nicolaita Michoacán

Gross, W.H, 1975. New ore Discovery and source of silver- gold veins, Guanajuato,México, Eco.Geo, 70.

Gogu y Dessargues, 2000, GIS–based evaluation of groundwater vulnerability in the Russeifa area, Jordan, Rev. mex. cienc. Geol. v.23 n.3 México.

Goya Sánchez J, 2011. Distribución espacial de la vulnerabilidad de acuífero de abastecimiento de la ciudad de México aplicando la metodología DRASTIC. (Tesis de pregrado). Facultad de ingeniería de la UNAM. Ciudad de México

Golden Software 2015. Stratar.

Golden Software 2011. Surfer 10.1

Goldscheider, N., 2002. Hydrogeology and Vulnerability of Karst Systems – Examples from the Northern Alps and the Swabian Alb. – *Schr. Angew, Geol.*, 68, 236p, Karlsruhe.

Guysa, 1998. Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de Irapuato-Valle de Santiago. Reporte Técnico CEAS-APA-GTO-97-023. Guysa, CEASG, México.

Hasenaka, T, y Carmichael, I.S.E., 1985. The cinder cones of Michoacán- Guanajuato, central Mexico—their age, volume, and distribution, and magma discharge rate: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 105-124.

Hernández, L. N., 1991. Modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero del Valle de León, Guanajuato (Tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, UNAM. México, DF

Hirata, R. y Reboucas, A., 1999. La Protección de los Recursos Hídricos Subterráneos, una Visión Integrada Basada en Perímetros de Protección y Vulnerabilidad de acuíferos, *Boletín Geológico Minero*. Vol. 110-4 Año1999.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009. Anuario estadístico del municipio y estado de Guanajuato, Prontuario, Salamanca, México.

INEGI, (1998) Estudio hidrológico del estado de Guanajuato, Primera edición [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222253/702825222253\\_1.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222253/702825222253_1.pdf)

INEGI, 2001. Conjunto de datos vectoriales fisiográficos continuo nacional serie I.

INEGI, 2014. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie I, escala 1: 250,000 (Continuo Nacional). México.

INTERCENSO, 2015. Salamanca, Guanajuato.

INEGI, 2015. Conjunto de información topográfica Serie III, escala 1: 50,000. Salamanca

Lesser y asociados, 2000. Seguimiento del estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Irapuato-Valle de Santiago. CEAG. México.

Limón Hernández L, Haro Berelleza Julio, Mahlkecht J, 2006. Generación de los índices de vulnerabilidad para acuíferos: comparación de métodos.

Margat, J., 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. BRGM Publication, 68.

Martínez, M., Delgado, p., & Fabregat, V., 1998. Aplicación Del Método Drastic Para La Evaluación Del Riesgo De Afección A Las Aguas Subterráneas Por Una Obra Lineal. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID

Martínez-Reyes, J., 1992. Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato, con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Cartas geológicas y mineras 8, mapa de escala 1:100000 con texto explicativo en el reverso

Mena G, j., & Montes Juan O., 2010. Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada al antiguo botadero de desechos sólidos de mariona, departamento de san salvador. (Tesis de pregrado). Universidad de el salvador facultad de ingeniería y arquitectura, escuela de ingeniería civil, San Salvador, El Salvador.

Mejía, J. A, 2007. Factores que afectan la vulnerabilidad del sistema acuífero de Salamanca Gto. (Tesis de pregrado). Facultad de ingeniería, UNAM. Ciudad de México

Mejía J. A., Rodríguez R. and Berlín J., 2001. Hydrodynamic and pollution of the urban aquifer system of Salamanca, Gto. The Salamanca Case 1

Mejía, J.A., Sandoval, R., 2004. Uso del agua subterránea en la región acuífera Irapuato -Valle de Santiago (México) y su impacto sobre el sistema hidrogeológico: Boletín Geológico y Minero.

Nieto-Samaniego, A.F., 1990 (1992). Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la porción sudoriental de la Sierra de Guanajuato: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Revista, 9, 146-155.

Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Alvarez, S. A., Camprubí-Cano, A., 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo 52, 285-317

Nieto Samaniego, Ángel C, Ojeda García Susana A. Alaniz Álvarez, Shunshan Xu, 2012. Geología de la región de Salamanca, Guanajuato, México, Boletín de la sociedad geológica Mexicana, Vol 64, no. 3, pp 411-425

Nieto Obregón J, 2016. Patrón estructural, sismo tectónico y actividad antropogénica en la mesa central: Implicaciones en la ingeniería geológica, Academia mexicana de ingeniería, pp 11.

Pasquarè, G., Ferrare, L., Garduño, V. H., Tibaldi A., Vezzoli, L., 1991. Geologic map of the sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano, Italy

Periódico oficial del gobierno del estado de Guanajuato, 2016. Programa de desarrollo urbano y ecológico territorial (PMDUOET), Salamanca, Guanajuato. <https://portalsocial.guanajuato.gob.mx/documentos/programa-municipal-de-desarrollo-urbano-y-ordenamiento-ecol%C3%B3gico-territorial-de-salamanca>

Presidencia municipal de Salamanca, 2018 recuperado en <https://servicios-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/Municipio/Salamanca.pdf>

Quintero-Legorreta, O., 1992. Geología de la región de Comanja, estados de Guanajuato y Jalisco: Universidad Nacional Autónoma de México: Revista del Instituto de Geología, 10(1), 6-25

Ramos Leal, J., 2002. "Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso río turbio, Guanajuato." (Tesis de doctorado). Instituto de geofísica, UNAM, México.

Ramos Leal, J. A., 2000. *Uso y Validación de Mapas de Vulnerabilidad*. Tlaloc-AMH, Asociación Mexicana de Hidráulica, año VII, No. 19.

Ramos Leal, J. A., Rodríguez Castillo, R., 1998. "Análisis de Vulnerabilidad del Sistema Acuífero, del Valle de Río Turbio, Estado de Guanajuato", Proceeding. 4º Congreso Latinoamericano de Aguas Subterráneas, ALSHUD, Montevideo, Uruguay.

Ramos Leal, J., 2007. Factores que efectúan la Vulnerabilidad de Sistemas Acuíferos de Salamanca Gto., pp 23-75.

Rodríguez, R, Armienta, A, Berlín J. Mejía, J. A, 2000. Aquifer pollution risk assessment for a multi source process. The Salamanca Case 3.

Rodríguez R., 2003. The role of urban áreas in aquifer vulnerablility assesments: The Salamanca case Mexico CEAG, IGF-UNAM. , México.

Rosales, R .J. 2001. Caracterización del subsuelo y vulnerabilidad acuífera (IVA) en Salamanca Gto. Tesis profesional, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y arquitectura Unidad Ticoman.

Rodríguez R., Castillo y Isaías Rodríguez-Velázquez ,2006. Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia, Instituto de geofísica, UNAM, México, Boletín de la sociedad geológica mexicana, No. 2, pp 265-269

Rodríguez, R, Rodríguez V. 2004. Los mapas de riesgo de contaminación acuífera en zonas urbanas.

SSSA. Glossary of Soil Science Terms. Disponible en: [www.soils.org](http://www.soils.org).

Subsistema Estatal de Información de Biodiversidad y Recursos Naturales del Estado de Guanajuato (SEBIO-GTO). 2012. Guanajuato, Gto., México: Instituto de Ecología del estado de Guanajuato. Recuperado de <http://mapas.ecologia.guanajuato.gob.mx>

Torres Díaz M C, Basulto Solis Y,Y, Cortés Esquivel J, García Uitz, K, Koh Sosa,A, Puerto Romero, F, Ávila, J, 2014. Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. Ecosistemas y recursos agropecuarios vol.1 no.3 Villahermosa.

Tovar O., 2015. Índice de calidad del agua y vulnerabilidad acuífera en un sistema hidrogeológico caso: Valle de San Luis Potosí. (Tesis de maestría). Instituto Potosino de investigación científica y tecnológica, A.C. San Luis Potosí, México.

Triper, J., P 1997. Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland, hydrogeologie, vol 3, pp 15-157

Turc, L., 1954. *Le Bilan D'Eau Des Sols. Relations Entre Les Precipitations, L'Evaporation Et L'Ecoulement*. Ann. Agro. 5-131.

Vargas Quintero M, C, 2010. Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial. Bogotá Colombia.

Van Stempvoort D, Ewert D, Wassenaar L, 1993. Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. Can Water Resour J 18(1):25-37.

Velázquez, Aldo; Sánchez, Juan Carlos; Adame Martínez, Salvador; Paredes, 2017. Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando SINCTACS. Revista Universitaria de Geografía

Vías, J. M., Andreo, B., Perles, J. M., Carrasco, F., Vadillo, I. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: The COP method application in two pilot sites in southern Spain. Hydrogeology Journal 14(6): pp. 912–925.

Vrba J, Zaporozec 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Verlag Heinz Heise. Hannover. IAH International Contribution for Hydrogeology 16: 1-131.

World Resource Institute,(WRI), 2019. Recuperado en

[https://www.milenio.com/politica/comunidad/guanajuato-corre-alto-riesgo-que-dar-agua?fbclid=IwAR1weTzL6NWYwAueNeczPWA6giCri7AE53D\\_Q5fc1dcXIWgbiNGRYHspJs](https://www.milenio.com/politica/comunidad/guanajuato-corre-alto-riesgo-que-dar-agua?fbclid=IwAR1weTzL6NWYwAueNeczPWA6giCri7AE53D_Q5fc1dcXIWgbiNGRYHspJs)

Zapata B. 2013. DRASTIC- sg Propuesta metodológica para la caracterización espacial de la vulnerabilidad en acuíferos con subsidencia aplicada a la ciudad de México (Tesis de Maestría). Instituto de Geología de la UNAM. Ciudad de México

Zemo D. A., Graf T. E. and Bruya J. E., 1993. The importance and benefit of fingerprint characterization in site investigation and remediation focusing on petroleum hydrocarbons.. 39-45 pp. Groundwater Management, Book 17, NGWA.

# ANEXOS

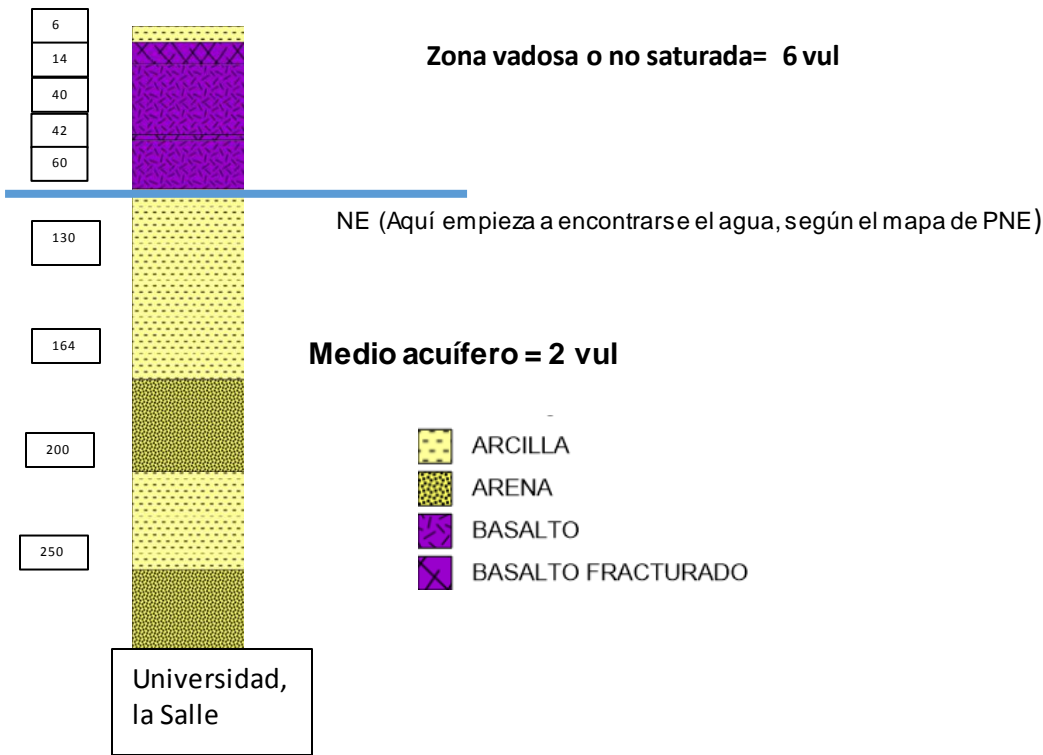


# 1. PUNTOS DE LOCALIZACIÓN DE LOS 71 CORTES LITOLOGICOS

ID	Sondeos	X_utm	Y_utm	Fuente
1	UNIVERSIDAD LA SALLE	267823.00	2273807.00	CMAPAS, Cano, 2011
2	FRACCONAMIENTO RESIDENCIAL CIPRESES	269695.00	2279163.00	CMAPAS, Cano, 2011
3	CMAPAS 2	271521.00	2276753.00	CMAPAS, Cano, 2011
4	CMAPAS 4	271890.00	2275400.00	CMAPAS, Cano, 2011
5	CMAPAS 6	269783.00	2275654.00	CMAPAS, Cano, 2011
6	CMAPAS 7	271296.00	2278693.00	CMAPAS, Cano, 2011
7	CMAPAS 15	271963.00	2278965.00	CMAPAS, Cano, 2011
8	CMAPAS 20	271785.00	2273801.00	CMAPAS, Cano, 2011
9	CMAPAS 31	269302.00	2274551.00	CMAPAS, Cano, 2011
10	ORDENA DE ABOYTES	279491.00	2289119.00	CMAPAS, Cano, 2011
11	SAN JUAN TEMASCATIO	268307.00	2284290.00	CMAPAS, Cano, 2011
12	MAJADAS DE ANCON	281156.00	2284282.00	CMAPAS, Cano, 2011
13	CALLEJONES	267515.00	2265521.00	CMAPAS, Cano, 2011
14	BUENAVISTA DE VALTIERRILLA	265403.00	2267235.00	CMAPAS, Cano, 2011
15	PREDIO EL XOCONOSTLE	278223.00	2283710.00	CMAPAS, Cano, 2011
16	CUATRO DE ALTAMIRA	274184.00	2266818.00	CMAPAS, Cano, 2011
17	EJIDO CUATRO DE ALATAMIRA	272298.00	2266057.00	CMAPAS, Cano, 2011
18	POZO LA LUZ	271886.00	2273170.00	CMAPAS, Cano, 2011
19	SAN ANDRES	272668.00	2280694.00	CMAPAS, Cano, 2011
20	EJIDO DE VALTIERRILLA	278171.00	2271823.00	CMAPAS
21	EJIDO CARRIZAL GRANDE	260324.00	2292411.00	CMAPAS, Cano, 2011
22	EJIDO CARRIZAL GRANDE	260149.00	2291392.00	CMAPAS, Cano, 2011
23	SAN ROQUE	255687.00	2279530.00	CMAPAS, Cano, 2011
24	SAN ROQUE	255919.00	2279545.00	CMAPAS, Cano, 2011
25	VIVERO REVOLUCION	259975.00	2286784.00	CMAPAS, Cano, 2011
26	EJIDO BUENAVISTA DE VALTIERRILLA FRACC. EL TAMBOR	259748.00	2268177.00	CMAPAS, Cano, 2011
27	SAN MANUEL	264496.00	2265854.00	CMAPAS
28	UNIVEX 1	280722.30	2273667.83	UNIVEX
29	UNIVEX 3	281277.23	2273427.42	UNIVEX
30	UNIVEX 4	280572.49	2272658.81	UNIVEX
31	UNIVEX 5	281068.59	2272267.60	UNIVEX
32	CFE 20-A	273209.00	2276274.00	CFE
33	CFE 1-A	273508.00	2275527.00	CFE
34	CFE 1-B	273453.00	2275599.00	CFE
35	CFE 2-A	273930.00	2275397.00	CFE
36	CFE 4-B	274169.00	2275959.00	CFE
37	CFE 5	274169.00	2274945.00	CFE
38	CFE 5-A	274181.00	2274930.00	CFE
39	CFE 6-A	275320.00	2272919.00	CFE
40	CFE 7	272997.00	2275278.00	CFE

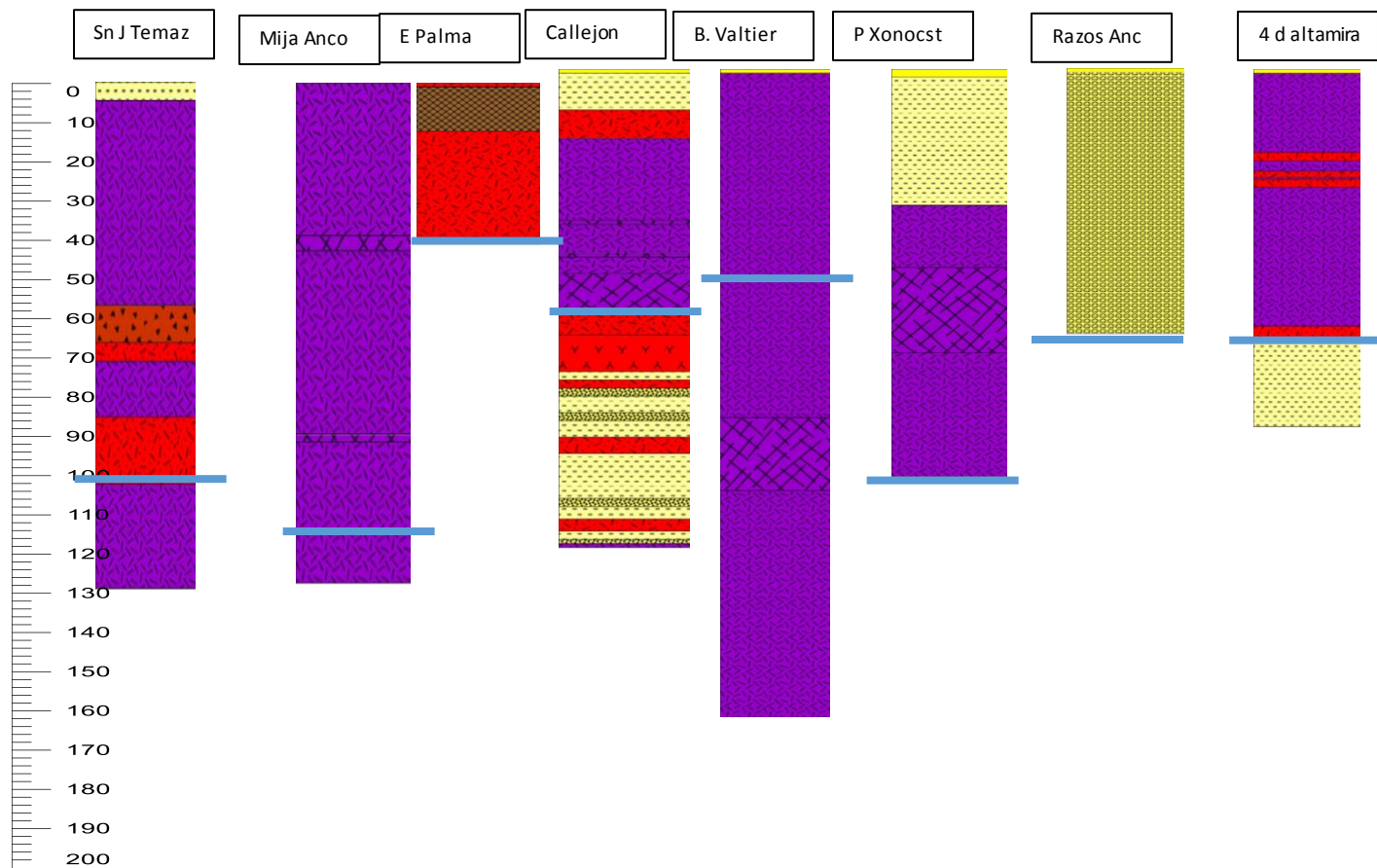
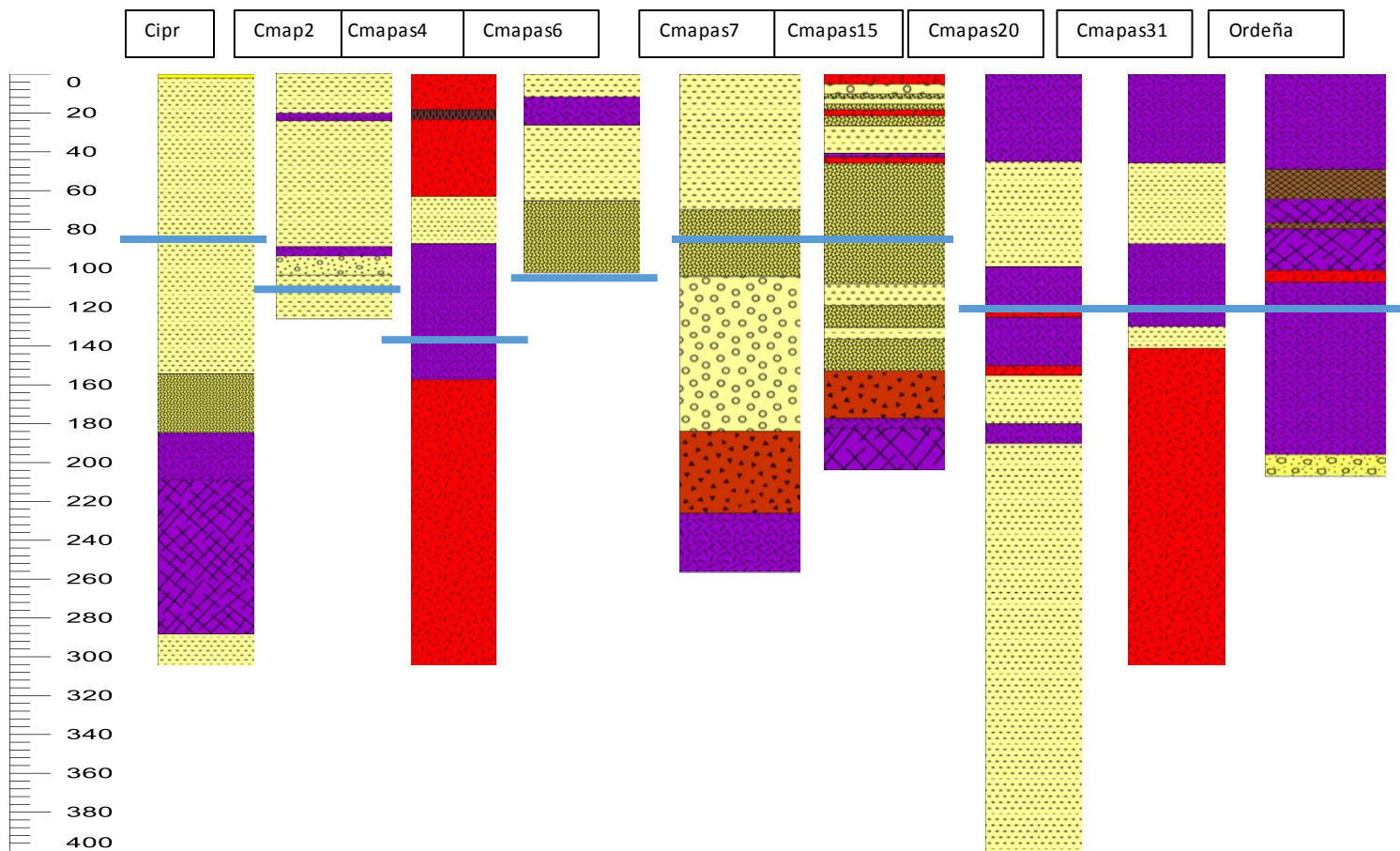
41	CFE 9 B	274584.00	2274760.00	CFE
42	43	285859.44	2261621.45	INEGI,1998
43	239	284102.74	2255473.00	INEGI,1998
44	47	282220.56	2249700.98	INEGI,1998
45	117	280714.82	2245936.61	INEGI,1998
46	220	265406.42	2288473.89	INEGI,1998
47	32	271680.35	2285085.97	INEGI,1998
48	246	281342.21	2278059.16	INEGI,1998
49	185	276699.50	2280066.82	INEGI,1998
50	171	277326.89	2284584.05	INEGI,1998
51	39	274064.45	2278059.16	INEGI,1998
52	404	274942.80	2275173.15	INEGI,1998
53	245	273060.62	2270906.88	INEGI,1998
54	37	274189.93	2267895.39	INEGI,1998
55	11 GUANOS	273543.00	2275385.00	TECKEM
56	RIAMMA 31	273248.00	2276620.00	PEMEX
57	RIAMMA 1	273155.00	2276182.00	PEMEX
58	Felipe Angeles	270575.00	2276799.00	CMAPAS
59	1910	269379.00	2278422.00	CMAPAS
60	Paraiso	270933.00	2274419.00	CMAPAS
61	Frac. Del Monte	271960.00	2278970.00	CMAPAS
62	Virreyes	269299.00	2274552.00	CMAPAS
63	Guerrero	270898.00	2276185.00	CMAPAS
64	Pozo 20A	272581.02	2276120.03	CMAPAS
65	Pozo 20B	270559.79	2273662.94	CMAPAS
66	El Sn Pedro	271296.00	2278693.00	CMAPAS
67	Nativitas	271890.00	2275400.00	CMAPAS
68	El cerrito	271785.00	2273801.00	CMAPAS
69	CMAPAS 16	274941.00	2276117.00	CMAPAS
70	La Luz	272499.00	2273946.00	CMAPAS
71	SAN JOAQUIN	261011.00	2281900.00	CMAPAS

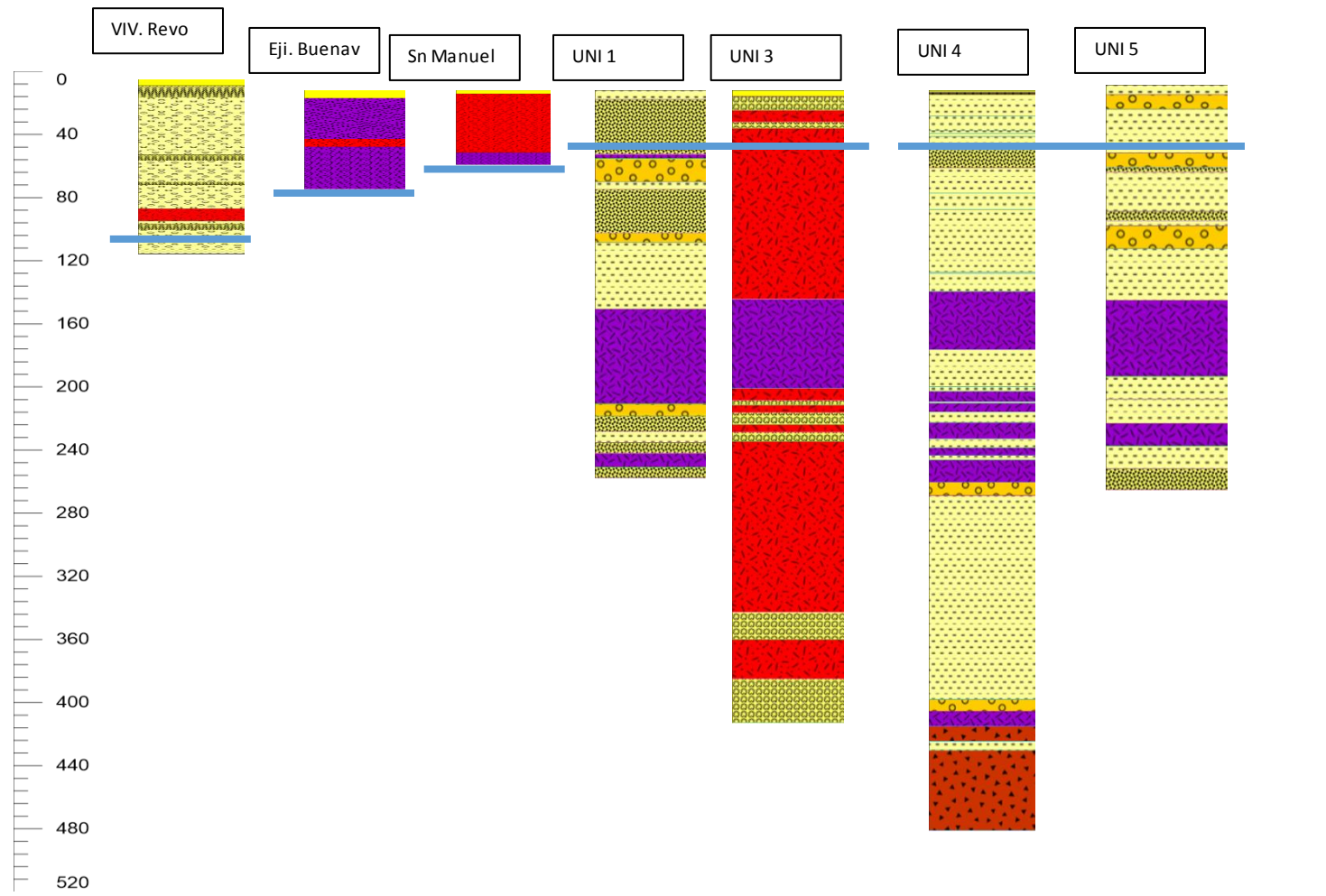
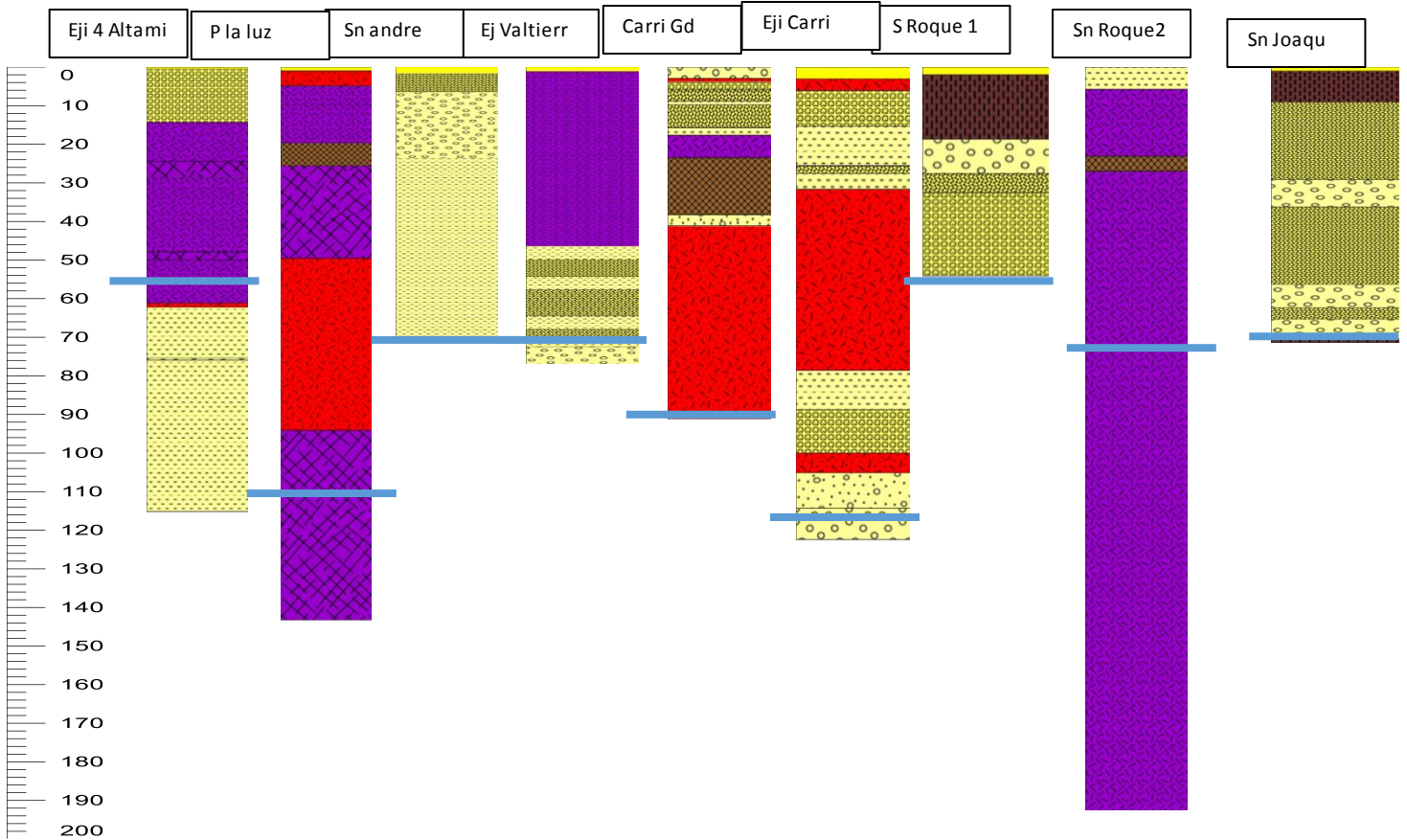
## 2. METODOLOGÍA APLICADA PARA LOS PARÁMETROS A, I, C, EN LOS 71 CORTES (EJEMPLO ILUSTRATIVO)

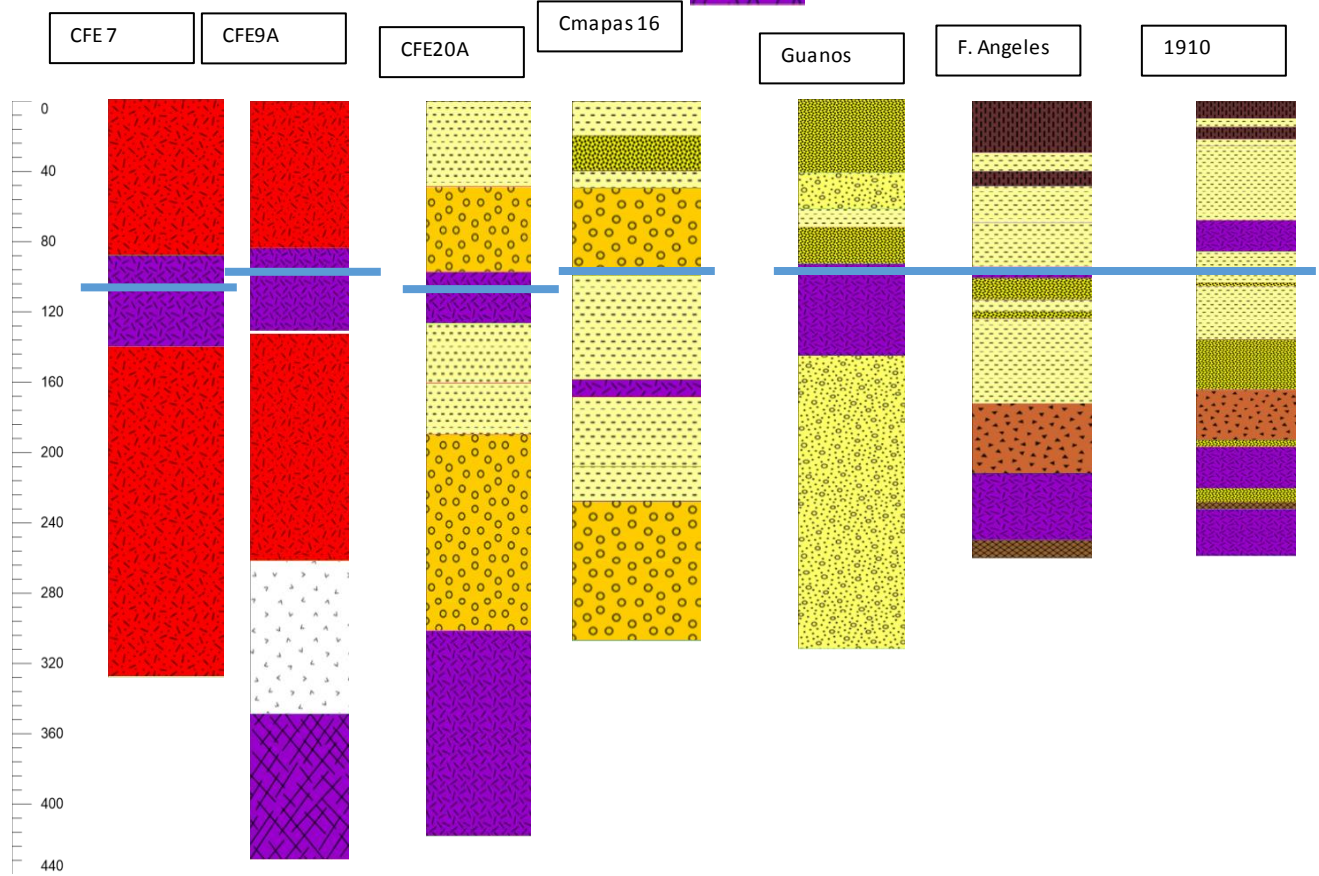
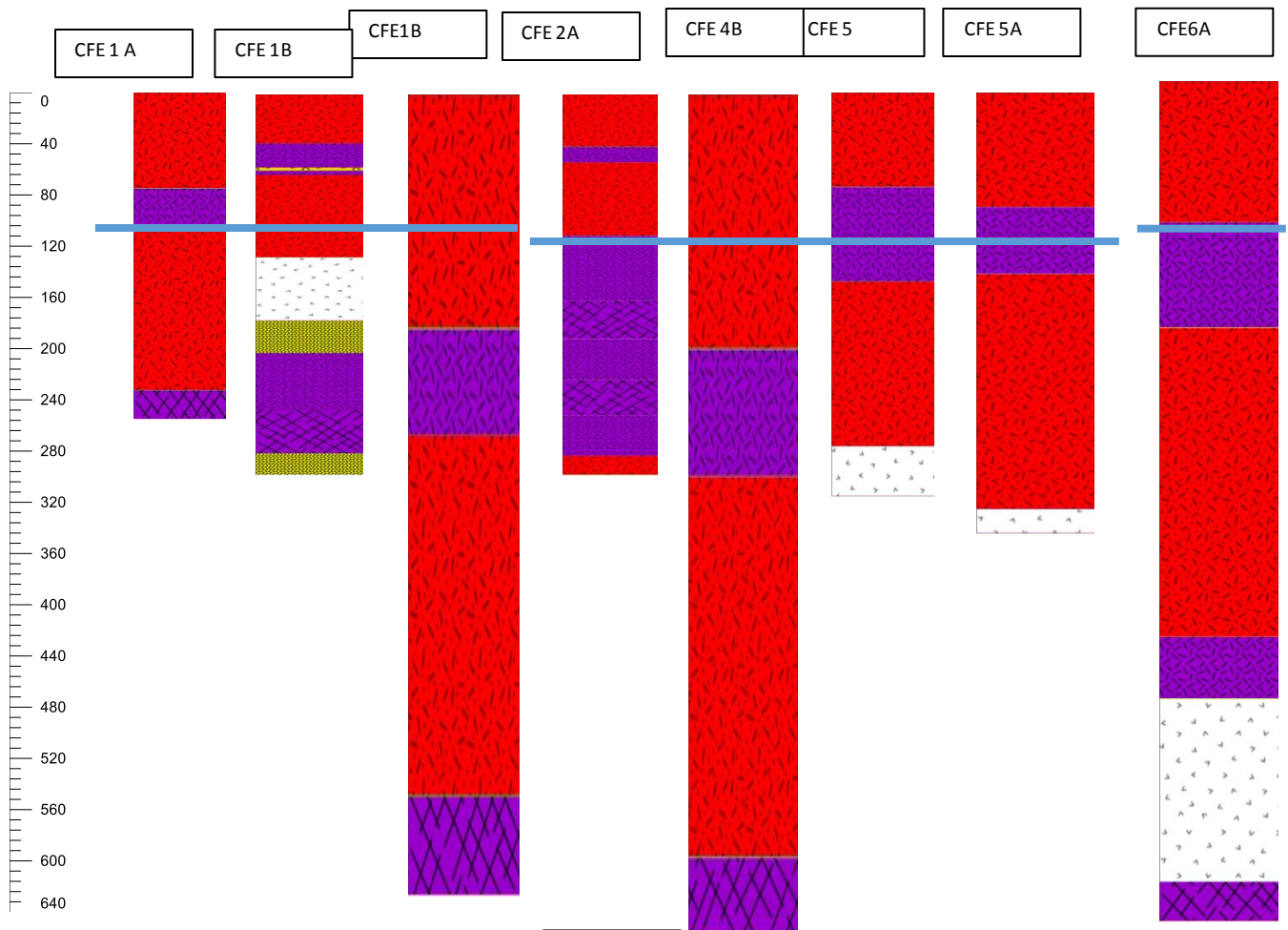


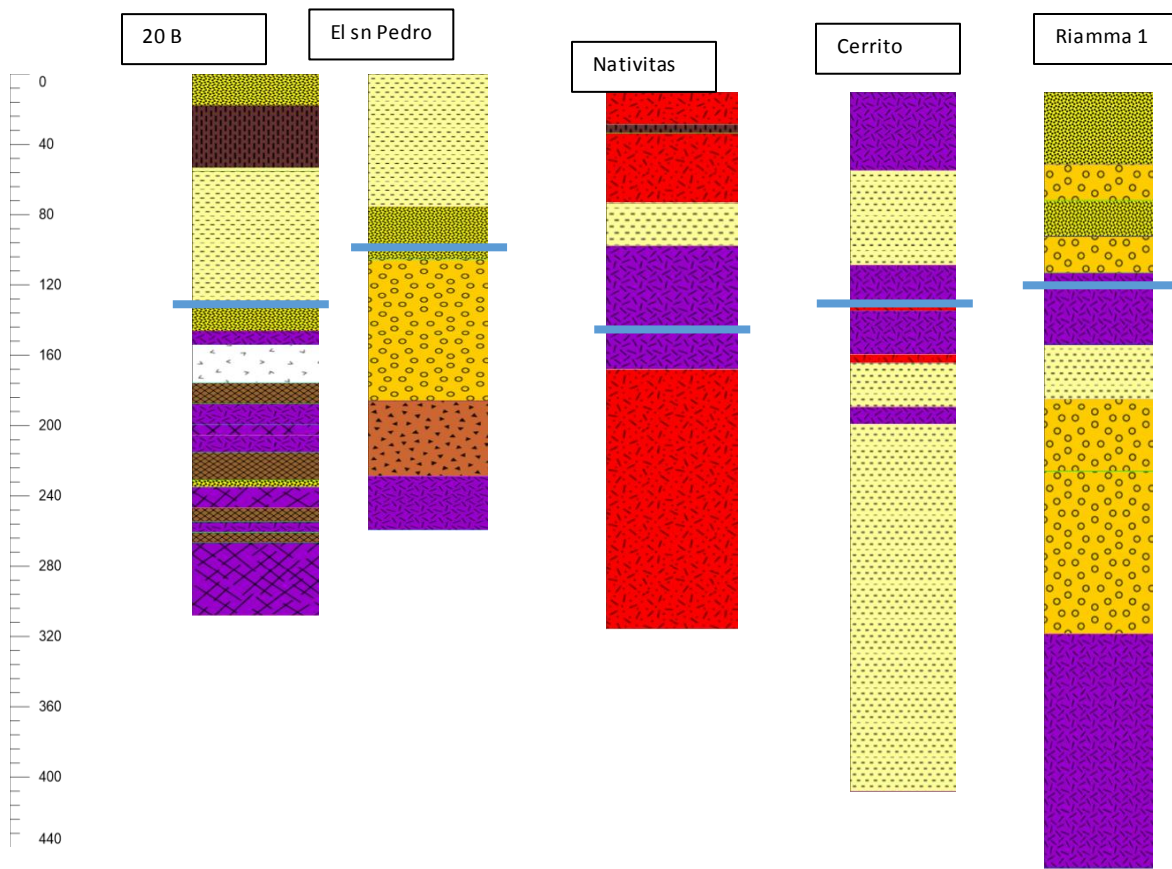
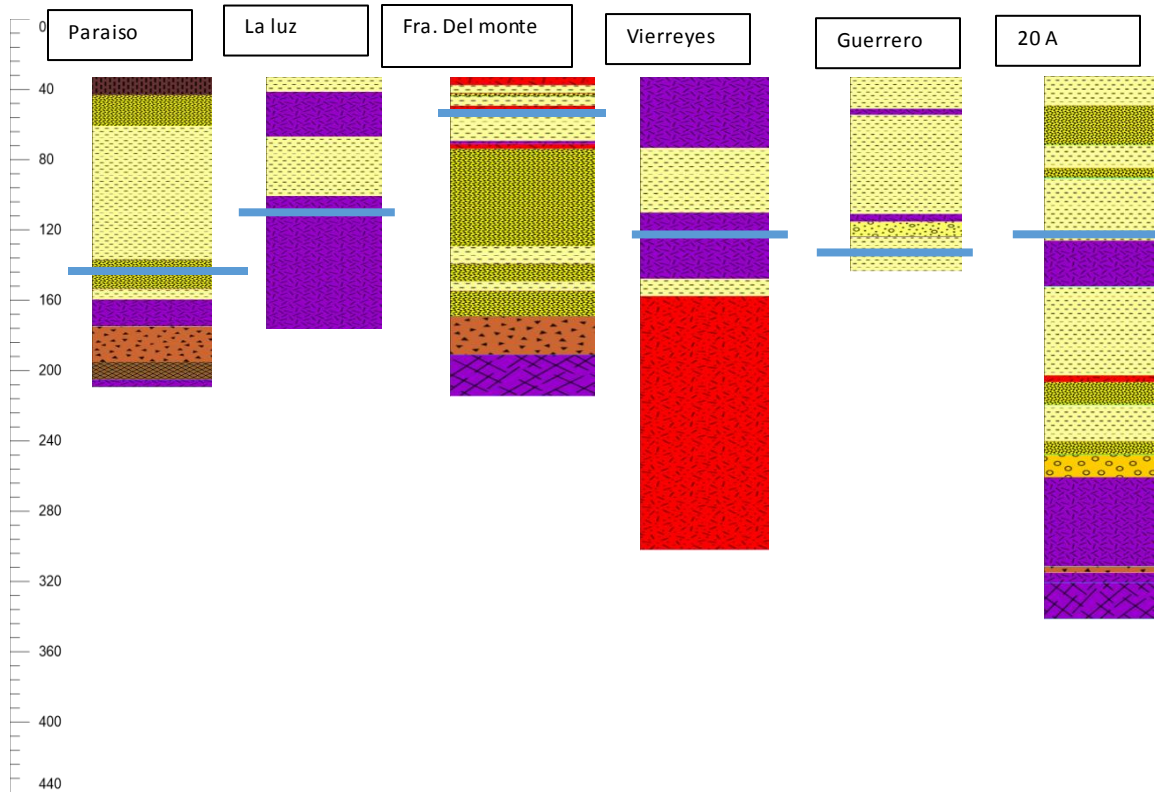
		Diferencia Espesores		Vulnerabilidad Asignada/ Litología		
		6	10	0.1	2	0.2
NE 60		8	13.3333333	0.13333333	8	1.06666667
100		26	43.3333333	0.43333333	6	2.6
		2	3.33333333	0.03333333	8	0.26666667
		18	30	0.3	6	5.93333333
		70	36.8421053	0.36842105	1	0.36842105
190		34	17.8947368	0.17894737	4	0.71578947
100		36	18.9473684	0.18947368	1	0.18947368
		50	26.3157895	0.26315789	4	2.32631579

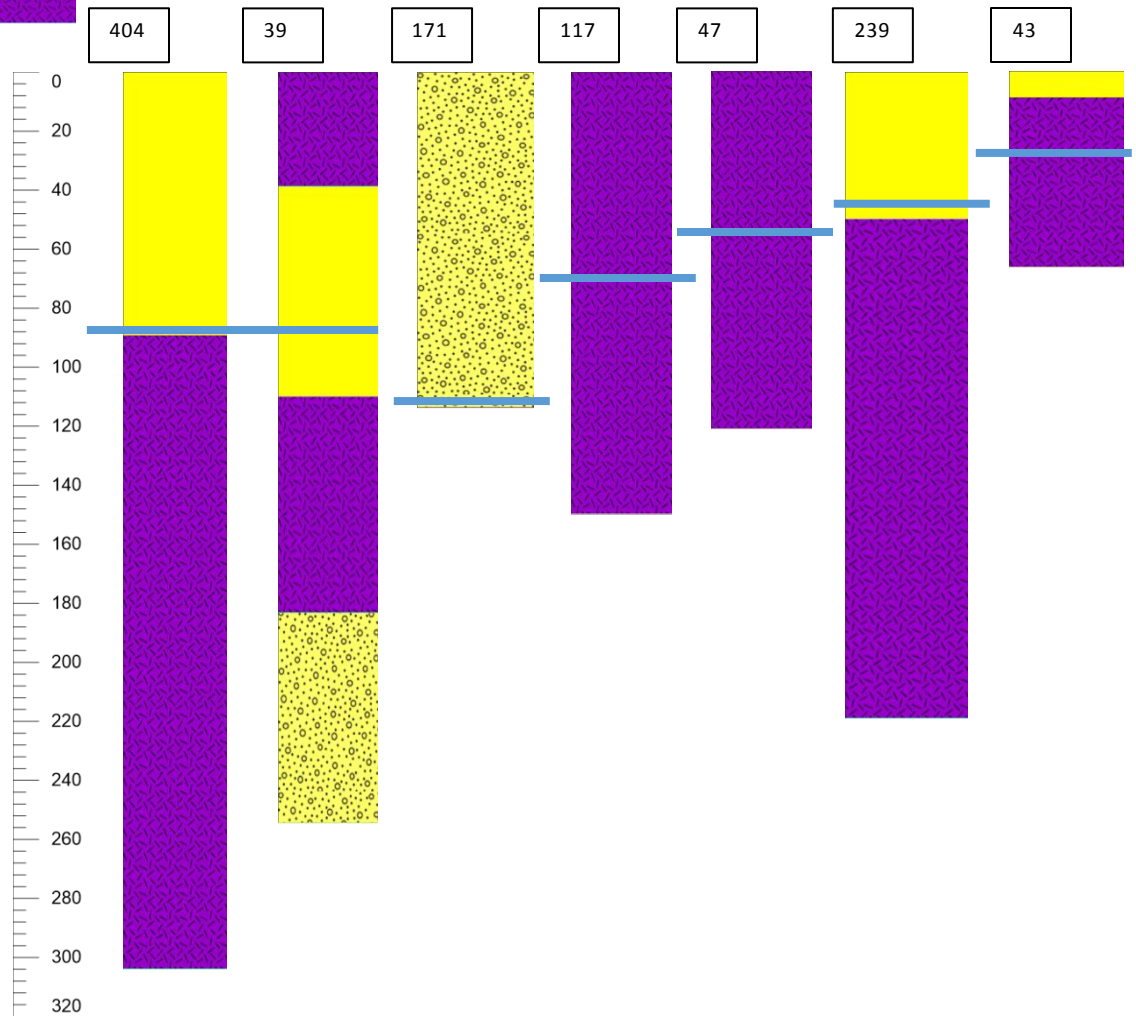
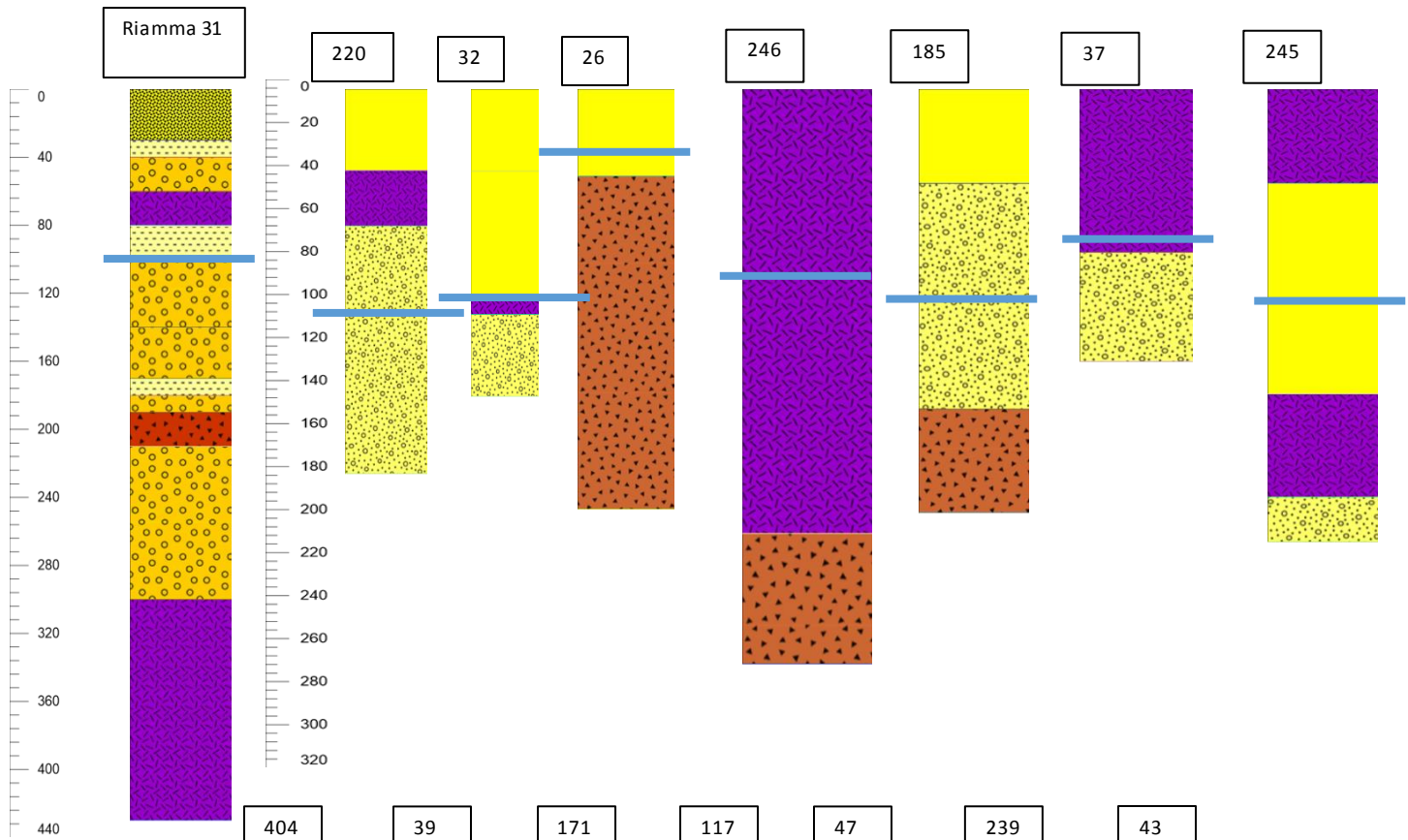






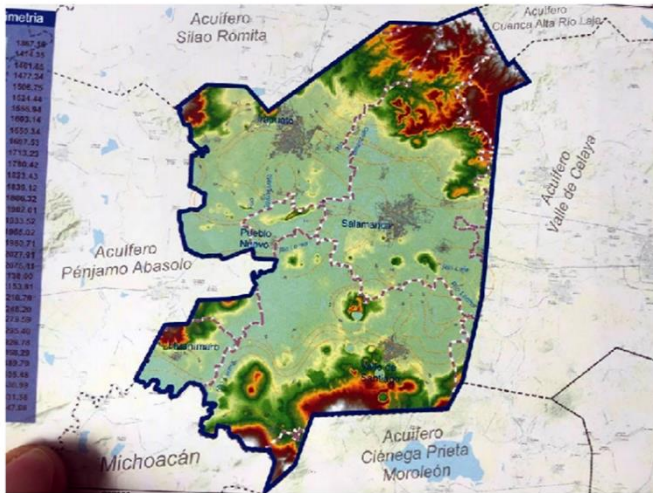






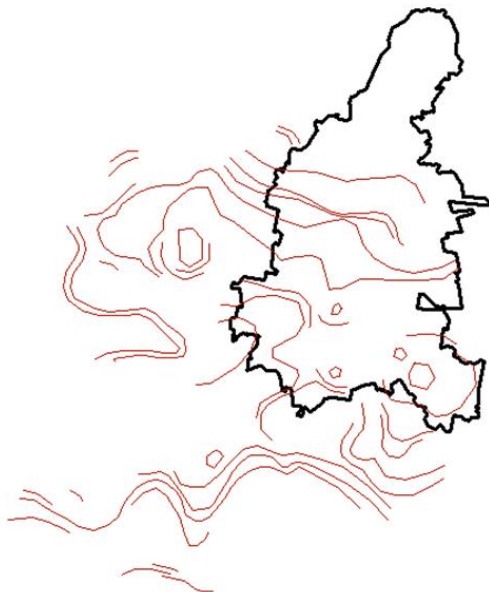


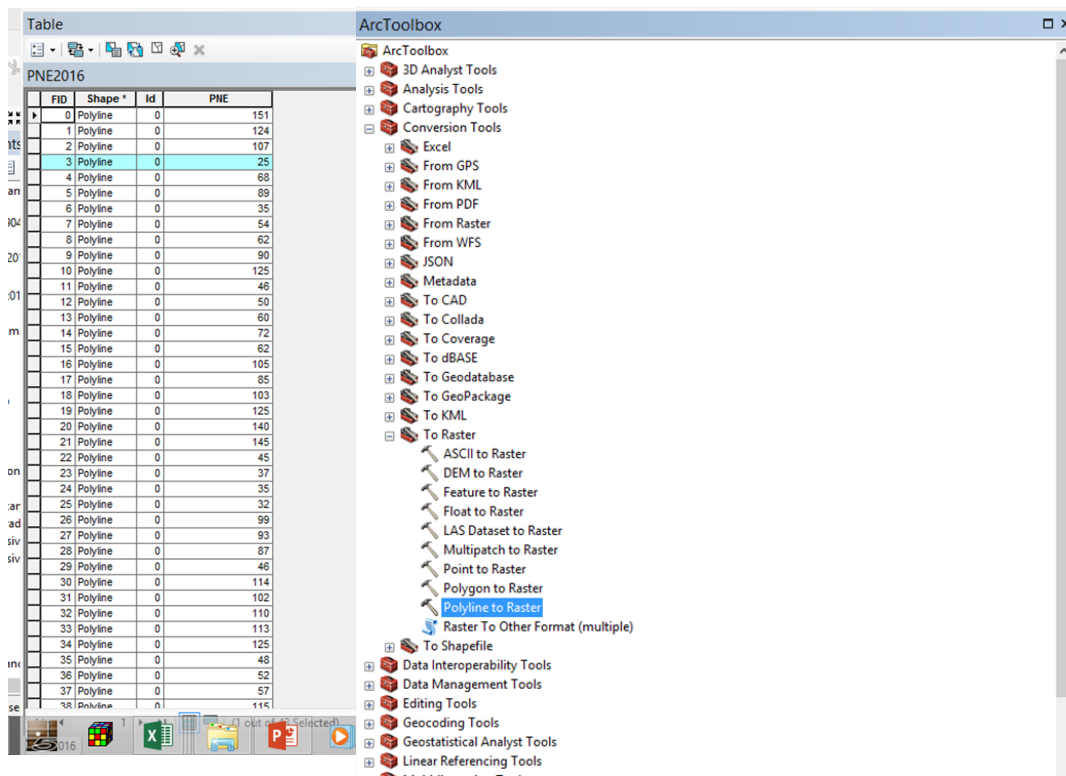
### 3. PROCESAMIENTO DE LAS ISOLINEAS DE PROFUNDIDAD



El primer paso es georreferenciar las isolíneas de profundidad para todo el acuífero Irapuato-Valle, esta información pertenece a los estudios publicados por la CEAG, (2018).

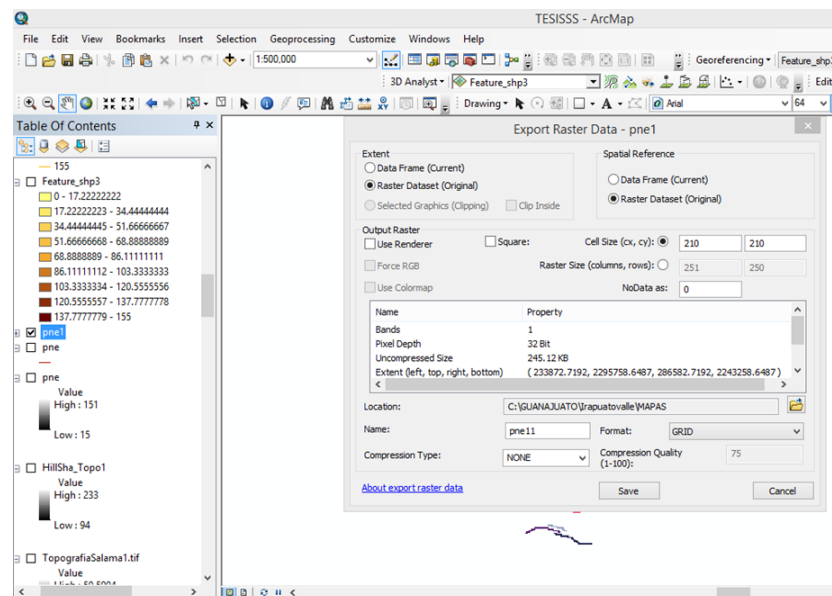
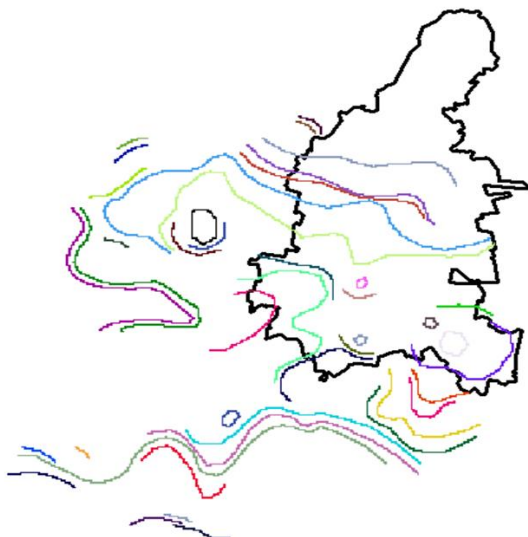
240.206 -752.676

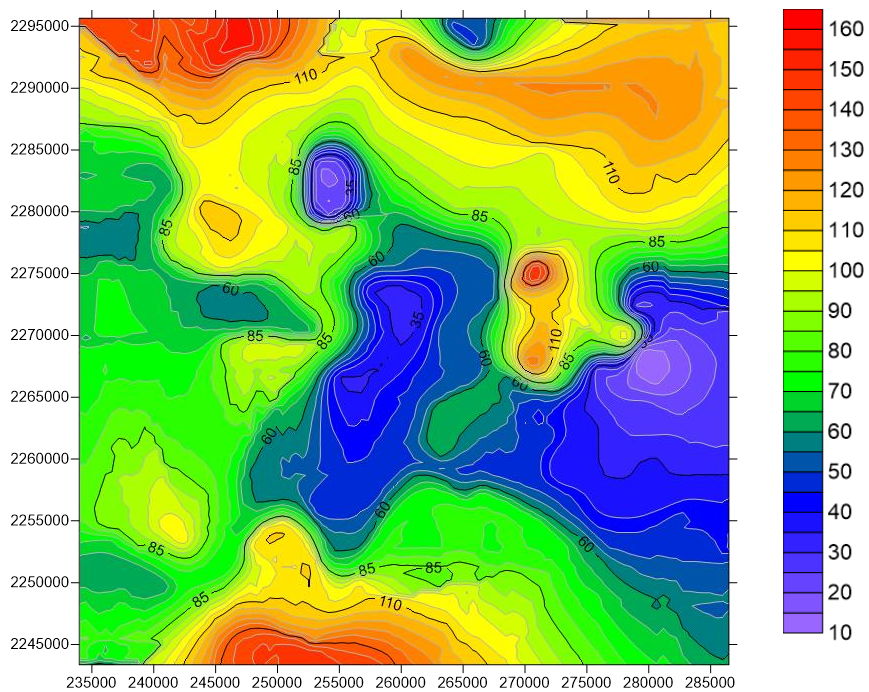




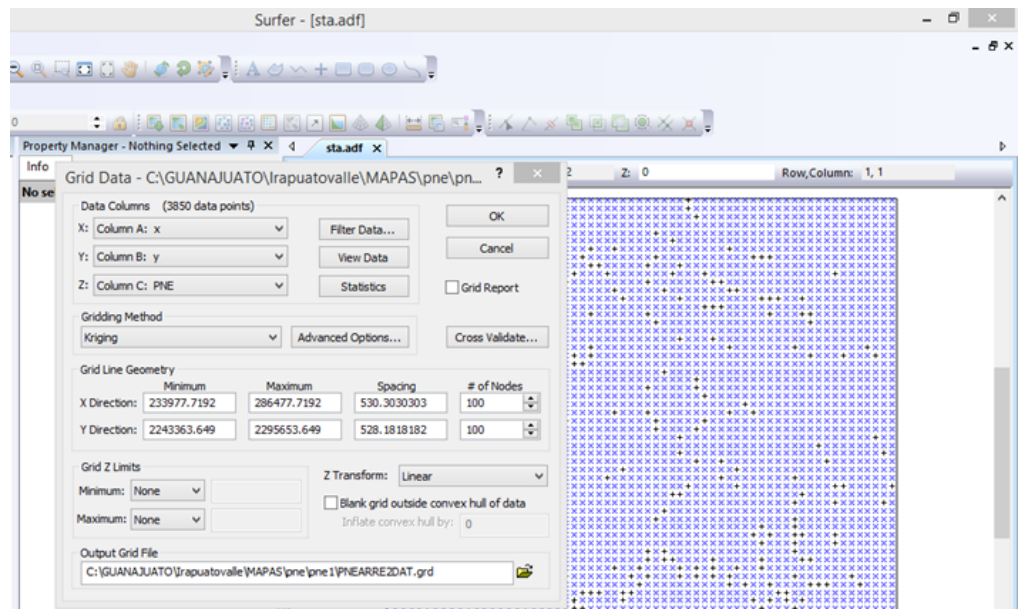
Una vez georreferenciados, se recurrió a una herramienta que convierte líneas de formato vectorial a raster.

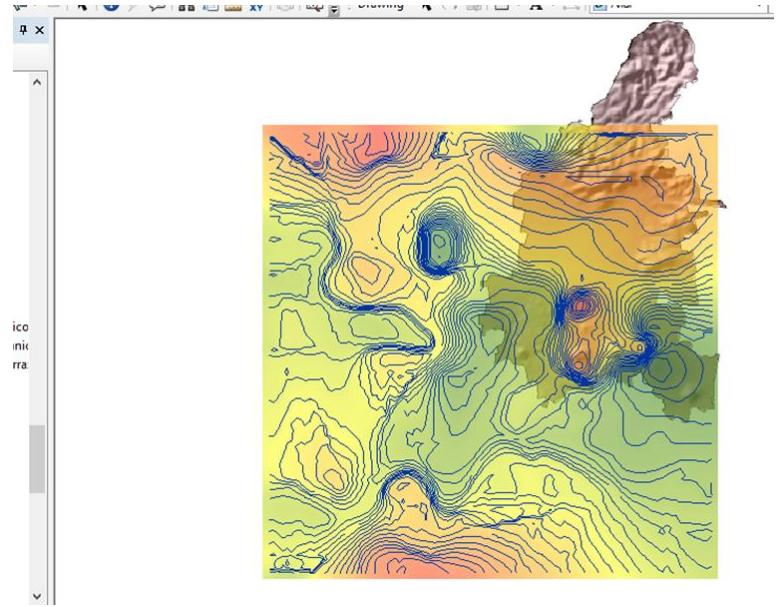
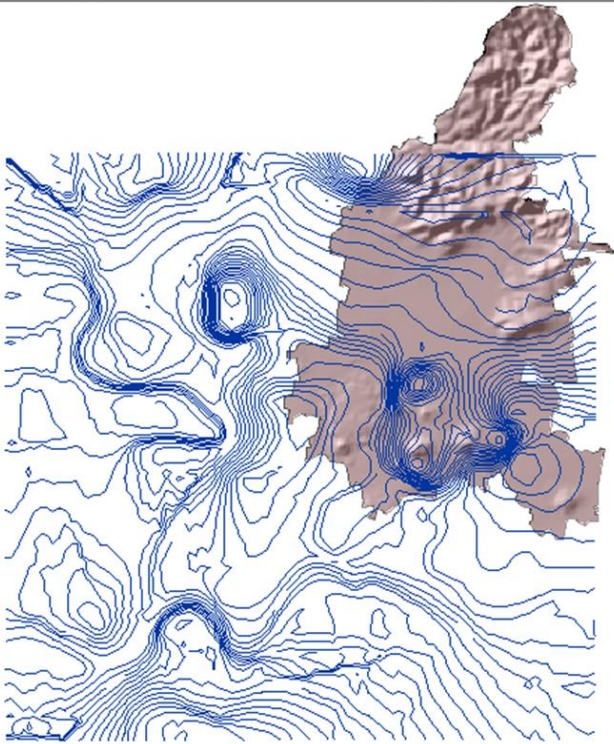
Una vez realizado esto, la imagen de abajo muestra que se montó el formato raster en un programa que permitió interpolar los datos.



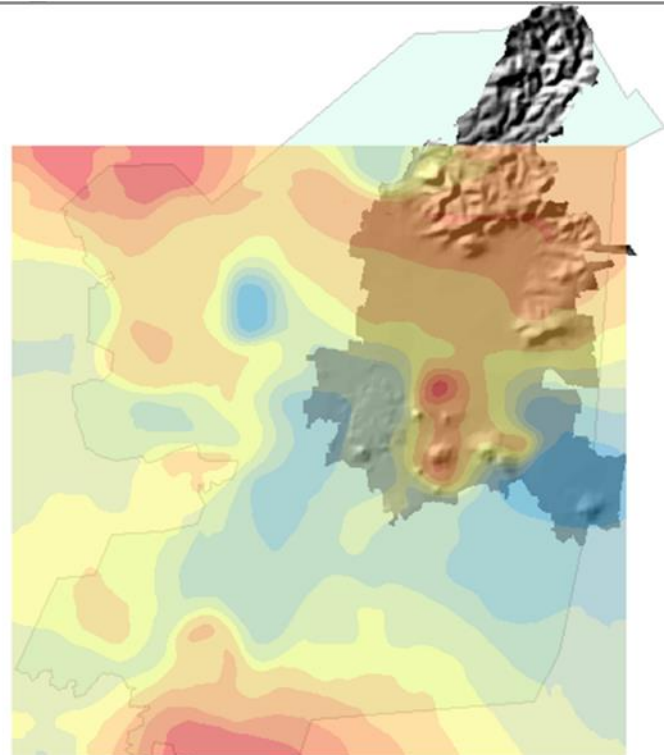
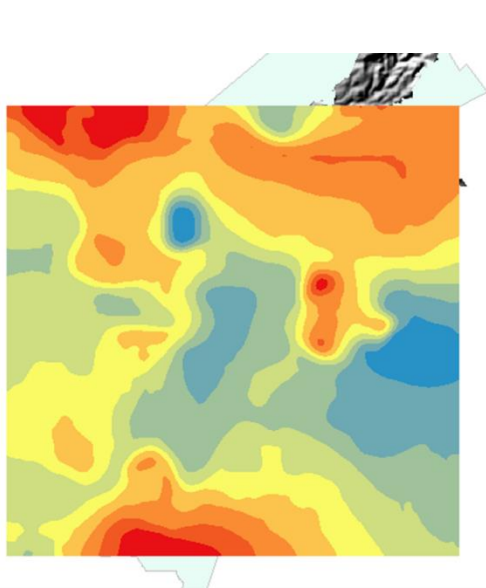


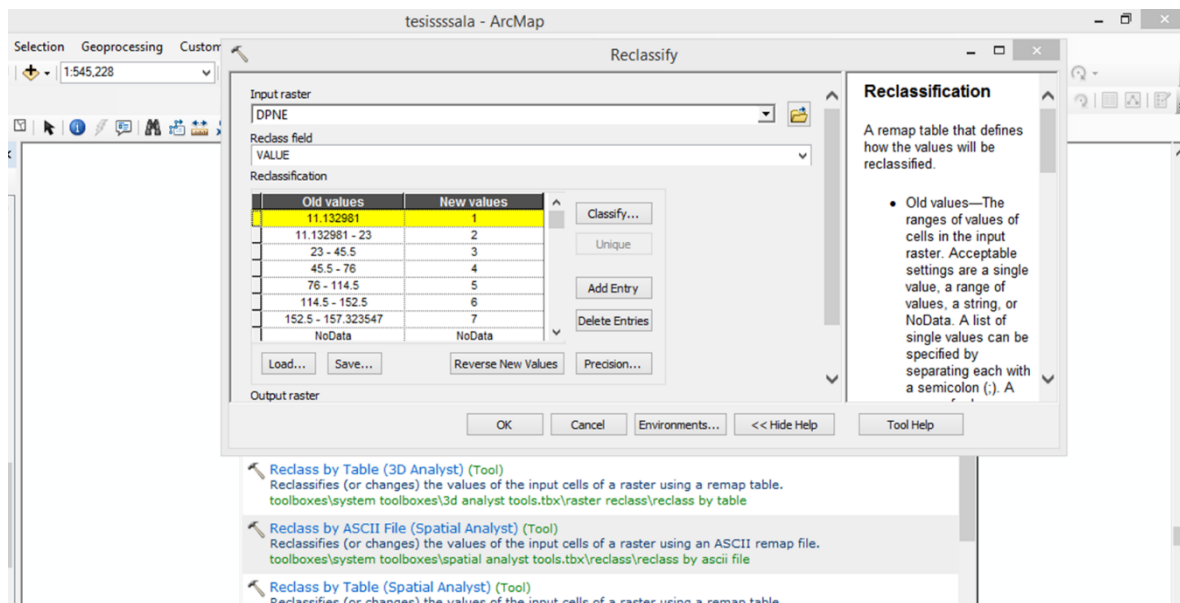
Se interpoló mediante el método Kriging, de esta manera fue posible llenar los datos faltantes entre las isolíneas de profundidades y conocer de esta manera, cualquier valor dentro del acuífero-Irapuato Valle.





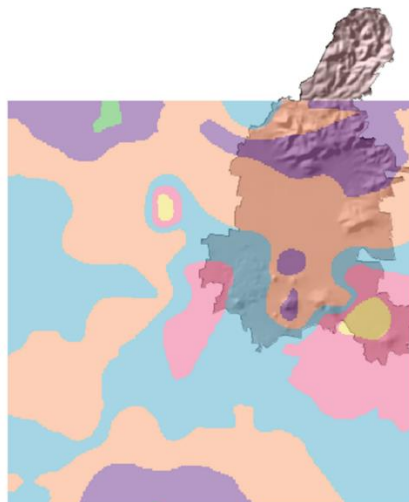
Una vez realizado el trabajo en el programa surfer, se cargó en arcgis, para poder obtener el valor de todas las isolíneas de profundidad para el acuífero, donde con ayuda de topografía se mostraron los colores de profundidad. La figura de abajo muestra la clasificación de colores, donde los colores bajos son menos profundos a colores muy fuertes donde la profundidad es mayor.





Una vez realizado esto, se reclasificaron las profundidades de acuerdo a las clases propuestas por Ramo, (2002).

Finalmente se redefinió la capa solo para la zona de estudio, la cual es el municipio de Salamanca.



#### 4. RECARGA NETA (EJEMPLO DE USO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES)

		LOS PERICOS						
L (300+25*Tmedia+0.05*Tmedia^3)	AÑO	TMIN	TMAX	TMEDIAANUAL °C Tmax-Tmin	PRECIPITACION (mm/a)	EVPT (Formula Turc)	Recarga Neta mm/a	
1035.72925	2005	10.15	28.07	17.92	362.9	358.838164	4.06183565	
1000.51597	2006	10.37	27.8	17.43	693.4	590.195466	103.204534	
985.810952	2007	10.27	27.49	17.22	638.4	555.788297	82.6117027	
1002.63545	2008	9.6	27.06	17.46	583.8	524.472402	59.327598	
1003.34299	2009	10.28	27.75	17.47	594.8	531.700517	63.0994834	
1001.22194	2010	9.49	26.93	17.44	898.7	688.12051	210.57949	
1091.36649	2011	9.46	28.12	18.66	346.5	346.361294	0.13870616	
983.728898	2012	10.16	27.35	17.19	543.5	495.064654	48.4353465	
947.037731	2013	10.67	27.32	16.65	797	628.467079	168.532921	
941.72702	2014	10.45	27.02	16.57	496	457.108035	38.8919646	
884.756122	2015	11.11	26.79	15.68	809	613.992632	195.007368	
949.705065	2016	10.59	27.28	16.69	497.6	459.144179	38.4558206	
2005-2015	987.517909			17.24454545	614.9090909	541.873779	<b>73.0353116</b>	
2010-2015	972.816975			17.03166667	648.45	559.275785	89.1742146	

$$EVT = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

## 5. VULNERABILIDAD DEL MEDIO ACUÍFERO (A) POR CORTE

ID	Sondeos	VUL A
1	UNIVERSIDAD LA SALLE	2
2	FRACCIONAMIENTO RESIDENCIAL CIPRESES	6
3	CMAPAS 2	1
4	CMAPAS 4	4
5	CMAPAS 6	4
6	CMAPAS 7	7
7	CMAPAS 15	5
8	CMAPAS 20	2
9	CMAPAS 31	4
10	ORDEÑA DE ABOYTES	8
11	SAN JUAN TEMASCATIO	7
12	MAJADAS DE ANCON	8
13	CALLEJONES	3
14	BUENAVISTA DE VALTIERRILLA	8
15	PREDIO EL XOCONOSTLE	8
16	CUATRO DE ALTAMIRA	3
17	EJIDO CUATRO DE ALATAMIRA	1
18	POZO LA LUZ	10
19	SAN ANDRES	1
20	EJIDO DE VALTIERRILLA	6
21	EJIDO CARRIZAL GRANDE	4
22	EJIDO CARRIZAL GRANDE	9
23	SAN ROQUE	6
24	SAN ROQUE	8
25	SAN JOAQUIN	9
26	VIVERO REVOLUCION	7
27	EJIDO BUANAVISTA DE VALTIERRILLA FRACC. EL TAMBOR	8
28	SAN MANUEL	8
29	univex 1	5
30	univex 3	5
31	univex 4	3
32	univex 5	4

33	CFE 20-A	7
34	CFE 1-A	5
35	CFE 1-B	6
36	CFE 2-A	6
37	CFE 4-B	7
38	CFE 5	6
39	CFE 5-A	5
40	CFE 6-A	6
41	CFE 7	5
42	CFE 9 B	6
43	43	8
44	239	8
45	47	8
46	117	8
47	220	4
48	32	5
49	246	6
50	185	3
51	171	4
52	39	6
53	404	7
54	245	7
55	37	4
56	T1 GUANOS	5
57	Riama 31	8
58	Riama 1	8
59	Felipe Angeles	4
60	1910	4
61	Paraiso	4
62	Frac. Del Monte	5
63	Virreyes	4
64	Guerrero	1
65	Pozo 20A	5
66	Pozo 20B	6
67	El Sn Pedro	7
68	Nativitas	5
69	El cerrito	2
70	CMAPAS 16	6
71	La Luz	8



## 6. VULNERABILIDADES DE LA ZONA VADOSA (I) POR CORTE

ID	Sondeos	VUL I
1	UNIVERSIDAD LA SALLE	6
2	FRACCIONAMIENTO RESIDENCIAL CIPRESES	2
3	CMAPAS 2	3
4	CMAPAS 4	5
5	CMAPAS 6	4
6	CMAPAS 7	3
7	CMAPAS 15	5
8	CMAPAS 20	4
9	CMAPAS 31	5
10	ORDEÑA DE ABOYTES	6
11	SAN JUAN TEMASCATIO	6
12	MAJADAS DE ANCON	6
13	CALLEJONES	6
14	BUENAVISTA DE VALTIERRILLA	6
15	PREDIO EL XOCONOSTLE	5
16	CUATRO DE ALTAMIRA	6
17	EJIDO CUATRO DE ALATAMIRA	6
18	POZO LA LUZ	6
19	SAN ANDRES	4
20	EJIDO DE VALTIERRILLA	6
21	EJIDO CARRIZAL GRANDE	5
22	EJIDO CARRIZAL GRANDE	5
23	SAN ROQUE	6
24	SAN ROQUE	6
25	VIVERO REVOLUCION	8
26	EJIDO BUANAVISTA DE VALTIERRILLA FRACC. EL TAMBOR	8
27	SAN MANUEL	8
28	univex 1	5
29	univex 3	6
30	univex 4	4
31	univex 5	4
32	CFE 20-A	6
33	CFE 1-A	5
34	CFE 1-B	5
35	CFE 2-A	5
36	CFE 4-B	5

37	CFE 5	5
38	CFE 5-A	5
39	CFE 6-A	5
40	CFE 7	5
41	CFE 9 B	5
42	43	6
43	239	7
44	47	6
45	117	6
46	220	6
47	32	7
48	246	6
49	185	6
50	171	6
51	39	7
52	404	7
53	245	7
54	37	6
55	T1 GUANOS	6
56	Riama 31	6
57	Riama 1	7
58	Felipe Angeles	3
59	1910	3
60	Paraiso	3
61	Frac. Del Monte	5
62	Virreyes	5
63	Guerrero	3
64	Pozo 20A	4
65	Pozo 20B	3
66	El Sn Pedro	3
67	Nativitas	5
68	El cerrito	4
69	CMAPAS 16	6
70	La Luz	4
71	SAN JOAQUIN	6

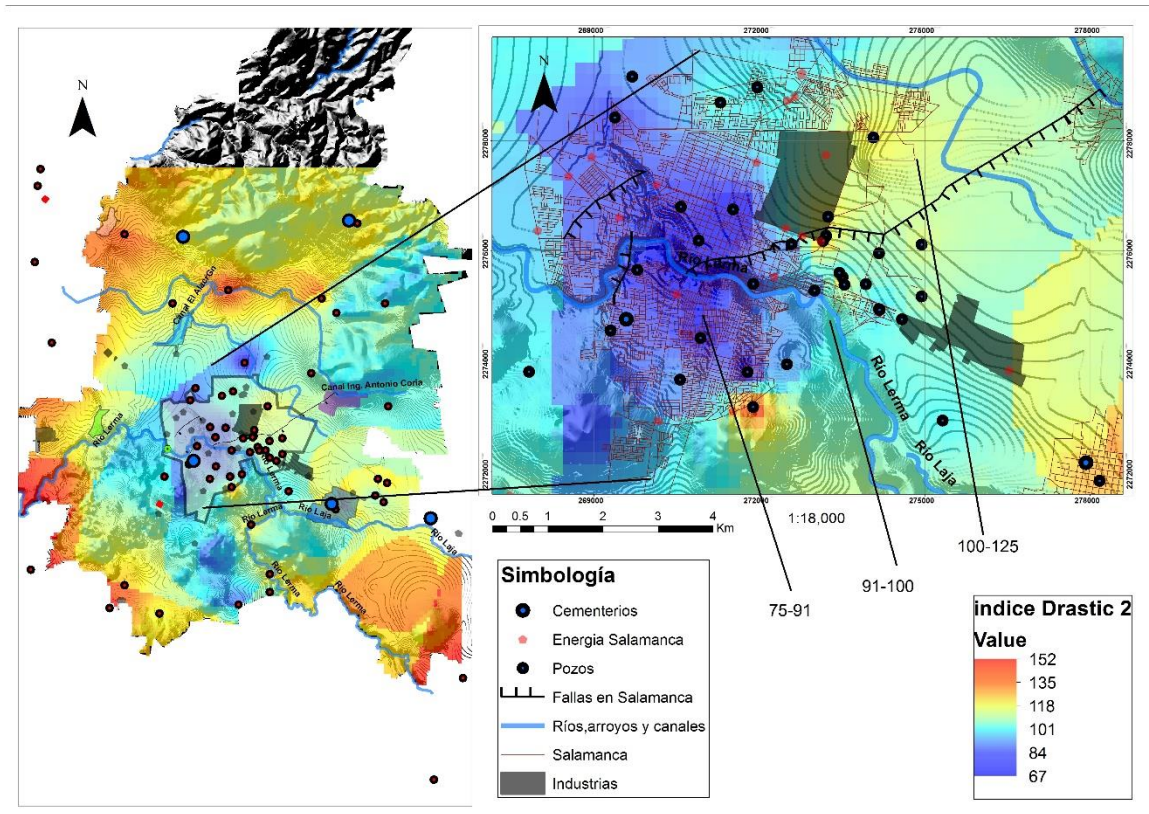
## 7. VULNERABILIDAD DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA POR CORTE (C)

ID	Sondeos	VUL 1
1	UNIVERSIDAD LA SALLE	1
2	FRACCIONAMIENTO RESIDENCIAL CIPRESES	4
3	CMAPAS 2	1
4	CMAPAS 4	1
5	CMAPAS 6	1
6	CMAPAS 7	5
7	CMAPAS 15	3
8	CMAPAS 20	1
9	CMAPAS 31	1
10	ORDE,,A DE ABOYTES	2
11	SAN JUAN TEMASCATIO	1
12	MAJADAS DE ANCON	1
13	CALLEJONES	2
14	BUENAVISTA DE VALTIERRILLA	3
15	PREDIO EL XOCONOSTLE	1
16	CUATRO DE ALTAMIRA	1
17	EJIDO CUATRO DE ALATAMIRA	1
18	POZO LA LUZ	10
19	SAN ANDRES	1
20	EJIDO DE VALTIERRILLA	5
21	EJIDO CARRIZAL GRANDE	1
22	EJIDO CARRIZAL GRANDE	10
23	SAN ROQUE	1
24	SAN ROQUE	1
25	VIVERO REVOLUCION	8
26	EJIDO BUANAVISTA DE VALTIERRILLA FRACC. EL TAMBOR	1

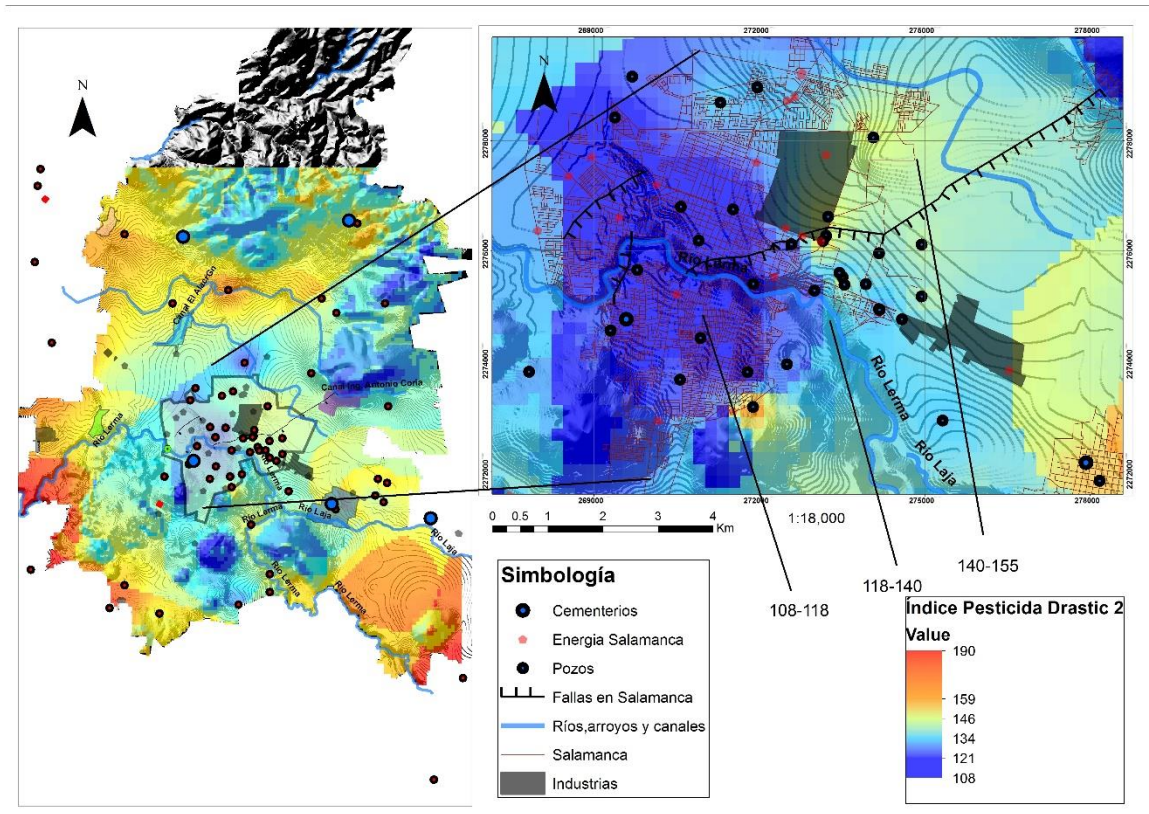
27	SAN MANUEL	1
28	univex 1	2
29	univex 3	2
30	univex 4	1
31	univex 5	2
32	CFE 20-A	4
33	CFE 1-A	1
34	CFE 1-B	2
35	CFE 2-A	3
36	CFE 4-B	3
37	CFE 5	2
38	CFE 5-A	1
39	CFE 6-A	2
40	CFE 7	1
41	CFE 9 B	3
42	43	1
43	239	1
44	47	1
45	117	1
46	220	10
47	32	8
48	246	1
49	185	5
50	171	10
51	39	5
52	404	1
53	245	3
54	37	8

55	T1 GUANOS	8
56	Riama 31	5
57	Riama 1	5
58	Felipe Angeles	1
59	1910	1
60	Paraiso	1
61	Frac. Del Monte	3
62	Virreyes	1
63	Guerrero	1
64	Pozo 20A	2
65	Pozo 20B	4
66	El Sn Pedro	5
67	Nativitas	1
68	El cerrito	1
69	CMAPAS 16	5
70	La Luz	1
71	SAN JOAQUIN	10

## 8. Índice DRASTIC usando IDW para los parámetros medio acuifero (I) , Zona vadosa (I) y Conductividad hidráulica.



9. Índice PESTICIDA DRASTIC usando IDW para los parámetros medio acuífero (I), Zona vadosa (I) y Conductividad hidráulica.



## 10. Reclasificación de los Índice Drastic y Pesticida Drastic.

Para la reclasificación de los dos índices se propusieron reclasificarlos en intervalos iguales. Se muestran a continuación.

### Índice DRASTIC

		Escala RECLASIFICADA	
Mínimo	67	67-84	Bajo (2)
Máximo	156	84-102	Moderado (4)
Promedio	113	102-120	Alto (6)
Desv. Estandar	14.9	120-138	Muy alto (8)
		138-156	Extremo (10)

### Pesticida DRASTIC

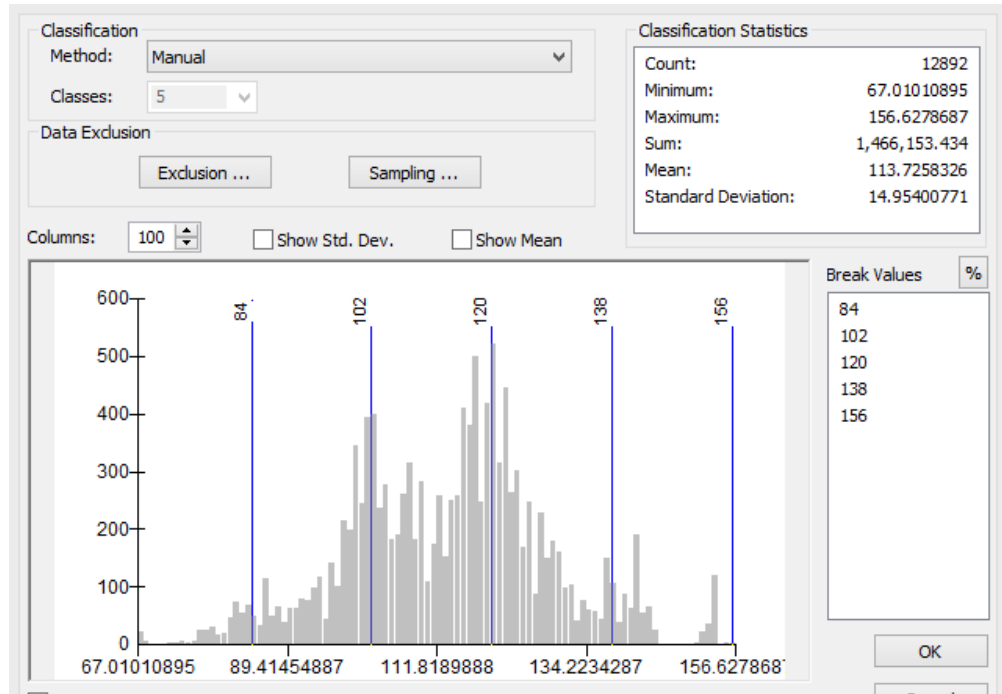
		Escala RECLASIFICADA	
Mínimo	93	93-113	Bajo (2)
Máximo	193	113-133	Moderado (4)
Promedio	143.29	133-153	Alto (6)
Desv. Estandar	15.4	153-173	Muy alto (8)
		173-193	Extremo (10)



## 11. Distribución de la información final.

Se muestra la distribución de la información, donde entre las unidades 84 y 120 se tiene un aumento y mayor cantidad de información, siendo este el caso de la ciudad de Salamanca, Guanajuato. Al igual con la información de Pesticida Drastic.

Histograma Índice DRASTIC



Histograma Pesticida DRASTIC

