



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra

Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio

**“VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA AL
PONIENTE DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN”**

TESIS

Para obtener el grado académico de:

Maestra en Ciencias

Con especialidad en

Geociencias y Planificación Del Territorio

Presenta:

Ing. Amayrani Citlaly Pedraza Pérez

Director de Tesis:

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera

Morelia Michoacán, Febrero 2018





ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Justificación.....	12
1.2. Hipótesis	14
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo general	14
1.3.2. Objetivos específicos.	14
1.4. Antecedentes	15
1.4.1. Antecedentes de la vulnerabilidad	15
1.4.2. Antecedentes en la zona de estudio	17
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1. Ciclo hidrológico.....	24
2.2. Agua subterránea.....	26
2.2.1. Importancia del agua subterránea.....	26
2.2.2. Definición de recarga	27
2.2.3. Tipos de recarga	27
2.2.4. Método del balance hídrico para el cálculo de la recarga.	28
2.3. Tipos de acuíferos.....	29
2.4. Contaminación de los acuíferos	31
2.4.1. Formas de contaminación de las aguas subterráneas.....	32
2.4.2. Principales contaminantes de las aguas subterráneas	33
2.4.3. Peligro de contaminación de aguas subterráneas	33
2.5. Vulnerabilidad de acuíferos.....	35
2.5.1. Vulnerabilidad intrínseca y específica	37
2.5.2. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos	38
2.6. Cartografía de la vulnerabilidad de los acuíferos.	39
2.7. Sistemas de Información Geográfica	40



2.8. Interpolación.....	41
2.8.1. Método IDW (Gravitacional o Inverso de la Distancia).....	43
2.8.2. Método Kriging.....	44
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	46
3.1. Ubicación.....	46
3.1.1. Macro localización.....	46
3.1.2. Micro localización.....	47
3.2. Geología regional.....	47
3.3. Delimitación de la zona de estudio.....	50
3.4. Clima.....	50
3.5. Infraestructura Carretera.....	51
3.6. Fisiografía y topografía.....	51
3.7. Hidrografía.....	53
3.8. Geología.....	54
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	57
4.1. Metodología del Índice DRASTIC.....	57
4.2. Definición y valores de los parámetros del índice DRASTIC.....	61
4.2.1. Profundidad del agua (D).....	61
4.2.2. Recarga neta (R).....	65
4.2.3. Medio acuífero (A).....	66
4.2.4. Tipo de suelo (S).....	72
4.2.5. Pendiente del terreno % (T).....	76
4.2.6. Impacto de la zona no saturada (I).....	78
4.2.7. Conductividad Hidráulica (C).....	80
4.2.8. Fallas geológicas.....	82
5. RESULTADOS.....	87
5.1. Profundidad del agua (D).....	87
5.2. Recarga neta (R).....	88
5.2.1. Selección de estaciones climatológicas.....	88



5.2.2. Deducción de datos faltantes	91
5.2.3. Cálculo de la precipitación	95
5.2.4. Cálculo de la evapotranspiración	100
5.2.5. Obtención del coeficiente de escurrimiento (Ce).....	103
5.2.6. Cálculo de la infiltración total (It)	108
5.2.7. Cálculo de la Recarga (R)	109
5.3. Medio acuífero (A).....	110
5.4. Tipo de suelo (S).....	111
5.5. Pendiente del terreno (T)	113
5.6. Zona no saturada (I).....	114
5.7. Conductividad hidráulica (C)	115
5.8. Fuentes potenciales de contaminación	116
5.9. Mapa de índice DRASTIC	118
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	119
7. REFERENCIAS	122



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Polígonos propuestos por el SGM para la protección de zonas de infiltración al manantial de La Mintzita (CONURBA, 2012).	13
Figura 2. Clasificación de zonas subsuperficiales (Masters, 2008).	24
Figura 3. Ciclo hidrológico. La ciencia del agua para las escuelas (Pastor, 2011).....	25
Figura 4. Tipos de acuíferos. Aguas subterráneas (Wikisabio, 2017).	31
Figura 5. Esquema conceptual para la evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas. (Foster e Hirata, 1991).	35
Figura 6. Macro y micro localización del estado de Michoacán (INEGI, 2010).....	46
Figura 7. Micro localización de la zona de estudio (INEGI, 2015).	47
Figura 8. Mapa geológico de la zona de Morelia (Garduño <i>et al.</i> , 2001).	49
Figura 9. Zona de estudio.....	50
Figura 10. Topoformas de la zona poniente de Morelia (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).	52
Figura 11. Hidrología superficial de la zona poniente de Morelia (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).....	54
Figura 12. Metodología aplicada para este trabajo de investigación.	60
Figura 13. Medición de los niveles piezométricos en pozos de la zona de estudio.....	62
Figura 14. Profundidad a la que se localiza el agua subterránea en la zona de estudio.....	63
Figura 15. Regresión lineal para los datos de profundidad del agua.	64
Figura 16. Cortes litológicos de pozos en la zona de estudio.....	71
Figura 17. Elaboración de perfiles de suelos.....	73
Figura 18. Tipos de suelo presentes en la zona de estudio (INEGI, 1979; Ávila-Olivera <i>et al.</i> , 2015).	74
Figura 19. Mapa de la pendiente del terreno en porcentaje.	78
Figura 20. Distribución espacial de la zona no saturada.	80
Figura 21. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en m/día.	82
Figura 22. Mapa de la subsidencia de la ciudad de Morelia. (Ávila-Olivera <i>et al.</i> , 2012).....	85
Figura 23. Presencia de fallas geológicas con influencia en la zona de estudio. .	86
Figura 24. Índice DRASTIC para la profundidad del agua (D).....	87
Figura 25. Estaciones climatológicas	89
Figura 26. Precipitación media mensual registrada en las estaciones climatológicas consideradas.....	90



Figura 27. Temperatura media mensual registrada en las estaciones climatológicas consideradas.....	90
Figura 28. Distribución de los polígonos de Thiessen.	97
Figura 29. Isoyetas generadas a cada 50 mm.....	99
Figura 30. Precipitación media anual en mm para la cuenca en estudio.....	99
Figura 31. Temperatura media anual en °C para la cuenca en estudio.....	101
Figura 32. Evapotranspiración mensual obtenida por el método Thornthwaite para cada una de las estaciones climatológicas.....	102
Figura 33. Distribución espacial de la evapotranspiración media anual en mm/año.	103
Figura 34. Parámetro K uso y tipo de suelo.....	106
Figura 35. Coeficiente de escurrimiento anual en la cuenca en estudio.....	107
Figura 36. Uso de suelo en la cuenca en estudio.....	108
Figura 37. Distribución espacial de la infiltración media anual en mm/año.	109
Figura 38. Distribución espacial de la recarga potencial en mm/año.....	110
Figura 39. Índice DRASTIC para el medio acuífero.....	111
Figura 40. Índice DRASTIC para el tipo de suelo.	112
Figura 41. Índice DRASTIC para la pendiente del terreno.	114
Figura 42. Índice DRASTIC para la zona no saturada.....	115
Figura 43. Índice DRASTIC para la conductividad hidráulica.	116
Figura 44. Fuentes potenciales de contaminación Morelia – Capula.	117
Figura 45. Índice del grado de Vulnerabilidad DRASTIC.....	118



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de diferentes métodos de interpolación espacial (Lam, 1983; Burrough y McDonnell, 1998).	43
Tabla 2. Índices de ponderación de la importancia relativa entre los parámetros que emplea el índice DRASTIC.	58
Tabla 3. Clasificación de la vulnerabilidad de acuíferos del método DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987).	59
Tabla 4. Puntajes del parámetro de profundidad del nivel piezométrico DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987).	61
Tabla 5. Resultados estadísticos de la regresión lineal del parámetro (D).	64
Tabla 6. Modificación de los puntajes para la clasificación DRASTIC.	65
Tabla 7. Puntajes del parámetro de la recarga neta DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987).	66
Tabla 8. Puntajes para el medio acuífero DRASTIC, dependiendo de la litología presente en el acuífero en estudio (Aller <i>et al.</i> , 1987).	67
Tabla 9. Modificación del parámetro (A) de acuerdo a la granulometría del material.	67
Tabla 10. Puntajes para el tipo de suelo DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987).	72
Tabla 11. Puntaje modificado para la clasificación del tipo de suelo.	75
Tabla 12. Puntajes para la Topografía o Pendiente del terreno DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987).	77
Tabla 13. Puntajes para el parámetro Impacto de la zona no saturada DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987).	79
Tabla 14. Puntajes utilizados para la Conductividad hidráulica DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987).	81
Tabla 15. Datos geográficos, precipitación y temperatura anual de las estaciones climatológicas de la cuenca en estudio (CLICOM, 2016).	89
Tabla 16. Deducción de datos faltantes por el método de la regresión lineal para las precipitaciones anuales.	94
Tabla 17. Resultados del método de la regresión lineal para las estaciones de Morelia y El Colegio.	95
Tabla 18. Resultados del método aritmético para la precipitación media anual.	96
Tabla 19. Resultados del método polígonos de Thiessen para la precipitación media anual.	97
Tabla 20. Resultados del método de las isoyetas para precipitación media anual.	98
Tabla 21. Método de Thornthwaite para el cálculo de la evapotranspiración en la estación Cointzio.	101



RESUMEN

La vulnerabilidad a la contaminación es una combinación de factores hidrogeológicos, influencias antropogénicas y fuentes de contaminación, determinada a través de un índice. En esta investigación se empleó la metodología del índice DRASTIC, que identifica el mecanismo de transporte de los contaminantes hasta los mantos acuíferos, mediante la caracterización hidrogeológica y valoración de una posible afección a las aguas subterráneas, incluyendo la profundidad del agua, la recarga neta, el medio acuífero, medio del suelo, la topografía, el impacto de la zona no saturada y la conductividad hidráulica, los cuales afectan y controlan el movimiento del agua subterránea. Estos factores, se incorporan en un esquema de clasificación relativo que utiliza una combinación de pesos y clasificaciones para producir un valor numérico llamado índice DRASTIC. Los ajustes hidrogeológicos se combinan con Índices para crear unidades visualizadas en un mapa a través de un modelo aditivo. Como resultado se obtuvo vulnerabilidad de muy baja a alta. Los valores muy bajos se deben a un ambiente acuífero predominantemente arcilloso y de escaso fracturamiento, el alto se asocia principalmente a la actividad humana, ya que son las áreas en donde se encuentra establecida la población de la ciudad de Morelia y la localidad de Capula; otro factor importante es la presencia de material de origen volcánico, además de la existencia de fallas y fracturas. Se espera que el mapa de vulnerabilidad se convierta en un instrumento para la adecuada planificación del territorio y definición de políticas para la gestión y protección del recurso hídrico.

Palabras clave: Agua subterránea; Acuífero; Contaminación; Vulnerabilidad; Método DRASTIC.



ABSTRACT

The vulnerability to pollution is a combination of hydrogeological factors, anthropogenic influences and sources of pollution, determined through an index. This research used the DRASTIC method, which identifies the mechanism of pollutants transport in aquifers, through the hydrogeological characterization and assessment of a possible disturb in groundwater, in virtue of evaluating water depth, net recharge, aquifer environment, porous medium, topography, impact of the unsaturated zone and the hydraulic conductivity, which affect and control the groundwater flow paths. These factors are incorporated into a relative classification scheme that uses a combination of weights and classifications to produce a numerical value called the DRASTIC index. Hydrogeological adjustments are combined with indices to create units displayed on a map through an additive model. As a result, vulnerability was obtained from a range which vary from very low to high. The very low values are due to a predominantly clayey and scarcely fracturing aquifer environment, the high one is mainly associated to human activity, due to the fact that there are two main population establishment: the city of Morelia and the town of Capula; another important factor is the presence of volcanic rocks, in addition to the existence of faults and fractures. It is expected that the vulnerability map will become an instrument for the adequate planning of the territory and definition of policies for the water resource management and protection.

Keywords: Groundwater; Aquifer; Pollution; Vulnerability; DRASTIC Method.



1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km³, de los cuales 97.5% es agua salada y sólo 2.5%, es decir 35 millones de km³, es agua dulce. De esta cantidad, casi 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo. Del agua disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos (CONAGUA, 2014).

En México, 77% del agua superficial y subterránea se utiliza en la agricultura; 14%, en el abastecimiento público; 5%, en las termoeléctricas y; 4%, en la industria (CONAGUA, 2014).

Por agua subterránea se entiende la que se encuentra por debajo de la superficie terrestre; esta representa el 0.35% del agua de la Tierra y es 20 veces más del total del agua superficial de los continentes. Esta agua se encuentra acumulada en los poros entre las partículas sedimentarias, así como entre las discontinuidades (fracturas) de las rocas compactas (Pranzini, 2000).

La vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación es una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo (Foster, 1987). La evaluación se realiza admitiendo que es un proceso dinámico (cambiante con la actividad realizada) e iterativo (cambiante en función de las medidas protectoras). La vulnerabilidad puede ser intrínseca (condicionada por las características hidrogeológicas del medio) y específica (cuando se consideran factores externos como la climatología o el propio contaminante). El grado de vulnerabilidad puede expresarse mediante un índice. Los índices más utilizados en Latinoamérica son AVI, GOD, DRASTIC y SINTACS (Martínez *et al.*, 1998). El riesgo de contaminación de un acuífero se puede definir como la probabilidad de que el agua subterránea se contamine con alguna sustancia en concentraciones por arriba de la normatividad para agua de



consumo humano o de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (Foster e Hirata, 1991).

Michoacán, cuenta con una gran riqueza hídrica. Morelia, recibe abastecimientos muy importantes de tres fuentes: la Presa Cointzio y de los manantiales: San Miguel y La Mintzita, donde más del 77% de los abastecimientos para los usos son superficiales, tomando solamente 23% de aguas subterráneas (CONAGUA, 2010). En cuanto al volumen concesionado a nivel estatal es de 5,257.6 hm³ del cual 89.43% del agua se utiliza en la agricultura; 7.05%, en el abastecimiento público; 0.92% en las termoeléctricas y 2.60%, en la industria (CONAGUA, 2013).

En la ciudad de Morelia, el agua constituye un factor limitante del desarrollo social y económico. La zona poniente, en la fase subterránea alcanza mayor importancia cuantitativa dado que es una de las principales fuentes de abastecimiento de la población. Actualmente, la investigación hidrogeológica se ha interesado más en el estudio de las aguas subterráneas, ya que éstas disponen la mayor parte del recurso hídrico dulce que puede ser usado en diferentes actividades por el ser humano; pero ya no sólo se trata de cómo encontrar agua, sino de estudiar cómo se ve afectada su calidad, este vital líquido se encuentra afectado por las diferentes actividades humanas que han producido que la calidad de este ya no sea la misma que en el pasado, y es por medio del estudio de acuíferos y estudio de las diferentes fuentes de contaminación de éstos, que podemos llegar a entender en qué forma evitar que las aguas subterráneas sigan siendo contaminadas. La mala calidad puede ser debida a causas naturales o a la actividad humana. En la ciudad de Morelia, la contaminación del acuífero puede relacionarse con el crecimiento de la población, el intenso proceso de urbanización, la actividad agropecuaria y la presencia de industrias. Ante esta situación es primordial evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, con la finalidad de predecir la evolución del problema, intentar disminuirlo o simplemente adoptar las medidas oportunas para que estos problemas no lleguen a producirse.



En esta investigación se utiliza el método del índice DRASTIC, el cual clasifica y pondera parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio; siendo este el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos. DRASTIC valora los siguientes parámetros: D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga), A (litología del acuífero), S (naturaleza del suelo), T (pendiente del terreno), I (naturaleza de la zona no saturada) y C (conductividad hidráulica del acuífero) (Aller *et al.*, 1987). A partir de la información requerida por el método DRASTIC se generan índices en un Sistema de Información Geográfica (SIG) considerando los factores que intervienen en la vulnerabilidad intrínseca. Con los mapas temáticos valorados se determina la vulnerabilidad acuífera, tanto para situaciones naturales como para actividades antropogénicas.

Una vez que se determina la vulnerabilidad intrínseca de la zona de estudio, ésta se relaciona con las fuentes potenciales de contaminación (factores extrínsecos), para conocer las zonas de mayor riesgo. Todo ello para evitar que disminuya la calidad del agua subterránea, que representa una de las fuentes de abasto principales para la población de Morelia.

El conocimiento de la vulnerabilidad de los acuíferos es clave en la formulación de políticas de gestión del agua subterránea y protección de la misma; en el desarrollo de normativa sobre vertidos y desechos sólidos; en la evaluación de impacto ambiental de proyectos; en los planes de manejo ambiental de distintas actividades humanas; en el ordenamiento territorial, definiendo áreas para el desarrollo de actividades específicas y restringiendo aquellas con alta vulnerabilidad.



1.1. Justificación

Los principales problemas hídricos que tiene la ciudad de Morelia son la sobreexplotación de los mantos acuíferos y problemas de abastecimiento (suministro de agua potable), las actividades antropogénicas y el crecimiento urbano sin una adecuada planeación facilitan la susceptibilidad a la contaminación generando zonas de mayor riesgo, afectando de manera considerable a las poblaciones establecidas, esto debido a una inadecuada gestión del recurso hídrico.

La región poniente de la ciudad de Morelia adquiere gran relevancia en lo que al agua subterránea respecta, ya que es la única fuente de abastecimiento, además de ser considerada una de las principales zonas de recarga del sistema acuífero (Marín y Blanco, 2009). Ante estas circunstancias prioritarias para el desarrollo social y económico de la población, proteger y evitar la contaminación del sistema acuífero es una necesidad. Por lo que, es primordial evaluar la medida en que puede ser afectado el sistema acuífero, mediante la determinación del potencial de contaminación del agua subterránea, obteniendo con ello las zonas del sistema acuífero más vulnerables, e identificando las actividades que representan el mayor riesgo en la zona, contribuyendo de esta manera a una gestión adecuada del agua subterránea.

En el área de estudio se localiza el manantial de La Mintzita, que provee del 40 al 50% del agua potable para toda la ciudad de Morelia (SGM, 2008), así como su utilización para actividades agrícolas y en la industria papelera de CRISOBA (antes CEPAMISA). Además, es considerado como zona natural protegida (D.O.F., 1988; Gobierno del Estado de Michoacán, 2007). En el estudio de “Diagnóstico y valoración de la vulnerabilidad del Manantial La Mintzita” (SGM, 2008) se resalta la importancia de respaldar y fortalecer una propuesta para ampliar la zona protegida actual, en el que se incluyen las zonas de amortiguamiento y el corredor formado por el manantial de La Mintzita y el cerro El



1.2. Hipótesis

Las propiedades intrínsecas del sistema hidrogeológico, el desmesurado crecimiento urbano y las distintas actividades de carácter antrópico, son factores que influyen directamente en la atenuación o no de los contaminantes en un sistema acuífero.

La asignación de pesos y superposición del conjunto de características o atributos físicos del suelo, la zona no saturada, y las unidades hidrogeológicas, permiten identificar la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea en una zona de interés por medio de un método de indexación como DRASTIC.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Identificar la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea al Poniente de la ciudad de Morelia, Michoacán.

1.3.2. Objetivos específicos.

1. Determinar la superficie piezométrica de la zona de estudio.
2. Estimar la recarga del agua subterránea en la zona de estudio por medio de un balance hidrológico.
3. Determinar la vulnerabilidad del acuífero con la metodología DRASTIC.



1.4. Antecedentes

1.4.1. Antecedentes de la vulnerabilidad

La definición tradicional de vulnerabilidad de un acuífero se refiere a la susceptibilidad natural que presenta a la contaminación, y está determinada principalmente por las características intrínsecas del acuífero. De acuerdo con el National Academy Council (1993) el concepto de vulnerabilidad del agua subterránea se refiere a la tendencia o probabilidad que un contaminante alcance una posición específica en el sistema acuífero, después de su introducción en algún punto sobre el terreno.

El término "vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas" fue introducido a finales de la década de los años sesenta por el hidrogeólogo francés Margat, y el concepto se basa en la tesis de que el medio geológico y la cubierta edafológica proporcionan un cierto grado de protección a las aguas subterráneas frente a contaminantes de origen tanto natural, como derivados de actividades humanas (Margat, 1968). Posteriormente, se han presentado numerosas definiciones, calificaciones y metodologías sobre el mismo, en muchos casos orientados a su representación cartográfica.

No obstante, a pesar de las más de cuatro décadas de utilización y aplicación del término vulnerabilidad, no existe una definición reconocida y aceptada del término. La Asociación Internacional de Hidrogeólogos emplea y recomienda el uso del término vulnerabilidad como una propiedad intrínseca de un sistema hidrogeológico que depende de la sensibilidad del sistema a impactos de origen natural y humano (Vrba y Zaporozec, 1994).

La finalidad última de los mapas de vulnerabilidad es la división del territorio en áreas de diferente aptitud potencial para un propósito o uso específico, es decir, son mapas orientados a usos u objetivos concretos. Las primeras realizaciones tuvieron lugar en Europa, a mediados de los años sesenta, y se desarrollaron con



carácter extensivo en los años setenta en los países europeos (principalmente en Francia, Alemania y Checoslovaquia) y en Estados Unidos, si bien se trataba inicialmente de grandes coberturas territoriales a pequeña escala, en general de cobertura nacional. La siguiente generación de mapas de vulnerabilidad se abordó con el fin de dar cobertura a las escalas medias a grandes que requieren las visiones regionales y locales. Así, desde principios de los ochenta se ha publicado en todo el mundo un considerable número de mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas frente a la contaminación de diversas fuentes. Algunos de los mejores y más representativos ejemplos de la primera generación de mapas de vulnerabilidad son los recogidos en un documento de síntesis realizado por Vrana (1984), que incluye ejemplos franceses, checoslovacos, polacos, rusos, búlgaros, alemanes y españoles (IGME, 1976; 1979).

El mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en Francia, a escala 1:1,000,000 elaborado por Albinet (1970) puede ser considerado la primera aportación con la denominación "mapa de vulnerabilidad". Basado en criterios de composición litológica de rocas y depósitos, define seis categorías primarias y nueve secundarias de acuerdo con el riesgo potencial creciente de contaminación. Tiene un carácter orientativo previsor, a escala nacional, de localización de las regiones más sensibles del país al riesgo potencial de contaminación derivado de acciones humanas.

La siguiente fase en este tipo de cartografía estuvo orientada a cubrir el territorio nacional, desde las zonas más sensibles a las menos vulnerables, pero a escalas de medias a grandes, con objeto de preservar las aguas subterráneas de abastecimiento público de la contaminación producida por cualquier causa. Entre éstos cabe resaltar, por su consistencia y carácter sistemático, los mapas de vulnerabilidad realizados en Francia por el Bureau de Recherches Geologiques et Minières (BRGH), a escalas 1:50,000 y 1:100,000 a partir de 1973 a razón de cuatro hojas por año.



En Checoslovaquia se inició en 1970 un programa de cartografía en serie de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas del país a escala 1:200,000 (Olmer y Rezàc, 1974). Desde entonces y hasta mediados de los ochenta tiene lugar un prolijo desarrollo de este tipo de cartografía a escala nacional y regional, siendo esta temática objeto de celebración de varios congresos: uno en Holanda en 1987 sobre metodologías y avances en la aplicación práctica de éstas; otro en 1989, celebrado en Alemania sobre clasificación y metodologías temáticas de elaboración de mapas de vulnerabilidad.

En México los estudios han ido en aumento en la última década, debido al interés e intención de cuidar y proteger el recurso hídrico, entre los cuales destacan los trabajos titulados “Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Península de Yucatán” (Bautista, 2011) y “ERIS: Método para determinar el riesgo de contaminación de un sistema acuífero. Caso Valle de Zaachila, Oaxaca” (Belmonte *et al.*, 2012) por mencionar algunos.

En el estado de Michoacán se cuenta con el estudio denominado “Caracterización hidrogeológica y vulnerabilidad acuífera en la cuenca del río Duero, Michoacán, México”, en el cual se empleó la metodología SINTACS (Silva *et al.*, 2016).

1.4.2. Antecedentes en la zona de estudio

Se han llevado a cabo una serie de trabajos en la zona de estudio, los cuales tienen un enfoque geológico, geohidrológico y de tipo ambiental. Entre los estudios más relevantes se mencionan los siguientes:

- La geología de la región de Morelia (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004). El documento describe la geología regional, local y estructural de la ciudad de Morelia, en el cual se pretende demostrar que las fallas que se observan en la ciudad de Morelia son estructuras geológicas preexistentes que se asocian el PSCF (Procesos de Subsistencia–Creep-Falla) y que no es solo el factor correspondiente a la sobre explotación de acuíferos que



está generando el problema de hundimiento de la ciudad. El municipio de Morelia se encuentra localizado en el contacto entre dos provincias geológicas, al sur se encuentra la Sierra madre del Sur, cuyos productos andesíticos, ignimbríticos y basálticos sucesivos fueron emitidos entre $33 \pm 8 \pm 2$ Ma (millones de años) del Oligoceno al Mioceno. Sobre estos depósitos descansa un paquete de andesitas y flujos piroclásticos de composición riolítica denominados “cantera de Morelia” a la que se le ha atribuido una edad Mioceno. Sobre las rocas volcánicas del miocénicas se presenta una serie de productos lacustres y flaviolacustres, describiendo un cinturón orientado E-W. Lo que conforma el actual valle de origen tectónico de Morelia fue labrado por unidades geológicas del Cinturón Volcánico Mexicano. Desde el punto de vista de la tectónica, la sucesión de Mil cumbres, aflora al sur y es el basamento de la cuenca de Cuitzeo, se interrumpe por la intersección de un segmento del sistema activo de la falla Morelia – Acambay. Este sistema al reactivarse ha dado lugar en la ciudad de Morelia a fenómenos de hundimientos que se alinean en dirección de la falla regional (NE-SO). La cuenca de Cuitzeo está limitada al este por la Caldera de Los Azufres y al Oeste por vulcanitas pliocuaternarias cuyos productos formaron los volcanes en escudo Quinceo-Las Tetillas, los cuales forman parte del corredor Tarasco. En la ciudad de Morelia, tanto en el subsuelo como en superficie se identifica la siguiente estratigrafía: 1. Complejo andesítico Mil Cumbres del Mioceno medio-superior (>12 Ma), 2. Secuencia de flujos piroclásticos del Mioceno “Cantera de Morelia” (12Ma), 3. Complejo volcánico del Punhuato (Mioceno), 4. Secuencia fluvio-lacustre Cuitzeo-Morelia del Mioceno-Plioceno, 5. Vulcanismo del Corredor Tarasco (Cuaternario), 6. Paleosuelos y tepetates y 7. Suelos. En cuanto a las fallas, en la ciudad de Morelia se han reconocido dentro de la zona urbana y de norte a sur las siguientes: 1. El Realito, 2. La Soledad, 3. La Colina, 4. Central Camionera, 5. Cuautla, 6. Torremolinos, 7. Chapultepec y



8. La Paloma. Todas las estructuras geológicas además de seguir la dirección regional son fallas de tipo normal.

- Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007). En esta investigación se menciona que en la ciudad de Morelia, Michoacán, la sobreexplotación del acuífero se lleva a cabo a través de 105 pozos profundos, en dichos pozos, se desarrolló un análisis para determinar el abatimiento (2006) del nivel freático en cada uno de ellos, así como una proyección para el año 2010. Con el mencionado análisis se obtuvo una media anual del abatimiento de 2.46 m para el sistema acuífero de la ciudad; se identificó un periodo de recarga de dicho sistema (1997-1999), producto de las intensas lluvias, también se descubrió que en la parte NE de la ciudad, el sistema acuífero está conformado por dos acuíferos. Al relacionar los resultados del análisis realizado con los fallamientos, se apreció que la media del nivel freático de los bloques que se hunden en cada uno de los fallamientos es menor que la de los bloques que permanecen; producto del diferente espesor de sedimentos lacustres y fluviolacustres, a causa de la presencia de fallas geológicas y a su juego sinsedimentario. También se observó que en los bloques que se hunden en los fallamientos localizados en la parte NE de la ciudad, el agua es tomada del acuífero superficial, mientras que en los bloques que permanecen en el alto esta se extrae del acuífero profundo.
- Evaluación de la contaminación al acuífero, en la región Morelia – Capula, causada por el impacto de la infiltración de lixiviados generados por el basurero municipal de la ciudad de Morelia (Verduzco, 2010). El estudio evalúa si existe contaminación directa al acuífero, determinando las tendencias de migración de agentes ajenos al recurso hídrico, mediante la caracterización (físico-químico), evaluación y monitoreo de los aprovechamientos subterráneos y superficiales, así como la influencia de



los contaminantes vertidos en el tiradero de la región Morelia – Capula, da como resultado una base de datos físico- químicos e isotópicos de los pozos, además de información técnica sobre los abastecimientos, en la cual se reporta que en cuanto a los 11 parámetros evaluados son 21 fuentes las que tienen las condiciones óptimas para el consumo humano sin riesgo alguno (52.5% de las evaluadas); mientras que el caso de los metales pesados la situación es menos favorable ya que solamente las concentraciones de plomo cumplen con la normatividad vigente.

- Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia Michoacán, para una correcta planificación del territorio (Garduño *et al.*, 2011). Se dedujo que en la subcuenca de Morelia están presentes tres acuíferos: uno superficial (flujo local), de tipo libre, que se forma en las lavas de los volcanes semi-escudo y que dan lugar a los manantiales de La Colina, Mintzita, relacionado con las temperaturas bajas. Otro acuífero también de carácter libre, ubicado adentro de los depósitos fluvio-lacustres del Mioceno- Plioceno, con área de recarga hacia el oeste de la ciudad y descarga hacia el lago de Cuitzeo. Este acuífero actualmente se encuentra afectado por la sobreexplotación de pozos en el centro, oeste y suroeste de la ciudad. Se mencionan de manera puntual las medidas que se deben llevar a cabo para preservar el sistema acuífero como son, por mencionar algunas: detener la zona urbana hacia ambos volcanes. Los manantiales de La Mintzita y Manantiales-La Colina, Torreón Nuevo dependen de ello; iniciar estudios y monitoreo sistemático de los diferentes acuíferos, es decir sistematizar el monitoreo de los niveles estáticos, conocer el gasto de cada pozo, tener redes de monitoreo de pozos (triángulos de pozos), para obtener datos físicos y químicos del acuífero, monitorear las lluvias y hacer un estudio muy detallado de balance hidrológico.



- Análisis hidroquímico, modelación de flujo e interpretación del comportamiento del agua subterránea que abastece a la zona de Morelia, Michoacán México (Estrada, 2015). En este estudio se caracterizó la composición geoquímica de una red de monitoreo de pozos que abastecen de agua a la ciudad de Morelia, se analizó su calidad con respecto a las litologías existentes, su comportamiento dinámico y distribución espacio-temporal. Analizando principalmente la influencia de las fallas geológicas, concluyendo que la ubicación de los pozos es un referente importante para la calidad del agua. Las fallas funcionan como conductoras o drenes del acuífero en orientación SO-NE comunicando contaminantes antropogénicos con el acuífero. Los bloques funcionan como barreras en orientación N-S y como conductores de SO-NE. La geología de la zona, también influye en la calidad del agua y aportación de minerales y contaminantes.

En cuanto a las investigaciones realizadas en el acuífero en estudio se tiene un estudio elaborado por la CONAGUA (2015) en el que destacan los siguientes antecedentes:

- Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Morelia-Queréndaro, Michoacán (SARH, 1977). Este documento reporta la existencia de dos fuentes principales de agua subterránea, un acuífero granular y un acuífero basáltico. También indica espesores de 100 m en el valle de Morelia, y de 300 m en la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro.
- Estudio de exploración geofísica y actividades geológicas complementarias en la zona de Morelia-Álvaro Obregón, Michoacán (SARH, 1988). El estudio es una actualización del conocimiento geológico e hidrológico de los materiales del subsuelo con posibilidades de construir acuíferos susceptibles de explotación. Concluyen que en el subsuelo de la zona en que se encuentra ubicada la ciudad de Morelia, así como en las áreas circundantes, se manifiesta la existencia de un sistema acuífero de alta



productividad, alojado principalmente en las ignimbritas y tobas pumíticas de edad Plioceno Superior, así como en los derrames, brechas, aglomerados y conglomerados de composición basáltica y andesítica.

- Estudio geohidrológico cuantitativo del acuífero Morelia-Queréndaro, Mich. (CNA, 1990). En el estudio se llevó a cabo una actualización del inventario de aprovechamientos. Reportan una sobreexplotación del agua subterránea en el valle de Morelia provocando el descenso progresivo de los niveles del agua en el área localizada entre Cointzio y el poblado de Charo.
- Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero de Morelia-Queréndaro, Michoacán (CNA, 1993). Reportan una extracción de $100 \text{ mm}^3/\text{año}$ (incluye pozos y norias) distribuido de la siguiente manera: $40 \text{ mm}^3/\text{año}$ para uso agrícola, $53 \text{ mm}^3/\text{año}$ para abastecimiento de núcleos de población e instalaciones industriales y $7 \text{ mm}^3/\text{año}$ para uso doméstico y/o abrevadero. Los resultados indican que el incremento del bombeo provocaría el descenso de los niveles del agua, afectando el área de Morelia. En el acuífero se observan abatimientos desde 1977 en la zona de Morelia, del orden de 5 a 20 m.
- Registros de piezometría, acuífero Morelia-Queréndaro (CNA, 1997). Este expediente contiene una recopilación de planos de piezometría de estudios previos (SARH, 1990; entre otros). Contiene información litológica de 13 pozos y datos piezométricos de aprovechamientos que abastecen la ciudad de Morelia en el periodo Septiembre 1996 – Marzo 1997. El OOAPAS (Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia) dividió la información de niveles dinámicos en cinco zonas, 1) Zona Río Chiquito, destacando la Reserva Ocolucen con un nivel de 183.6 m; 2) Zona Prados Verdes, Mariano Escobedo II con un nivel de 154.2 m; 3) Zona Quinceo, Potrerillos con nivel de 190.2 m; 4) Zona Realitos, El Lago II con nivel de 157.1 m; 5) Zona Oriente de la ciudad, Enrique Ramírez II con nivel de 158.2 m. Los niveles estáticos se encuentran entre 2 y 98 m de



profundidad, los niveles dinámicos entre 21 y 215 m, el gasto entre 3 y 70 LPS y, la profundidad total de los pozos entre 25 y 350 m

- Estudio geohidrológico de la zona sur-poniente de Morelia (OOAPAS, 2006). El estudio tiene una extensión de 48 km², localizada en la zona sur-poniente de Morelia. El censo indica un total de 59 aprovechamientos de agua subterránea, de ellos 53 son pozos y 6 manantiales. 33 de los pozos son operados por el OOAPAS Morelia; se observa que los niveles estáticos de los pozos ubicados en la zona del valle varían de los 14 a los 45 m de profundidad y los pozos ubicados en la zona de las faldas del Quinceo varían de los 47 a los 110 m. Además se realizaron 20 sondeos eléctricos verticales. Reportan un volumen de agua subterránea disponible en el acuífero de 5'840,579.64 m³. El menor abatimiento se encuentra en la zona comprendida entre la población de San Juanito Itzícuaru y el Fraccionamiento Fuentes de Valladolid y hacia el sur de estos asentamientos. La calidad del agua subterránea es apta para el consumo humano en la zona centro y sur del valle aluvial, los pozos que en algunos parámetros rebasan lo establecido por la norma, se ubican al norte y oriente de la zona de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

El agua procedente de la lluvia fluye hacia los ríos y arroyos, y vuelve a la atmósfera por evaporación o transpiración, o se infiltra en el subsuelo para formar parte de las aguas subterráneas. Cuando el agua se infiltra a través de las grietas o los poros del terreno y las rocas, pasa a través de la llamada zona no saturada, que se caracteriza por la presencia tanto de aire como de agua en los espacios intersticiales del suelo. El agua vadosa, de la zona no saturada o de aireación no está disponible para el aprovechamiento humano, es decir, no se puede bombear. En la zona saturada los espacios intersticiales están completamente rellenos de agua. El agua de esta zona se llama agua subterránea, y su techo es el nivel freático. Hay una zona de transición entre las dos zonas mencionadas anteriormente que es la franja de capilaridad, en donde el agua sube por las pequeñas grietas como resultado de la atracción entre el agua y las superficies rocosas. La Figura 2 ilustra esta distribución (Masters, 2008).

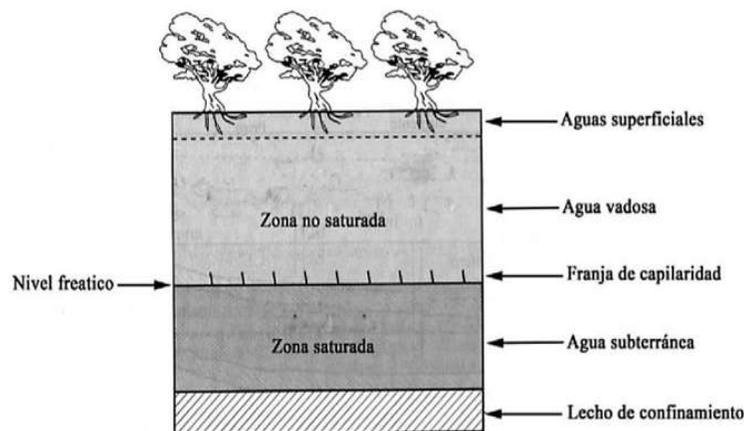


Figura 2. Clasificación de zonas subsuperficiales (Masters, 2008).

2.1. Ciclo hidrológico

Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin; y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la

atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la Tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la Tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar (Masters, 2008).



Figura 3. Ciclo hidrológico. La ciencia del agua para las escuelas (Pastor, 2011).



2.2. Agua subterránea

El agua subterránea constituye una porción del agua que circula a través del ciclo hidrológico; esta proviene de la infiltración o percolación a través de la superficie de la Tierra, después de lo cual se transporta lentamente a grandes distancias hasta que nuevamente regresa a la superficie por acción del flujo natural, de las plantas o el hombre. El agua subterránea origina el agua superficial y viceversa.

Podemos decir también que el agua subterránea es el agua que circula en la zona saturada de los acuíferos y que es posible de captar por obras de ingeniería (pozos, drenes, etc.) (Cerros, 2007).

Las aguas subterráneas suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, es más difícil de eliminar. Sucede esto porque las aguas del subsuelo tienen un ritmo de renovación muy lento. Se calcula que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación.

2.2.1. Importancia del agua subterránea

El agua subterránea es agua subsuperficial que ocupa vacíos presentes en formaciones geológicas, y constituye una de las fases o etapas del ciclo del agua. La cantidad de agua subterránea almacenada en las formaciones geológicas y la facilidad con la cual puede extraerse depende de dos factores físicos: la porosidad y la permeabilidad. El agua subterránea es ampliamente utilizada en regiones áridas y en islas, debido a la escasez de fuentes superficiales, pero debido al alto costo de los sistemas de abastecimiento de agua superficial, en los países de clima húmedo se ha comenzado a implementar también este recurso. El agua subterránea es la mayor fuente de agua dulce disponible, por lo cual más de la mitad de la población mundial la utiliza para su consumo; además posee un gran número de ventajas, ya que tiene excelente calidad natural, pues en general es



libre de patógenos, color y turbiedad, y puede ser consumida directamente sin tratamiento, o luego de realizarse un tratamiento sencillo; está ampliamente distribuida y se pueden desarrollar sistemas de abastecimiento en lugares muy próximos a los sitios donde se presenten las necesidades, evitando así la construcción de grandes sistemas de distribución; sus fuentes son confiables y en general no se afectan ante la presencia de sequías cortas; y puede incrementarse su desarrollo con el tiempo, de esta manera se evita la necesidad de almacenar grandes cantidades de agua (Vélez, 1999).

2.2.2. Definición de recarga

La recarga se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Balek, 1988). Es importante prestar atención en la estimación de la recarga de los acuíferos, ya que es necesario determinar la cantidad de agua que llega a ellos, su calidad, procedencia y las zonas donde se presenta recarga o descarga del flujo subterráneo, por este motivo su cuantificación es un aspecto incluido dentro de estudios referentes a los recursos de agua subterránea, al transporte de contaminantes, a la subsidencia o al diseño de campos de pozos (Isaar y Passchier, 1990).

2.2.3. Tipos de recarga

La recarga a un acuífero puede darse naturalmente debido a la precipitación, a las aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas



de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988; Simmers, 1990; Lerner, 1990; Custodio, 1997; Samper, 1997).

Lerner (1990) propone una clasificación similar pero un poco más completa sobre las fuentes de recarga:

1. Recarga directa o recarga difusa, proveniente del agua lluvia.
2. Recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros.
3. Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos.
4. Retorno de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución
5. Recarga Urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado

Lerner (1990) y luego Simmers (1997) definen la recarga localizada como una categoría intermedia la cual implica un movimiento horizontal del agua antes de que se dé el proceso de recarga.

Es importante saber que muchas de las técnicas existentes para determinar la recarga no cuantifican el valor real sino que estiman la recarga potencial, este término fue introducido por Rushton en 1988 y se refiere al agua que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático (Rushton, 1988; Scanlon *et al.*, 2002).

2.2.4. Método del balance hídrico para el cálculo de la recarga.

Para hacer el balance hídrico se aplica el principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido (volumen de control), definida por unas condiciones de frontera, durante un período de tiempo. La diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua. La



mayor parte de los métodos de balance de agua determinan la recarga a partir de los demás componentes, este tipo de balances se puede hacer en la zona superficial, en la no saturada y en la saturada (Samper, 1997).

Hay diferentes expresiones para calcular la recarga a partir de un balance hídrico según el volumen de control escogido y según las subdivisiones que se hagan a las entradas, salidas o cambios en el almacenamiento. La expresión más sencilla puede ser:

$$R = P - E_s - ET \Delta - S$$

Siendo:

R = recarga

P = precipitación

E_s = escorrentía

ET = evapotranspiración

ΔS = cambio en el almacenamiento

Esta ecuación es válida si se asume que la recarga es igual al flujo subterráneo o descarga y si se toma la precipitación (P) como única entrada al sistema, luego de asumir que la divisoria de la cuenca coincide con la divisoria de aguas subterráneas y por lo tanto, no hay entrada de flujo desde acuíferos vecinos (Freeze y Cherry, 1979).

2.3. Tipos de acuíferos

Acuífero: Del latín aqua=agua y fero=llevar, se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades (Custodio y Llamas, 2001).



Los acuíferos los podemos clasificar en:

Acuíferos libres no confinados o freáticos: Son aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto a presión atmosférica. La superficie libre se conoce como superficie freática y el nivel a que ella se eleva, respecto a otro de referencia, nivel freático. Está formado en general por un estrato permeable parcialmente saturado de agua que yace sobre otro estrato impermeable o relativamente impermeable (Custodio y Llamas, 2001).

Acuíferos cautivos, confinados o a presión: El agua de éstos se encuentra sometida a cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándolo totalmente (Custodio y Llamas, 2001).

Acuíferos semicautivos o semiconfinados: pueden considerarse como un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que la base y/o el techo que los encierra no sea totalmente impermeable sino un acuitardo, es decir un material que permita una filtración vertical de agua, muy lenta, que alimente el acuífero principal en cuestión, a partir de un acuífero o masa de agua situado encima o debajo del mismo. En la Figura 4 se ilustran los tipos de acuíferos antes mencionados (Custodio y Llamas, 2001).

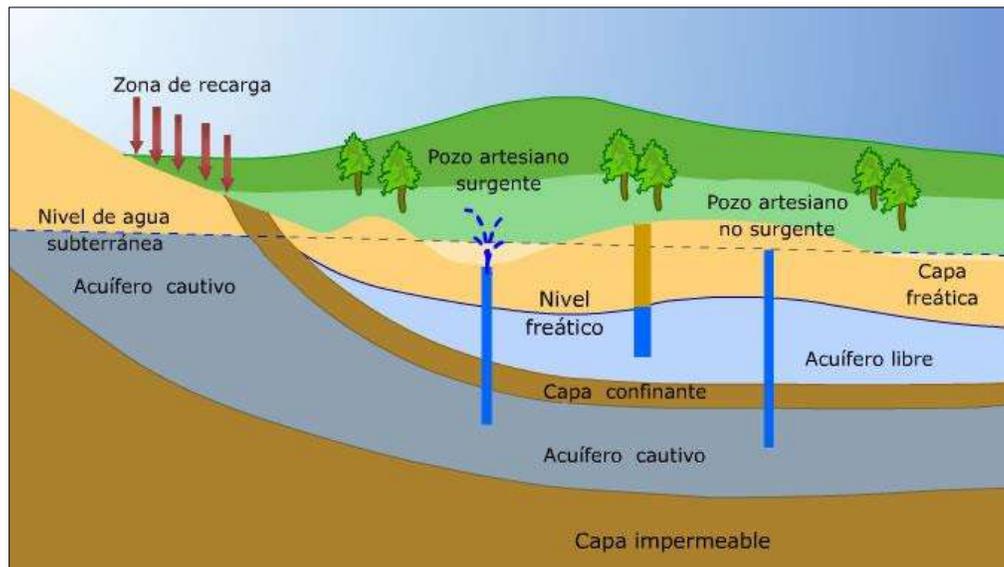


Figura 4. Tipos de acuíferos. Aguas subterráneas (Wikisabio, 2017).

2.4. Contaminación de los acuíferos

En la actualidad el concepto de contaminación no tiene una definición aceptada universalmente, Custodio y Llamas (1996) realizan una sugerencia de definición, y hacen una diferenciación entre lo que es la polución y lo que es la contaminación.

De esta manera, la polución del agua se refiere al caso en el que la composición o el estado de un curso de agua son directa o indirectamente modificados por la actividad del hombre, en una medida tal que su utilización se ve restringida para todos, o para algunos de aquellos usos para los que podría servir en su estado natural (Custodio y Llamas, 1996).

A diferencia de lo anterior, el concepto de contaminación del agua apunta a su calidad bacteriológica denominándose contaminada, y también cuando su alteración es tal que no puede ser utilizada para la bebida, porque afectara la salud del hombre (Custodio y Llamas, 1996).



Las causas de la contaminación de las aguas pueden ser de dos tipos (Mena y Montes, 2010):

- Contaminación debida a causas naturales: se debe principalmente a sustancias químicas como el arsénico y flúor que se originan a partir de la disolución en los sedimentos de partículas de origen volcánico.
- Contaminación debida a actividades humanas: Sobre esta podemos mencionar la ocasionada por: residuos sólidos urbanos, aguas residuales, actividades agrícolas, ganadería, actividades industriales y mineras, entre otras.

2.4.1. Formas de contaminación de las aguas subterráneas

Las fuentes de contaminación de aguas subterráneas son diversas, y se diferencian según el tipo de contaminante y la forma en que emiten dicha contaminación, de esta manera, Foster *et al.* (2002) hacen la diferencia entre fuentes que generan contaminación difusa, y fuentes que generan contaminación puntual, las cuales poseen las siguientes características:

- Fuentes de contaminación difusas: Son aquellas fuentes que no generan una pluma de contaminación claramente definida y que impactan extensamente al acuífero, entre estas fuentes se encuentran las actividades agrícolas y el saneamiento in situ.
- Fuentes de contaminación puntual: Son aquellas fuentes que al emitir un contaminante al acuífero forman una clara pluma de contaminación en el. Estas fuentes cuando se concentran en un área relativamente reducida en extensión, pueden actuar como fuentes difusas, algunos ejemplos de esto son: los residuos industriales, los vertederos, los estanques de almacenamientos de combustible.

Además de esta clasificación, Custodio y Llamas (1996) hacen la distinción entre las actividades que generan una contaminación directa hacia el acuífero, y las que



lo hacen indirectamente teniendo cada una de estas formas las siguientes características:

Contaminación directa del acuífero: Este tipo de contaminación se caracteriza por no haber dilución, puesto que se introducen las sustancias contaminantes directamente en el acuífero.

Contaminación indirecta del acuífero: Este tipo de contaminación se caracteriza por presentar dilución, y se produce cuando las sustancias contaminantes ingresan al acuífero a través de la recarga natural, o por entradas de aguas contaminadas debido a la alteración de las condiciones hidrodinámicas preexistentes, tales como las producidas por los bombeos o los drenajes.

2.4.2. Principales contaminantes de las aguas subterráneas

Las sustancias que alteran la constitución de las aguas subterráneas son diversas, Custodio y Llanos (1996) proponen una clasificación indicando cuales son los principales contaminantes. Tal clasificación es la siguiente:

- Contaminantes minerales.
- Contaminantes minerales metálicos y de elementos menores.
- Contaminantes radioactivos.
- Contaminantes por derivados del petróleo.
- Contaminación por detergentes.
- Contaminación por compuestos nitrogenados.
- Contaminación por pesticidas.
- Contaminación por compuestos.

2.4.3. Peligro de contaminación de aguas subterráneas

El peligro de contaminación de aguas subterráneas, posee el mismo significado que el término riesgo utilizado por Foster *et al.* (1987) definiendo al riesgo como el peligro de deterioro en la calidad de un acuífero, por la existencia real o potencial



de sustancias contaminantes en su entorno. El cambio de terminología realizado en publicaciones más recientes, se debió a la necesidad de adaptar el concepto de riesgo con lo que actualmente se comprende con el mismo término en otras disciplinas, en donde el riesgo es el resultado del peligro adaptado a la escala del impacto a la salud humana, animal, o a los ecosistemas (Foster *et al.*, 2002).

De esta manera el término peligro aplicado a la contaminación de aguas subterráneas, no considera los impactos potenciales a la salud humana o a los ecosistemas acuáticos que dependen del acuífero, y puede definirse como la probabilidad de que un acuífero experimente impactos negativos a partir de una actividad antrópica, hasta un nivel en que su agua subterránea se torne inaceptable para el consumo humano, de acuerdo a los valores guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua potable (Foster *et al.*, 2002).

El peligro de contaminación de las aguas subterráneas en cualquier área se determina considerando la interacción entre dos variables, las cuales son independientes entre sí, como se demuestra en la Figura 5.

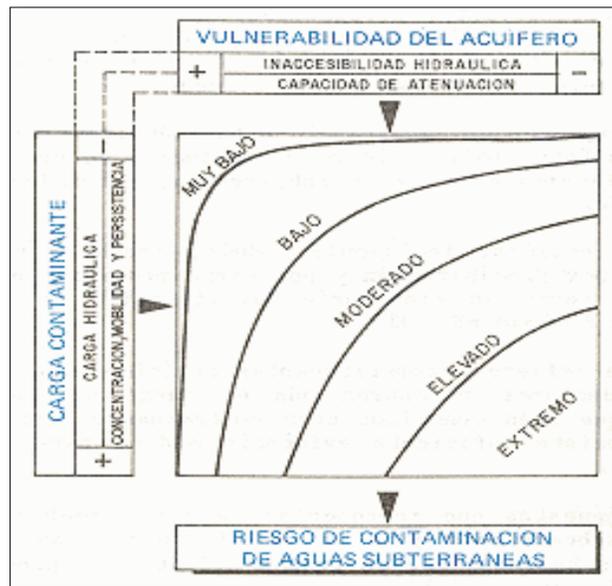


Figura 5. Esquema conceptual para la evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Foster e Hirata, 1991).

2.5. Vulnerabilidad de acuíferos

El término vulnerabilidad del acuífero a la contaminación representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta. Es, en efecto, lo inverso a la capacidad de asimilación de contaminantes de un cuerpo receptor de agua superficial, con la diferencia que los acuíferos tienen una cubierta de substratos que proporciona una protección adicional (Foster, 1987).

El hecho que este riesgo pueda convertirse en una seria amenaza a la calidad de abastecimiento de agua subterránea ya desarrollado o por desarrollar, dependerá de la movilidad de los contaminantes dentro del acuífero mismo. De esta manera, la vulnerabilidad es función de varios factores hidrogeológicos que determinan la capacidad de respuesta, entre ellos: tendencia a la infiltración de contaminantes; capacidad de atenuación en las diversas capas que lo cubren, que tienden a



proteger al acuífero, purificando el agua a medida que percola por la zona vadosa en algunos casos (Foster, 1987).

La vulnerabilidad del acuífero es una función de:

(a) La inaccesibilidad de la zona saturada, en un sentido hidráulico, a la penetración de contaminantes.

(b) La capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero como resultado de su retención física y reacción química con contaminantes.

Los componentes de la vulnerabilidad del acuífero interactúan con los componentes de la carga contaminante, los cuales serían los siguientes:

(a) El modo de disposición del contaminante en el subsuelo, y en particular la magnitud de cualquier carga hidráulica asociada.

(b) La clase del contaminante en términos de su movilidad y persistencia.

Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace que unas áreas sean más susceptibles que otras, por esto existen zonas de mayor o menor sensibilidad o vulnerabilidad. Tomando en cuenta estos criterios es posible determinar la vulnerabilidad relativa en una determinada área de estudio.

Al realizarse una evaluación de la vulnerabilidad en una zona determinada, se debe tener presente ciertos principios que encierra este concepto. Tenerlos presentes ayudarán a dar una correcta interpretación de los resultados. Carbonell *et al.* (1993) señalan algunos de estos principios indicando lo siguiente:

- Toda agua subterránea es vulnerable.
- Toda evaluación de la vulnerabilidad es inherentemente incierta.



- Lo que es obvio puede quedar enmascarado, y lo que es sutil resulta indistinguible.

Además, Foster e Hirata (1988) agregan lo siguiente:

- La vulnerabilidad general a un contaminante universal en un escenario típico de polución es un concepto vacío.
- Todos los acuíferos son vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes y móviles.
- Los acuíferos menos vulnerables no son fácilmente contaminados, pero una vez que lo están son mucho más difíciles de restaurar.

2.5.1. Vulnerabilidad intrínseca y específica

La vulnerabilidad puede ser intrínseca o específica; la primera, que es la utilizada en el presente trabajo, se refiere al riesgo potencial de contaminación del agua subterránea por contaminantes generados por actividades humanas y es independiente de la naturaleza del contaminante (Gogu y Dessargues, 2000). Está dada por las características ambientales (hidrológicas, geológicas y geofísicas) del terreno de manera independiente al tipo de contaminante que represente un potencial peligro o amenaza en la región. Es decir, se trata de la evaluación de la capacidad de respuesta en general que tiene el sistema cuando no se consideran los factores externos y tiene una validez genérica. Se determina a través de la evaluación de tres factores, principalmente: (1) la capacidad de atenuación de la carga contaminante que ocurre en el suelo, en la zona no saturada y en la zona saturada; (2) la resistencia o la inaccesibilidad en el sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes; y (3) los factores externos que puedan facilitar o retardar el impacto de las cargas contaminantes, como la pendiente del terreno y la recarga del acuífero que son valores indicativos (cualitativo) y no cuantitativos, por lo tanto, los resultados que se obtienen de su evaluación son relativos y adimensionales.



La vulnerabilidad específica, hace referencia a la evaluación de un sistema cuando se considera su capacidad de respuesta a uno o varios contaminantes específicos y por tanto, tiene en cuenta de manera explícita las características de los factores externos (Ej. climatología o actividades antrópicas en la región) y de los contaminantes a considerar (Ej. características químicas y bioquímicas de las sustancias y su interacción con los componentes del medio subterráneo). De este modo, la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación es una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo (Foster, 1987).

2.5.2. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos

Existen diversos métodos para la evaluación de la vulnerabilidad, los cuales incluyen más o menos parámetros en sus aplicaciones, siendo algunos de estos parámetros características propias de los acuíferos, y otros características del ambiente en los cuales se insertan. En este sentido Vrba y Zaporozec (1994) hacen una distinción entre los parámetros principales y los parámetros secundarios en la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Los principales serían aquellos correspondientes a las características propias de los acuíferos y serían los siguientes:

- La recarga.
- El suelo.
- La zona no saturada.
- El acuífero.

Los parámetros secundarios serían aquellas características del medio en donde se encuentran insertos los acuíferos, tales como:

- La topografía.
- La naturaleza de la unidad geológica subyacente del acuífero.
- El contacto con las aguas superficiales, o aguas de mar.



Los métodos utilizados para la predicción de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, pueden ser clasificados en tres grupos (Otalvaro, 1996):

- Métodos basados en procedimientos: utilizan modelos matemáticos para analizar y simular los procesos que gobiernan el transporte de contaminantes en la subsuperficie.
- Métodos estadísticos: utilizan grupos de variables que condicionan la vulnerabilidad de la contaminación de los acuíferos, proporcionando conclusiones según la asociación que presenten éstas áreas.
- Índices y estimadores agregados: combinan un conjunto de características o atributos físicos del suelo, la zona no saturada y los acuíferos, a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad. Son los más usados por su mayor flexibilidad, en cuanto al conocimiento básico de la zona, aceptando ciertas estimaciones en caso de contar con información insuficiente. Los más utilizados son: el método GOD, propuesto por Foster (1988), DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), AVI (Van Stempvoort, 1992) y SINTACS (Civita *et al.*, 1990).

2.6. Cartografía de la vulnerabilidad de los acuíferos.

La forma más adecuada de representar los parámetros durante una evaluación de vulnerabilidad, y los resultados que se obtienen de tal evaluación, es a través de mapas. La escala del mapa condicionará su fiabilidad, ya que los datos requeridos se obtienen con distintos grados de precisión dependiendo de la extensión del área que se pretende evaluar. Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles de sensibilidad permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran un área (Bessouat *et al.*, 2001).



Para realizar estos mapas se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG), que es una herramienta diseñada para consultar, manipular y aplicar los datos de: información geográfica, cartografía digital, bases de datos de atributos y estadísticas, de una manera simultánea y automatizada (López y Granados, 2000).

Dado que un mapa de vulnerabilidad de aguas subterráneas es la representación gráfica de los resultados obtenidos en una evaluación, en donde se relacionaron y se ponderaron factores de distinta naturaleza y que apunta a un objetivo determinado, su utilización requiere de una adecuada interpretación. Por tales motivos Custodio (1995) enfatiza que al momento de hacer uso de un mapa de vulnerabilidad, se debe tener claro los siguientes aspectos:

- Los resultados que representa deben ser considerados como orientaciones.
- El significado de los resultados representados en el mapa, cambia con el contaminante o tipo de contaminante que se considere.
- Cualquier propuesta de decisión territorial debe ir acompañada de un dictamen de expertos.
- Cualquier autorización para la localización de actividades potencialmente contaminantes y sus restricciones, deben ser objeto de un estudio de detalle.
- Las decisiones tomadas con sólo el apoyo de las indicaciones del mapa, pueden llegar a diferir grandemente de la realidad a nivel local.
- Que menor vulnerabilidad no quiere decir menor necesidad de protección, y a lo más, sólo quiere decir menor prioridad en las acciones de protección.

2.7. Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica permiten el manejo confiable de una gran cantidad de datos y la elaboración de escenarios dinámicos, en el plano o en el espacio en tiempo real. A través de estos sistemas los mapas para evaluación de



vulnerabilidad, los cuales implican la superposición de diversos factores que influyen en el fenómeno, pueden ser regularmente actualizados en un tiempo relativamente corto (Escobar *et al.*, 2002)

Un SIG es un conjunto informatizado de datos, que representa la realidad posibilitando la modelización de eventos a futuro, es decir; un conjunto de datos referenciados a puntos territoriales o espaciales que permiten la obtención de información indispensable para todo tipo de planificación y evaluación de gestión (OAS, 1993).

2.8. Interpolación

La interpolación es un procedimiento matemático utilizado para predecir el valor de un atributo en una locación precisa a partir de valores del atributo obtenidos de puntos vecinos ubicados al interior de la misma región. A la predicción del valor de un atributo en lugares fuera de la región cubierta por las observaciones se le llama extrapolación. Se utiliza interpolación para transformar un número finito de observaciones, obtenidas en base a ubicaciones geográficas precisas, a un espacio continuo de manera que el patrón espacial presentado por las observaciones puntuales pueda ser comparado con los patrones espaciales de otras variables bajo consideración (Burrough y McDonnell 1998).

La interpolación es necesaria:

- a) Cuando la superficie rasterizada (GRID) tiene una resolución que es diferente de la resolución pedida.
- b) Cuando una superficie continúa es representada por un modelo que es diferente al necesitado.
- c) Cuando los datos no cubren toda la región de interés de estudio.

Las superficies continuas obtenidas por medio de métodos de interpolación pueden ser utilizadas en un SIG tanto como capas temáticas o ser visualizadas



individualmente. Para su representación se utiliza normalmente mallas regulares (ráster), líneas de contorno o TINs (redes de triángulos irregulares). Debido a que una superficie interpolada varía continuamente en el espacio, las técnicas de compresión de datos como los "runlength codes" y "quadtrees" no son apropiados para su representación. Es también importante comprender que aunque una superficie interpolada muestra variaciones en sus tres ejes, (X, Y de sus coordenadas y el eje Z del atributo interpolado), ellas no son consideradas una representación en tres dimensiones (3D). El término 3D es reservado por situaciones donde el atributo varía continuamente a través del marco de referencia en 3D. La representación y visualización de datos en 3D requieren programas especiales que normalmente no son disponibles en un SIG estándar (FAO, 2003).

La hipótesis básica de la interpolación espacial es: la observación común que, en promedio, da valores a un atributo dentro de una vecindad en el espacio tienen una fuerte probabilidad de ser similares (variables regionalizadas y dependencia espacial) y que esta probabilidad disminuye respecto a valores de una vecindad separados por una gran distancia (FAO, 2003).

La exactitud de los resultados obtenidos por interpolación está asociada principalmente a las estrategias de muestreo y al cumplimiento de las hipótesis estadísticas de los modelos utilizados, en especial aquellas relacionadas con la estructura espacial de los atributos en estudio. Estos aspectos comúnmente son tratados a través del análisis estadístico exploratorio, cuyo objetivo es describir las características globales del conjunto de datos y detectar patrones de regularidad espacial (Kitanidis, 1997). El análisis exploratorio permite detectar problemas de representatividad en el muestreo, describir la existencia de dependencia espacial en los datos, ajustar un modelo de representación de esta dependencia y estimar el error asociado antes de aplicar un algoritmo de interpolación espacial. Para ello, se han desarrollado diversas herramientas como las descripciones estadísticas básicas del ámbito univariado, análisis gráficos y descripciones espaciales basadas en el estudio de la covarianza, semivarianza y autocorrelación espacial



(Isaaks y Srivastava 1989; Goovaerts, 1997; Kitanidis, 1997). Es importante destacar que la realización de una interpolación espacial, con un análisis estadístico exploratorio previo, permite asegurar la calidad de los resultados obtenidos.

La literatura describe diferentes métodos de interpolación. En forma general, ellos son clasificados en globales y locales, de acuerdo a la cantidad de información que utilizan, y en exactos e inexactos, de acuerdo al valor de las estimaciones respecto a los datos de origen (Tabla 1), (Lam, 1983; Burrough y McDonnell 1998).

Tabla 1. Clasificación de diferentes métodos de interpolación espacial (Lam, 1983; Burrough y McDonnell, 1998).

Método	Global/Local	Tipo de interpolación
Clasificación	Global	Inexacta
Superficies de tendencia	Global	Inexacta
Modelos de regresión	Global con refinamiento local	Inexacta
Polígonos de Thiessen	Local	Exacta
Interpolación lineal	Local	Exacta
Inverso de la distancia y medias móviles	Local	Inexacta cuando se aplica un suavizamiento de la superficie interpolada
Splines	Local	Exacta, con un refinamiento limitado
Kriging	Local, pero con un variograma global	Exacta
Simulación condicional	Local, pero con un variograma global	

2.8.1. Método IDW (Gravitacional o Inverso de la Distancia)

El método IDW combina la idea de vecindad con la idea de un cambio gradual de las superficies con una tendencia. Se supone que el valor del atributo Z en una posición donde el valor del atributo no es conocido es un promedio de los valores de sus vecinos pero donde los vecinos más cercanos tienen más importancia que los más alejados. Cada punto de la muestra ejerce una influencia sobre el punto a determinar y disminuye en función de la distancia. Así cada punto vecino contará



con un "peso" en la determinación de la cota del punto a interpolar, que será mayor cuanto más cerca se encuentre, siguiendo el principio de correlación espacial. IDW se presenta en Spatial Analyst como dos opciones: Con un radio de búsqueda fijo y un radio de búsqueda variable. Para el primero de ellos el radio del círculo usado para buscar entradas de puntos es igual para cada celda interpolada. Para especificar una cantidad mínima se puede asegurar que dentro del radio fijo, al menos un número mínimo de puntos de entrada será usado en el cálculo de cada celda interpolada (Esri, 2017).

2.8.2. Método Kriging

Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z . A diferencia de otros métodos de interpolación implica una investigación interactiva del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida. Kriging, está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones (Esri, 2017).

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie.

La herramienta Kriging en un Sistema de Información Geográfica ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de



varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología (Esri, 2017).

El método Kriging es similar al de IDW en que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos (Esri, 2017).

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Dónde:

$Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i

λ_i = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i

S_0 = la ubicación de la predicción

N = la cantidad de valores medido

En IDW, la ponderación, λ_i , depende exclusivamente de la distancia a la ubicación de la predicción. Sin embargo, con el método Kriging, las ponderaciones están basadas no solo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos. Para utilizar la disposición espacial en las ponderaciones, la correlación espacial debe estar cuantificada. Por lo tanto, en un Kriging ordinario, la ponderación, λ_i , depende de un modelo ajustado a los puntos medidos, la distancia a la ubicación de la predicción y las relaciones espaciales entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción. En las siguientes secciones se describe cómo se utiliza la fórmula general de Kriging para crear un mapa de la superficie de predicción y un mapa de la precisión de las predicciones (Oliver, 1990).

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación

3.1.1. Macro localización.

El estado de Michoacán se localiza en el extremo sur occidental de la mesa central de México. Se ubica entre las coordenadas $20^{\circ} 23' 27''$ y $17^{\circ} 53' 50''$ de latitud norte y entre $100^{\circ} 03' 32''$ y $103^{\circ} 44' 49''$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Limita al norte con los estados de Jalisco y Guanajuato, al noroeste con el estado de Querétaro, al este con los estados de México y Guerrero, al oeste con el Océano Pacífico y los estados de Colima y Jalisco, al sur con el Océano Pacífico y el estado de Guerrero. Está dividido en 113 municipios. Se ubica entre los ríos Lerma y Balsas, el lago de Chapala y el Océano Pacífico (Figura 6). Este estado forma parte del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur. Tiene una superficie de $59,864 \text{ km}^2$. La entidad cuenta con 213 km de litoral y $1,490 \text{ km}^2$ de aguas marítimas; cuenta con una población aproximada de 3'985,667 habitantes (INEGI, 2010).

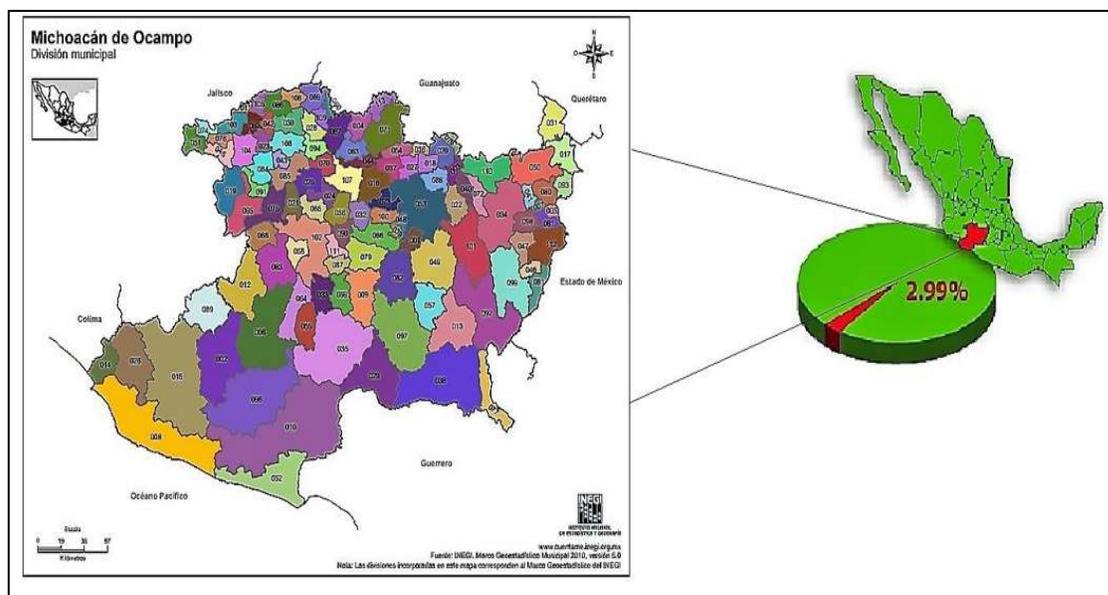


Figura 6. Macro y micro localización del estado de Michoacán (INEGI, 2010).



Desde un punto de vista geohidrológico, la ciudad de Morelia se localiza en una sub-cuenca fluvio-lacustre comprendida dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo; tectónicamente la estructura en la que se encuentra la ciudad es un semi-graben, delimitado al sur por la falla La Paloma que, de acuerdo a su dirección, origen y posición geográfica, forma parte del sistema de fallas OSO-ENE Acambay-Morelia, producto de un régimen transtensional y también relacionado a la subducción de la placa de Cocos que subduce a la placa de Norte América (Demant, 1981). En este contexto, la SMC constituye el alto estructural (horst) que separa hacia el norte a las depresiones lacustres de la CVTM y hacia el sur a la depresión de Tierra Caliente (Israde- Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Desde el plano morfológico la ciudad de Morelia ha crecido en una serie de lomeríos, valles y sierras que han sido labrados por las fallas y el vulcanismo de la CVTM. El semi-graben donde se ubica la ciudad de Morelia se caracteriza por un sistema de 10 fallas (Figura 8), las cuales cuentan con evidencias de actividad de subsidencia actual, tres de ellas con evidencias o antecedentes de actividad sísmica actual o histórica (La Paloma, Central y Tarímbaro). El evento más reciente, hasta ahora caracterizado, ocurrió hace más de 750 mil años (Pleistoceno Medio). Las fallas de la región de Morelia tienen una dirección N85°E y algunas con orientación N55°E, en todas los planos inclinan hacia el norte. La estructura mayor, conocida como la falla La Paloma, mide 13 km de longitud y muestra una forma escarpada con un desnivel máximo de 180 m (Garduño *et al.*, 2014).

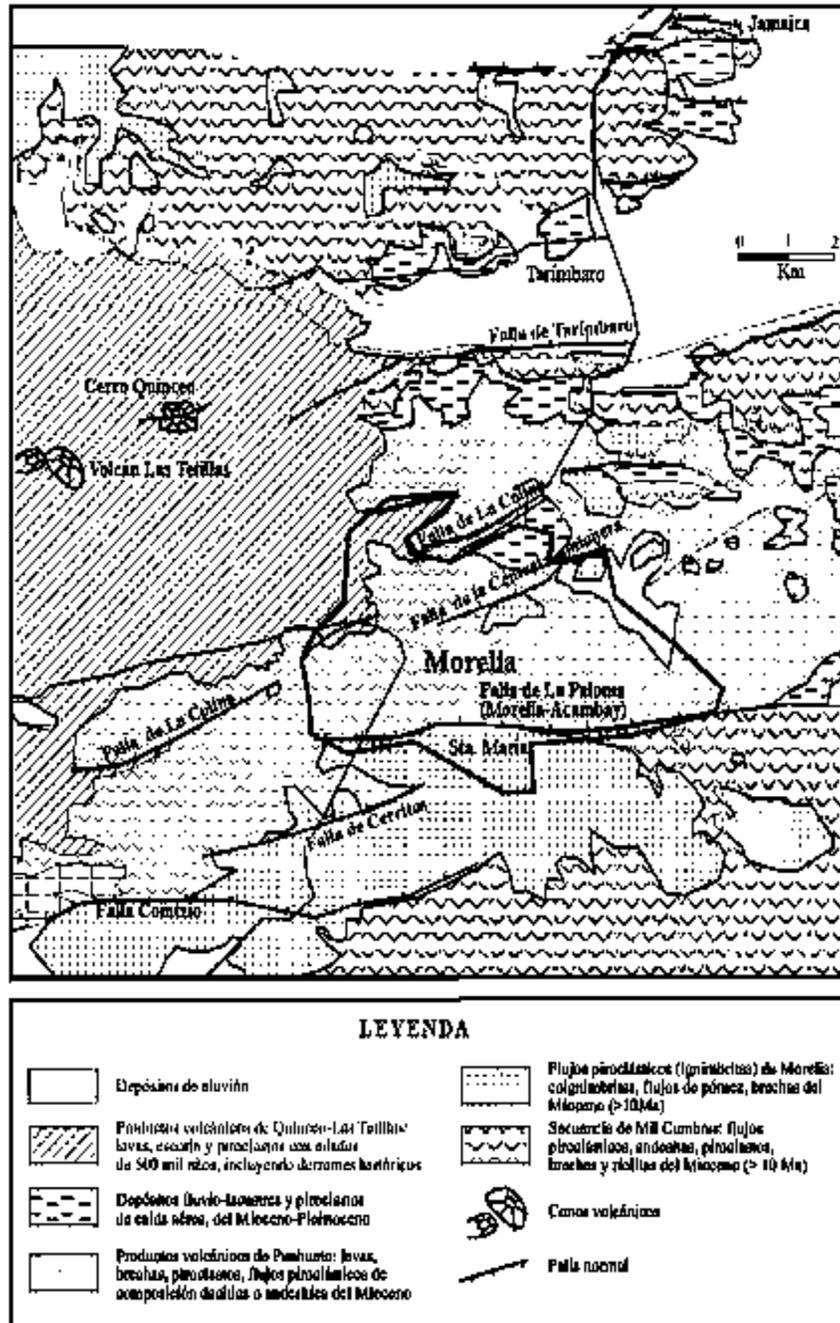


Figura 8. Mapa geológico de la zona de Morelia. Donde se pueden observar las unidades correspondientes a la Sierra de Mil Cumbres y las unidades del Cinturón Volcánico Mexicano. También sobresalen las fallas regionales NE-SW y E-W, las cuales son paralelas a las estructuras que dañan a la mancha urbana. Hay que destacar que una gran parte de Morelia se localiza en zona de antiguos lagos, ahora cubiertos por depósitos de aluvión (Garduño *et al.*, 2001).

3.3. Delimitación de la zona de estudio.

La región Morelia - Capula se ubica entre los paralelos $19^{\circ}46'06''$ y $19^{\circ}40'25''$ de latitud norte y $101^{\circ}11'22''$ y $101^{\circ}23'36''$ de longitud oeste, encontrándose por arriba de los 2,150 msnm. El principal interés por esta zona de estudio es el desmesurado crecimiento de la mancha urbana, la localización del manantial la Mintzita, así como la localización de zonas propensas a la contaminación del acuífero como el tiradero municipal y la industria papelera por mencionar algunos. La Figura 9 muestra la delimitación de la zona en estudio.

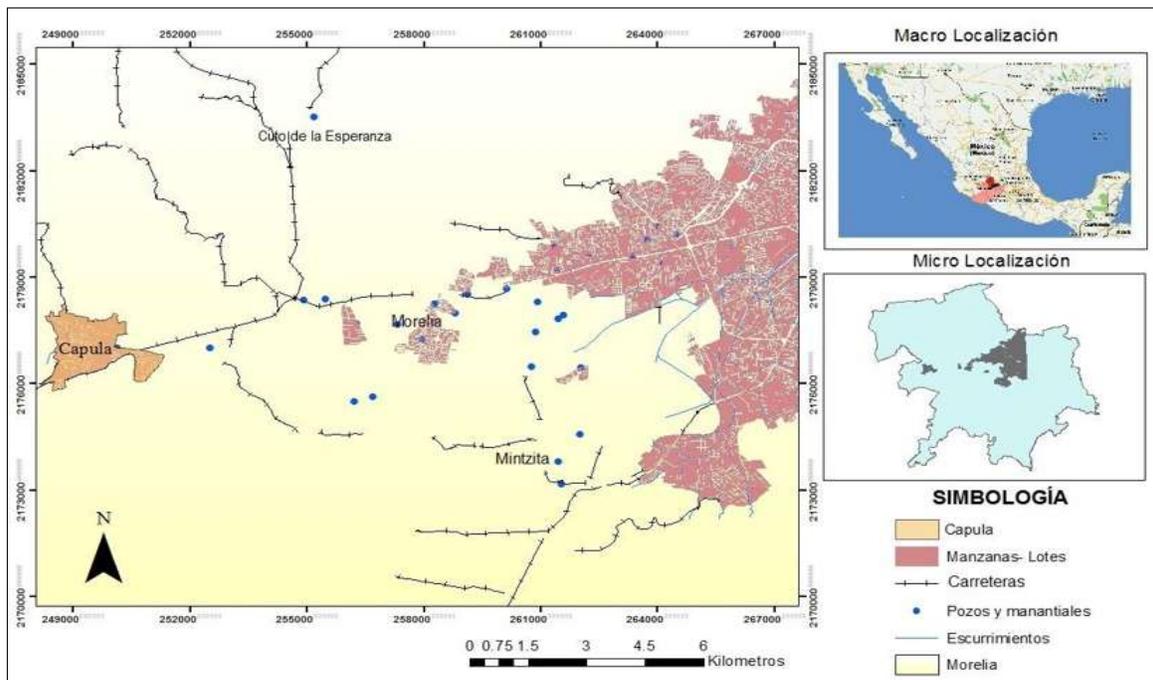


Figura 9. Zona de estudio.

3.4. Clima

La ciudad de Morelia tiene un clima templado con humedad media C (w1), con lluvias en verano de entre 700 y 1000 mm de precipitación anual y lluvias invernales de 5 mm anuales promedio. La temperatura media anual oscila entre los 14 y 18°C. Los vientos predominantes vienen del suroeste y del noroeste, con



variables en julio, agosto y octubre e intensidades de entre 2 y 14.5 km por hora (SEGOB, 2002).

En el municipio de Morelia se reporta precipitación media anual de 796.25 mm, menor en comparación con la evaporación media anual de 1,726.45 mm (4.43 mm/día) determinada por la insolación cuya media anual registrada es de 2746 horas con 29 minutos, por lo que el agua superficial y de los acuíferos depende de la infiltración que se realiza a través de la región hidrológica (H. Ayuntamiento de Morelia, 2004).

3.5. Infraestructura Carretera

La zona poniente de la ciudad de Morelia, al igual que el resto de las zonas periféricas de la ciudad, carece de infraestructura vial, puesto que las principales infraestructuras son las vías de comunicación que la delimitan: principalmente al oriente a través del periférico Independencia (libramiento de Morelia) además de las vialidades regionales de salida a Guadalajara al norte, al sur por la avenida La Huerta y vialidad regional a Pátzcuaro, y al poniente con la vialidad vecinal de Coitzio.

3.6. Fisiografía y topografía

El municipio de Morelia está localizado en la provincia fisiográfica denominada Arco Volcánico Transmexicano; la zona poniente de Morelia está ubicada en las subprovincias Neovolcánica Tarasca y Sierras y Bajíos Michoacanos (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).

Esta zona está conformada por un rango altitudinal variable que va de los 1800 hasta los 2200 msnm que van en dirección sureste a noroeste, siendo la parte más alta la correspondiente al Cerro Pelón con una altitud de 2400 msnm. La parte correspondiente a la zona urbana abarca un rango de altitud de los 1800 hasta los 2100 msnm con pendientes que van de 0 a 15%, que son consideradas



como condiciones aptas para funciones urbanas totales o condicionadas, en virtud de que aquellas zonas con pendientes menores a 5% pueden ser zonas susceptibles a inundaciones, mientras que las zonas con pendientes 5.15% son aptas para el desarrollo de zonas habitacionales de mediana y alta densidad así como zonas aptas para la industria (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).

La zona que presenta pendientes de 0 a 3% tiene un sistema de topografía de llanura aluvial, mientras que en zonas de mayor pendiente se encuentran tres sistemas: sierra volcánica con estrato volcanes al sur, escudo volcanes del centro al norte, y meseta basáltica con lomerío y malpaís al noroeste, Figura 10 (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).

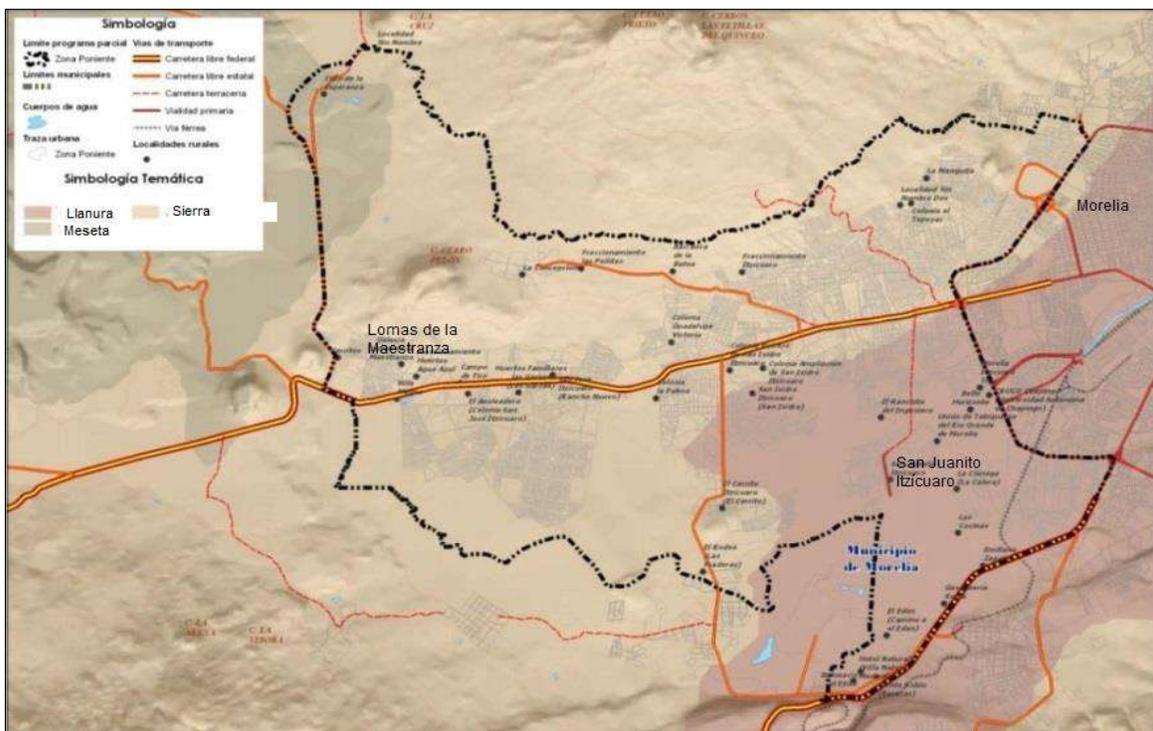


Figura 10. Topografías de la zona poniente de Morelia (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).



3.7. Hidrografía

El municipio de Morelia se ubica en la región hidrográfica Número 12, conocida como Lerma-Santiago, que a su vez forma parte de la cuenca denominada Pátzcuaro-Cuitzeo y Lago de Yuridia, y de la subcuenca Lago de Cuitzeo. Sus principales corrientes fluviales son el río Grande y río Chiquito, los arroyos Atécuaro, la Huerta y Refugio, así como la presa Cointzio. Los arroyos más conocidos son el de La Zarza y La Pitaya (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).

La topografía es parte fundamental en la captación de los recursos hidrológicos en todo el municipio de Morelia. Las diferentes alturas generan escurrimientos de agua, con lo cual se forman cuerpos naturales de agua, tanto superficiales como subterráneos (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).

De acuerdo con el modelamiento de las unidades de escurrimiento del municipio, se definió la zona Poniente de Morelia una unidad de escurrimiento en la cual los flujos de los escurrimientos corren de norte a sur (Fig. 11), recibiendo los escurrimientos e infiltración en su parte norte provenientes de los cerros Las Tetillas del Quinceo, Cerro Prieto y el Cerro Pelón. Al sur de la zona de estudio se encuentra el manantial de La Mintzita, que se localiza al suroeste de la ciudad de Morelia (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).

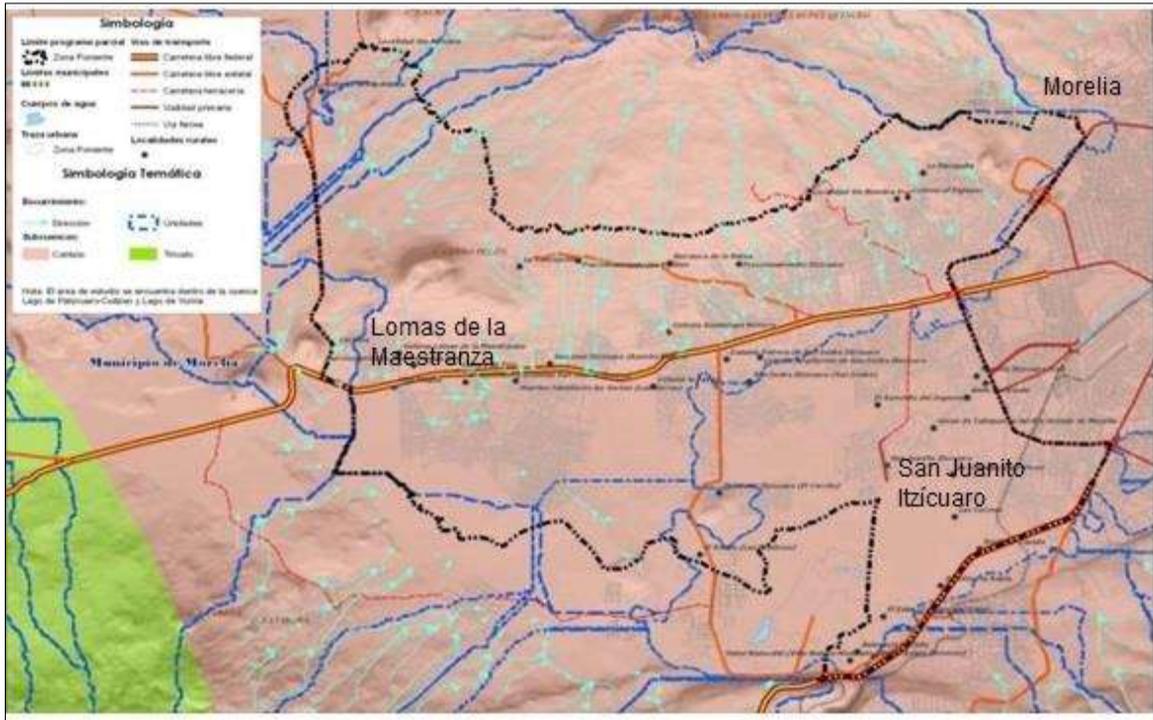


Figura 11. Hidrología superficial de la zona poniente de Morelia (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).

3.8. Geología

Las características estructurales, litológicas y geomorfológicas están relacionadas en gran parte con una intensa actividad volcánica, la cual emitió rocas ígneas extrusivas de tipo piroclástico con tal fuerza que originó que algunas de ellas rodaran ladera abajo, arrastrando y mezclando fragmentos de rocas preexistentes, originando depósitos de rocas soldadas caracterizadas por presentar zonas distintas en cuanto a su textura, estructura y grado de compactación (H. Ayuntamiento de Morelia, 2012).

La zona de estudio pertenece a la cuenca de Cuitzeo caracterizada por mostrar una morfología donde alternan altos y fosas tectónicas E-O y NE-SO. La secuencia lacustre y fluviolacustre que aflora en las inmediaciones meridionales del lago de Cuitzeo sobreyace el sustrato volcánico de composición andesítica



(Israde-Alcantara, 1999). La región poniente de Morelia presenta rasgos estructurales de dirección NE-SW.

Por medio de la información de los pozos perforados en el poniente de la ciudad de Morelia, de mapas geológicos y trabajo en campo se identifica la estratigrafía en las siguientes unidades (Garduño-Monroy *et al.*, 2014):

Andesitas de Mil-Cumbres del Mioceno medio-superior (>12 Ma). Esta unidad es caracterizada por un paquete de lavas andesíticas gris-verdosas intensamente alteradas y fracturadas con presencia de vetillas de calcita o bien de calcedonia (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 2005).

Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (Cantera de Morelia) Se le denomina Cantera de Morelia a los productos piroclásticos de composición riolítica generalmente de color rosa, ricos en líticos de andesitas y pómez. Tiene un espesor de 200 metros y se clasifica como una roca piroclástica denominada ignimbrita (Israde-Alcántara y Garduño- Monroy, 2005).

Complejo volcánico miocénico del Cerro Punhuato. Se trata de una secuencias de rocas constituida por derrames de lava y brechas andesíticas y dacíticas, a veces soldadas, que por su estructura y morfología se asocia a un complejo de domos. Este complejo presenta una estructura de herradura abierta hacia el Oeste y los productos asociados, considerados ser el material acumulado después de la destrucción del cono, forman un abanico al oriente de la ciudad, lo que evidencia una gran explosión lateral. A esta unidad se le asigna una edad ubicada adentro del Mioceno, considerando que subyace a los sedimentos lacustres del Mioceno superior-Plioceno (Israde-Alcántara, 1995).

Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno. Esta secuencia aflora en la parte sur y oriente de Morelia, donde está caracterizada por limos y arcillas; tiene un espesor, según los cortes efectuados por las perforaciones profundas, hasta de 60 metros y presentan un basculamiento de 5° hacia el sur.



Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco Es la unidad más reciente y corresponde a los productos del volcanismo monogenético del CVTM. Son lavas andesíticas y eventualmente andesítico-basálticas que provienen de los volcanes Quinceo, Las Tetillas o del Cerro El Águila que, además, delinean morfológicamente la cima más importante de la ciudad de Morelia.



4. MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1. Metodología del Índice DRASTIC

El método DRASTIC desarrollado por Aller *et al.* en 1987 y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) es un método empírico, que clasifica y pondera parámetros intrínsecos, que reflejan las condiciones naturales del medio y es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos.

La metodología DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales, a las que asigna valores, y un multiplicador o índice de ponderación, según su importancia.

D (Depth) profundidad del agua.

R (Recharge) recarga que recibe el acuífero.

A (Aquifer) medio acuífero.

S (Soil) tipo de suelo.

T (Topography) pendiente del terreno.

I (Impact) impacto de la zona no saturada según su litología.

C (Conductivity) conductividad hidráulica (permeabilidad).

Para aplicar este método debe asumirse que el posible contaminante tiene la misma movilidad en el medio que el agua, que se introduce por la superficie del terreno y que se incorpora al agua subterránea mediante la recarga (lluvia y/o retorno de riego). Se aplica a acuíferos libres y confinados, pero no a los semiconfinados, que deben valorarse de manera que puedan adaptarse a uno de los tipos definidos.



A cada uno de los siete parámetros considerados por este método se les asigna un valor en función de los diferentes tipos y rangos definidos. Además, al valor de cada parámetro se le aplica un índice de ponderación entre 1-5 que cuantifica la importancia relativa entre ellos (Tabla 2), y que puede modificarse en función del contaminante.

Tabla 2. Índices de ponderación de la importancia relativa entre los parámetros que emplea el índice DRASTIC.

Parámetro	Peso	Peso Pesticidas
Profundidad del agua	5	5
Recarga neta	4	4
Medio acuífero	3	3
Tipo de suelo	2	2
Pendiente del terreno	1	1
Impacto de la zona no saturada	5	5
Conductividad hidráulica del acuífero	3	3

Las hipótesis en las que el índice DRASTIC se basa son las siguientes (Aller *et al.*, 1987):

- El contaminante debe ser introducido en la superficie del terreno.
- El contaminante penetra con el agua de recarga.
- El contaminante tiene la movilidad del agua.
- El área evaluada es mayor o igual a 45 ha.

Cuando no se cumplen estas condiciones, la evaluación del potencial de contaminación del agua subterránea mediante este método, no es confiable. La valoración de los parámetros permite acotar los intervalos de vulnerabilidad a la contaminación y delimitar áreas de mayor riesgo frente a un contaminante potencial.

El índice DRASTIC permite encontrar un valor numérico para cada punto del área de estudio mediante la siguiente ecuación:



$$DRASTIC = DRDW + RRRW + ARAW + SRSW + TRTW + IRIW + CRCW$$

Donde R y W son el puntaje (Rating) y el peso de ponderación (Weight) respectivamente. La vulnerabilidad aumenta con el valor del índice.

La suma expresa la conjunción de las valoraciones de cada propiedad, aportadas por el método, y el conocimiento del acuífero particular del que se trata por parte de quienes lo aplican.

En la Tabla 3 se indica el grado de vulnerabilidad en función del valor obtenido por el método DRASTIC. Los intervalos de vulnerabilidad o riesgo van de 100 (despreciable) a 200 (vulnerabilidad extrema).

Tabla 3. Clasificación de la vulnerabilidad de acuíferos del método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Rangos del valor DRASTIC	Tipo de clases
<100	Despreciable
101 - 119	Vulnerabilidad muy baja
120 - 139	Vulnerabilidad baja
140 - 159	Vulnerabilidad moderada
160 - 179	Vulnerabilidad alta
180 - 199	Vulnerabilidad muy alta
>200	Vulnerabilidad extrema

La síntesis de la metodología que se empleó en este trabajo de investigación se presenta en la Figura 12.

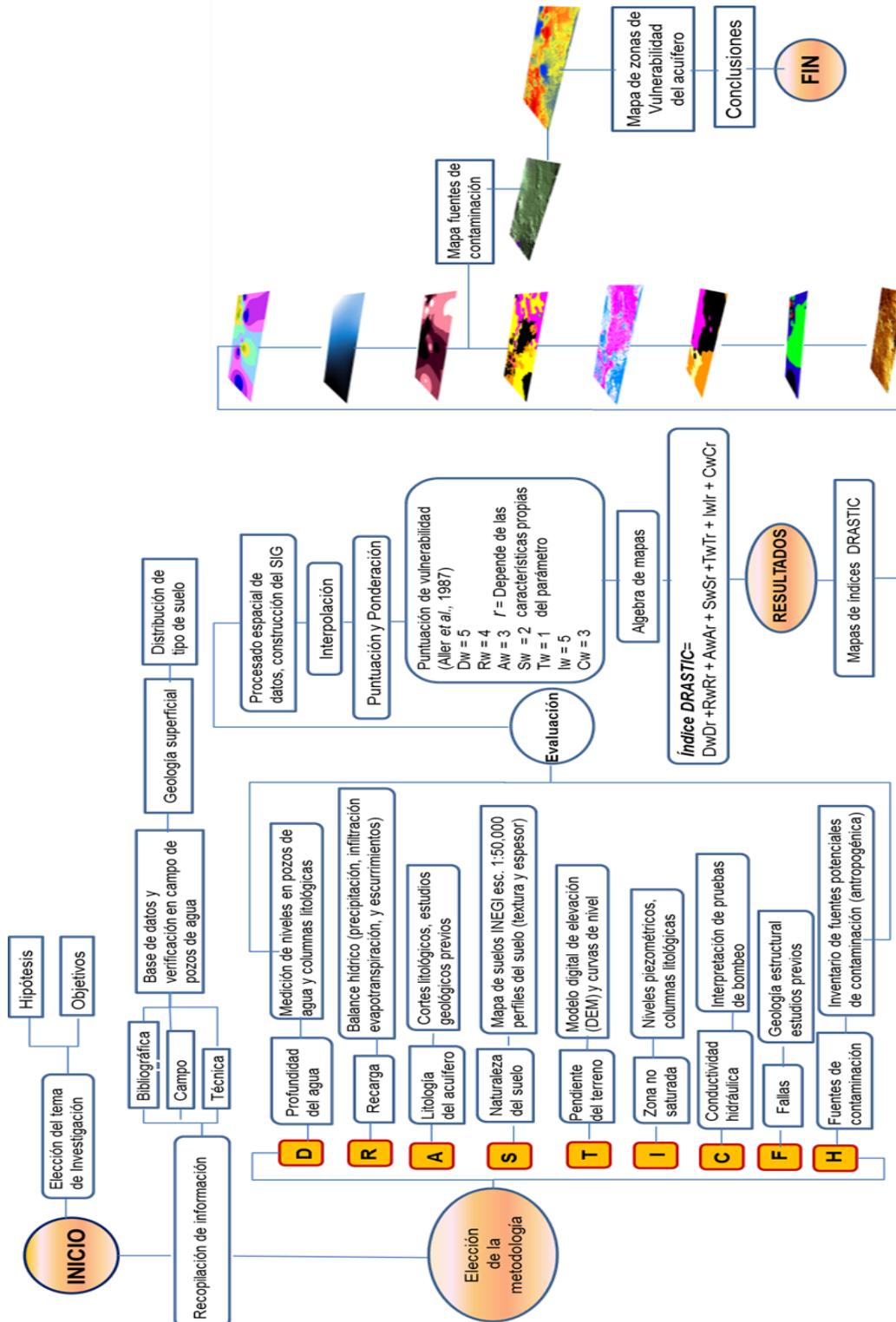


Figura 12. Metodología aplicada para este trabajo de investigación.



4.2. Definición y valores de los parámetros del índice DRASTIC

4.2.1. Profundidad del agua (D)

Su valor se obtiene como la diferencia entre el nivel topográfico y el nivel al que se encuentra el material saturado, que coincide con el nivel piezométrico cuando el acuífero es libre o con el techo del acuífero cuando es confinado. Este es el espesor que debe atravesar el contaminante para alcanzar la zona de saturación (Cerros, 2007). Como criterio inicial, se asume que la vulnerabilidad disminuye con el aumento de la profundidad. En su valoración se emplean datos puntuales (pozos de extracción en el área de estudio), estudios hidrogeológicos y mediciones en campo. En la Tabla 4 se indican los rangos considerados para este parámetro en metros, así como la clasificación asignada por el método DRASTIC.

Tabla 4. Puntajes del parámetro de profundidad del nivel piezométrico DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Rango de profundidades (D) (m)	
Rango	Clasificación
0.0 - 1.5	10
1.6 - 4.6	9
4.7 - 9.1	7
9.2 - 15.2	5
15.3 - 22.9	3
30.0 - 30.5	2
> 30.5	1

Para la elaboración del mapa de la profundidad del agua del sistema acuífero de la zona de estudio, se recopiló la información disponible de los pozos de extracción, administrados por el OOAPAS, los cuales se emplean para extraer el agua del subsuelo (Figura 13); en total se empleó la información correspondiente a 23 pozos (Pérez-Villarreal, en revisión).



Figura 13. Medición de los niveles piezométricos en pozos de la zona de estudio.

Para la obtención de este parámetro se realizó una interpolación de tipo IDW, no es la que generaba el menor error cuadrático sin embargo, la interpolación de los datos es menos brusca con este método de interpolación. El IDW tiende a crear puntos de concentración en las zonas donde se localizan los puntos de control (Figura 14).

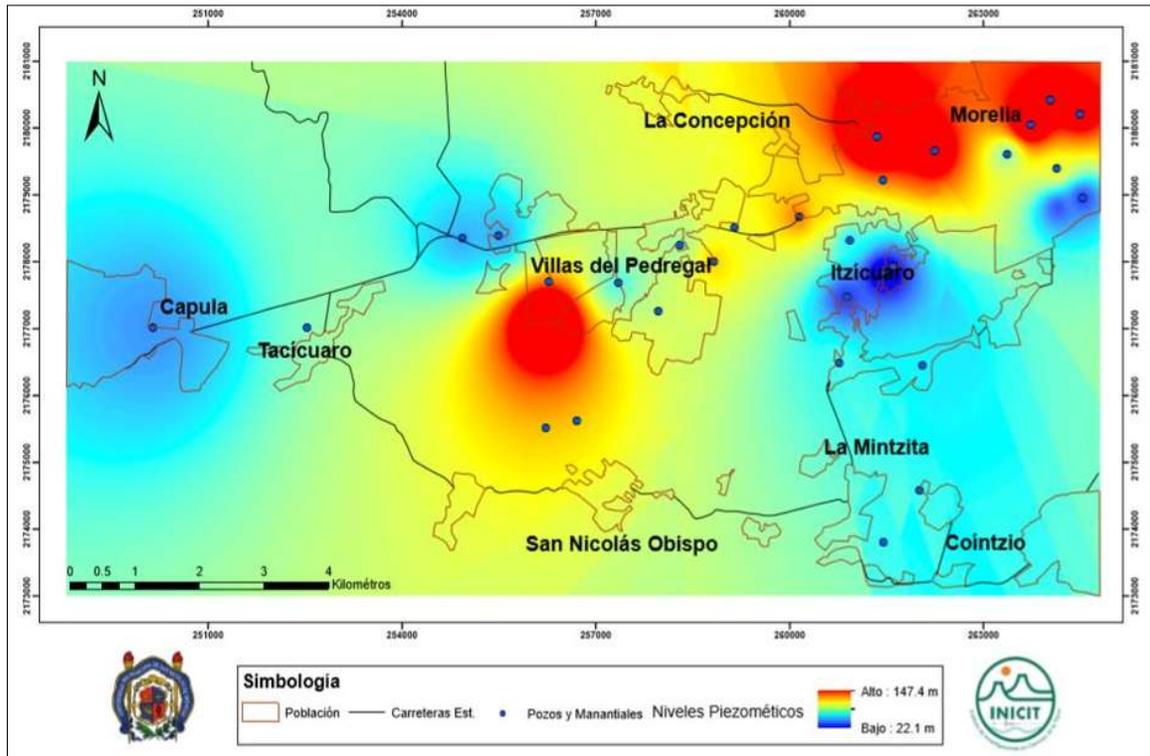


Figura 14. Profundidad a la que se localiza el agua subterránea en la zona de estudio.

En la zona de estudio se tienen profundidades por encima a las establecidas por el método DRASTIC, esto debido a la sobreexplotación del sistema acuífero, la presencia de conos de abatimiento y estructuras geológicas; por lo que se consideró conveniente realizar un ajuste a este parámetro para profundidades del nivel piezométrico de hasta 147 m, ya que en esta zona predominan profundidades mayores a 100 m, el ajuste se realizó mediante la modificación del método DRASTIC original (Aller *et al.*, 1987) adaptándolo al caso de estudio como se describe enseguida:

Se ordenaron los datos recopilados para cada punto de medición y se aplicó una modificación de intervalos por medio de porcentajes, posteriormente se ajustaron los rangos con la ponderación por medio de una regresión lineal como se muestra



en la Figura 15 y se obtuvo la ecuación de la línea de tendencia. Se obtuvo un buen ajuste $r^2 = 0.96$, de acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 5.

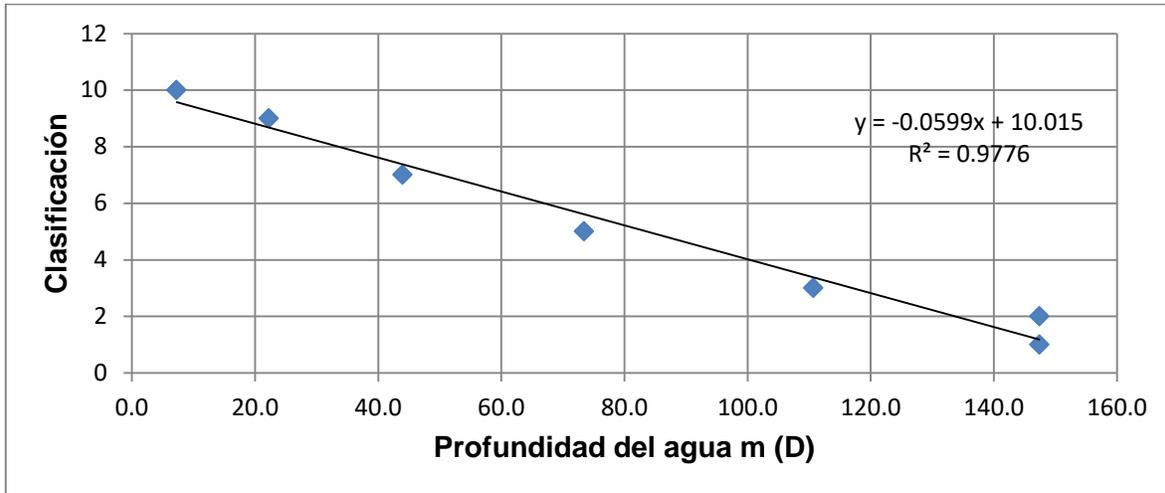


Figura 15. Regresión lineal para los datos de profundidad del agua.

Tabla 5. Resultados estadísticos de la regresión lineal del parámetro (D).

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9846
Coefficiente de determinación R^2	0.9694
R^2 ajustado	0.9617
Error típico	0.6310
Observaciones	6

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	9.9775	0.4374	22.8124	0.0000	8.7632	11.1919
Variable X 1	-0.0589	0.0052	-11.2526	0.0004	-0.0735	-0.0444

Los rangos y la clasificación utilizados para este parámetro se muestran en la Tala 6, obtenidos en base a la información obtenida de la Tabla 5, empleando la ecuación de ajuste $y = 9.9775 - 0.0589 X$.



Tabla 6. Modificación de los puntajes para la clasificación DRASTIC.

Rango de profundidades (D) (m)			
<i>Aller et al., 1987</i>		Modificado	
Rango	Clasificación	Rango	Clasificación
0.0 - 1.5	10	0 - 7.3	9.6
1.5 - 4.6	9	7.3 - 22.2	8.7
4.6 - 9.1	7	22.2 - 44.0	7.4
9.1 - 15.2	5	44.0 - 73.5	5.7
15.2 - 22.9	3	73.5 - 110.7	3.5
22.9 - 30.5	2	110.7 - 147.4	1.3
> 30.5	1	>147.4	

4.2.2. Recarga neta (R)

La recarga es el volumen de agua por unidad de área que ingresa al acuífero durante un período de tiempo, para lo cual debe atravesar la superficie y la zona no saturada. En su camino el agua arrastra consigo muchas sustancias, siendo así el principal vehículo para la lixiviación y el transporte de contaminantes líquidos y sólidos (Cerros, 2007).

Dicho parámetro puede considerarse como el resultado de la precipitación menos la evapotranspiración y menos la escorrentía superficial, y puede ser de mucha ayuda contar con estudios hidrogeológicos previos para determinar el presente índice (Escobar *et al.*, 2002).

Los puntajes y rangos considerados para el parámetro de la recarga son los que se muestran en la Tabla 7 (Aller *et al.*, 1987).



Tabla 7. Puntajes del parámetro de la recarga neta DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Recarga neta (R) (mm/año)	
Rango	Clasificación
0.0 - 50	1
51- 102	3
103- 178	6
179 - 250	8
> 250	9

Para la obtención de este parámetro se calculó la recarga a través de un balance hídrico, siendo este la relación de los procesos de precipitación, escurrimiento, infiltración y recarga, que permite determinar la disponibilidad de agua. También permite la definición de zonas de infiltración y probable recarga de acuíferos, de modo que se pueda hacer un mejor proceso de planeación.

4.2.3. Medio acuífero (A)

El método DRASTIC valora la litología que constituye el acuífero, considerándose que a mayor granulometría y fracturamiento, mayor permeabilidad y por tanto un grado de vulnerabilidad más alto. Su importancia radica por el grado de influencia en la atenuación de un contaminante, a través de los procesos de absorción, dispersión y dilución.

Para obtener el presente parámetro podemos apoyarnos de pozos perforados, también de afloramientos de estratos en la ribera de los ríos; por lo que un buen estudio hidrogeológico puede resultar de mucha ayuda para determinar este parámetro. Al ser este parámetro difícilmente cuantificable, DRASTIC asocia rangos de puntajes a los distintos tipos de acuífero y sugiere un puntaje típico para cada uno.



Tabla 8. Puntajes para el medio acuífero DRASTIC, dependiendo de la litología presente en el acuífero en estudio (Aller *et al.*, 1987).

Medio acuífero (A)		
Tipo	Clasificación	Clasificación típica
Lutita masiva	1 - 3	2
Metamórficas/ ígneas	2 - 5	3
Metamórficas/ ígneas meteorizadas	3 - 5	4
Depósito glacial	4 - 6	5
Secuencias areniscas, caliza y lutitas	5 - 9	6
Arenisca masiva	4 - 9	6
Caliza masiva	4 - 9	6
arena o grava	4 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza Kárstica	9 - 10	10

El método original fue pensado para un medio homogéneo; sin embargo, en muchos escenarios es común encontrar estratificación de diferentes materiales. Al considerar el método original (Aller *et al.*, 1987) se encontró que se requería un ajuste (Tabla 9), para el cual la litología se ajustó en función del porcentaje de arenas, arcillas y basaltos.

Tabla 9. Modificación del parámetro (A) de acuerdo a la granulometría del material.

Pozo	Clasificación	DRASTIC
23 de Marzo	6.4	19.2
La Esperanza	6.5	19.5
Ricardo Flores Magón	4.0	12.0
San Isidro Itzicuaró	4.0	12.0
San José Itzicuaró	7.0	21.0
Mariano Abasolo	3.5	10.5
Tzindurio Sarh	6.4	19.2
San Juanito Itzicuaró	8.6	25.8
Ario de 1815	5.0	15.0
Villa Magna 3	5.0	15.0
Ignacio Allende	5.1	15.3
Residencial Tinijaro	6.2	18.6
Capula 2	5.0	15.0



Tacícuaro	6.0	18.0
La Maestranza	7.5	22.5
El Cerrito Itzícuaró	5.3	15.8
Manantial La Mintzita	5.5	16.5
San Nicolás Obispo	7.0	21.0
CRISOBA	4.0	12.0
Tanganxoan	8.6	25.8
Las Garzas	5.6	16.8
Pozo de monitoreo	7.0	21.0
La Concepción	7.4	22.2

Desde el punto de vista geohidrológico se reconocen cuatro unidades, las cuales se describen a continuación (Garduño-Monroy *et al.*, 2010):

- **Unidades hidrológicas volcánicas del Corredor Tarasco y Los Azufres.**

Hacia el poniente del lago de Cuitzeo y en la región de Morelia se presenta una serie de aparatos monogenéticos y de tipo escudo (Águila, Quinceo, Las Tetillas, etc.) que se encuentran descansando sobre las secuencias lacustres terrígenas. Este vulcanismo está compuesto por lavas en bloque, brechas, piroclastos y derrames de escoria. Los volcanes escudo ocupan grandes superficies, por lo que son zonas de captación para las aguas subterráneas que van a abastecer preferencialmente a los acuíferos de las secuencias terrígenas. También a ellos se asocian los manantiales que surgen en el contacto de los volcanes y las arcillas de las secuencias terrígenas. Dentro de la cuenca, hacia el suroeste prevalentemente, las rocas volcánicas están conformadas por arenas y gravas, además de lavas muy fracturadas (Garduño-Monroy *et al.*, 2010).

- **Unidad geohidrológica terrígena**

Los estudios gravimétricos realizados en el centro del Lago de Cuitzeo en los años ochenta, sugieren la presencia de 1,500 m de sedimentos fluviolacustres (Arredondo, 1983); sin embargo, una reinterpretación de los datos realizada sólo infiere un espesor de 500 m de sedimentos. En la región de Charo,



Indaparapeo, se reconoce una secuencia lacustre y fluviolacustre de 40 m de espesor; compuesta por tres paquetes y en la base una serie de sedimentos limo-arcillosos que terminan con un nivel oxidado. La secuencia continúa con diatomitas arcillosas laminares, y éstas a su vez, son erosionadas por una de tipo fluvial, caracterizada por conglomerados, gravas arenas y limos. La secuencia es coronada por un nivel de pómez vítrea (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Esta unidad se compone en el subsuelo de 60 m de alternancias de conglomerados, arenas, limos y arcillas; con eventuales interdigitaciones de lavas y productos volcánicos explosivos, por lo tanto, es donde se localizan los acuitardos. Dentro de ella se observan fallas noroeste-sureste, este-oeste y noreste-suroeste, las dos últimas presentan una geometría de fallas sedimentarias que son, junto con la utilización del acuífero, las que detonan los Procesos de Subsistencia Creep Falla (PSCF) de Morelia, Santa Ana Maya y Tarímbaro, cuyas tasas de hundimiento van de 4 a 6 cm/año (Garduño-Monroy *et al.*, 2001). La permeabilidad depende de la litología, siendo obviamente los niveles más granulares los más idóneos para el aprovechamiento del acuífero (Garduño-Monroy *et al.*, 2010).

- **Unidad geohidrológica andesítica**

Se trata de una secuencia volcánica de carácter andesítico, compuesta de derrames de lava muy fracturados (Pasquarè *et al.*, 1991). Las andesitas alternan con flujos piroclásticos, brechas, escorias y depósitos de caída; esta característica le confiere a la roca una excelente permeabilidad secundaria. El paquete volcánico tiene su mayor representatividad en la sierra de Mil Cumbres, en el campo Geotérmico de Los Azufres y en la región de Cuitzeo-Morelia, las cuales conforman el acuífero más importante de la zona. De hecho, la producción geotérmica de los Azufres se genera en esta unidad. Su principal zona de recarga se localiza en la zona de Mil Cumbres y las calderas de Atécuaro y La Escalera. Por el grado de fracturamiento, su morfología y la configuración de la red hidrológica, las rocas volcánicas son excelentes zonas



de recarga del acuífero de la región; en particular, el del subsuelo de Morelia y Cuitzeo ha permitido el desarrollo de gran cantidad de obras de extracción. Se observa que el avance de la mancha urbana invade zonas de recarga y afectan la calidad y cantidad de agua subterránea y superficial, por lo que es de vital importancia que esta zona no sea urbanizada (Garduño *et al.*, 2001).

- **Unidad geohidrológica ignimbrítica**

Conforma una secuencia de flujos piroclásticos provenientes de las calderas localizadas en la sierra de Mil Cumbres (Calderas de Atécuaro, La Escalera). La secuencia de flujos piroclásticos está compuesta de flujos de pómez y ceniza, ceniza y líticos, y lo que se denominan flujos soldados, es decir, una roca vítrea muy dura con líticos. Toda la unidad es de composición riolítica, contando con una baja permeabilidad. El fracturamiento es menor que la unidad andesítica; sin embargo, se reconocen los mismos sistemas de fracturas mencionados en las andesitas del Mioceno. La permeabilidad disminuye también debido a que en los flujos piroclásticos no soldados y de pómez y la alteración de las plagioclasas, genera formación de arcillas que impiden la circulación de fluidos. Estas rocas componen un acuífero de tránsito y en el subsuelo no tiene características de un buen acuífero, además de ser portador de muchos sólidos en suspensión (arcillas) en el agua subterránea (Garduño-Monroy *et al.*, 2010).

La obtención de este parámetro se realizó por medio de la información de 23 pozos localizados dentro de la zona de estudio. En la Figura 16 se ilustran 4 litologías obtenidas de 5 pozos: 23 de Marzo, San Isidro Itzícuaru, Villa Magna, El Cerrito Itzícuaru y La Concepción.

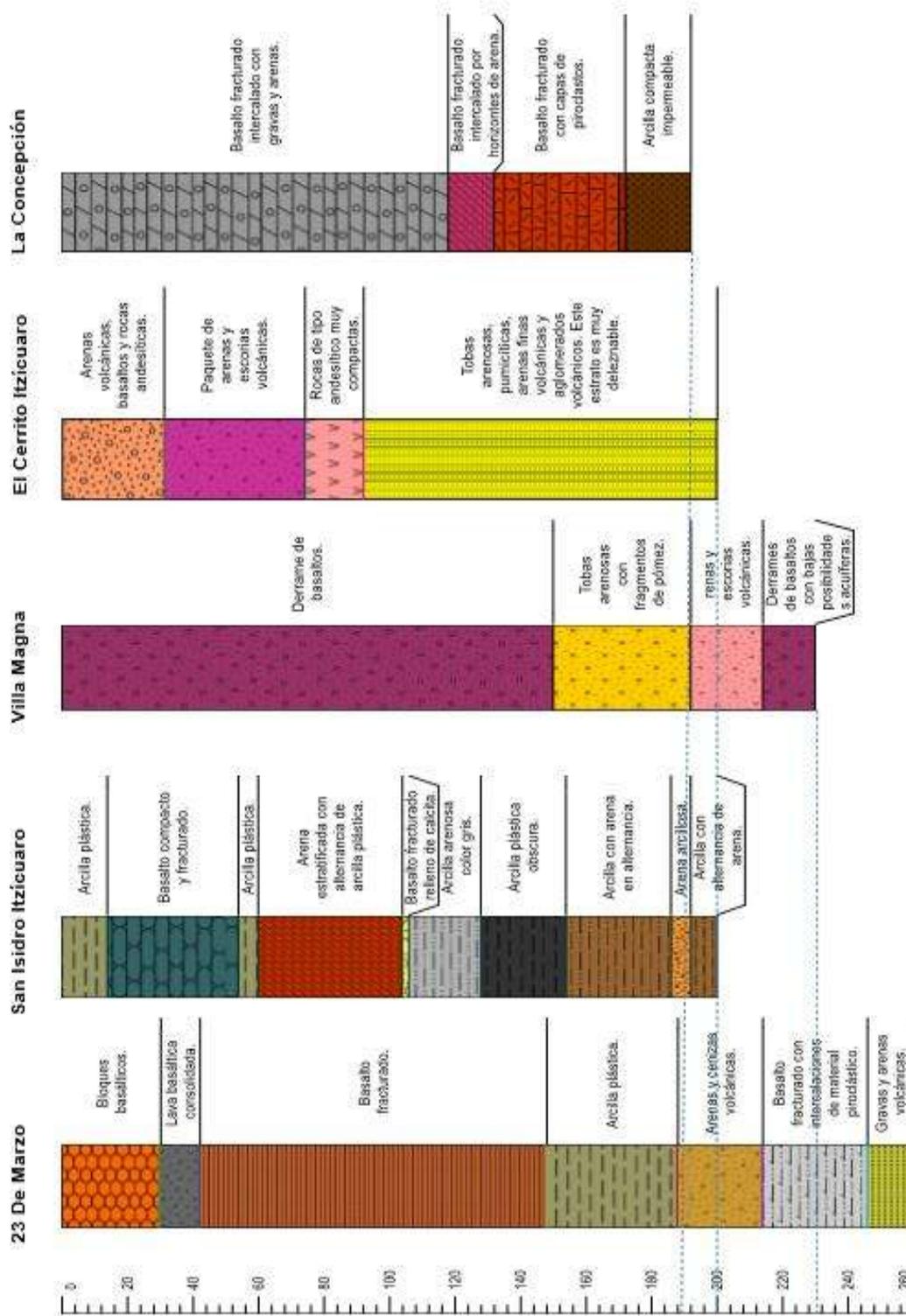


Figura 16. Cortes litológicos de pozos en la zona de estudio.



4.2.4. Tipo de suelo (S)

En el presente parámetro al igual que el medio acuífero, los materiales que conforman esta zona influyen en las propiedades del contaminante, atenuándolo, con lo que la vulnerabilidad a partir de este parámetro depende del tipo de materiales que se encuentran en el subsuelo. Para determinar dicho parámetro es necesario tener información sobre espesor, estructura, textura, mineralogía, propiedades físicas y químicas, porosidad, permeabilidad, humedad, capacidad de infiltración y compactación del material que constituye la zona en estudio (Escobar *et al.*, 2002).

Tabla 10. Puntajes para el tipo de suelo DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Tipo se suelo (S)	
Tipo	Clasificación
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol – cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Se considera suelo, al material no consolidado localizado a poca profundidad del terreno (1-2 m), contiene la materia orgánica y alimenta la cobertura vegetal (Boulding, 1995). El estado físico del suelo juega un papel muy importante en el transporte de una sustancia. En su interacción con el suelo, una sustancia contaminante puede sufrir procesos de retardación, dilución y en casos especiales su eliminación (Wilson, 1991; Foster e Hirata, 1991).



La realización de perfiles de suelo es fundamental, ya que de esta manera la caracterización física nos permitió realizar la clasificación y puntuación adecuada para el parámetro tipo de suelo (Figura 17).



Figura 17. Elaboración de perfiles de suelos.

Para este parámetro se consideraron los suelos predominantes de la región de estudio los cuales se caracterizaron mediante la cartografía edafológica editada por INEGI y la información obtenida de 23 perfiles de suelo (Ávila-Olivera *et al.*, 2015), Figura 18.

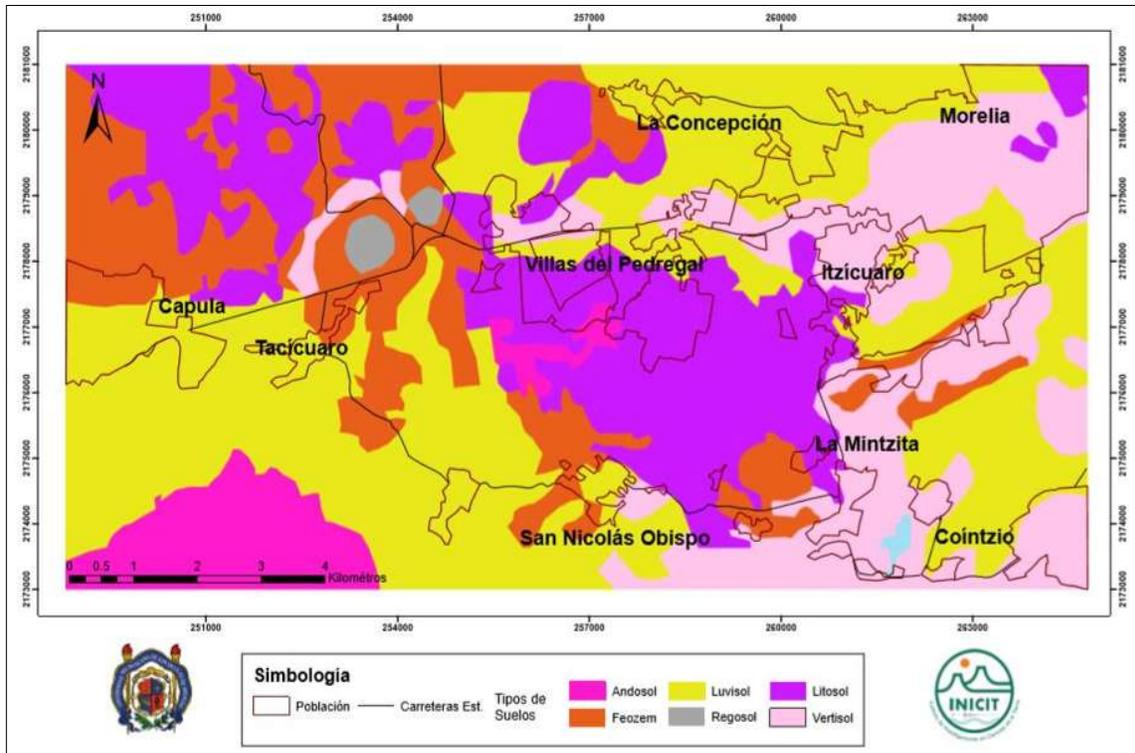


Figura 18. Tipos de suelo presentes en la zona de estudio (INEGI, 1979; Ávila-Olivera *et al.*, 2015).

Dado que la clasificación de la metodología DRASTIC está adecuada a los suelos provenientes de los condados de Estados Unidos se tuvo que adaptar la clasificación para los suelos propios de la zona de estudio realizando una comparación entre los mismos obteniendo la siguiente clasificación (Tabla 11).



Tabla 11. Puntaje modificado para la clasificación del tipo de suelo.

Suelos	Clasificación	Área km ²	%
Andosol	10	7.310	5.71
Feozem	5	21.196	16.54
Litosol	10	26.264	20.50
Luvisol	1	49.005	38.25
Regosol	10	0.759	0.59
Vertisol	7	23.592	18.41

Como resultado de la meteorización y erosión de las unidades litológicas antes mencionadas, en el área de estudio se presentan diferentes tipos de suelo.

Los Vertisoles son suelos que se caracterizan por su textura densa, formación de grietas profundas la mayor parte del tiempo y poseen una estructura en bloques. Son suelos jóvenes, poco profundos, algunos de ellos pedregosos y salinos, tienen alto contenido de arcilla, por lo que son poco permeables y de drenaje muy lento; el tipo de vegetación natural que crece en estos suelos es de bosque espinoso de acacia.

Los Feozems se localizan intercalados con Litosoles. Son suelos en su mayoría delgados, limitados por roca o una capa de tepetate; son de permeabilidad media a baja, tienen un color negro grisáceo o gris oscuro, contienen altas cantidades de materia orgánica y son ligeramente ácidos, sin salinidad alta. Estos suelos se desarrollan en lugares donde la evapotranspiración excede la precipitación, situación que conduce al desarrollo de una comunidad natural de gramíneas, aunque a menudo se encuentra bosque deciduo dominado por especies de encinos, como sucede en la cuenca del Lago de Cuitzeo. Estos suelos tienen una fertilidad natural alta y producen buenas cosechas. Mientras que los Litosoles literalmente, son suelo de piedra de muy poca profundidad sobre roca pura. La mayoría son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar y no en forma de cárcavas, son suelos arcillosos pero muy superficiales. Las texturas varían de gruesa, arenas y gravas hasta muy



pedregosos sobre la roca dura. Son los suelos más abundantes del país. Se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras de México, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 cm, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido (Israde-Alcántara *et al.*, 2008).

En las zonas de mayor elevación se localizan los Andosoles, Regosoles y los Luvisoles. Los Andosoles, cuyo material original, fundamentalmente son cenizas volcánicas, aunque también se desarrollan a partir de pómez, lapilli y otros productos de eyección volcánica, característicos del Cinturón Volcánico Mexicano, son generalmente de colores oscuros y tienen alta capacidad de retención de humedad, tienen por lo general un horizonte superficial entre 20 y 40 cm de espesor, de color oscuro, textura franca y estructura granular ; los Regosoles se desarrollan en materiales no consolidados al igual que los Luvisoles, pero de textura fina, Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En, general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen (Israde-Alcántara *et al.*, 2008).

Localmente predominan los Luvisoles, son sumamente arcillosos, de permeabilidad baja y drenaje lento, ricos en materia orgánica y ligeramente ácidos. Estos suelos se desarrollan principalmente sobre una gran variedad de materiales no consolidados como depósitos aluviales y coluviales. Predominan en las zonas planas o con pendientes suaves con climas templados fríos o cálidos, pero con una estación seca y otra húmeda como el que se presenta en la zona de estudio. Son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros, son suelos con alta susceptibilidad a la erosión (Israde-Alcántara *et al.*, 2008).

4.2.5. Pendiente del terreno % (T)

El agua que llega a la superficie del suelo y no se evapora, tiene principalmente dos caminos: escurrir o infiltrarse. El comportamiento que tenga depende en gran



medida de la pendiente del terreno. Si la pendiente es grande, el agua escurre superficialmente llevándose consigo parte de las sustancias contaminantes. En cambio, si es pequeña, el agua tiende a encharcarse permaneciendo en la superficie lo suficiente para infiltrar y llevar con ella sustancias al acuífero (Santos, 1998). Para este parámetro es necesario conocer las elevaciones, pendientes variables de la superficie del terreno, trayecto de curso de aguas superficiales, densidad de corrientes de la red. Toda esta información es obtenida por medio de la digitalización de mapas que contienen curvas de nivel de la zona en estudio (Escobar *et al.*, 2002). En la Tabla 12 se muestran el rango y clasificación asignados por el método DRASTIC para este parámetro.

Tabla 12. Puntajes para la pendiente del terreno DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Topografía - Pendiente %	
Rango	Clasificación
0 - 2	10
3 - 6	9
7 - 12	6
13 - 18	3
18 ó más	1

Para el cálculo de este parámetro se utilizaron Modelos Digitales de Elevación (DEM), que constituyen una representación digital de los valores de elevación de la superficie de la Tierra en intervalos horizontales espaciados regularmente. Posteriormente se clasificó de acuerdo a los rangos establecidos por el método DRASTIC (Figura 19). En zonas topográficamente abruptas las diferencias en gradientes topográficos se reflejan fácilmente en los índices de vulnerabilidad (rojo); la pendiente llega ser constante hacia los valles (verde) y presenta cambios muy importantes en las laderas y conos volcánicos.

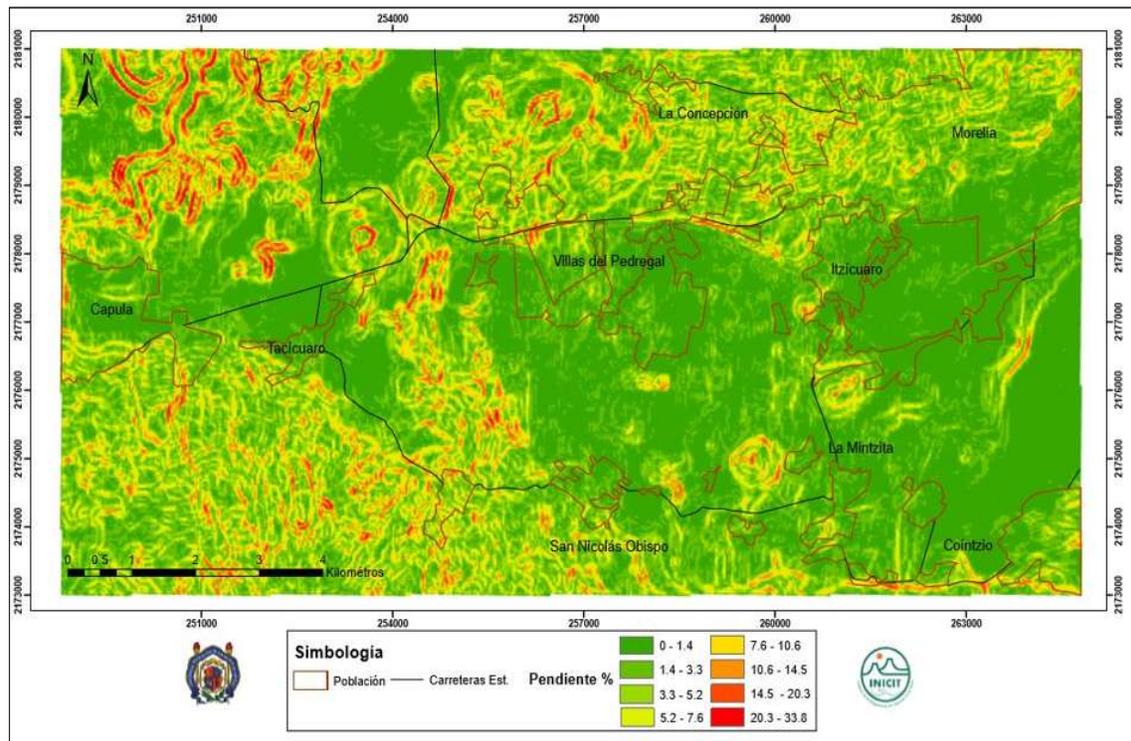


Figura 19. Mapa de la pendiente del terreno en porcentaje.

4.2.6. Impacto de la zona no saturada (I)

El tiempo que demora el agua en recorrer el camino hasta la zona saturada no sólo depende de la longitud, sino también del tipo de material con que se encuentra. Las características del espesor, composición litológica, propiedades químicas de las rocas determinan las condiciones de atenuación del material que se encuentra por debajo del horizonte del suelo y por encima de la capa freática. La biodegradación, la neutralización, la fricción, reacción química, volatilización y dispersión son fenómenos que pueden ocurrir y contribuyen al proceso de atenuación en la zona vadosa (Hernández, 2006).

Para la obtención de este parámetro es necesario recurrir a la información de pozos perforados o excavados, y afloramientos observados en la zona que se estudia; estudios hidrogeológicos previos pueden darnos toda esta información o complementar los estudios de campo que se realicen. Al igual que con el medio



acuífero, se asignan rangos a los distintos tipos de material y se dan valores típicos (Tabla 13).

Tabla 13. Puntajes para el parámetro Impacto de la zona no saturada DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Impacto de la zona no saturada (I)		
Tipo	Clasificación	Clasificación típica
Capa confinante	1	1
Limo – arcilla	2 - 6	3
Lutita	2 - 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Secuencias de caliza, arenisca y lutita	4 - 8	6
Arena o grava con significantes limos y arcillas	4 - 8	6
Metamórficas o ígneas	2 - 8	4
arena y Grava	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza Kárstica	8 - 10	10

Este parámetro tiene un comportamiento temporal y espacial similar al tratado en el medio acuífero, ya que de igual forma, los diversos escenarios 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 ajustaron a la litología del área de estudio, con base en la permeabilidad empírica de los materiales. Cuantificando el potencial de infiltración de un contaminante a través de una sección del medio estratificado. En la Figura 20 se muestra la litología presente en la zona de estudio.

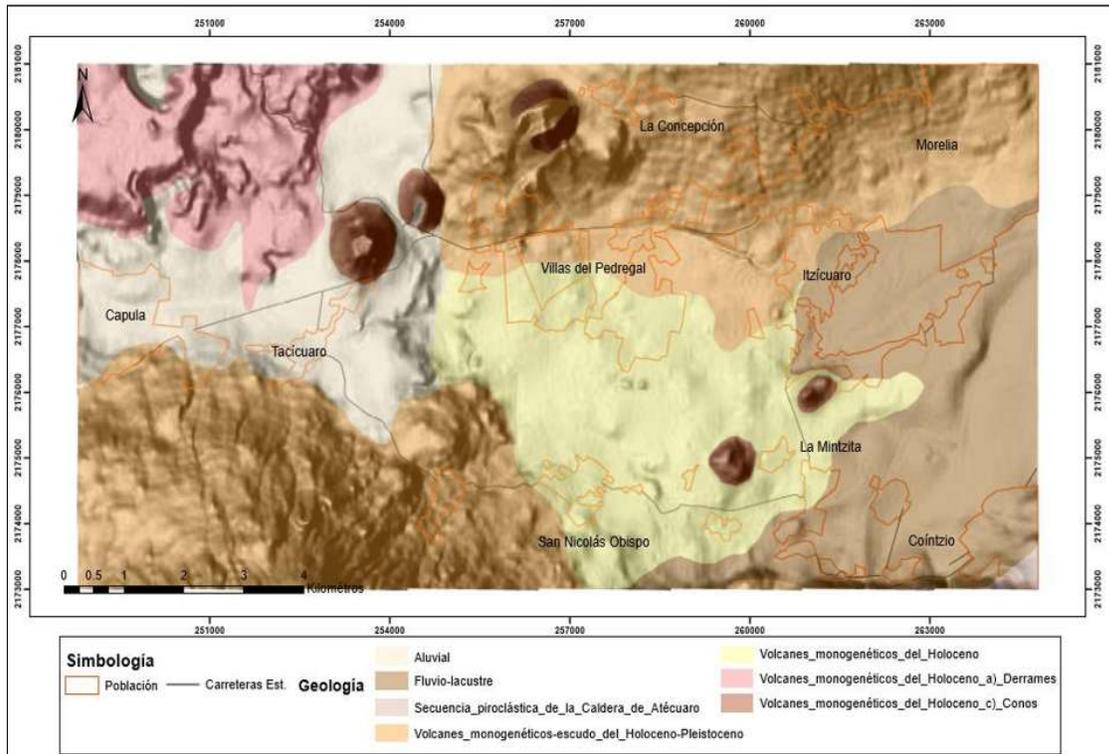


Figura 20. Distribución espacial de la zona no saturada.

4.2.7. Conductividad Hidráulica (C)

La conductividad hidráulica se define como la mayor o menor facilidad con que el medio acuífero deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo, es decir, se refiere a la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua, lo cual controla el flujo y la velocidad a la que se mueven los contaminantes desde que ingresan al acuífero. Este parámetro debe ser medido en metros sobre día, y la información es obtenida de informes de pozos perforados, además de complementarse de estudios hidrogeológicos previos (Escobar *et al.*, 2002). Los rangos y puntajes otorgados por el método DRASTIC para este parámetro se muestran en la Tabla 14.



Tabla 14. Puntajes utilizados para la Conductividad hidráulica DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Conductividad hidráulica (C)	
Rango (m/día)	Clasificación
0,04 - 4,08	1
4.09 – 12.22	2
12.23 – 28.55	3
28.56 – 40.75	6
40.76 – 81.49	8
> 81.49	10

Este parámetro se presenta principalmente en escenarios en donde se producen interdigitaciones de materiales con diferentes propiedades hidráulicas. La conductividad hidráulica es notablemente sensible ante la presencia de estructuras geológicas como fallas, diques y cuerpos volcánicos, que cambian abruptamente la permeabilidad del medio. Con este factor se mide la tasa de movimiento del agua dentro del acuífero, lo que afecta la velocidad a la cual se puede desplazar un contaminante. Los valores de este parámetro se tomaron de la tesis doctoral de Pérez-Villarreal (en revisión), así como de una recopilación de datos en estudios anteriores (Figura 21).

El tipo de interpolación utilizado es este parámetro fue IDW debido a que mostraba homogeneidad y las transiciones son menos marcadas, cuando el distanciamiento entre los puntos de control es muy grande, los variogramas no son posibles de obtener, entonces comparativamente el IDW se perfila como el mejor entre los demás métodos de interpolación.

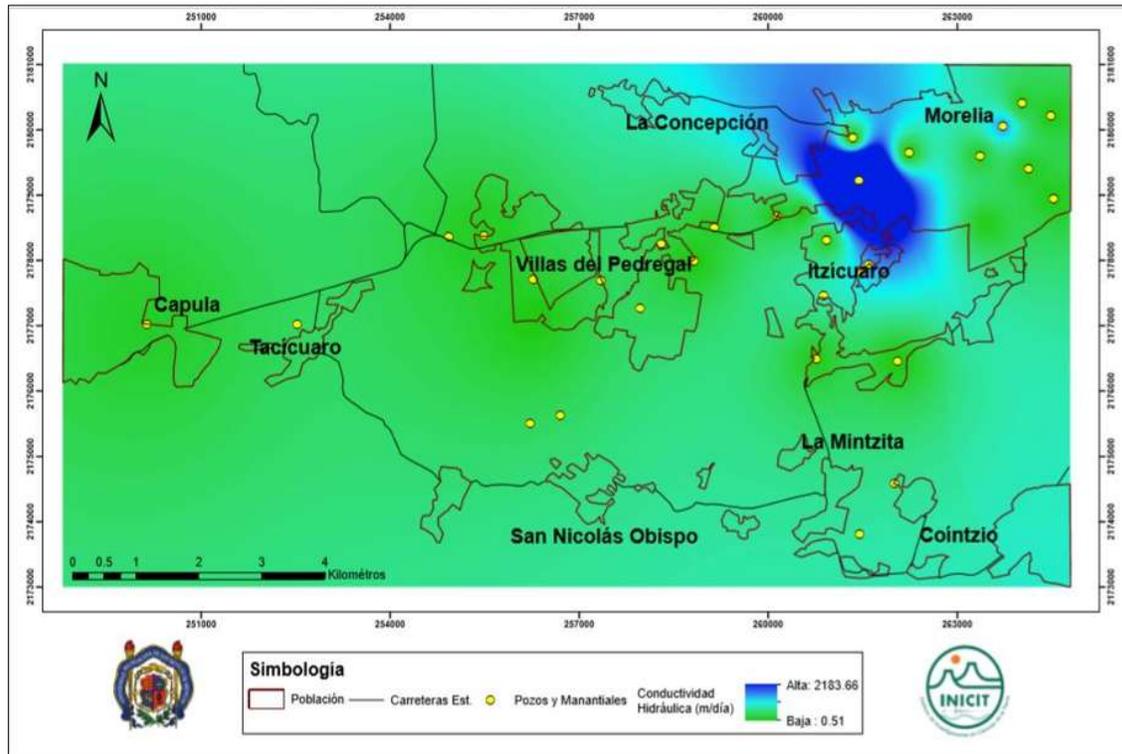


Figura 21. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en m/día.

4.2.8. Fallas geológicas

La ciudad de Morelia forma parte del Cinturón Volcánico Mexicano. Como tal, es una zona geológicamente joven, caracterizada por la presencia de una fuerte actividad sísmica ligada a la presencia de numerosas fallas activas de dirección NE-SO y E-O con desarrollo e importancia regional. Pertenecen al sistema de fallas Morelia-Acambay. Las fallas activas NE-SO presentan movimientos (creep-falla) asociados con desplazamientos verticales que en 1996 fueron medidos en 6 cm/año (Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

Potencial sísmico

Morelia puede verse afectada por dos tipos de sismicidad: a). Terremotos intraplaca, generados por la placa de subducción de Cocos, como el terremoto del



25 de septiembre de 1985, y; b). Terremotos intraplaca, que pueden estar relacionados con estructuras de profundidad intermedia (profundidades más de 30 km), o también se puede asociar a las fallas geológicas (Singh *et al.*, 1996; Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

El peligro de la actividad sísmica de las fallas geológicas en Morelia, se detectó en los mecanismos focales de terremotos históricos superficiales intraplaca que indica que están relacionados con el sistema de fallas Morelia-Acambay. Los sismos superficiales intraplaca o corticales, son los que representan un mayor riesgo para la ciudad de Morelia debido a la cercanía de sus epicentros con respecto al centro de población, tal y como sucedió en los eventos del 17 de octubre de 2007 con epicentros en la falla Nocupétaro, la cual atraviesa la mancha urbana de la ciudad con una dirección ENE-OSO (Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

Evolución de las fallas geológicas

Las fallas geológicas comenzaron a estudiarse en Morelia desde 1983, cuando se manifestaron daños en obras civiles en las colonias La Colina, Tres Puentes y también en la Avenida Héroes de Nocupétaro. Todas estas estructuras geológicas tienen direcciones NE-SO, es decir obedecen a las direcciones de las fallas de la región. En 1988 se detectó una tercera falla, Chapultepec. En 1993, el número de estructuras aumentó a seis con la aparición de las fallas Torremolinos, El Realito y La Soledad. Dos fallas más ocurrieron en 1999, Cuautla y Ventura Puente (Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Ávila-Olivera, 2004). Hoy en día la infraestructura de la ciudad de Morelia está siendo afectada por catorce discontinuidades con la adición de las fallas de La Paloma, Cerritos, Girasoles, Viveros, Lago y Puerta del Sol. Todas estas estructuras se encuentran dentro de la mancha urbana, haciendo crecer el factor de vulnerabilidad debido a que estas afectan a viviendas, edificios públicos, redes hidráulicas, drenajes, líneas eléctricas, calles, etc. Es muy importante reconocer que la sobreexplotación de las aguas subterráneas es uno



de los factores principales que generan el hundimiento diferencial de las zonas urbanas (creep o fluencia), pero también son importantes las técnicas de extracción y el diseño de pozos para la explotación del acuífero contenido en los sedimentos fluviolacustres, y los cambios de clima. Los estudios de geología y geofísica llevados a cabo en la Ciudad de Morelia sugieren que todas las estructuras que actualmente afectan a la zona urbana tienen rasgos lineales superficiales o en el subsuelo que permite relacionar a los movimientos diferenciales con una falla. Estas estructuras se inician como grietas simples, pero con el tiempo el lado donde existe mayor espesor de sedimentos lacustres sufre un hundimiento por cambio de volumen (Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

El peligro de subsidencia que ocurre en Morelia puede ser clasificado en dos grupos, de acuerdo a su geometría y a su génesis (Ávila-Olivera *et al.*, 2012):

a). Las fallas geológicas que se han reactivado por la actividad humana (procesos de subsidencia creep-falla, PSCF), con tasas anuales de hasta a 40 mm (por ejemplo, la falla La Colina); b). Las fallas que pueden ser clasificadas como potencialmente activas, las cuales también podrían estar asociadas a PSCF o bien por su morfología a inestabilidad de laderas.

Monitoreo de la subsidencia.

Uno de los elementos fundamentales para el estudio del proceso de subsidencia creep-falla, es el monitoreo y evaluación de las tasas de hundimiento o tasas de subsidencia. Para monitorear y analizar los peligros relacionados a las fallas geológicas en Morelia se llevó a cabo un par de estudios geodésicos. El primero es aplicar el InSAR (Radar de apertura sintético interferométrico), mientras que el otro es a través del uso de GPS geodésico sensores (Ávila-Olivera *et al.*, 2010).

De acuerdo con el análisis InSAR, la subsidencia presenta una magnitud que varía de 0 a 35 mm / año (Figura 22). La tasa máxima se observa hacia el norte, oeste y porción noroeste de la ciudad (Farina *et al.*, 2008), donde el espesor de los

sedimentos es mayor, alcanzando valores hasta 160 m (Ávila-Olivera *et al.*, 2010). El monitoreo GPS indica que el La magnitud de este movimiento lateral alcanza valores de hasta 30 mm / año hacia el oeste (Ávila-Olivera *et al.*, 2007).

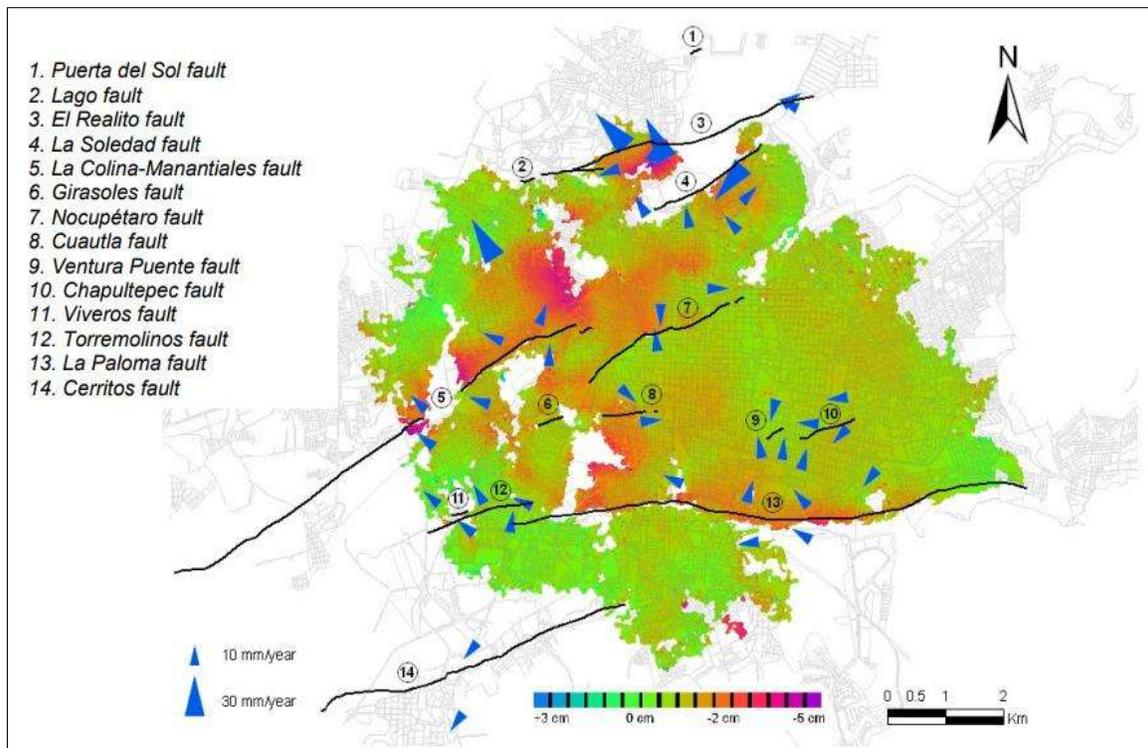


Figura 22. Mapa de la subsidencia de la ciudad de Morelia. La barra de color indica la tasa anual de subsidencia determinada por interferometría. Los triángulos azules muestran la dirección de desplazamiento lateral de los puntos de control medidos con GPS (Ávila-Olivera *et al.*, 2012).

Morelia está siendo afectada por tres tipos de peligros relacionados a fallas geológicas: a). Hundimientos, grietas y fallas en la superficie causada por los Procesos de subsidencia Creep-falla; b). Movimiento lateral de fallas desencadenadas por el campo activo de tensión regional y; c). Actividad sísmica que puede desarrollar estas fallas. Una sola discontinuidad puede experimentar los tres tipos de peligro, como sucede con las fallas Nocupétaro y La Colina (Ávila-Olivera *et al.*, 2012).



Para la obtención de este parámetro en nuestra zona de estudio se revisó la bibliografía existente y se cuantificó la presencia de ocho fallas geológicas debidas su gran mayoría a la sobreexplotación del acuífero (Figura 23). Este factor influye de manera directa tanto en el movimiento de la carga contaminante así como en la velocidad que esta viaje, se consideró una zona de influencia de 25 m a cada lado de la falla (Valdivias, 2016) .

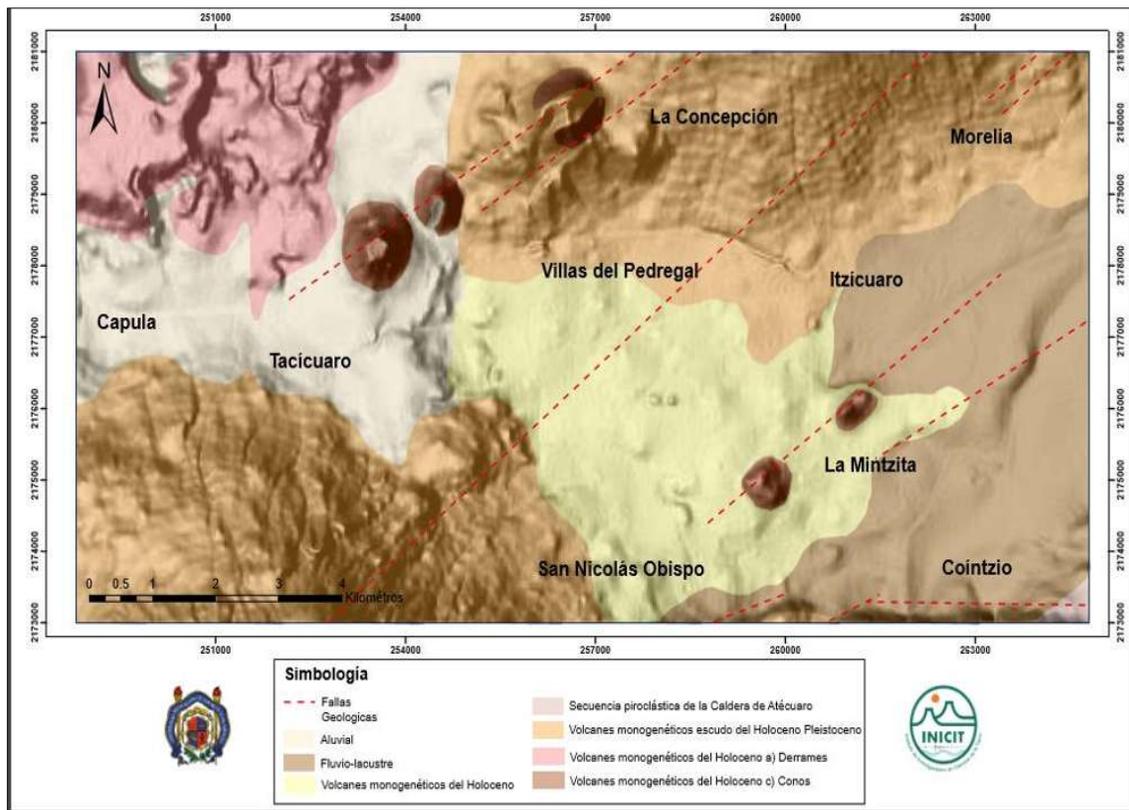


Figura 23. Presencia de fallas geológicas con influencia en la zona de estudio.



5. RESULTADOS

5.1. Profundidad del agua (D)

El parámetro de la profundidad se ajustó de acuerdo a las características de la zona de estudio tomando intervalos de 22.5 m hasta la profundidad máxima de 147.42 m. Los resultados obtenidos para el índice de Vulnerabilidad DRASTIC se muestran en la Figura 24. Las aguas someras representan los valores más altos del índice de vulnerabilidad DRASTIC (31- 43 puntos), en la zona de estudio se localizan hacia las prominencias volcánicas y en la periferia de éstas; por el contrario, para lo niveles más profundos los valores del índice DRASTIC fueron los más bajos (6.5-19.5 puntos) encontrándose en los valles y en las zonas más planas.

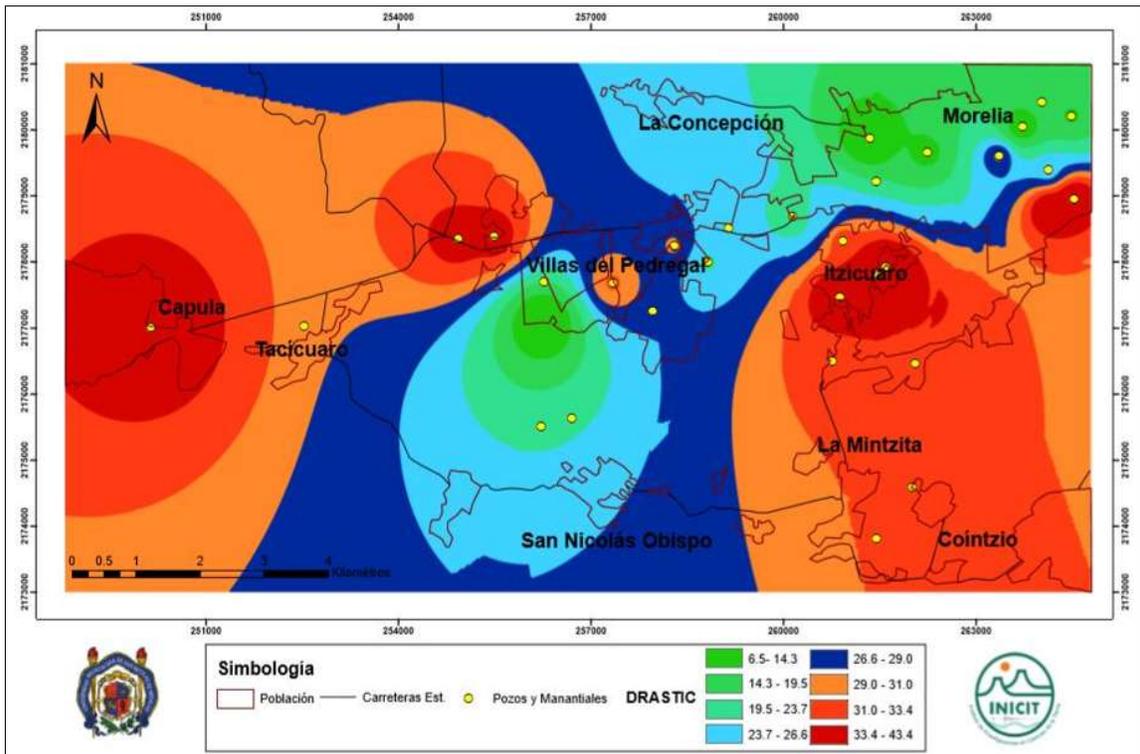


Figura 24. Índice DRASTIC para la profundidad del agua (D).



5.2. Recarga neta (R)

Este parámetro considera la recarga que penetra la superficie terrestre por unidad de área, está expresada en mm/año. A continuación se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la realización de un balance hídrico, siendo necesario determinar la precipitación (métodos aritmético, isoyetas y polígonos de Thiessen), evapotranspiración (método de Thornthwaite), los escurrimientos e infiltración.

La ecuación básica para realizar un balance hídrico es $\frac{dV}{dt} = E - S$, la cual expresa que la variación del volumen (V) es igual a las entradas (E) menos las salidas (S) de agua para un intervalo de tiempo t específico.

El balance se realizó con ayuda del software Arcgis 10.3, de manera cuasi-distribuida, es decir considerando la totalidad de la cuenca como un conjunto de celdas en donde se realizó el balance hídrico. Todas las variables son volúmenes de agua, y el intervalo de tiempo es mensual y anual. El procedimiento para obtener cada una de las variables se realizó de la siguiente manera (Hernández, 2014):

5.2.1. Selección de estaciones climatológicas

La selección de estaciones se utiliza para obtener una descripción espacial de las variables climatológicas que inciden en la producción o consumo de agua en la zona de estudio. La mayoría de las estaciones generan información pluvial, temperatura y evaporación. Los registros utilizados para la selección de las estaciones son los de precipitación, los cuales se utilizan posteriormente para cuantificar el volumen de lluvia en la cuenca. Se seleccionaron siete estaciones (Tabla 15) que son las que tienen influencia en la cuenca en estudio, la localización de dichas estaciones climatológicas se muestra en la Figura 25.

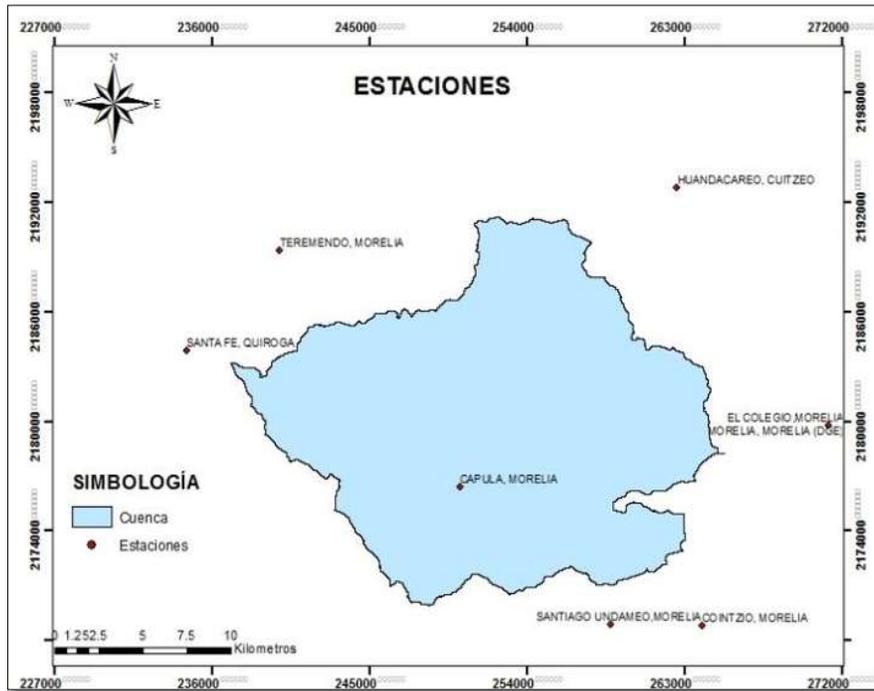


Figura 25. Estaciones climatológicas

Tabla 15. Datos geográficos, precipitación y temperatura anual de las estaciones climatológicas de la cuenca en estudio (CLICOM, 2016).

Clave	Estación	X	Y	Precipitación anual mm	Temperatura anual °C
16022	Coitzio, Morelia	264002.12	2168773.28	818.61	17.67
16081	Morelia, Morelia	271174.23	2179753.83	774.67	20.05
16118	Santa Fe, Quiroga	234523.86	2183917.77	800.19	16.88
16120	Santiago Undameo, Morelia	258755.54	2168843.20	864.43	16.56
16247	Capula, Morelia	250149.65	2176381.58	744.09	15.87
16250	Huandacareo, Cuitzeo	262539.07	2192823.94	807.90	18.56
16254	Teremendo, Morelia	239847.95	2189377.12	691.09	17.49

De acuerdo a los datos obtenidos por el CLICOM, para las estaciones climatológicas con influencia en la zona de estudio los meses que registran mayor precipitación son: Junio, Julio, Agosto y Septiembre (Figura 26).

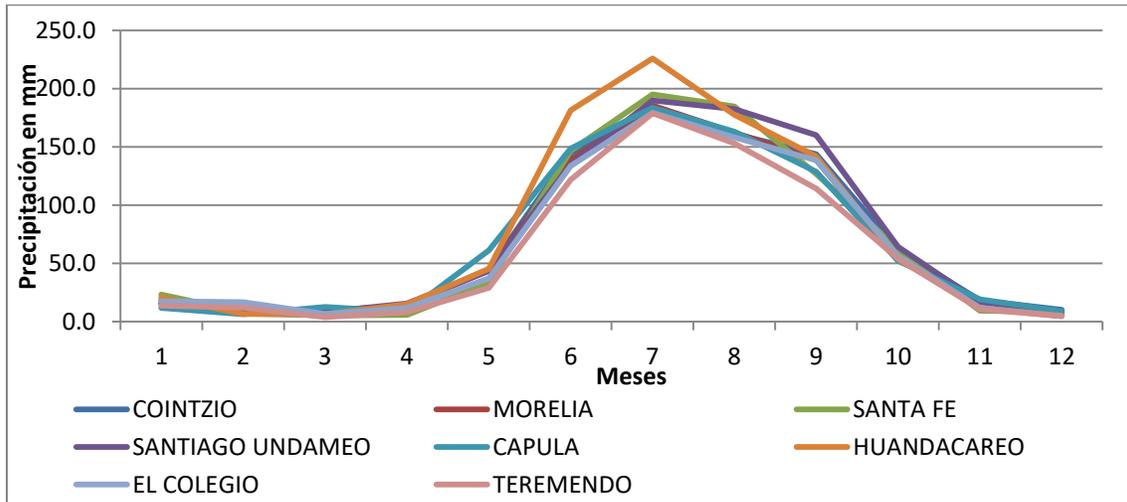


Figura 26. Precipitación media mensual registrada en las estaciones climatológicas consideradas.

Las temperaturas medias más altas registradas en las estaciones climatológicas pertenecen a los meses de Abril, Mayo, Junio y Julio, tal como se puede observar en la Figura 27.

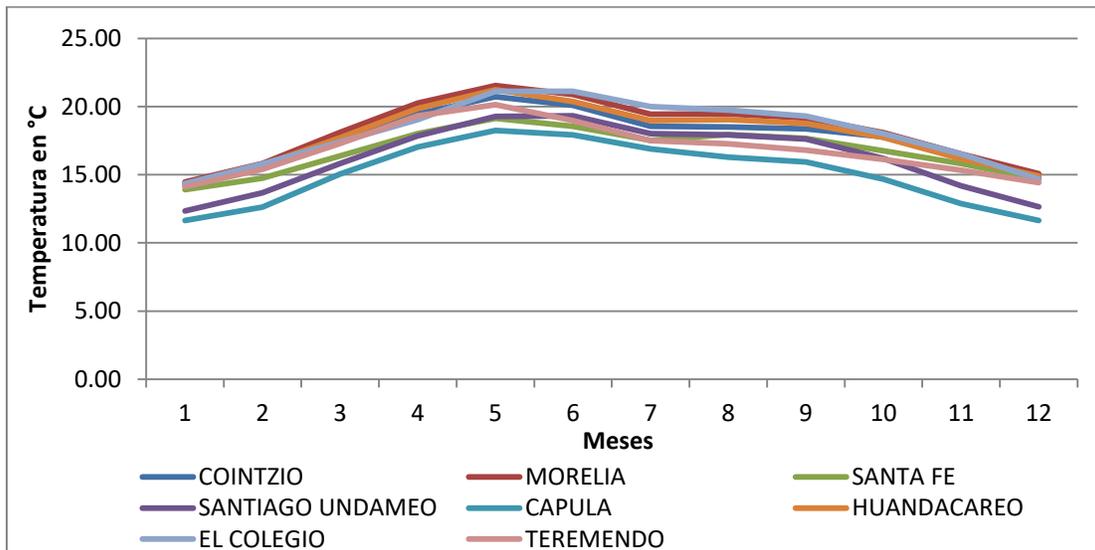


Figura 27. Temperatura media mensual registrada en las estaciones climatológicas consideradas.



5.2.2. Deducción de datos faltantes

En la operación de las estaciones climatológicas suelen presentarse circunstancias que hacen que se pierdan o no se tomen lecturas durante períodos de tiempo que pueden ser días, meses o incluso años; esto produce registros incompletos. Para poder utilizar esos datos, muchas veces tienen que completarse, de manera que se tenga una mejor base de datos para realizar un análisis hidrológico (Luna y Lavado, 2015).

Para estimar la precipitación que no se midió se suelen utilizar varios métodos, cada uno de los cuales tienen sus limitaciones y sus condiciones de aplicación.

Los métodos para la deducción de datos faltantes son (Luna y Lavado, 2015):

- Racional Deductivo
- Relación Normalizada
- US National Weather Service
- Regresión Lineal

En este trabajo se utilizó el método de la regresión lineal Tabla 16, el cual puede aplicarse a escala mensual y anual. Básicamente, el método consiste en investigar si existe correlación entre los registros simultáneos de una estación y de las estaciones vecinas (dentro de la misma zona geográfica). Si esta correlación existe y es buena ($r \geq 0.9$), entonces se utiliza la ecuación de ajuste para deducir los datos faltantes en la estación en estudio. Si se desea estimar algún dato mensual, entonces se debe establecer la correlación con datos del mismo mes, a lo largo de los años de registro simultáneo.

Método de la regresión lineal

Se va a designar con “y” a la estación con datos incompletos y con “x” a la estación índice. Para la implementación del método se siguen los siguientes pasos:



- dibujar el diagrama de dispersión (puntos de coordenadas x,y).
- ajustar una recta a ese diagrama de dispersión.
- esta recta, llamada “línea de regresión”, se usa para completar la información faltante en “y”

Cuando hay varias estaciones índice surge la interrogante de cuál de ellas utilizar, la respuesta es la que tenga mejor correlación.

$$r = \frac{\sum(X - X_m) * (Y - Y_m)}{(n - 1) * S_x * S_y}$$

n: número de pares de datos conocidos.

X_m: media aritmética de los datos de “X” que forman parejas con los de “Y”.

Y_m: media aritmética de todos los datos de “Y”.

S_x: desviación estándar para todos los datos de “X” que forman parejas con los de Y.

S_y: desviación estándar para todos los datos de “Y”.

$$S_x = \frac{\sum(X - X_m)^2}{(n - 1)} \wedge 0.5$$

$$S_y = \frac{\sum(Y - Y_m)^2}{(n - 1)} \wedge 0.5$$

Los valores de *r* varían de -1 a 1.

R=0, significa que no existe ningún grado de asociación entre los valores de “x” y los valores de “y” (correlación nula).

R=1, significa que los puntos del diagrama de dispersión se alinean en una recta de pendiente positiva.



$R=-1$, significa que los puntos del diagrama de dispersión se alinean en una recta de pendiente negativa.

En el caso presente de precipitaciones anuales, la experiencia indica que la correlación es directa y entonces la ecuación de la recta de regresión es:

$$Y' = \alpha + \beta * X$$

La recta Y' se emplea para referirse a los valores derivados de la recta de regresión. Los valores de los coeficientes α y β se encuentran generalmente con el método de los mínimos cuadrados.

En lugar de la ecuación anterior se prefiere usar:

$$Y' = a + b * (X - X_m)$$

$$a = Y_m$$

$$b = r * \frac{S_y}{S_x}$$

Los resultados obtenidos en la regresión lineal múltiple en cada una de las estaciones en estudio se presentan en la Tabla 16.



Tabla 16. Dedución de datos faltantes por el método de la regresión lineal para las precipitaciones anuales.

Año	Morelia	Santiago Undameo	Capula	Santa Fe	Teremendo	Cointzio	Colegio	Huandacareo
1941	872.87	869.40	893.97	841.24	716.35	901.90	819.88	812.97
1942	787.04	845.54	812.74	800.95	691.04	743.40	754.58	847.33
1943	765.32	839.50	792.19	790.76	684.64	703.30	738.06	856.03
1944	773.82	841.86	800.24	794.75	687.14	719.00	744.53	852.62
1945	701.91	821.87	732.18	761.00	665.93	586.20	689.82	881.42
1946	596.53	792.58	632.46	711.53	634.86	391.60	609.64	923.61
1947	774.47	842.05	800.85	795.06	687.33	720.20	745.02	852.36
1948	639.50	804.52	673.12	731.70	647.53	736.60	642.33	906.40
1949	544.10	778.00	582.83	686.92	619.39	716.00	569.75	944.60
1950	745.90	834.10	773.81	781.64	678.91	869.00	723.28	863.80
1951	710.20	824.18	740.03	764.89	668.38	578.20	696.12	878.10
1952	939.30	887.87	956.84	872.43	735.95	776.20	870.42	786.37
1953	689.80	818.51	720.72	755.31	662.36	614.80	680.60	886.27
1954	828.40	865.30	851.89	820.37	703.24	783.30	786.05	830.77
1955	805.70	944.70	830.40	809.71	696.54	900.20	768.78	839.86
1956	845.30	909.50	867.88	828.30	708.22	748.10	798.91	824.01
1957	545.90	649.10	584.54	687.76	619.92	707.70	571.12	943.88
1958	1151.60	1277.00	1157.75	972.08	798.56	1392.30	1031.94	701.38
1959	1114.60	988.50	1122.73	954.71	787.65	941.70	1003.79	716.19
1960	581.50	647.50	618.23	704.47	630.42	640.70	598.21	929.63
1961	556.90	635.70	594.95	692.93	623.17	700.00	579.49	939.47
1962	789.40	806.20	814.98	802.06	691.74	851.70	756.38	846.39
1963	838.60	864.10	861.54	825.16	706.25	909.90	793.81	826.69
1964	844.50	909.50	867.12	833.40	707.99	950.10	798.30	824.33
1965	925.50	766.30	943.78	1440.50	731.88	870.70	859.92	791.90
1966	884.40	942.60	904.88	1117.50	719.75	892.80	828.66	808.35
1967	1027.90	1061.00	1040.68	1285.60	762.08	1096.10	937.83	750.90
1968	859.30	1008.40	881.13	1009.90	712.35	1110.60	809.56	818.40
1969	724.90	834.80	753.94	910.10	672.71	791.00	707.31	872.21
1970	810.90	680.50	835.32	813.60	698.08	643.40	772.74	837.78
1971	936.60	877.10	954.28	965.40	735.15	785.60	868.37	787.46
1972	1020.50	906.90	1033.68	1012.30	759.89	848.20	932.20	753.86
1973	870.10	867.10	891.35	1175.90	715.54	878.60	817.78	814.08
1974	894.00	684.40	913.97	857.20	722.59	308.00	835.96	804.51
1975	732.80	896.90	761.41	963.50	675.04	845.30	713.32	869.05
1976	1060.00	1054.70	1071.06	1071.00	771.54	987.10	962.25	738.05
1977	713.60	1026.90	743.24	963.90	669.38	851.50	698.71	876.74
1978	907.00	1014.80	926.27	1105.30	726.42	1018.60	845.85	799.31
1979	580.80	780.30	617.57	937.70	630.21	664.00	597.67	929.91
1980	786.60	734.70	812.33	718.00	690.91	923.80	754.25	847.51
1981	700.60	786.25	730.94	886.20	665.55	906.20	688.82	881.94
1982	521.80	710.80	604.60	525.60	588.10	588.80	552.78	953.53
1983	811.80	585.10	825.20	670.40	391.60	886.90	773.42	296.20
1984	601.20	772.60	784.00	757.50	797.20	726.10	613.19	1216.40
1985	700.10	799.40	681.50	287.10	514.20	820.50	688.44	866.10
1986	661.00	701.50	756.70	521.56	707.20	742.42	658.69	822.60
1987	565.80	618.80	215.40	483.40	540.10	690.87	510.50	609.90
1988	846.70	878.10	602.20	624.50	716.60	842.98	865.30	658.20
1989	557.50	555.00	595.52	543.20	767.10	686.37	653.40	645.30
1990	895.10	1167.90	915.01	1097.90	673.40	869.18	784.10	758.90
1991	918.50	864.30	937.15	811.40	673.10	881.86	839.70	779.00
1992	961.40	935.50	977.75	917.50	980.80	943.70	922.00	770.70
1993	932.00	861.50	949.93	268.10	552.20	787.30	736.00	667.10
1994	694.80	648.70	725.45	756.20	484.30	710.80	666.70	884.26
1995	907.63	1091.60	926.87	769.80	683.30	966.10	905.60	799.05
1996	513.50	835.70	553.88	461.30	533.30	693.90	554.60	956.85
1997	713.20	793.70	721.90	205.90	464.20	672.00	585.40	876.90
1998	988.40	917.70	1017.40	895.47	621.70	745.80	907.78	766.72
1999	730.80	675.40	762.30	774.56	675.10	653.10	717.40	669.60
2000	517.80	891.70	706.00	674.57	682.70	802.60	550.70	1533.20
2001	848.00	946.00	1264.60	829.57	1117.90	894.80	850.30	806.30
2002	1053.10	742.70	1191.30	477.40	1080.90	890.10	967.50	1269.20
2003	971.40	861.30	767.00	887.49	693.00	812.70	1009.80	885.90
2004	914.20	885.60	894.40	844.30	810.60	823.20	891.10	1186.50
2005	756.80	935.50	773.00	584.80	643.80	859.90	692.90	536.40
2006	788.90	729.50	837.10	957.90	647.70	983.55	812.01	1220.90
2007	692.20	831.00	767.20	638.20	721.80	759.31	650.60	995.90
2008	584.00	789.09	620.59	1021.20	460.50	700.72	600.11	1050.58
2009	720.70	827.10	749.96	652.40	452.30	774.75	658.90	868.76
2010	1032.03	913.65	1044.59	670.40	972.79	943.33	906.30	391.41
2011	559.00	782.14	596.94	559.80	623.79	687.18	675.60	938.63
2012	649.41	807.28	682.49	736.35	650.45	736.14	648.80	902.44
Promedio =	784.55	841.34	810.39	793.87	686.59	799.73	753.49	848.33



Nota: los números en rojo representan los datos faltantes los cuales se estimaron con el método de regresión lineal.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 17, para las estaciones de Morelia y El Colegio, se considera que la estimación de datos es aceptable obteniendo un valor de $r = 0.95$, existiendo una buena correlación entre la base de datos y los predichos.

Tabla 17. Resultados del método de la regresión lineal para las estaciones de Morelia y El Colegio.

Estadísticas de la regresión				
Coeficiente de correlación múltiple		0.95987		
Coeficiente de determinación R^2		0.92134		
R^2 ajustado		0.92022		
Error típico		44.486		
Observaciones		72		
ANÁLISIS DE VARIANZA				
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	
Regresión	1	1622707.85	1622707.85	
Residuos	70	138530.3337	1979.004768	
Total	71	1761238.183		
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	-122.897707	32.1208584	-3.826102811	0.00028
Variable X 1	1.20431541	0.0420575	28.63497104	2.216E-40

5.2.3. Cálculo de la precipitación

De los métodos que existen para estimar la precipitación media mensual o anual, tres de los más conocidos son: el aritmético, el de las isoyetas y el de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 1997).



a) Método aritmético

Consiste simplemente en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada una de la estación usada en el análisis (Aparicio, 1997). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 18.

$$hp = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hpi$$

Tabla 18. Resultados del método aritmético para la precipitación media anual.

Clave	Estación	Precipitación anual mm	<i>hp mm</i>
16022	Cointzio	799.73	781.42
16081	Morelia	784.55	
16118	Santa Fe	793.87	
16120	Santiago Undameo	841.34	
16247	Capula	810.39	
16512	El colegio	753.49	
16254	Teremendo	686.59	
N° de Estaciones		7.00	

b) Método de los polígonos de Thiessen

El método de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 1997) consiste en obtener el área de influencia de cada una de las estaciones climatológicas. Al dividir el área parcial del polígono entre el área total de la cuenca se obtiene el factor de ponderación que multiplicado por la lámina de lluvia registrada en la estación correspondiente se obtiene el dato de aportación de cada estación climatológica (Tabla 19).

$$hp = \frac{1}{A\tau} \sum_{i=1}^n Ai hpi$$



Tabla 19. Resultados del método polígonos de Thiessen para la precipitación media anual.

Clave	Estación	Precipitación anual mm	Área de influencia km ²	Área x Precipitación	hp mm
16022	Cointzio	799.73	64.18	51326.67	796.68
16081	Morelia	784.55	2.47	1937.83	
16118	Santa Fe	793.87	3.11	2468.93	
16120	Santiago Undameo	841.34	18.73	15758.32	
16247	Capula	810.39	223.20	180877.94	
16512	El colegio	753.49	1.02	768.56	
16254	Teremendo	686.59	36.41	24998.64	
TOTAL=			349.12		

La elaboración de los polígonos de Thiessen se realizó por medio del software ArcGis 10.3 de acuerdo al procedimiento descrito por Aparicio (1997), las áreas de influencia de cada una de las estaciones climatológicas se muestran en la Figura 28.

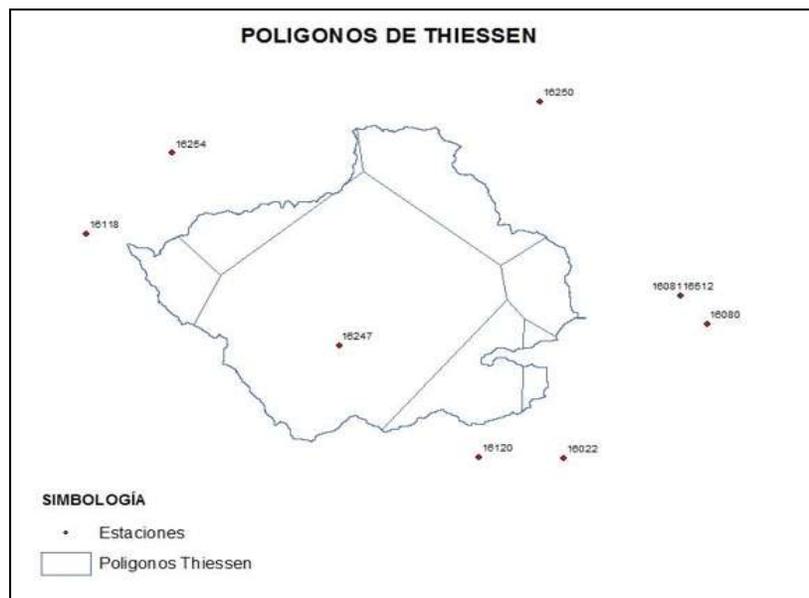


Figura 28. Distribución de los polígonos de Thiessen.



c) Método de las Isoyetas

El método de las isoyetas (Aparicio, 1997) es más preciso que los anteriores, pero tiene la desventaja de que se tienen que calcular las isoyetas para cada evento de precipitación o para la precipitación acumulada de acuerdo con el intervalo de tiempo de interés. El método consiste básicamente en obtener curvas con igual lámina de precipitación, calcular el área entre dos curvas y multiplicarla por la lámina de precipitación media (Tabla 20).

$$hp = \frac{1}{A\tau} \sum_{i=1}^n (hp A'i)$$

Tabla 20. Resultados del método de las isoyetas para precipitación media anual.

Clave	Estación	Precipitación anual mm	Isoyeta	Área km ²	hp promedio		hp mm
16022	Cointzio	799.73	550-600	3.53	575	2029.75	782.94
16081	Morelia	784.55	600-650	9.68	625	6050	
16118	Santa Fe	793.87	650-700	19.09	675	12885.75	
16120	Santiago Undameo	841.34	700-750	65.89	725	47770.25	
16247	Capula	810.39	750-800	88.34	775	68463.5	
16512	El colegio	753.49	800-850	130.75	825	107868.8	
16254	Teremendo	686.59	850-900	23.59	875	20641.25	
TOTAL=			900-950	8.25	925	7631.25	

En la Figura 29 se observan las curvas generadas por el software ArcGis 10.3 a cada 50 mm.

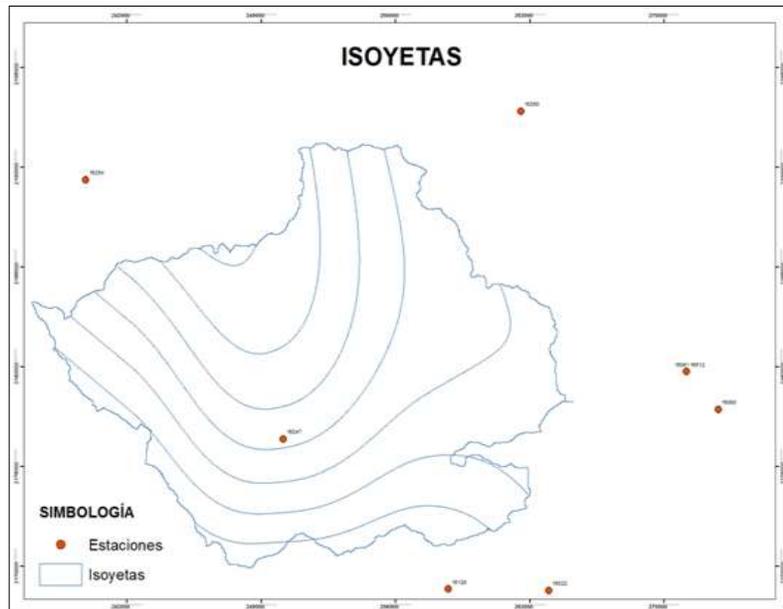


Figura 29. Isoyetas generadas a cada 50 mm.

De acuerdo a los resultados obtenidos de cada uno de los métodos para el cálculo de la precipitación anual, se decidió utilizar las precipitaciones anuales en mm obtenidas por el método de los polígonos de Thiessen (Figura 30), debido a que se considera un método preciso y confiable.

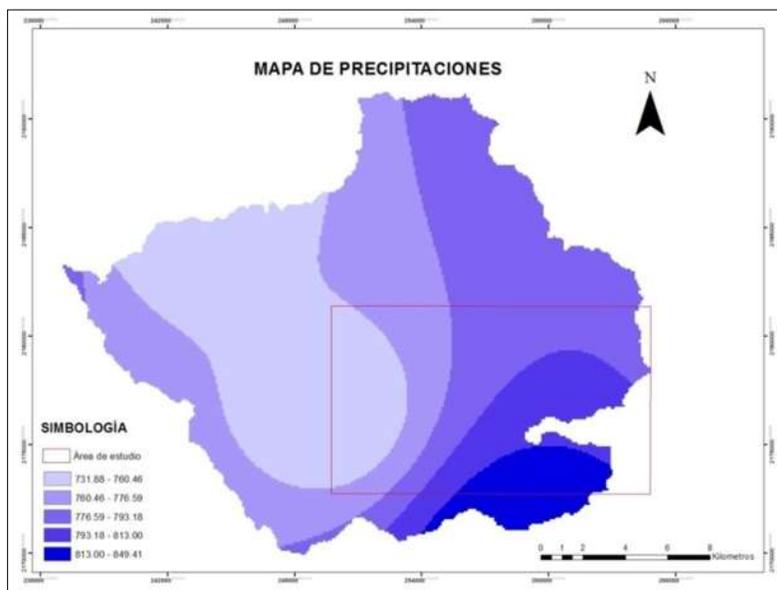


Figura 30. Precipitación media anual en mm para la cuenca en estudio.



5.2.4. Cálculo de la evapotranspiración

Para determinar la evapotranspiración es necesaria una serie histórica de temperaturas medias mensuales. Se hace un promedio mensual y con ese dato se calcula la evapotranspiración para cada uno de los meses del año. Para este trabajo se empleó el método de Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial (Hernández, 2014).

Método de Thornthwaite. Este método emplea únicamente datos de temperatura media mensual del sitio de estudio para el cálculo del uso consuntivo o evapotranspiración, dejando fuera aspectos como el tipo de cultivo y sus condiciones de desarrollo. Este método se considera solo como una aproximación y se recomienda su uso solo en estudios de gran visión. Con este método el uso consuntivo se calcula como:

$$U_j = 1.6 k_\alpha \left(\frac{10T_j}{I} \right)^\alpha$$

U_j : uso consuntivo para el mes “j” (en cm de lámina de agua).

T_j : temperatura media mensual en el mes “j” (en °C).

K_a : constante que depende de la latitud del sitio y del mes del año analizado.

α, I : constantes determinadas con las siguientes fórmulas.

$$\alpha = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.492$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} ij, \text{ donde } ij = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

El resultado del cálculo de la evapotranspiración es el que se presenta en la Tabla 21. El mismo procedimiento se realizó para cada una de las estaciones climatológicas.

Tabla 21. Método de Thornthwaite para el cálculo de la evapotranspiración en la estación Coitzio.

16022	Coitzio, Morelia												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
temp	14.58	16.15	18.31	20.16	20.87	20.08	18.88	18.77	18.56	17.74	16.19	14.99	215.27
i	5.05	5.90	7.14	8.26	8.70	8.21	7.48	7.41	7.28	6.80	5.92	5.27	83.42
ETP sin corr	44.74	54.02	68.12	81.33	86.71	80.74	72.07	71.31	69.84	64.24	54.28	47.10	
nº días mes	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	
nº horas luz	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	
ETP corr.mm	46.23	50.42	70.39	81.33	89.60	80.74	74.47	73.69	69.84	66.38	54.28	48.67	806.05
ETP corr.m ³	56.64	61.77	86.23	99.63	109.76	98.90	91.23	90.27	85.56	81.32	66.49	59.62	987.41

La temperatura media anual que se utilizó para la obtención de la evapotranspiración es la que se presenta en la Figura 31 (CLICOM, 2016)

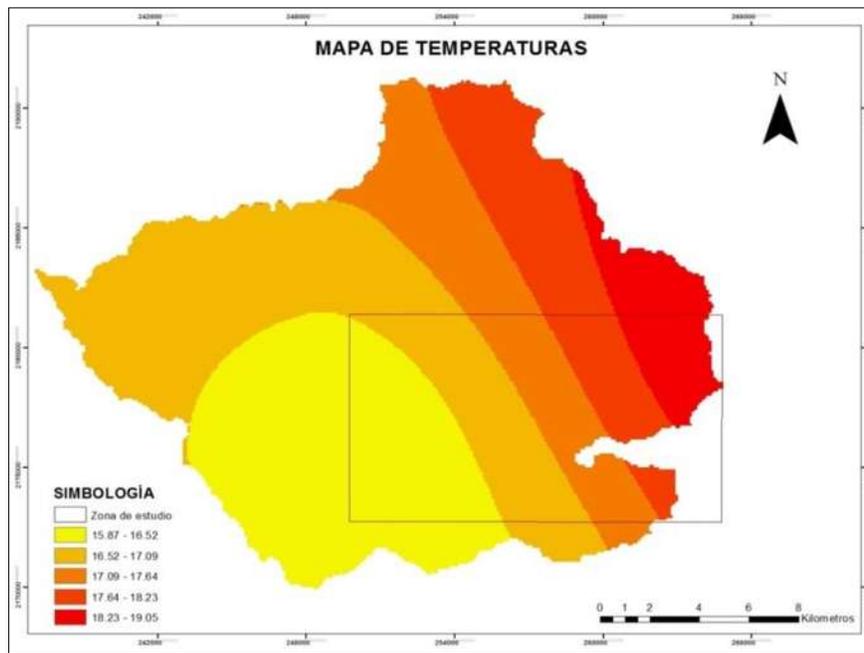


Figura 31. Temperatura media anual en °C para la cuenca en estudio.



La evapotranspiración se obtuvo de manera mensual para cada una de las estaciones en estudio registrándose los valores más altos en los meses de Abril, Mayo y junio, (Figura 32) obtenidos por el método de Thornthwaite.

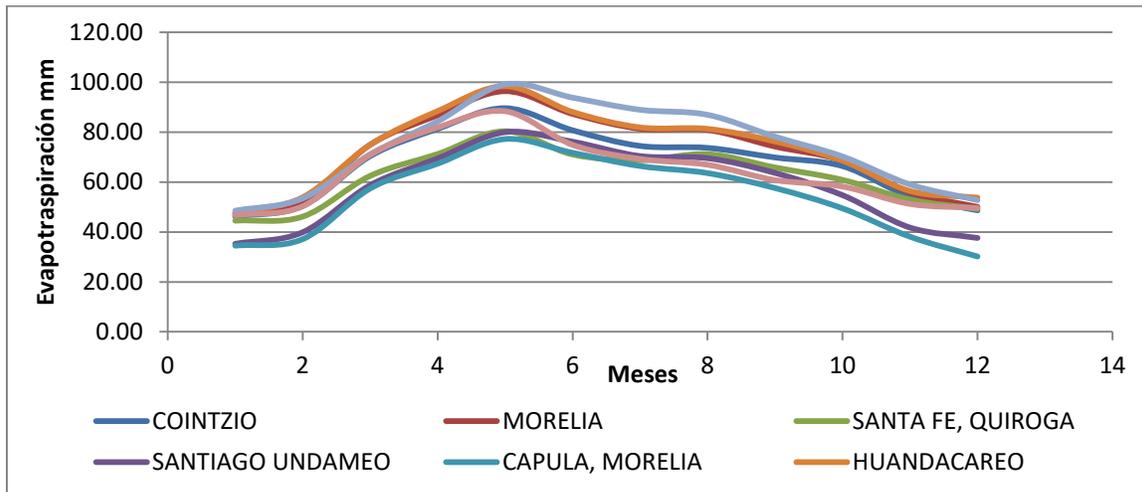


Figura 32. Evapotranspiración mensual obtenida por el método Thornthwaite para cada una de las estaciones climatológicas.

La información presentada anteriormente se introdujo al Software ArcGis 10.3, representando los valores bajos 70.55 (verde) y los más altos 89 (rojo), obteniendo con ello la distribución espacial de la evapotranspiración media anual de la cuenca en estudio (Figura 33).

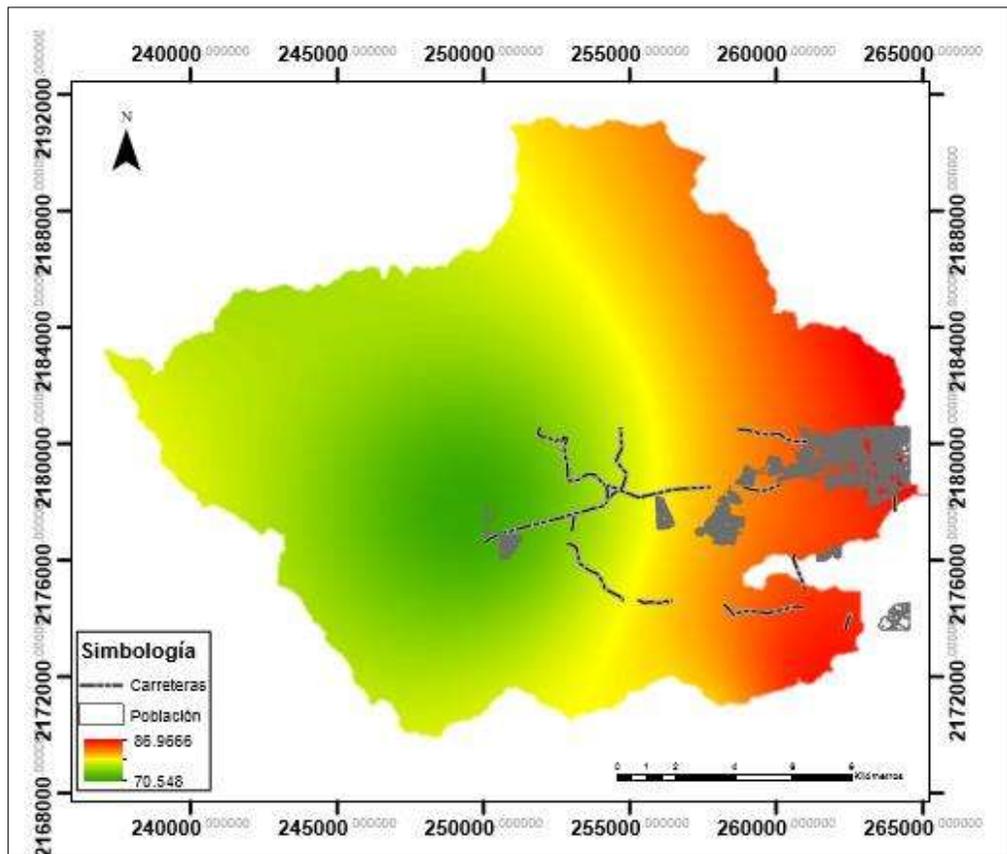


Figura 33. Distribución espacial de la evapotranspiración media anual en mm/año.

5.2.5. Obtención del coeficiente de escurrimiento (C_e)

El coeficiente de escurrimiento es la proporción de lluvia que se convierte en escurrimiento para la región determinada. El método que se aplica para la determinación de este coeficiente fue adoptado de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015, que establece las especificaciones y el criterio para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Para ello, se considera en primer lugar el volumen de precipitación total mensual registrada en las estaciones climatológicas más cercanas a las zonas de estudio. Se toman en cuenta también las características de permeabilidad del suelo, y la capacidad de interceptación de la lluvia por parte de la vegetación, ambas incluidas en el parámetro “k” que establece la norma.



A pesar de que la permeabilidad del suelo es un elemento complejo que depende de diversos factores, se hace la simplificación de considerar la textura del suelo como una media de ese elemento.

Sin embargo, hay que señalar que el coeficiente de escurrimiento no es un valor exacto, sino únicamente una aproximación, pues además de que se obtendrá a partir de datos muy generales para el tamaño de la cuenca, el coeficiente en sí mismo tiende a variar espacialmente y temporalmente en el transcurso del año, según la intensidad de la lluvia y las condiciones de humedad, previas en la cuenca.

Conociendo el coeficiente de escurrimiento, es posible obtener el volumen medio mensual del escurrimiento, al multiplicar el coeficiente de escurrimiento, por la media ponderada de la precipitación o lámina media mensual de lluvia (m) por la superficie (m²), obteniéndose un volumen total del agua que cae como precipitación en la cuenca expresado en m³/mes.

El coeficiente de escurrimiento (Ce) puede obtenerse a partir de tablas o manuales hidrológicos, en función del tipo de cobertura del suelo, las pendientes del terreno, el uso y tipo del suelo.

La Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015, establece una metodología para obtener el coeficiente de escurrimiento, que está en función del uso y tipo de suelo y de la precipitación en la cuenca, mediante las siguientes ecuaciones.

$$C_{ea} = \frac{k(p_{ma} - 250)}{2000} \text{ si } k \leq 0.15$$

$$C_{ea} = \frac{k(p_{ma} - 250)}{2000} + \frac{k - 0.15}{1.5} \text{ si } k > 0.15$$



Dónde:

C_{ea} = Coeficiente de escurrimiento medio anual.

k = Parámetro que depende del uso y tipo de suelo.

p = Precipitación media anual en mm.

Para obtener el coeficiente mensual se divide la precipitación mensual entre la anual y se multiplica por el coeficiente de escurrimiento. Es decir:

$$C_{em} = \frac{p_{mmi}}{p_{ma}} * C_{ea}$$

Dónde:

C_{em} = Es el coeficiente de escurrimiento medio mensual.

P_{mmi} = Es la precipitación media mensual del mes i .

P_{ma} = Es la precipitación media anual.

C_{ea} = Es el coeficiente de escurrimiento medio anual.

A continuación, en la Figura 34 se presenta la distribución espacial del parámetro “ k ” de la cuenca en estudio en la cual predominan los valores entre 0.2 y 0.32

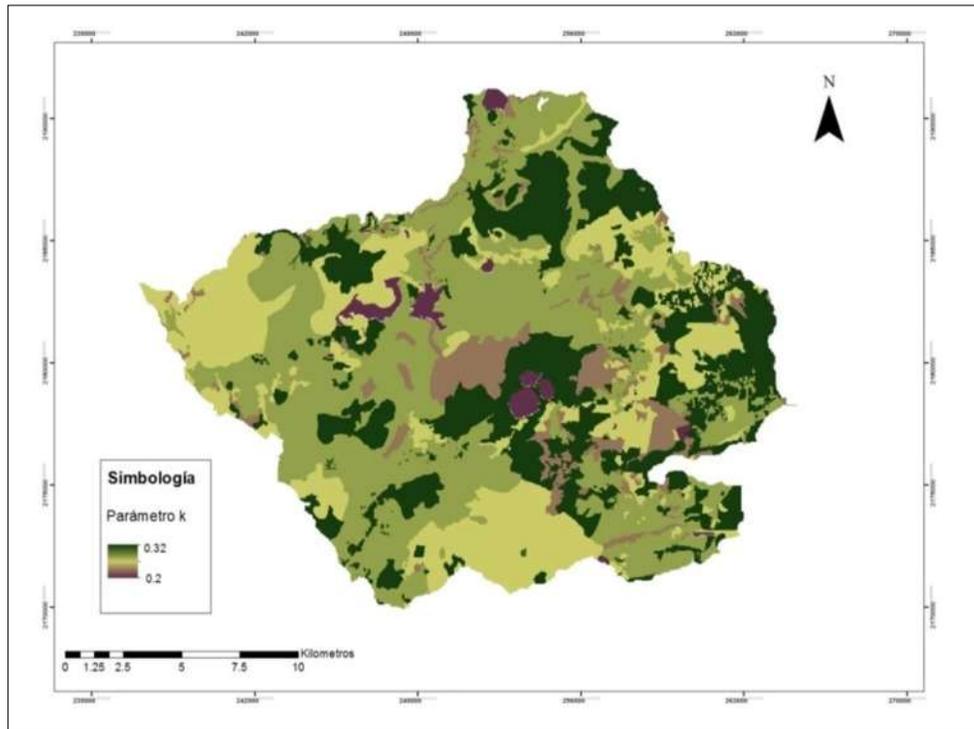


Figura 34. Parámetro K uso y tipo de suelo.

La figura 35 representa el coeficiente de escurrimiento medio anual calculado para la cuenca en estudio, los valores oscilan entre 0.086 – 0.197, identificando con ellos las zonas propensas a la infiltración.

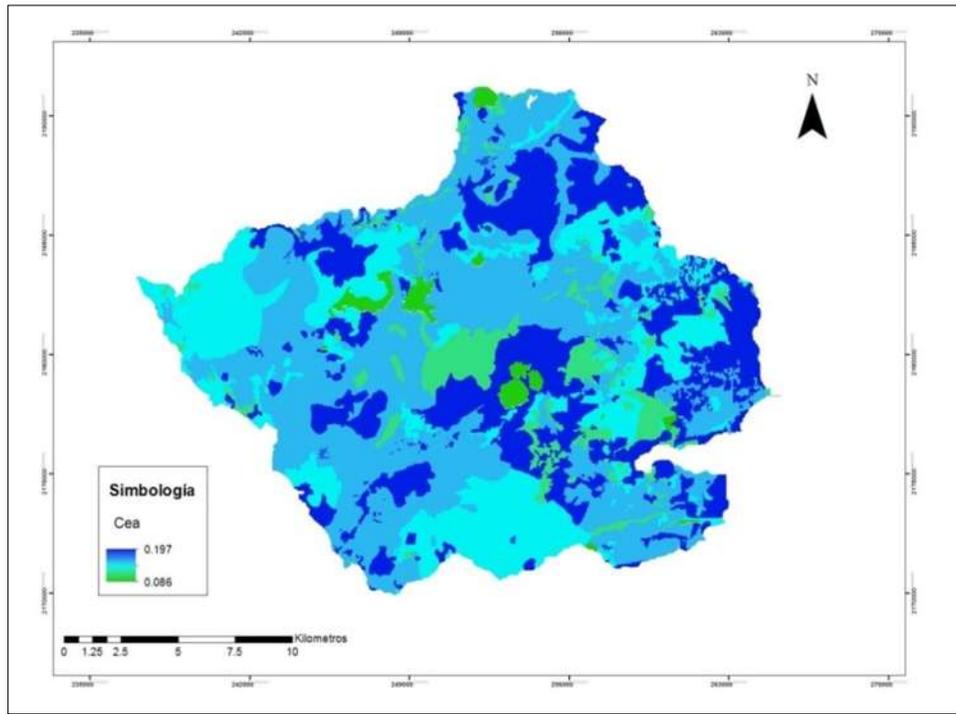


Figura 35. Coeficiente de escurrimiento anual en la cuenca en estudio.

Para la obtención del uso de suelo se realizó una interpretación a través de la digitalización de polígonos a escala 1:10,000 mediante imágenes SPOT del año 2015, los cuales se clasificaron de la siguiente manera (Figura 36):

Asentamientos humanos.

Bosque.

Cultivos en escarcha.

Cultivos tupidos.

Pastizales.

Pasto de corte.

Praderas.

Suelo en descanso.

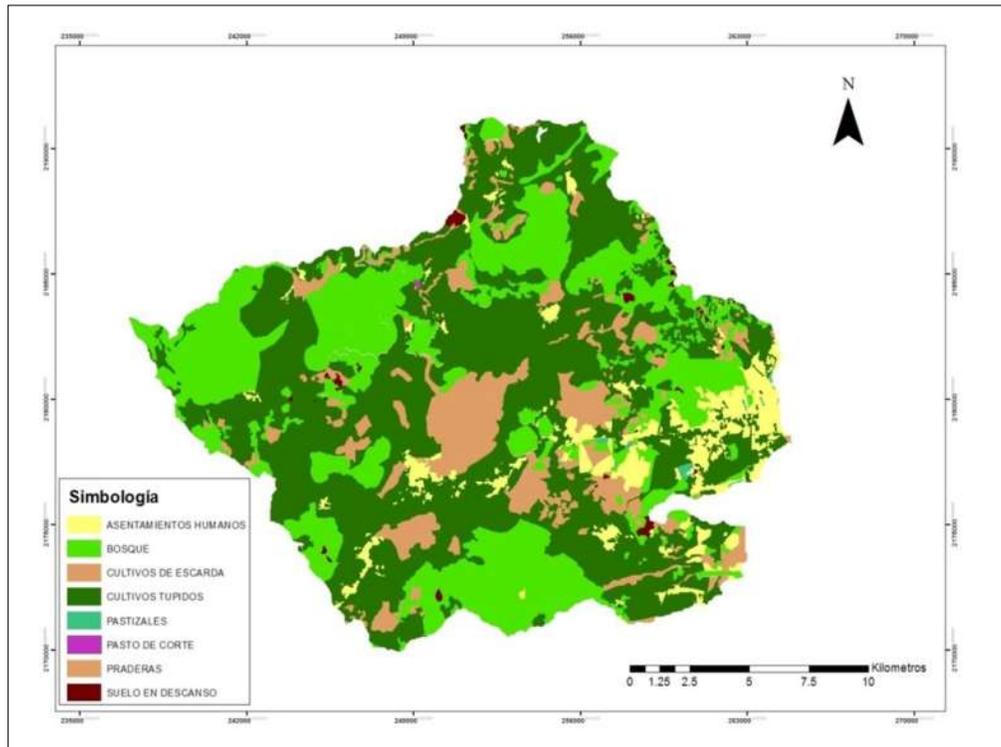


Figura 36. Uso de suelo en la cuenca en estudio.

5.2.6. Cálculo de la infiltración total (I_t)

La Infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la Tierra, y queda retenida por ella o alcanza un nivel freático incrementando el volumen acumulado anteriormente. Superada por la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad. Esta parte del proceso recibe distintas denominaciones: percolación, infiltración eficaz, infiltración profunda, etc (Hernández, 2014).

Se define por la ecuación:

$$I_t = (1 - c_{em})$$

Se considera que representa la proporción de la lluvia que no se pierde en la cuenca en forma de escurrimiento, sin embargo, una parte de la precipitación que no escurre se pierde por procesos de evaporación y transpiración.

La zona sureste de la cuenca en estudio muestra los valores más altos de infiltración indicando con ello las zonas de recarga presentes. Los valores oscilan entre 115.7 – 150 mm/año (Figura 37).

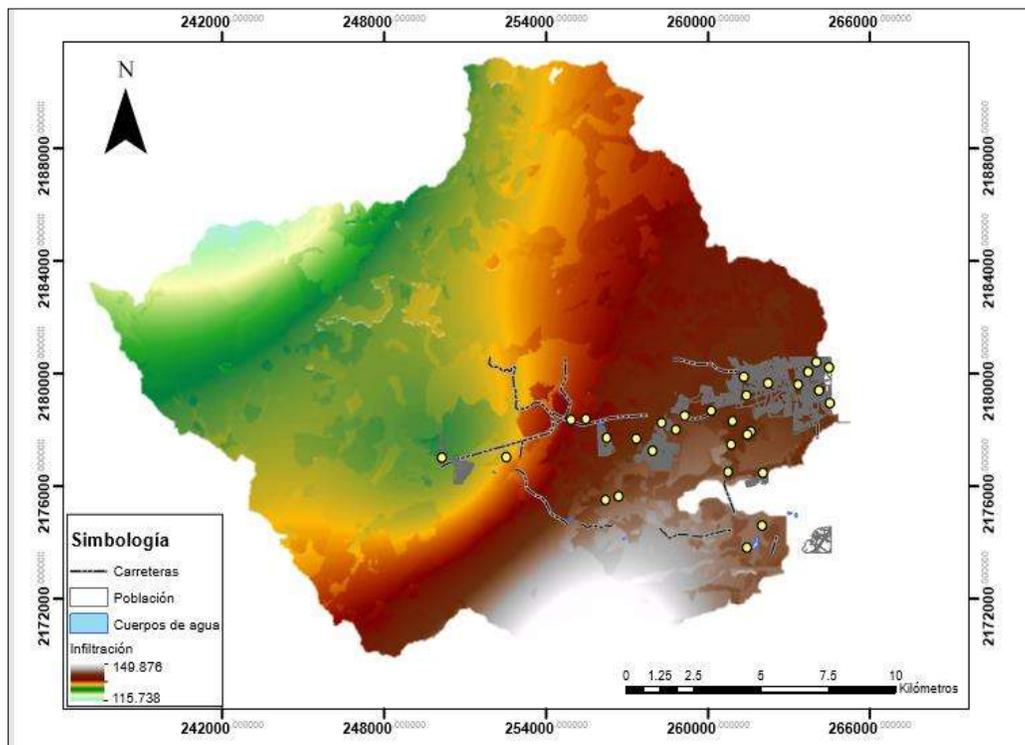


Figura 37. Distribución espacial de la infiltración media anual en mm/año.

5.2.7. Cálculo de la Recarga (R)

Cuando a la infiltración total se le resta el volumen de agua perdido por evapotranspiración se obtiene la recarga potencial en m^3 (Hernández, 2014).

$$R = It - ETP$$

La recarga que ocurre en el área de estudio oscila entre 227-280 mm/año (Figura 38). De acuerdo a lo anterior y con base en la Tabla 7, al parámetro de la recarga se le asigna un factor de ponderación de 9 para toda la zona de estudio, dado que estos valores se encuentran dentro del rango correspondiente, por tal motivo la puntuación de la recarga neta para el índice de Vulnerabilidad DRASTIC homogéneamente será de 36 puntos, representando una vulnerabilidad alta.

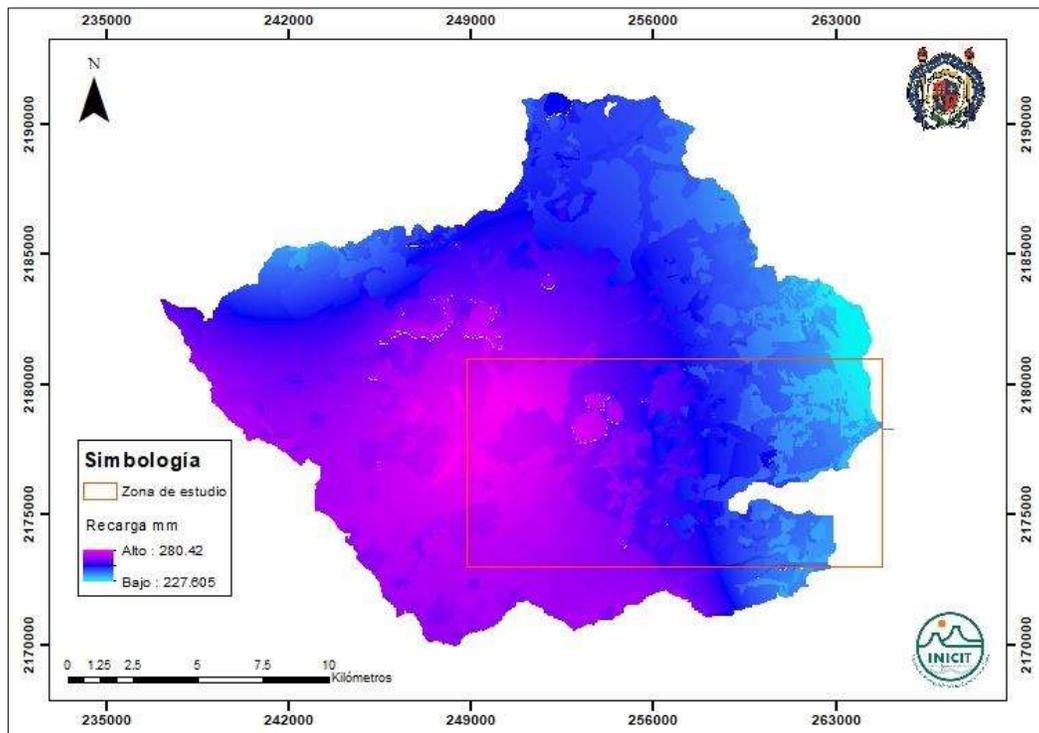


Figura 38. Distribución espacial de la recarga potencial en mm/año.

5.3. Medio acuífero (A)

La estratificación de materiales en la zona de estudio está constituida principalmente por material de origen volcánico (basaltos, andesitas, escorias, gravas, arenas), así como de origen lacustre y fluviolacustre (limos y arcillas). De acuerdo a lo anterior, y al ajuste realizado al método DRASTIC para su aplicación en la zona de estudio, se asignaron los valores más bajos del índice de vulnerabilidad a los limos y arcillas, mientras que al material de origen volcánico



los mayores. La Tabla 9 resume los puntajes otorgados y la Figura 39 muestra su distribución espacial. Los valores mayores para este parámetro se localizan en los conos volcánicos y sus alrededores, dado que los materiales que los conforman (permeables) y el estado en que se encuentran (fracturados), representan una mayor facilidad para que en un momento dado los contaminantes ingresen al acuífero. Para este parámetro los valores del índice DRASTIC se encuentran entre 10.5 y 26 puntos. Es importante conocer el grado de fracturación de la roca puesto que de ello depende el grado de vulnerabilidad, mientras mayor sea el fracturamiento mayor será la vulnerabilidad.

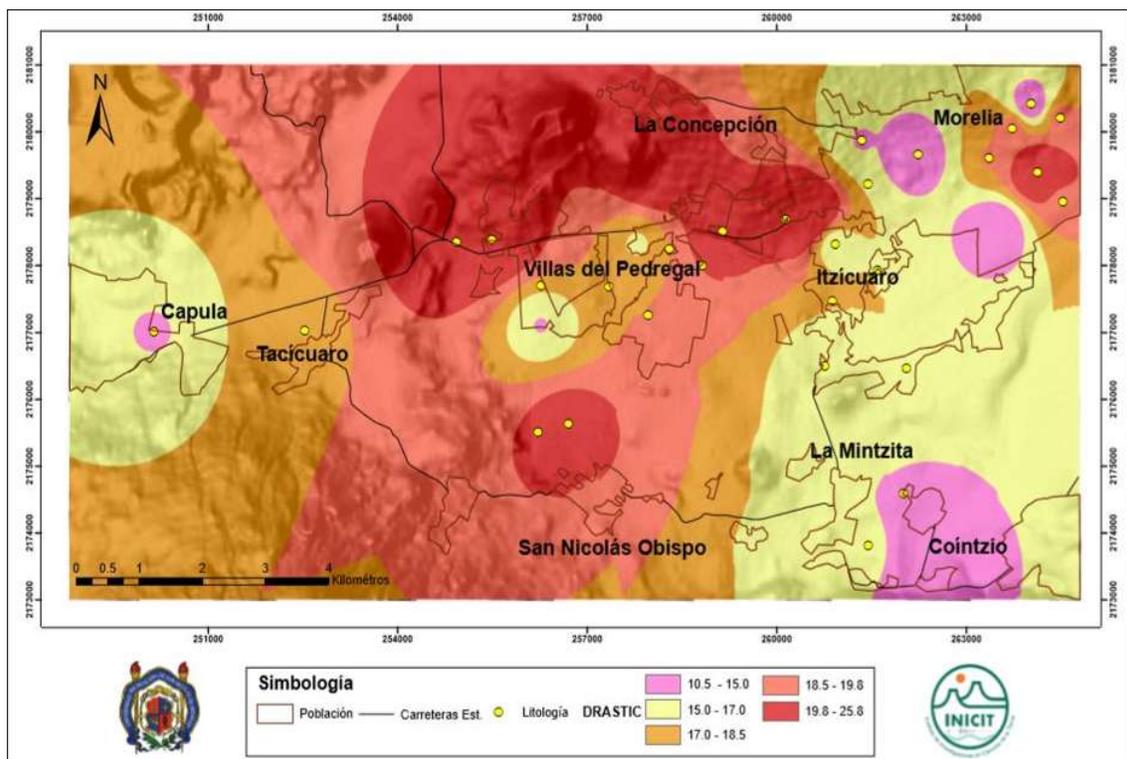


Figura 39. Índice DRASTIC para el medio acuífero.

5.4. Tipo de suelo (S)

Esta es la "primera línea de defensa" del acuífero. Los suelos más ampliamente distribuidos dentro de la cuenca fueron los Luvisoles (38.25%), Litosoles (20.50%) y Vertisoles (18.4%). Presentándose también suelos Feozems, Andosoles y los



menos predominantes los Regosoles. Esta distribución de las distintas unidades edafológicas se refleja en los valores obtenidos para dicho parámetro (Figura 40), cuyos valores son variables, desde 2 a 20 puntos. A los Luvisoles, que son los que predominan, se les asignó un valor de 2 dado que son sumamente arcillosos, y por lo tanto, de permeabilidad baja y drenaje lento; mientras que con un valor de 20 se consideraron a los Andosoles, Litosoles y Regosoles, dada su estructura y textura que les proporciona una determinada permeabilidad, incrementando su vulnerabilidad. En el área de estudio predominan las texturas arcillosas, las cuales por sus propiedades impermeables, representan para el parámetro de tipo de suelo una vulnerabilidad insignificante de acuerdo al método DRASTIC.

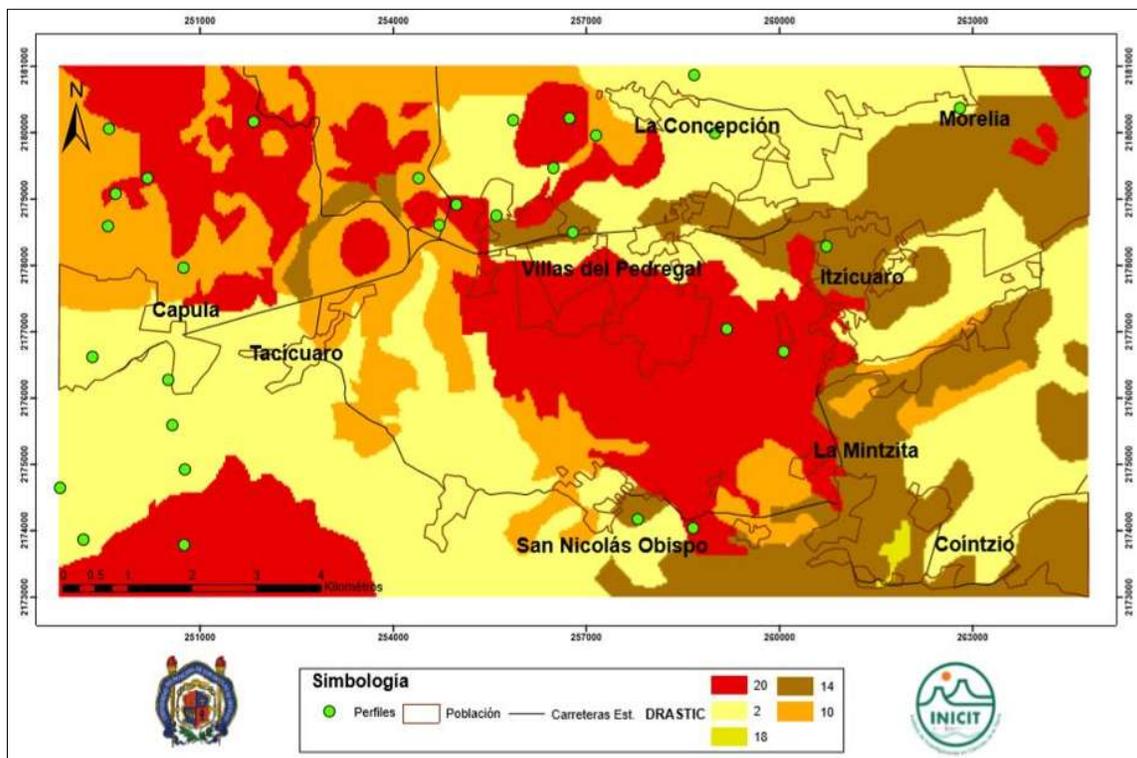


Figura 40. Índice DRASTIC para el tipo de suelo.



5.5. Pendiente del terreno (T)

La zona de estudio es una región muy abrupta por lo que se obtuvieron valores de la pendiente, superiores a 30%, ya que se encuentran gran cantidad de conos volcánicos destacando la presencia de aparatos de gran magnitud siendo el mayor y más complejo el Tzirare, responsable de pendientes que proporcionan menor oportunidad para que los contaminantes se infiltren, ya que el agua se mueva rápidamente y por lo tanto, existe mayor escorrentía y erosión. En la Figura 41 se observa un índice de vulnerabilidad en el rango de 1 – 3, lo que se asocia con un menor potencial de contaminación del agua subterránea. La unidad geológica que viene cortada en dirección E–O por el sistema de fallas Morelia-Acambay crea un desnivel topográfico que se incrementa conforme nos adentramos en la mancha urbana (zonas planas) donde se asignaron los valores mayores del índice de vulnerabilidad (9 y 10 puntos). Los índices dominantes oscilaron entre 1 y 6 puntos.

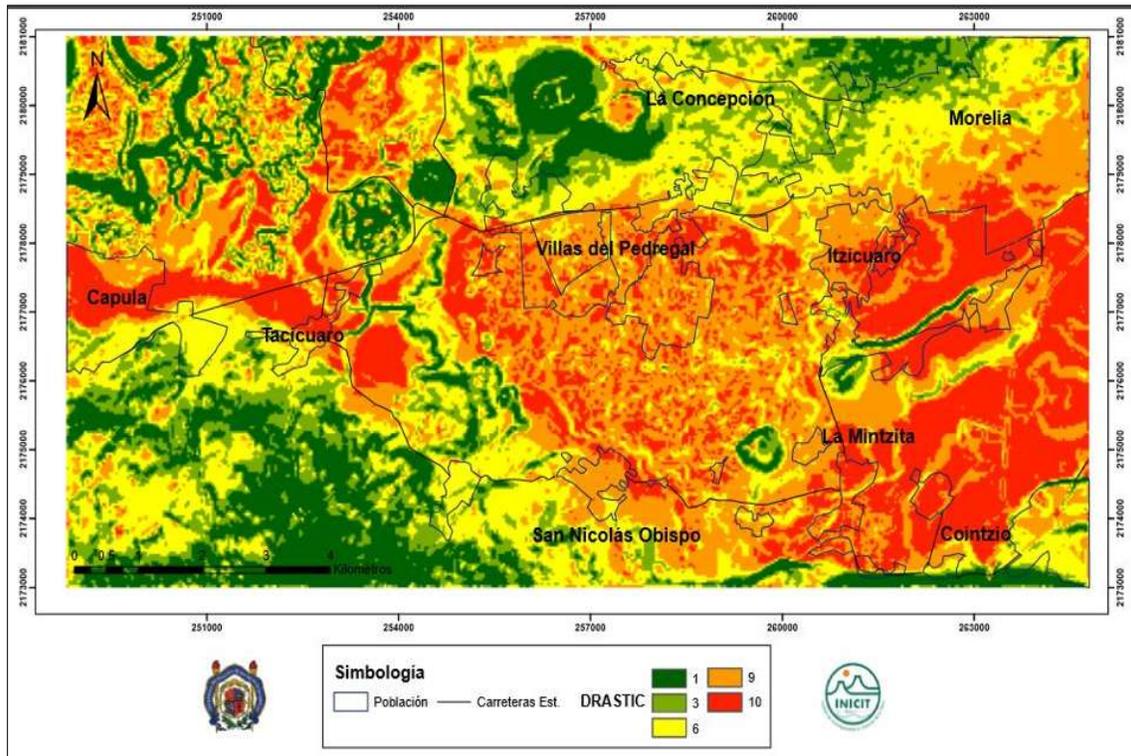


Figura 41. Índice DRÁSTIC para la pendiente del terreno.

5.6. Zona no saturada (I)

La zona no saturada es uno de los parámetros de mayor importancia para el cálculo final del índice de vulnerabilidad DRÁSTIC, esto se debe a que tiene el mayor de los pesos asignados a algún atributo junto a la profundidad del agua. La zona de estudio pertenece al Cinturón Volcánico Mexicano y al campo volcánico Michoacán-Guanajuato. En la zona de estudio se cuenta con cuatro unidades geohidrológicas predominando la secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco, y en menor cantidad, se presentan los flujos piroclásticos ignimbríticos. Conforme lo muestra la Figura 42 se obtuvieron valores altos del índice de vulnerabilidad DRÁSTIC (20 – 45 puntos), siendo la mayor valoración para los Depósitos Cuaternarios Aluviales debido a que están compuestos principalmente por arenas y gravas de diferente composición, motivo por el cual posee una permeabilidad alta. A la secuencia volcánica del corredor Tarasco se le

asignó un valor de 40, esta unidad presenta un intenso fracturamiento que le proporciona una permeabilidad alta, y regularmente está asociada con brechas de la misma composición. A la secuencia fluviolacustre se le dio un valor de 30 puntos, debido a que predominan sedimentos finos: arenas finas, limos y arcillas. El valor menor lo obtuvo la secuencia piroclástica de la ignimbrita de Morelia.

En las zonas de absorción y de recarga del manantial de La Mintzita, la litología está constituida por rocas basálticas que junto con la topografía propician la infiltración de las aguas pluviales al subsuelo.

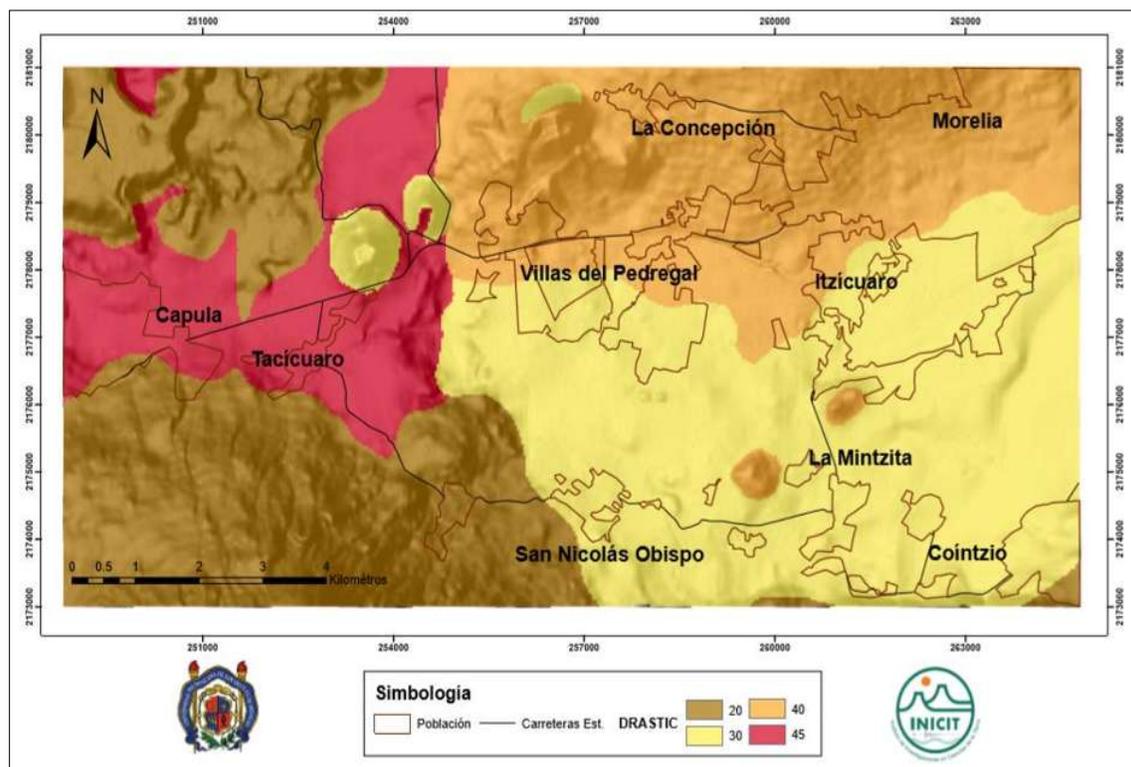


Figura 42. Índice DRASTIC para la zona no saturada.

5.7. Conductividad hidráulica (C)

La conductividad hidráulica se determinó a través de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en los pozos de extracción del agua del subsuelo como parte de la tesis doctoral de Pérez-Villarreal (en revisión). La Figura 43 demuestra



que el índice de vulnerabilidad DRASTIC mayor (19 – 30 puntos), se encuentra cercano a la ciudad de Morelia reflejando que se carece de sustrato impermeable, además de contar con porosidad relativamente alta, ya que está conformado por fragmentos de lavas andesíticas, eventualmente andesítico-basálticas fracturadas, y depósitos fluviolacustres, siendo vías de migración de los contaminantes hacia el acuífero. La mayor parte de la zona de estudio presenta de baja a moderada conductividad hidráulica, debido a esto disminuye la dispersión del contaminante y la vulnerabilidad del acuífero predominando los valores bajos entre 3 y 9 puntos.

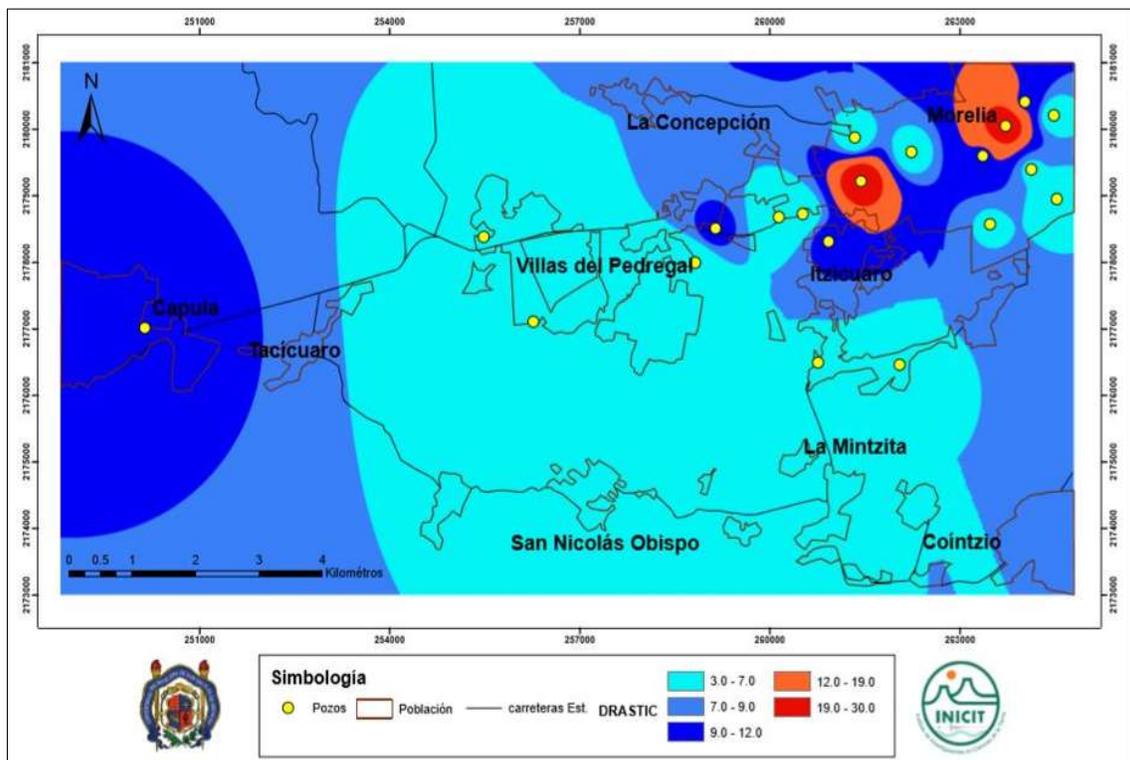


Figura 43. Índice DRASTIC para la conductividad hidráulica.

5.8. Fuentes potenciales de contaminación

Para identificar las actividades que pueden originar contaminación antrópica dentro del área de estudio, se realizó un inventario de fuentes potencialmente contaminantes principalmente en el área urbana. Se encontraron alrededor de 628 como se muestra en la Figura 44, sin embargo la mayoría de estas fuentes de



contaminación están concentradas en la localidad de Capula representando a el oficio de la Alfarería, las demás actividades que se tomaron en cuenta en este análisis fue la explotación del material pétreo: Banco Cerritos, Joyitas y Santa Fe por mencionar algunos, talleres mecánicos, la industria papelera CRISOBA, el tiradero municipal de la ciudad de Morelia y la existencia de 6 gasolineras dentro del área de estudio.

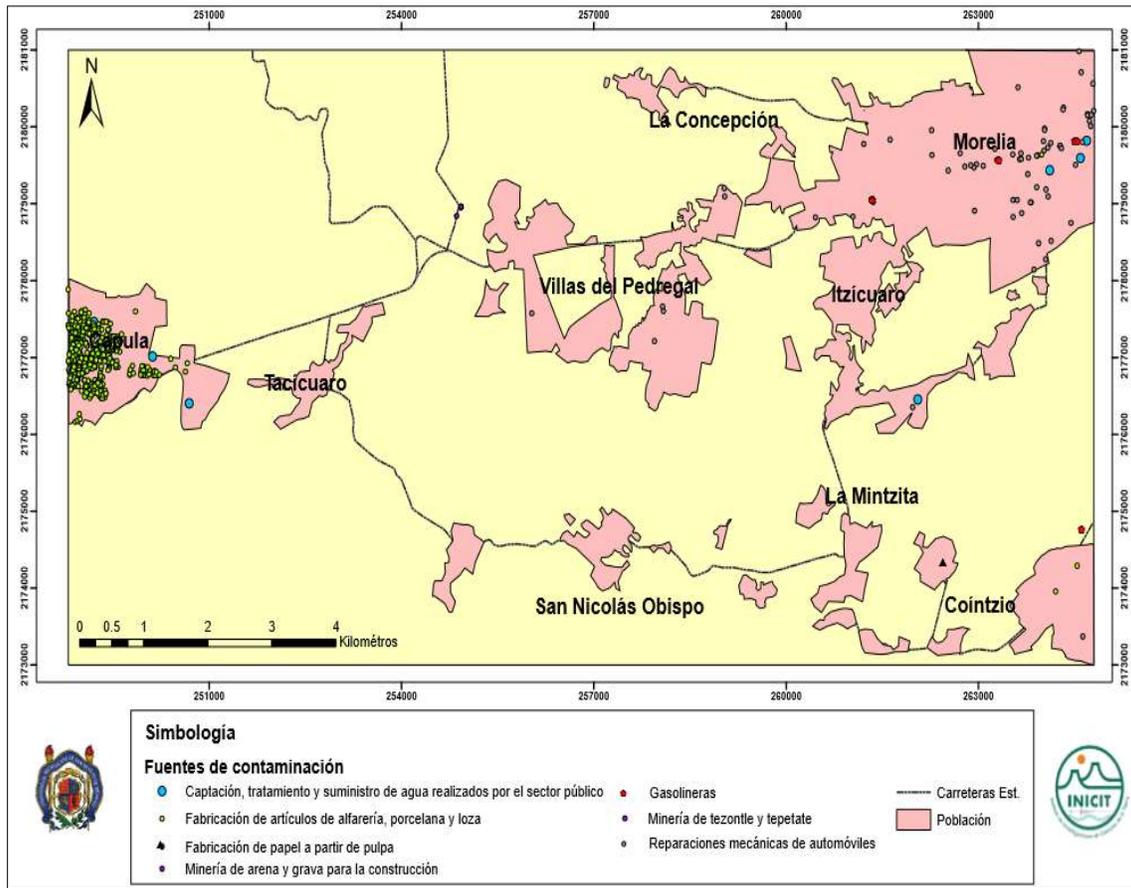


Figura 44. Fuentes potenciales de contaminación Morelia – Capula.



5.9. Mapa de índice DRASTIC

Con los resultados obtenidos de la reclasificación de los siete parámetros que emplea el método DRASTIC, se elaboró el mapa que se presenta en la Figura 45, la cual muestra la variación espacial del índice del grado de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la zona de estudio que varían entre 103 a 173, por lo que la zona de estudio presenta cuatro tipos de vulnerabilidad, los cuales son: Muy baja, Baja, Moderada y Alta.

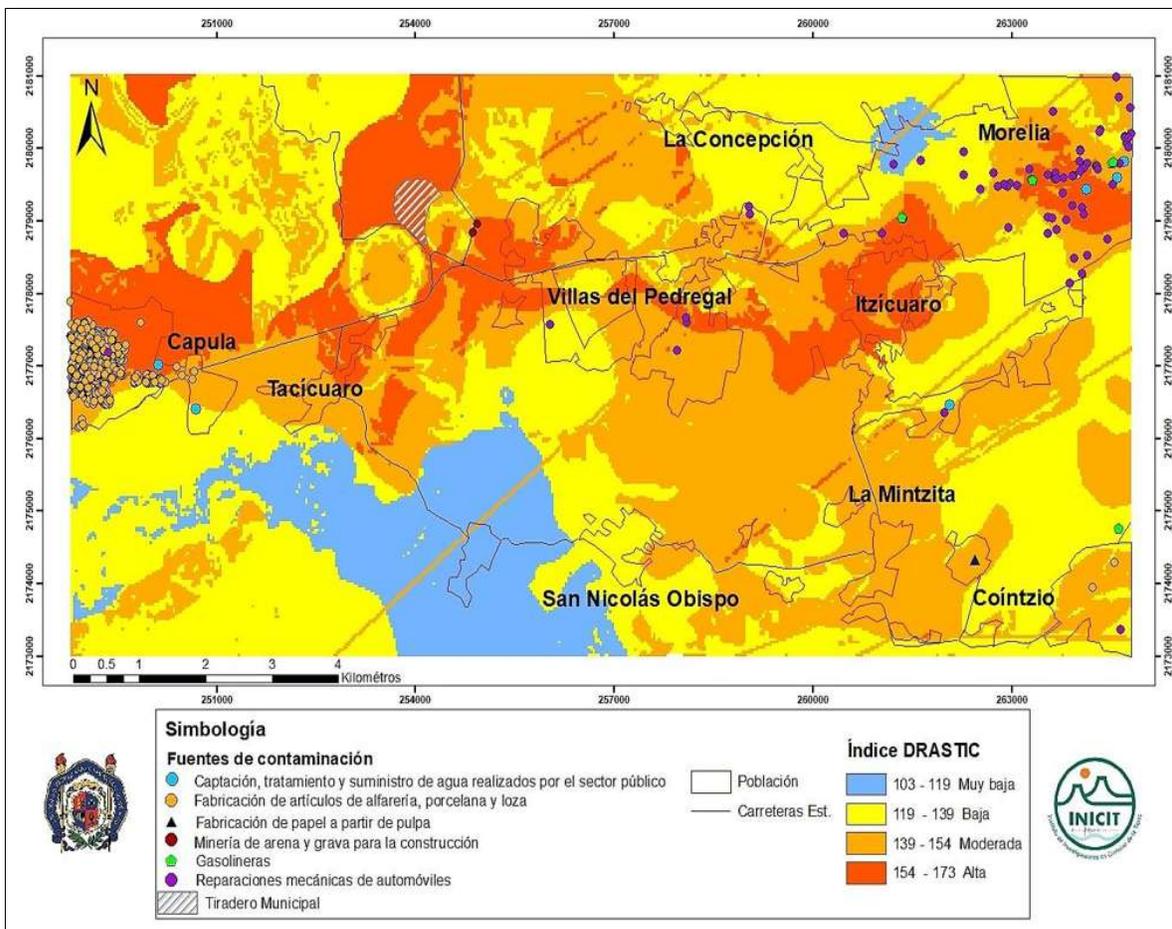


Figura 45. Índice del grado de Vulnerabilidad DRASTIC.



6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El método DRASTIC asigna un peso alto de vulnerabilidad a la profundidad del agua subterránea, pero la zona de estudio es poco propicia para que el acuífero se contamine, en cuanto a este parámetro se refiere, debido a que el agua subterránea se encuentra en su gran mayoría a profundidades por arriba de los 100 m. Sin embargo, los procesos de subsidencia-creep-falla asociados a la sobreexplotación del acuífero y la litología del medio incrementan las posibilidades de contaminación, ya que facilitan la infiltración de los agentes contaminantes hacia los mantos freáticos.

En cuanto a los suelos encontrados, éstos presentan una baja vulnerabilidad proporcionando un mayor grado de protección al acuífero subyacente, ya que están constituidos en su gran mayoría por materiales finos impermeables, que contienen un alto porcentaje de arcilla, con alto contenido de materia orgánica y que tienen baja conductividad hidráulica vertical.

Como era de esperarse, el parámetro que reflejó su importancia en la determinación del grado de vulnerabilidad fue el de la zona no saturada, representando el mayor índice a la vulnerabilidad debido a la presencia de sedimentos aluviales, fluviolacustres y material poroso de origen volcánico. Los principales fenómenos de difusión y dispersión de los agentes contaminantes dependen de la granulometría, textura, fraccionamiento, porosidad y permeabilidad de las rocas donde se encuentra el acuífero. Por lo que, se determinó que la capacidad del medio geológico para atenuar o restringir el transporte de los contaminantes hacia el acuífero en la zona poniente de Morelia es muy baja.

Se realizó un balance hídrico utilizando el resultado obtenido del cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) por el método de Thornthwaite y los datos de precipitación (P), con los que se obtuvo la infiltración y el escurrimiento mediante



el procedimiento de la NOM-011-CNA-2015. Finalmente, se calculó una recarga del sistema acuífero de 357 - 435 m³ /año.

La suma paramétrica de los mapas temáticos generados para la zona de estudio, indica que la vulnerabilidad natural del agua subterránea, de acuerdo a la metodología DRASTIC, es de muy baja a alta (103-173), los valores más altos del índice del grado de vulnerabilidad DRASTIC corresponden a las áreas en donde se encuentra establecida la localidad de Capula así como en la ciudad de Morelia, esto a consecuencia de las intensas actividades antropogénicas que ahí se desarrollan y a las características propias del medio como lo son los depósitos cuaternarios fluviolacustres y las lavas altamente fracturadas. Los parámetros que proporcionaron el mayor peso fueron: la profundidad del agua subterránea, la recarga neta, la pendiente del terreno y la zona no saturada.

El análisis realizado evidencia la presencia de gasolineras, bancos de materiales y el tiradero municipal de la ciudad de Morelia en las zonas de vulnerabilidad alta, lo que incrementa el riesgo de contaminación de los acuíferos.

Estudios realizados con anterioridad encabezados por la Dra. Isabel Israde Alcántara, respecto a la calidad del agua, demuestran que la zona de estudio Morelia-Capula sufre impacto directo de la contaminación de los mantos freáticos por metales pesados debido a la presencia de lixiviados, derivados vertidos industriales y hospitalarios en el relleno sanitario de la ciudad. El problema radica en que en esta zona se concentran los grandes conjuntos habitacionales como Villa Magna, La Hacienda, Del Bosque, La Maestranza, Villas de la Loma, Villas del Pedregal y Las Garzas donde se ha detectado la presencia de metales altamente tóxicos, como Manganeso, Hierro, Arsénico, Cobre, Cadmio y Plomo. El Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS) reporto que en los pozos que supervisa en la parte norponiente de Morelia, sólo en tres: Tacúcuaro, Villa Magna y Villas del Pedregal II se detectó presencia de Fierro y Manganeso. Esta información realza la importancia de la



determinación de índices de vulnerabilidad a la contaminación en esta zona, ya que los índices obtenidos muestran que las zonas de mayor vulnerabilidad son las que cuentan con la presencia de metales pesados, como se representa visualmente estos conjuntos habitacionales presentan un alto riesgo a ser contaminados esto debido al desmesurado crecimiento urbano y las actividades antropogénicas. La protección del acuífero debe realizarse de manera inmediata ya que este, es el que abastece de agua potable a la mayoría de población de Morelia.

Los estudios de vulnerabilidad natural a la contaminación resultan de gran importancia, ya que además de servir como pauta para la elaboración de políticas para la protección del acuífero y una correcta planificación del territorio en la zona de estudio, su adecuada utilización permitiría alcanzar el necesario uso sostenible de los recursos hídricos subterráneos que en la actualidad presentan problemas de sobreexplotación, y de los cuales se seguirán realizando las extracciones para satisfacer la demanda de la población. Así mismo, podrían conducir a evaluaciones de la vulnerabilidad sobre el uso del territorio y a la toma de medidas de protección contra la contaminación, siendo necesario visualizar el problema a corto, mediano y largo plazo, comenzando a reubicar los principales focos potenciales de contaminación, como el tiradero municipal, que se localizan en las zonas de alto riesgo de contaminación.



7. REFERENCIAS

- Albinet, M. 1970. Carte de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine de la France à 1/1.000.000 (Map of France of the ground water vulnerability to contamination, scale 1:1.000.000). Orléans, France : Publ. DATAR-BRGM
- Aller, L., Bennett T., Lehr, J., Petty, R. y Hackett, G.1987. "DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings". Robert S Keer Environmental Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency, ADA, Oklahoma 74820. USA.
- Aparicio F.J. 1993. Fundamentos de hidrología de superficie. Segunda reimpresión. Editorial Limusa, México.
- Ávila-Olivera, J.A. 2004. Contribución a los estudios geotécnicos y geofísicos en zonas urbanas con Procesos de Subsistencia Creep-Falla, caso: la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, p. 234.
- Ávila-Olivera J.A y Garduño-Monroy V.H. (2007). Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia. Ciencia Nicolaita, Vol. 46.
- Ávila-Olivera, J.A. y Garduño-Monroy V.H.2008. "A GPR study of subsidencecreep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico". Engineering Geology.
- Ávila-Olivera, J.A. y Garduño-Monroy, V.H. 2010. Conceptual model of land subsidence with a structural control. In: Land Subsidence, Associated Hazards and the role of Natural Resources Development (Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Galloway, D.L. eds.). Querétaro, Mexico, 195-197.
- Ávila-Olivera, J.A., Salmerón-Díaz, José E., Garduño-Monroy, V.H. y Hernández-Madrigal, Víctor M. 2012. Hazards of geological faults in Morelia. In: International Workshop on Active Tectonics, Paleoseismology and Archaeoseismology. Morelia, Mexico, 11-14.
- Ávila-Olivera J.A., López-Granados E.M. y Alcalá de Jesús M. 2015. Capacidad de infiltración de la cuenca de la ciudad de Morelia, Michoacán. Informe de proyecto de investigación. CECTI. p. 28.
- Banco Mundial. 2003. Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y autoridades ambientales.



- Balek, J. 1988. Groundwater recharge concepts. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series, p. 3–9.
- Bautista, F. 2011. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la Península de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Tropical and Subtropical Agroecosystems, Vol. 13, Núm. p. 2. VII-VIII. Mérida, Yucatán, México.
- Belmonte, S., Aragón M., Navarro S. y Herrera J. 2012. ERIS: Método para determinar el riesgo de contaminación de un sistema acuífero. Caso Valle de Zaachila, Oaxaca. CIIDIR OAXACA IPN, UNAM, CICESE. México.
- Cambio de Michoacán. 2014. Centro Virtual de Información del Agua [en línea]. Morelia, Michoacán. AGUA.org.mx. Disponible en internet: <http://www.agua.org.mx/noticias/not-nacionales/30509-agua-principal-problematica-en-la-ciudad-de-morelia>
- Burrough, P. y McDonnell R. 1998. Principles of geographical information systems. New York, Oxford University Press, p.333.
- Cerros, G. 2007. Un enfoque de gestión ambiental del recurso hídrico desde la perspectiva de la vulnerabilidad de acuíferos. Antiguo Cuscatlan, El Salvador.
- Civita, M., Chiappone, A., Falco M., E P. y Jarre. 1990. Preparazione della carta di vulnerabilità per la rilocalizzazione di un impianto pozzi dell' Aquedotto di Torino. Proc. 1st. Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi. Vol. 2: p. 461-462. Marano sul Parnaro
- CONAGUA. 1990. Estudio Geohidrológico Cuantitativo del Acuífero Morelia Queréndaro, Mich. Realizado por la compañía Consultores, S. A.
- CONAGUA. 1993. Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero de Morelia-Queréndaro, Michoacán, realizado por la empresa Servicios, Estudios, Proyectos de Ingeniería y Ciencias de la Tierra, S. A. de C.
- CONAGUA. 2015. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán. D.F., México
- CONAGUA. 2013, 2014. Estadísticas del Agua en México. Secretaría de Gobernación, Comisión Nacional del Agua. D.F., México.
- CONAGUA 2010. Abastecer de agua potable a la población, uno de los mayores retos que enfrentan los tres órdenes de gobierno. Secretaria de Gobernación, Comisión Nacional del Agua Morelia, Michoacán, México.



- CONURBA. 2012. Programa parcial de desarrollo urbano de la zona suroeste de Morelia (La Mintzita). Consultoría y Gestión Urbana y Ambiental. Morelia, Michoacán, México.
- Custodio, E. 1997. Recarga a los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Textos del seminario celebrado en las Palmas de Gran Canaria. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, p. 19-39.
- Custodio, E. y Llamas, M. 2001. Hidrológica subterránea. Barcelona: Ediciones Omega, S.A
- Demant. A. 1981. L'Axe Néo-volcanique Transmexicain – étude volcanologique et pétrographique; signification géodinamique: Marseille, Université du Droit, d'Economie et des Sciences d' Aix-Marseille, Ph. D. Thesis.
- Escobar, M., García, J. y Guerrero, T. 2002. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitlán. Antiguo Cuscatlan, El Salvador.
- Esri. 2017. ArcGis: Conceptos del conjunto de herramientas interpolación de raster. URL: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- Estrada A.M. 2015. " Análisis hidroquímico, modelación de flujo e interpretación del comportamiento del agua subterránea que abastece a la zona de Morelia, Michoacán, México". Tesis de Maestría. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH.
- FAO. (2008). Manual Curso Análisis Espacial Arcview 8.2 : Proyecto regional "Ordenamiento territorial rural sostenible". Santiago, Chile: FAO, p. 17-25.
- Farina P., Ávila-Olivera J.A., Garduño-Monroy V.H. y Catani F. 2008. "DInSAR analysis of differential ground subsidence affecting urban areas along the Mexican Volcanic Belt (MVB)". Rivista italiana di Telerilevamento. p. 103-113.
- Foster S. e Hirata R. 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes. CEPIS: 1-81. Lima.
- Foster S.1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. TNO Comm. On Hydrog. Research. Proceed. And Information, p. 38: 69-86. The Hague.



- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'elia, M. y Paris, M. 2002. Protección de la calidad del agua subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Washington, D.C.- EE.UU. p.128.
- Foster, S., Ventura, M. y Hirata, R. 1987. Contaminación de las aguas subterráneas, un enfoque ejecutivo en relación con el suministro de agua potable. Documento del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Mundial de la Salud (OMS), Organización Panamericana de la Salud (OPS). Lima-Perú. p. 42.
- Foster, S., Stephen e Hirata, R. 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes. CEPIS. Lima, Perú.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A. 1979. Groundwater. New Jersey: Ed. Prentice Hall, p. 604.
- Garduño-Monroy, V.H., Arreygue, E., Israde-Alcántara, I., y Rodríguez, G. 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18(1), p. 37-54.
- Garduño-Monroy, V.H., Israde-Alcántara, I., Francalanci, L., Carranza, O., Chiesa, S., Corona, P., y Arreygue, E., 1997, Sedimentology, volcanism and tectonics of the southern margin of the lacustrine basins of Maravatío and Cuitzeo, Mich., Mexico, in IAVCEI General Assembly, Fieldtrip guidebook, Puerto Vallarta, Jal., Guadalajara, Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco, Unidad Editorial, p.15.
- Garduño-Monroy, V.H., Arreygue, E., Chiesa, S., Israde-Alcántara., I., Rodríguez, G.M. y Ayala, G.M.1998. Las fallas geológicas y sísmicas de la Ciudad de Morelia y su influencia en la planificación del territorio: Ingeniería Civil, V. 1, Núm. 5 p. 3-12.
- Garduño-Monroy, V.H., y Escamilla, T.R. 1996. Revisión histórica de la sismicidad en Michoacán, México: Ciencia Nicolaíta, V. 11, p. 57-81.
- Garduño-Monroy, V.H., Giordano, N., Ávila-Olivera, J.A., Hernández-Madrigal, V.M., Sámano, A. y Díaz J.E. 2014 .Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. p.197-222.
- Garduño-Monroy, V.H., Rodríguez, G.M., Israde , I., Arreygue, E., Canuti, P., y Chiesa, S. 1999. Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de fluencia



- de las fallas geológicas de la Ciudad de Morelia: Geos, Unión Geofísica Mexicana, .V. 9, Núm. 2, p. 84-93.
- Garduño-Monroy, V.H., y Gutiérrez, C.A. 1992. Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano: Geofísica Internacional, V. 31, Núm. 4, p. 417-429.
- Garduño-Monroy, V. H. 2004. "Contribución a la geología e impacto ambiental de la región de Morelia" Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Garduño-Monroy, V.H., Pérez-López, E., Israde-Alcántara, I., Rodríguez-Pascua, M.A., Szyuka-ruk, E., Hernández-Madrugal, V.M., García-Zepeda, M.L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V.H., García-Estrada, G., Carranza, O., LópezGranados, E. y Mora-Chaparro, J.C. 2009a. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico, Geofísica Internacional, 48 (3), 319-335.
- Gilbert M. Masters, Wendell P. 2008. Introducción a la ingeniería medioambiental. 3ª edición. Pearson Madrid. España.
- Gobierno del Estado de Michoacán. 2007. Ley Ambiental y de Protección del Patrimonio Natural del Estado de Michoacán de Ocampo. Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo.
- Gogu y Dessargues. 2000, GIS-based evaluation of groundwater vulnerability in the Russeifa area, Jordan, Rev. mex. cienc. Geol. V.23 N.3 México.
- Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. New York, Oxford University Press. p.483.
- H. Ayuntamiento de Morelia. 2012. Estudio técnico justificativo para el decreto de la zona de restauración y protección ambiental del área de recarga del manantial de La Mintzita. Morelia, Michoacán, México.
- H. Ayuntamiento de Morelia. 2004. Proyecto de Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Poniente de Morelia. Morelia: H. Ayuntamiento de Morelia.
- H. Ayuntamiento de Morelia. 2012. Proyecto de Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Poniente de Morelia. Morelia: H. Ayuntamiento de Morelia.
- Hernández-Bedolla, J. 2014. Material de apoyo ArcView 3.2 (Recarga). Departamento de hidráulica. Facultad de Ingeniería Civil. UMSNH



- Hasenaka, T. y Carmichael, S. E. 1985. The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central, Mexico-their age, volume and distribution, and magma discharge rate: *Jurnal of Volcanology and Geothermal Research*, V. 25, Núms. 1-2, pp. 105-124.
- IGME .1976. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos de la España Peninsular, Baleares y Canarias. Primer esquema cualitativo. 20 ed. Mem. explic., mapa esc. 1:1.000.000. Madrid : Serv. Publ. Mir Industria, 1976
- IGME. 1979-1981. Mapas de orientación al vertido de residuos sólidos urbanos. Hojas esc. 1:50.000 pleg., mem. explic. Madrid.: Serv. Publ. Min. Industria.
- INEGI, 2002. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Carta Edafológica. Escala 1: 50,000. Segunda impresión. Morelia, Michoacán. Clave E14 A 23.
- INEGI. 2004. Guía para la interpretación de cartografía: Edafología. Aguascalientes, México
- Isaaks, E. y M. Srivastava.1989. An introduction to applied geostatistics. New York, Oxford University Press. p. 561.
- Israde-Alcántara, I. y Garduño-Monroy, V.H. 2004. La geología de la región de Morelia. En: *Contribuciones a la geología e impacto ambiental de la región de Morelia*. UMSNH. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Morelia, Michoacán. México. p 1–14.
- Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V.H., Ibáñez, D., Alatorre, M. A., Carrillo, I.A., Rizzi, Agostino y Soto, L. 2004. Caracterización geológico ambiental del tiradero de Morelia y su relación con las poblaciones del entorno. En: *Contribuciones a la geología e impacto ambiental de la región de Morelia*. UMSNH. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Morelia, Michoacán. México. p 137–155.
- Israde–Alcántara, I, Buenrostro–Delgado, O., Garduño–Monroy, V.H, Hernández–Madrigal, V.M. y López-Granados E. (2008). Problemática geológico–ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán. *Sociedad Geológica Mexicana*, Vol.60. Mexico.
- Issar, A. y Passhier, R.1990.Regional hydrogeological concepts. En: *Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge*. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, p. 20-98.



- Kitanidis, P.1997. *Introduction to geostatistics: applications in hydrogeology*. New York, Cambridge University Press. p.249.
- Lam, N. 1983. Spatial interpolation methods: a review. *The American Cartographer*. Vol. 10(2), p. 129-149.
- Lerner, D.N. 1990. Techniques. En: Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, p. 99-229.
- Luna-Romero, E y Lavado-Casimiro, W. (2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque, Perú. *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, Vol. 28, p.42- 52
- Margat J. 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines a la pollution. Bases de la cartographie. SLG 198 HYD. Orléans.
- Marín, M. y Blanco A. 2009. Designación de nuevos sitios Ramsar o actualización de los ya existentes: La Mintzita. UNAM. Facultad de Biología. México. Ficha informativa Versión 2009-2012.
- Martínez, M., Delgado, P. y Fabregat, V. 1998. Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. En *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*, p. 413-420. Valencia, España: AIH-GE
- National Academy Council.1993. Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo, Elementos para el Ordenamiento y la Planeación del Desarrollo. p. 4.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- Oliver, M. A. 1990. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems". *International Journal of Geographic Information Systems* 4: p. 313–332.
- Organización de Estados Americanos (OAS). 1993. *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*. Washington, D.C.: OAS



- Otalvaro, D. 1996. Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la sabana de Bogotá. Universidad de Caldas. Facultad de Geología y Minas. Manizales.
- Pastor-Torín, J. 2011. Figura del ciclo hidrológico. El Agua: Imágenes, Folletos, Afiches, Reportajes, etc. Recuperado de: <http://sistemajpii.blogspot.mx/2011/03/ciclo-hidrologico.html>
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V.H., Tibaldi, A., y Vezzoli, L., 1991, Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán: Boulder, Geological Society of America
- Pranzini, G. (2000). Elementi di idrogeologia. Università degli Studi di Firenze, Apuntes del curso de Geociencias. Firenze, Italia.
- Pérez-Villarreal J. En revisión. Estudio hidrogeológico del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia. Tesis doctoral. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. p. 156.
- Rushton, K.1988. Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series, p. 223-237.
- Samper, F.J. 1997. Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. TEXTOS DEL SEMINARIO CELEBRADO EN LAS PALMAS DE GRAN CANARIA. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. p. 153-182.
- Scanlon, B.R., Healy, P.G., y Cook. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. En: Hydrogeology Journal, No. 10, p. 18-39.
- SEGOB.2002. Los Municipios de Michoacán. México: Secretaría de Gobernación.
- Servicio Geológico Mexicano. 2008. Diagnóstico y valoración de la vulnerabilidad del manantial de La Mintzita, Estado de Michoacán. Morelia, Michoacán.
- Singh, S.K., Ordaz, M., Pérez-Rocha, L. 1996. The great mexican earthquake of 19th June 1958; expected ground motion and damage in Mexico City from a similar future event, Seismological Society of America, Bulletin, 86(6), 1655-1666.
- Simmers, I.1990. Aridity, groundwater recharge and water resources management. En: Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, p. 1-20.



- Simmers, I. 1997. Groundwater recharge principles, problems and developments. En: Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas. Róterdam: A.A. Balkema, p. 1-18.
- Van, Stempvoort D., Ewert, L. y Wassenaar, L. 1992. AVI: A method for Groundwater Protection Mapping in the Praire Province of Canada. Report No. 114; National Hydrology Research Institute, Canada.
- Valdivias J.R. 2016. "Determinación de zonas con aptitud para la expansión urbana en la ciudad de Morelia con análisis espacial". Tesis de Maestría. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH.
- Vélez-Otálvaro, M. 1999. Hidráulica de aguas subterráneas. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Verduzco L.A. 2010. "Evaluación de la contaminación al acuífero, en la región Morelia-Capula, causada por el impacto de la infiltración de lixiviados generados por el basurero municipal de la ciudad de Morelia". Tesis de Maestría. Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMSNH.
- Vrba, J. y Zaporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Verlag Heinz Heise, International Contributions to Hydrogeology V.16. Hannover. p.131.
- Wikisabio. 2017. Geografía: Aguas subterráneas. Recuperado de <http://wikisabio.com/aguas-subterranas>.