



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Geografía



**Delimitación de áreas de gestión para manantiales
ubicados en la cuenca presa de Guadalupe, Estado
de México.**

Tesis de Maestría

Para obtener el grado de:

Maestra en Análisis Espacial y Geoinformática

Presenta:

Raquel Segundo Sandoval

Tutor académico

Dra. Xanat Antonio Nemiga

Tutores adjuntos

Dr. Jose Luis Expósito Castillo

Dr. Víctor Ávila Akerberg

Toluca, Estado de México, septiembre de 2020

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por todo el apoyo otorgado.

A la secretaria de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México, a la Facultad de Geografía, y al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) por el otorgamiento de recursos para realizar movilidad académica, asistir a conferencias y visitas de campo.

A mi Tutor Académico, Dra. Xanat Antonio Nemiga, por brindarme el tiempo y la orientación suficientes para poder efectuar mi trabajo de investigación.

A mis Tutores Adjuntos, Dr. José Luis Expósito Castillo, por su invaluable apoyo en la guía del presente trabajo y al Dr. Víctor Ávila Akerberg por su calidad académica y disposición; sus comentarios y observaciones.

A mis Tutores Externos, Dr. Eduardo Javier Treviño Garza de la Facultad de Ciencias Forestales y al Dr. René Alberto Dávila Pórcel profesor investigador de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma del Nuevo León, por recibirme dentro de su espacio académico, sus recomendaciones y observaciones.

A la Dra. Raquel Hinojosa Reyes y al Dr. Alexis Ordaz Hernández coordinadores de la Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática, por su valioso apoyo.

A mis profesores de la maestría por su esfuerzo y dedicación para transmitir conocimientos en nuestra formación académica.

A Fernando Sánchez Carmona por estar siempre y en todo momento.

Un especial agradecimiento al Regidor Israel Osnaya Rosas y a su equipo de trabajo por el apoyo otorgado para las visitas a los manantiales de su municipio.

Dedicado a mi familia

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	5
1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Delimitación de zonas de protección de manantiales	9
1.3. Estimación del balance hídrico	13
1.4. Marco legal	23
1.5. Marco conceptual	25
CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO	27
1.1. Localización	27
1.2. Medio físico.....	28
1.2.1. Relieve	28
1.2.2. Clasificación climática	29
1.2.3. Precipitación.....	31
1.2.4. Temperatura.....	32
1.2.5. Uso del suelo y vegetación	33
1.2.6. Edafología	35
1.2.7. Características geológicas	37
1.2.8. Características hidrológicas	38
1.3. Geografía social.....	43
1.3.1. Población	43
1.3.2. Actividades económicas.....	46
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	48
3.1. Búsqueda de la información disponible	49
3.2. Delimitación física del área de estudio.....	50
3.3. Identificación y selección de manantiales.....	51
3.3.1. Identificación y ubicación de manantiales	51
3.3.2. Presentación del proyecto a las autoridades municipales correspondientes	52

3.3.3. Selección de manantiales	52
3.4. Delimitación de las zonas de protección de manantiales.....	54
3.4.1. Delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales.....	55
3.4.2. Estimación del balance hídrico.....	55
3.4.3. Delimitación de las zonas de protección de los manantiales	60
3.5. Establecimiento de áreas de gestión	62
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
4.1. Delimitación física del área de estudio.....	64
4.2. Identificación y selección de manantiales	66
4.2.1. Identificación y ubicación de manantiales	66
4.2.2. Presentación del proyecto a las autoridades municipales correspondientes	67
4.2.3. Selección de manantiales	69
4.2.4. Parámetros fisicoquímicos de los manantiales	77
4.3. Delimitación de zonas de protección de los manantiales seleccionados.....	81
4.3.1. Delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales.....	81
4.3.2. Estimación de la infiltración para la delimitación de las zonas de protección de los manantiales.....	86
4.3.3. Delimitación de las zonas de protección de los manantiales	100
4.4. Establecimiento de áreas de gestión	106
4.4.1. Inventario de focos potenciales de contaminación.....	106
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de las zonas de protección de manantiales. Modificado de López 2018.	12
Figura 2.1. Mapa de ubicación de la cuenca presa de Guadalupe.....	27
Figura 2.2. Mapa de altitud, con base en el Modelo Digital de Elevación.	28
Figura 2.3. Clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1973). Fuente: IFOMEGEM 2010.....	29
Figura 2.4. Mapa de precipitación media anual (1980-2010), con base en datos del SMN (2015) y Ordoñez (2015).	31
Figura 2.5. Mapa de temperatura media anual (1980-2010), con base en datos del SMN (2015) y Ordoñez (2015).	32
Figura 2.6. Bosque de oyamel talado en la parte alta de la CPG.....	33
Figura 2.7. Mapa de uso de suelo de la parte alta de la cuenca presa de Guadalupe.....	34

Figura 2.8. Mapa edafológico. Fuente: CONABIO 2009.	35
Figura 2.9. Tipo de suelo luvisol de la zona de estudio.	36
Figura 2.10. Mapa litológico. Fuente: IFOMEGEM 2010.	37
Figura 2.11. Mapa hidrológico. Fuente IFOMEGEM, 2010.	38
Figura 2.12. Presa Iturbe, Isidro Fabela, Estado de México.	40
Figura 2.13. Porcentaje del uso del agua de los manantiales en la CPG. Fuente: REPDA, 2019. .	43
Figura 2.14 Pirámide de población en la CPG. Elaboración propia con datos de INEGI, 2015.	45
Figura 2.15. Actividades económicas con base al SIAN, 2018.	46
Figura 2.16. Principales actividades económicas de acuerdo con el SIAN, México 2018.	47
Figura 3.1. Esquema metodológico.	48
Figura 3.2. Diagrama para la generación de cuencas hidrológicas en el software IDRISI Terset. ...	50
Figura 3.3. Secuencia metodológica para la selección de manantiales.	51
Figura 3.4. Secuencia metodológica para la delimitación de zonas de protección de manantiales. Modificado de López 2018.	55
Figura 3.5. Proceso del cálculo de la ET_0 mediante la fórmula de Hargreaves.	59
Figura 3.6. Diagrama de Todd, que muestra la relación de la descarga media del manantial, la recarga media anual y el área de recarga (Vargas, 2002).	62
Figura 4.1. Delimitación de la cuenca presa de Guadalupe.	65
Figura 4.2. Comité de agua de la 7ta regiduría del H. Ayuntamiento de Isidro Fabela.	67
Figura 4.3. Oficio de respuesta de la comisión de agua potable de la 7ta regiduría del H. Ayuntamiento de Isidro Fabela, Estado de México.	68
Figura 4.4. Manantial La Cocinera, Isidro Fabela, Estado de México.	70
Figura 4.5. Manantial los Capulines, Isidro Fabela, Estado de México.	71
Figura 4.6. Manantial Agua Azul, Isidro Fabela, Estado de México.	73
Figura 4.7. Manantial la Planta, Isidro Fabela, Estado de México.	75
Figura 4.8. Mapa de ubicación del manantial los Capulines, la Cocinera, Agua Azul y la Planta.	76
Figura 4.9. Medición el caudal del manantial la Planta.	78
Figura 4.10. Medición el caudal del manantial Agua Azul.	79
Figura 4.11. Mapa de la zona de captura potencial del manantial Agua Azul y la Planta.	82
Figura 4.12. Mapa de precipitación media anual (1980-2010), con base en datos del SMN (2015) y Ordoñez (2015) y zonas de captura potencial de los manantiales.	87
Figura 4.13. Histograma de precipitación media mensual de las zonas de captura de los manantiales.	88
Figura 4.14. Tipo de suelo según su textura y zonas de captura potencial de los manantiales (CONABIO, 2019).	89
Figura 4.15. Mapa de uso del suelo y zonas de captura potencial de los manantiales.	90
Figura 4.16. Mapa de escurrimiento superficial anual y zonas de captura potencial.	92
Figura 4.17. Histograma de escurrimiento superficial mensual de las zonas de captura potencial.	93

Figura 4.18. Temperatura media anual y zonas de captura potencial de los manantiales.	94
Figura 4.19. Histograma de temperatura media mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.	95
Figura 4.20. Mapa de evapotranspiración potencial anual y las zonas de captura potencial.	96
Figura 4.21. Histograma de evapotranspiración de referencia mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.	97
Figura 4.22. Histograma de infiltración potencial mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.	98
Figura 4.23. Mapa de infiltración real anual y zonas de captura potencial de los manantiales.	99
Figura 4.24. Histograma de infiltración real mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.	100
Figura 4.25. Zona de protección interna del manantial Agua Azul.	101
Figura 4.26. Zona de captura potencial para el manantial Agua Azul, Isidro Fabela.	102
Figura 4.27. Zona de captura potencial para el manantial Agua Azul, Isidro Fabela.	104
Figura 4.28. Ranchería Las Palomas.	105
Figura 4.29. Identificación de los focos potenciales de contaminación en las zonas de protección del Manantial Agua Azul.	107
Figura 4.30. Fotografías donde se muestran los principales focos de contaminación del manantial Agua Azul.	108
Figura 4.31. Identificación de los focos potenciales de contaminación en las zonas de protección del Manantial La Planta.	110
Figura 4.32. Fotografías donde se muestran los principales focos potenciales de contaminación del manantial La Planta.	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Coeficiente de escurrimiento según Benítez, et al. (1980).	17
Tabla 1.2. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002)..	17
Tabla 1.3. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002) (continuación).	18
Tabla 1.4. Métodos empíricos para calcular la Evapotranspiración (Sánchez, 2010).	19
Tabla 2.1. Características de tipo de clima presente en el área de estudio tomado del Atlas Geológico - Ambiental del Estado de México, elaborado por el instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México IFOMEGEM, (2016).	30

Tabla 2.2. Nombre de las localidades de acuerdo con los números en el mapa hidrológico de la figura 2.11.	39
Tabla 2.3. Manantiales ubicados dentro de la zona de estudio según datos del REPDA, 2019.	41
Tabla 2.4. Manantiales ubicados dentro de la zona de estudio según datos del REPDA, 2019 (continuación).....	42
Tabla 2.5 Número de habitantes por municipio. Elaboración propia con datos del Censo Intercensal INEGI 2015.	44
Tabla 2.6 Población por grupo quinquenal de hombres y mujeres.....	44
Tabla 2.7. Población por grupo quinquenal de hombres y mujeres (continuación).	45
Tabla 3.1. Parámetros medidos por los electrodos de pH, Conductividad Eléctrica.	54
Tabla 3.2. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002)..	57
Tabla 3.3. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002) (continuación).....	58
Tabla 4.1. Manantiales de uso público urbano en la cuenca presa de Guadalupe.	66
Tabla 4.2. Manantiales de uso público urbano en la cuenca presa de Guadalupe (continuación). ...	67
Tabla 4.3. Manantiales con mayor volumen de extracción de agua al año, del municipio de Isidro Fabela, Estado de México.	69
Tabla 4.4. Localidades a las que abastece el manantial los Capulines.....	69
Tabla 4.5. Localidades a las que abastece el Manantial los Capulines.....	72
Tabla 4.6. Localidades a las que abastece el manantial Agua Azul.	73
Tabla 4.7. Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua de los manantiales.	77
Tabla 4.8. Nombre de las localidades de acuerdo con los números en los mapas.	82
Tabla 4.9. Nombre de las localidades de acuerdo con los números en los mapas (continuación)...	83
Tabla 4.10. Extensión superficial de las zonas de captura potencial de los manantiales.....	83
Tabla 4.11. Localidades con población indígena dentro de la ZCP del manantial Agua Azul.	84
Tabla 4.12. Localidades con población indígena dentro de la ZCP del manantial la Planta.	85
Tabla 4.13. Localidades con población indígena dentro de la ZCP del manantial los Capulines y la Cocinera.	86
Tabla 4.14. Precipitación media mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).....	87
Tabla 4.15. Valores de K en función del tipo y uso del suelo (DOF, 2002).	91
Tabla 4.16. Escurrimiento superficial mensual y anual de las zonas de captura potencial (mm).....	93
Tabla 4.17. Temperatura promedio mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (°C).....	94
Tabla 4.18. Radiación solar mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.	95
Tabla 4.19. Evapotranspiración potencial mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).....	96

Tabla 4.20. Infiltración potencial mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).....	97
Tabla 4.21. Infiltración real mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).....	99

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico, a nivel nacional, ha sido altamente afectado por la presión humana, agravando cada vez más su disponibilidad (cantidad y calidad). Estos factores de presión son fundamentalmente la sobreexplotación de acuíferos, el vertimiento de sustancias contaminantes a los cuerpos de agua, los cambios en el uso del suelo tales como la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas, el incremento de urbanizaciones en zonas de producción hídrica, entre otros (Ordoñez, 2011).

En este sentido, la gestión de un manantial debe centrarse en la protección de la cantidad y calidad de las aguas subterráneas en su área de drenaje para el uso específico del manantial (Kresic, 2010). Las dimensiones y forma del área de gestión de un manantial dependen de su caudal anual promedio, de las precipitaciones que ocurren en la región, del escurrimiento superficial y de las características hidrogeológicas del sitio las cuales, a su vez, definen el origen y el tipo de manantial.

En la parte alta de la cuenca presa de Guadalupe se localizan los municipios de Isidro Fabela y Jilotzingo ambos situados en el Estado de México quienes principalmente aprovechan el agua de sus manantiales para uso y consumo humano siendo su principal y única fuente de agua potable; ya que, debido a su nivel altitudinal no ha sido factible la construcción de pozos de agua pues podría ocasionar la desecación de más de un manantial en la zona generando problemas sociales y ambientales, como la extinción del ajolote de montaña.

Por lo cual, se requiere de una adecuada gestión para su protección y uso sustentable. Una alternativa para lograrlo es delimitar áreas de gestión o zonas de captura potencial entorno a los manantiales que contemple un plan de medidas para su conservación, y donde participen de manera activa los habitantes de las localidades cercanas a estas fuentes de abastecimiento.

PROBLEMA

Los manantiales son una fuente importante de agua potable en las zonas altas de la cuenca; por lo tanto, el agua de buena calidad es valiosa en esta región; sin embargo, algunas actividades como la agrícola, la ganadera y los centros poblacionales sin una adecuada red de drenaje, con letrinas y fosas sépticas pueden afectar la calidad y cantidad del agua de los manantiales.

Aunado a esto, se han identificado diversos problemas ambientales dentro de la zona de estudio, entre los cuales destacan: la tala clandestina de los recursos forestales pertenecientes al Parque Estatal ecológico, turístico y recreativo Zempoala – La Bufa (conocido comúnmente como Parque Otomí – Mexica del Estado de México) ubicado en la parte alta de la cuenca, afectando directa e indirectamente la flora y fauna de la zona y pudiendo afectar de igual manera la cantidad y calidad de los recursos hídricos en la zona.

Por lo cual; se vuelve importante e indispensable aplicar metodologías que promuevan la protección, el cuidado y la conservación de dichas fuentes de abastecimiento de agua potable.

JUSTIFICACIÓN

La mayoría de las comunidades de la cuenca presa de Guadalupe dependen del agua de los manantiales para uso y consumo humano los cuales se han visto afectados a lo largo del tiempo; por lo que necesitan apoyo de las autoridades y/o de otras instituciones que los asesoren en la implementación de estrategias de protección que faciliten el manejo sustentable de sus recursos hídricos. Por tal razón, la delimitación de áreas de gestión en manantiales debe tratarse con asesoría de especialistas en el tema y con la participación de los comités de agua de las comunidades.

Sin embargo, la delimitación de áreas de gestión en manantiales, con base en el análisis de sus zonas potenciales de recarga, es una tarea compleja debido al desconocimiento hidrogeológico de las zonas que alimentan el manantial. Por lo tanto, aplicar un proceso metodológico que permita definir dichas áreas, considerando el balance hidrometeorológico dentro de las zonas potenciales de recarga, mediante el uso de los sistemas de información geográfica (SIG); facilitará el manejo sustentable del recurso hídrico en el área de estudio. Esto se puede traducir en un mejor diseño de estrategias de conservación y consecuentemente en la reducción de la vulnerabilidad de la población en relación con el acceso al agua en cantidad y calidad adecuada para su consumo.

Por otro lado, los resultados de este proyecto permitirán disponer de información de diversa naturaleza sobre las características de la zona de estudio.

OBJETIVOS

Objetivo general

Delimitar áreas de gestión en manantiales para uso y consumo humano, localizados en la cuenca presa de Guadalupe, Estado de México, considerando variables físicas e hidrometeorológicas mediante el uso de los sistemas de información geográfica.

Objetivos específicos

1. Analizar y sintetizar la información documental y cartográfica existente relacionada con la temática de estudio para generar una base de datos.
2. Caracterizar la zona de estudio para conocer los elementos físicos que componen la cuenca tales como: relieve, clima, precipitación, temperatura, uso de suelo, edafología, litología e hidrología.
3. Identificar, ubicar y seleccionar manantiales del área de estudio considerando la importancia que tienen para uso y consumo humano.
4. Delimitar zonas de protección en los manantiales seleccionados, que permitan el uso sustentable de los recursos hídricos.
5. Identificar posibles focos potenciales de contaminación que pudieran modificar la cantidad y calidad del agua de los manantiales.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Las medidas contra la contaminación de las aguas subterráneas deben ser preferentemente protectoras: regulando, ordenando o prohibiendo determinadas actividades en diferentes zonas, o bien, estableciendo ciertas medidas de seguridad sobre actividades potencialmente nocivas. Ello es especialmente importante en acuíferos y captaciones que sirven para el abastecimiento público, a fin de evitar que diferentes agentes contaminantes alcancen el agua extraída (Expósito, 2001).

En relación con la protección de las captaciones de agua subterránea, no hay duda de que la forma más segura de conseguir su protección absoluta contra la contaminación sería impedir todo tipo de actividad potencialmente contaminante en el área de recarga de esta y sus alrededores. No obstante, éste es un planteamiento imposible de llevar a la práctica, por las implicaciones técnicas y, sobre todo, económicas que supondría por lo que se considera más adecuado definir perímetros de protección (Livingstone et al., 1996), que no es más que, el establecimiento de un sistema de zonas rodeando la captación, en el interior de las cuales se restringen o se prohíben, de forma graduada (en función de la proximidad a la misma), las actividades susceptibles de modificar la calidad del agua subterránea.

Las primeras experiencias en este sentido ocurrieron en Europa, en el siglo pasado. Algunos trabajos científicos, pertenecientes a la década de 1930, ya establecen que los pozos deben estar alejados de fuentes potenciales de contaminación, a una distancia que permita que el agua subterránea tenga un tiempo de tránsito superior a los 50 días, para la erradicación de microorganismos patogénicos (Hirata y Reboucas, 1999).

Entre los métodos generales más usados se encuentran: radio arbitrario fijo/calculado, formas variables simplificadas, modelos hidrogeológicos analíticos, mapeo hidrogeológico, y modelos numéricos de flujo de agua subterránea (CONAGUA, 2007).

En lo particular, se pueden citar los siguientes métodos: método de Albinet, modelos matemáticos, método de Rehse (cálculo del poder autodepurador del terreno), trazadores, estudios isotópicos, método de Hoffman y Lillich, empleo de ábacos para el cálculo de isócronas, métodos Jacobs y Bear y el método de Wyssling (López et al., 1996; Elhatip & Afşin, 2001; Vargas, 2002; Foster et al., 2002; Qian et al., 2006; He et al., 2010; Silva et al., 2010).

Estos métodos son usados comúnmente para delinear las zonas de protección de los pozos de abastecimiento de agua, particularmente mediante perímetros; sin embargo, como menciona Civita (2008), algunos de estos métodos no son directamente aplicables a todos los tipos de manantiales.

Pese a esta situación, hay trabajos que emplean métodos y técnicas específicas para definir zonas y perímetros de protección de manantiales, los cuales son: método hidrogeológico, pruebas de trazadores, monitoreo hidrológico, así como análisis químico y microbiológico, análisis de curvas de recesión, método VESPA, método de radio fijo, método radio calculado, método DISCO, método matemático analítico, modelos matemáticos tridimensionales con elementos finitos, método estocástico, EPIK, COP+K y mecanismo de compensación ecológica (Elhatip & Afşin, 2001; Qian et al., 2006; Pochon et al., 2008; Civita, 2008; Silva et al., 2010; Marín & Andreo, 2010; Galleani et al., 2011; Biava et al., 2014; Banzato et al., 2015).

Estos métodos son aplicados a diferentes tipos de manantiales considerando sus características geológicas e hidrogeológicas particulares, diferenciando así, manantiales que se ubican en medios kársticos (mayormente aplicados), volcánicos, detríticos, fracturados, porosos, confinados y libres.

Para manantiales en medios kársticos, en Italia se presentan algunos ejemplos. En los Alpes, se mejoró un método estándar para delinear zonas de protección en manantiales kársticos. El método, basado en el análisis de curvas de recesión, definió cuatro escenarios de vulnerabilidad para determinar las dimensiones apropiadas de las zonas de protección (Civita, 2008). En esta misma región se utilizó un índice para estimar la vulnerabilidad, el índice VESPA (estimador de

vulnerabilidad para las áreas de protección de manantiales), basado en un análisis de la descarga, la temperatura y la conductividad eléctrica (Galleani et al., 2011).

Por otro lado, en Suiza se empleó una metodología basada en la vulnerabilidad para delimitar zonas de protección de los manantiales en acuífero fracturado (a pesar de que la delimitación de las zonas de protección de acuíferos fracturados es una tarea difícil debido a la heterogeneidad y la anisotropía de la conductividad hidráulica). El estudio considera la diversidad de las condiciones hidrogeológicas y permite seleccionar uno de los tres métodos para la delimitación de zonas de protección de manantiales: método de la distancia (radio fijo), método isócrono (radio calculado) y el método DISCO (cartografía de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas) (Pochon et al., 2008).

Para manantiales de acuíferos confinados y libres, en Costa Rica se utilizó el método matemático analítico para definir las zonas de protección de manantiales en este tipo de acuíferos localizados en áreas urbanas. El método considera la diferenciación de los manantiales según su entorno geológico (manantial en depresión, manantial de contacto y manantial en abanico aluvial) (Vargas, 2002).

En el caso de los manantiales en áreas volcánicas existen menos ejemplos. En Turquía por medio de métodos hidrogeoquímicos (hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos) se estimaron las zonas de protección de manantiales. A pesar de que los análisis hidroquímicos mostraron que las aguas de estos manantiales cumplen con los estándares de agua potable y de riego, el área alrededor de los manantiales continuamente está siendo contaminado por desechos domésticos y agrícolas. Por lo tanto, se propusieron tres zonas de protección principales frente a los efectos de la contaminación antrópica (Elhatip & Afşin, 2001).

Existen otros trabajos que han estudiado tanto la calidad como la cantidad de los manantiales, pero no proponen un método de protección de dichas fuentes de agua. Para el caso mexicano, en la literatura se han encontrado pocos casos enfocados a los métodos para definir zonas de protección de manantiales. En Michoacán se determinaron los niveles de vulnerabilidad acuífera en el Valle de Los Reyes, un acuífero libre de tipo volcánico, utilizando el método SINTACS para la protección

del acuífero y manantiales amenazados por actividades antrópicas, en donde como conclusión se propuso la ampliación de la zona de amortiguamiento del área natural protegida Chorros del Varal, una superficie que rodea y protege la zona núcleo para evitar impactos ambientales (Silva et al., 2010).

Por otro lado, el estudio de González (2006) tuvo como objetivo realizar un inventario y analizar el comportamiento hidráulico y calidad del agua de los manantiales disponibles en la microcuenca Atécuaro, Morelia, Michoacán, donde se localizaron 14 manantiales (de contacto en medio volcánico) a los que se les determinó el gasto mensual durante un año y se estimó el índice de calidad del agua (ICA). Los resultados mostraron que sólo 5 de ellos mantienen su gasto hidráulico estable hasta la época de estiaje, en tanto que en 9 el escurrimiento depende total o parcialmente de la época de lluvias.

En el estudio de García et al. (2012) se muestrearon seis manantiales ubicados dentro de la zona urbana de Tijuana, con el propósito de evaluar la calidad del agua de manantiales y afloramientos urbanos. Las muestras se analizaron para parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los resultados mostraron que el agua de los manantiales con potencial para ser aprovechados no es apta para el consumo humano sin un tratamiento previo y sugieren medidas de protección.

En el Estado de México, se llevó a cabo un estudio que, si bien no se llevó a la práctica, tuvo como objetivo evaluar el peligro de contaminación de los manantiales del municipio de Almoloya de Juárez. La evaluación del peligro de contaminación se realizó considerando dos aspectos fundamentales: la definición de las zonas de captura de los manantiales con base en criterios hidrodinámicos e hidrogeológicos y el inventario de los focos de contaminación presentes en las zonas de captura. Con base en ello se obtuvieron mapas que muestran las dimensiones de la zona de captura y el tipo de foco de contaminación que en ellos se localizan, así como la ubicación de los focos de contaminación que representan un mayor peligro de contaminación a los manantiales (Esquivel, 2008).

Así como un proyecto para una tesis de doctorado desarrollado en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), de la UAEMéx titulado

“Estrategias para la protección de manantiales: propuesta metodológica de acuerdo al entorno físico-social y proyección de escenarios”. El cual tuvo como principal objetivo proponer una metodología para definir las mejores estrategias para la protección de manantiales en el Estado de México, considerando su tipología, entorno físico-social y escenarios futuros de acuerdo con la evolución de las variables involucradas (López, 2018).

Varias son las técnicas y metodologías implementadas para la protección de manantiales en la literatura citada; sin embargo, distintos autores coinciden en que para ello se necesitan delimitar áreas con distinto grado de protección, las cuales varían de acuerdo con las políticas implementadas en cada país.

1.2. Delimitación de zonas de protección de manantiales

Debido a que el concepto de zonas de protección de manantiales no se ha aplicado en nuestro país, se puede adecuar la definición de protección de pozos que proporciona la United States Environmental Protection Agency (USEPA) (López, 2018).

De acuerdo con la USEPA una zona de protección de pozos consiste en “la superficie y subsuelo que encierra o rodea a un pozo o campo de pozos que proveen agua para abastecimiento poblacional, de tal modo que, en dicha región, en caso de que se presente un contaminante, es más factible que se mueva y alcance el agua que extrae dicho pozo o campo de pozos.” El cálculo de la zona de protección de un pozo considera un volumen de extracción. En condiciones ideales, dicho caudal debe corresponder al máximo autorizado al Organismo Operador correspondiente para dicho aprovechamiento (CONAGUA, 2007).

Tomando en consideración esta definición, se puede definir zona de protección de un manantial como aquella superficie del terreno y subsuelo que se encuentra aguas arriba del manantial (en el caso de manantiales hipodérmicos). Esta zona de protección podrá ser calculada considerando el volumen del caudal de la fuente, cuya

finalidad es proteger la calidad y cantidad del agua subterránea que se destina para el uso de la población, además de contribuir al equilibrio ambiental.

La determinación de zonas de protección se referirá a todo el proceso de especificación de una región aledaña al aprovechamiento, con el propósito de limitar al máximo un posible evento que conduzca a la contaminación de los recursos hídricos y a su agotamiento.

Para llevar a cabo la delimitación de las zonas de protección de manantiales, primero se debe llevar a cabo la delimitación de la zona de captura potencial también conocida como zona de contribución, que consiste en el área que potencialmente puede contribuir al volumen del caudal del manantial a largo plazo. Dentro de la zona de captura potencial se han de estimar y definir las zonas de protección de manantiales (zonas con distinto grado de protección).

La delimitación de las zonas de captura potencial puede basarse en diversos parámetros dependiendo de la amenaza de contaminación percibida que involucra: distancia horizontal, tiempo de flujo horizontal, proporción del área de recarga, dilución de contaminantes en la zona saturada o la capacidad de atenuación. No obstante, es común emplear una combinación del tiempo de tránsito en sentido vertical en la zona no saturada y cuasi horizontal en la saturada (Vargas, 2002).

Una vez delimitada la zona de captura potencial se pueden utilizar los métodos para la protección de manantiales que mejor se adapten a las características del manantial, su contexto físico y a la información disponible.

En la literatura existente se han definido desde tres hasta cinco zonas de protección de manantiales, según el país del que se trate.

Losilla (1992) propone una metodología que considera aspectos hidrogeomorfológicos, al definir el área de protección con base en las divisorias de la cuenca hidrológica donde se encuentra el manantial. Se asume que los límites de la cuenca hidrogeológica coinciden con los límites de la cuenca hidrológica, según la cual se sigue la curva de elevación topográfica más baja del manantial, a ambos lados de este, hasta cruzar un río importante, considerado como influente; a partir

de esto se sigue por las divisorias de las subcuencas hasta unirse en su parte superior. Esta metodología está diseñada para delimitar zonas de recarga de manantiales que son originados desde acuíferos someros.

En el caso británico, la Agencia del Medio Ambiente (Environment Agency, 2009) ha definido tres zonas de protección para fuentes de abastecimiento de agua que se aplica tanto para pozos como para manantiales: a) zona de protección interna (ZP I), b) zona de protección externa (ZP II) y c) protección de la zona de captura potencial.

a) Zona de protección interna (ZP I)

La zona de protección interna se define por un tiempo de tránsito de 50 días desde cualquier punto por debajo de la capa freática hasta la fuente o un radio mínimo de 50 metros desde la fuente, el que sea mayor. Está ubicado inmediatamente adyacente al manantial (*Figura 1.1*). Diseñado para proteger contra la transmisión de químicos tóxicos rápidamente degradantes y algunas enfermedades transmitidas por el agua. La política de protección de aguas subterráneas de la Agencia de Medio Ambiente establece los más estrictos controles sobre la actividad humana en esta zona.

Los límites del ZP I se ajustan cuando el acuífero está confinado debajo de un material de permeabilidad sustancialmente baja o cuando existen zonas insaturadas profundas. Esta es una medida de precaución para protegerse contra el caso donde las vías rápidas para el transporte de contaminantes están presentes, como las estructuras profundas. La zona de protección interna de 50 metros de radio se asume por defecto para cualquier fuente potable.

b) Zona de protección externa (ZP II)

La zona de protección exterior se define como un tiempo de tránsito de 400 días y un radio mínimo de 250 m o 500 m alrededor de la fuente. El tiempo de 400 días se basa libremente en la consideración del tiempo mínimo requerido para proporcionar retardo, dilución y atenuación de los contaminantes que se degradan lentamente. La zona generalmente no está definida para acuíferos confinados.

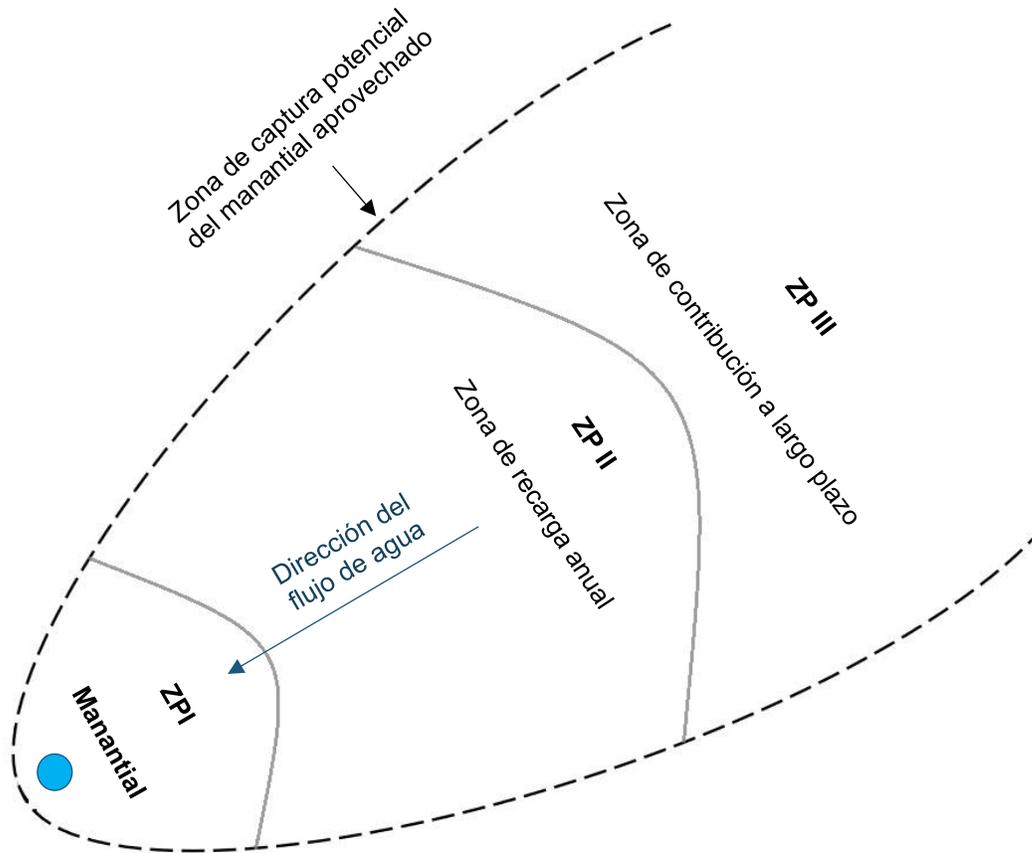


Figura 1.1. Esquema de las zonas de protección de manantiales. Modificado de López 2018.

c) Protección de la zona de captura potencial (ZP III)

La zona de captura potencial de la fuente de agua se define como el área necesaria para soportar el rendimiento protegido de la recarga de aguas subterráneas a largo plazo. En áreas donde el acuífero está confinado debajo de estratos impermeables, la fuente de captación puede ubicarse a cierta distancia de la abstracción real.

Esta metodología ha sido adaptada en la presente investigación de acuerdo con la información disponible.

La delimitación de zonas de protección de fuentes de agua debería ser un elemento clave en el marco de la política ambiental de un país, con el fin de controlar el riesgo de modificar la cantidad y calidad del agua y de las actividades potencialmente contaminantes o emisiones accidentales de contaminantes.

Hay que tener en cuenta que establecer cuáles son las actividades antrópicas que requieren mayor atención ambiental es una de sus mayores dificultades, ya que implica contar con información de todas las actividades que se realizan dentro del área de estudio debido a la gran diversidad y densidad de actividades humanas además de los altos costos de las investigaciones detalladas, por lo que es un trabajo muy complejo e impráctico sobre todo para áreas muy extensas (Alvarado, 2009).

Sin embargo, el uso del suelo es una variable importante, ya que al identificar un uso específico aguas arriba del manantial se puede elegir el tipo de protección a emplear.

La identificación de las diferencias del uso del suelo ayudará a definir las posibles fuentes de contaminación del agua subterránea (Barquín & Scarsbrook, 2008).

La delimitación de zonas de protección junto con otras estrategias puede ser apoyadas mediante los SIG, ya que son ampliamente utilizados como una herramienta esencial para el análisis espacio temporal de la protección de los recursos hídricos.

1.3. Estimación del balance hídrico

Para la delimitación de zonas de protección de manantiales, en algunos casos se ha utilizado como criterio de análisis el tiempo de tránsito, entendiéndose éste como el tiempo que un contaminante tarda en llegar a la fuente de agua a proteger; para ello, se han utilizado distintas técnicas; sin embargo, la estimación del balance hídrico puede ser una variable que considerar para estimar las zonas de protección e identificar cuál es la zona que soporta el caudal anual del manantial.

El balance hídrico del suelo se basa en el principio de la conservación del agua, donde toda el agua que entra al suelo debe ser igual a la cantidad de agua que se almacena más el agua que sale de él. Las entradas al sistema son debido a la precipitación, del agua que se infiltra hacia el suelo y las salidas se deben a la evapotranspiración y la descarga hacia los acuíferos (Fetter, 2001). Los factores

que influyen en el balance hídrico del suelo son parámetros meteorológicos (precipitación, temperatura, horas de sol, etc.), geográficas (uso del suelo y pendiente) y geológicas (textura del suelo, velocidad de infiltración) (Alvarado & Barahona, 2017).

Para determinar el balance hídrico se necesitan conocer el cálculo de diferentes procesos del ciclo hidrológico como la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía superficial, y la infiltración.

De esta manera la formula del balance global se puede expresar como (*Ecuación 1.1*):

$$P = Es + ET + I \quad (1.1)$$

Donde:

P = Precipitación (mm/unidad de tiempo, habitualmente año o mes).

Es = Escurrimiento superficial (mm/t)

ET = Evapotranspiración real (mm/t)

I = Infiltración en el terreno (mm/t)

a) Precipitación

Las precipitaciones agrupan todas las aguas meteóricas recogidas en una cuenca hidrográfica o área determinada. Se presentan en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo). Cuando el agua, en estado líquido o sólido, llega a la superficie de la Tierra, se dice que ha precipitado. La lluvia se mide por la altura que alcanzaría sobre una superficie ideal plana y horizontal, antes de sufrir pérdidas por evaporación, infiltración y escurrimiento superficial (Schulz y García, 2015).

Los aparatos destinados a cuantificar la cantidad de agua precipitada son el pluviómetro ordinario, pluviómetro totalizador y el pluviógrafo localizados en estaciones meteorológicas y recientemente, a través de imágenes satelitales o por radar, donde se utilizan principalmente datos de precipitación media. Su unidad de medida más usual es en mm/m^2 o l/m^2 .

b) Escurrimiento superficial

El escurrimiento es la parte del ciclo hidrológico, en la cual el agua precipitada circula sobre la superficie del continente iniciando el retorno, ya sea hacia el mar, hacia la zona de recarga de algún recipiente subterráneo, o para llegar a algún reservorio superficial desde donde se evapora. El escurrimiento es un fenómeno estrictamente superficial del agua. Los factores fisiográficos que afectan el drenaje superficial son, entre otros, el uso y tipo de suelo, pendiente topográfica, superficie de la cuenca hidrográfica, etc. (Schulz y García, 2015).

El uso del suelo es importante ya que un suelo plantado y con vegetación abundante, retiene más el agua de lluvia y produce mayor evapotranspiración, dando lugar a una componente menor de escurrimiento fluvial, que el mismo tipo de suelo sin vegetación. En zonas urbanizadas, se produce un incremento de la componente de escurrimiento y un marcado decrecimiento de la infiltración. El tipo de suelo (forma, estructura, textura, etc.), influye notablemente en la capacidad de infiltración, de esta forma un suelo permeable, poco evolucionado, suele tener mayor capacidad de absorción de agua y por lo tanto disminuye la componente de escurrimiento, a diferencia de un suelo estructurado y texturalmente fino, que tiende a dar lugar una mayor componente de escurrimiento.

En general la mayor parte del escurrimiento está en forma canalizada (ríos y arroyos) y se mide en estaciones de aforo construidas especialmente para ello en los cauces. El escurrimiento de una cuenca se estima mediante el volumen de agua escurrido en un año, éste se obtiene con la relación entre el volumen de agua que precipita en un año y el coeficiente de escurrimiento (Aparicio, 2005), que indica cuánto de esa lluvia puede escurrir. Para determinar el escurrimiento superficial se emplea la *ecuación 1.2*:

$$Q = P * Ce \quad (1.2)$$

Donde:

Q = Altura de la lámina de escurrimiento anual

P = Precipitación anual promedio en mm

C_e = Coeficiente adimensional de escurrimiento promedio

Si se desea obtener el volumen de escurrimiento, se debe multiplicar por el área de la zona de estudio.

El C_e se puede obtener por medio de dos metodologías principalmente: con base en Benítez, et al. (1980) y la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 (DOF, 2015).

La metodología de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (DOF, 2015) sobre la Conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, señala que en el caso de que la cuenca bajo estudio no cuente con suficiente información, para obtener el C_e se puede aplicar el método indirecto a partir de tres características: a) la precipitación, b) el tipo de suelo (textura) y c) cobertura del suelo (uso de suelo).

- a) La precipitación anual es el volumen de lluvia que ocurre en un año. Se mide en milímetros (*mm*).
- b) El tipo de suelo (textura) se clasifica de acuerdo con su grado de permeabilidad, debido a que permite en mayor o menor medida el paso del agua, esto es suelo: permeable, medianamente permeable y casi impermeable (*Tabla 1.1*).
- c) El uso del suelo (cobertura) se clasifica en coberturas agrupadas por: barbecho, áreas incultas y desnudas, cultivos, pastizal, bosque, zonas urbanas, caminos y pradera permanente.

Para calcular el C_e , se deben obtener primeramente los valores de K . La constante K es una constante adimensional que depende del tipo de suelo y cobertura. Sus valores oscilan desde 0.07 a 0.33 (*Tablas 1.2 y 1.3*).

Una vez obtenido el valor de K , el C_e se calcula mediante las fórmulas siguientes dependiendo de las condicionantes. Las fórmulas se considerarán válidas para valores de precipitación anual entre 350 mm y 2150 mm.

Si K resulta menor o igual que 0.15, entonces (Ecuación 1.3):

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} \quad (1.3)$$

Si K es mayor que 0.15, entonces (Ecuación 1.4):

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad (1.4)$$

Donde:

C_e = Coeficiente de escurrimiento anual, en mm

K = Parámetro que depende del tipo y uso de suelo

P = Precipitación anual, en mm

Para fines de la presente investigación se utilizó el método de CONAGUA (DOF, 2002), debido a que es el utilizado a nivel nacional.

Tabla 1.1. Coeficiente de escurrimiento según Benítez, et al. (1980).

Tipo de suelo	Características
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactados que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

Tabla 1.2. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002).

Uso del suelo		Tipo de suelo		
		A	B	C
1	Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
	Cultivos:			
2	En Hilera	0.24	0.27	0.3
3	Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
4	Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
	Pastizal (% del suelo cubierto o pastoreo):			
5	Más del 75% - Excesivo	0.14	0.2	0.28

Tabla 1.3. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002) (continuación).

Uso del suelo		Tipo de suelo		
		A	B	C
6	Del 50 al 75% - Regular	0.2	0.24	0.3
7	Menos del 50% - Poco	0.24	0.28	0.3
Bosque (% del suelo cubierto):				
8	Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
9	Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
10	Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
11	Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
12	Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
13	Caminos	0.27	0.3	0.33
14	Pradera permanente	0.18	0.24	0.3

c) Evapotranspiración

La evapotranspiración es resultado del proceso por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso y directamente, o a través de las plantas vuelve a la atmósfera en forma de vapor; es decir; la evapotranspiración no es un fenómeno distinto a la evaporación y transpiración, sino la sumatoria de los dos procesos y el término, sólo es aplicable correctamente a una determinada área de terreno cubierta por vegetación. Cuando ésta no existe, únicamente podrá hablarse de evaporación. Por el contrario, en condiciones naturales, y aunque el fenómeno tiene sus características propias, no es posible la ocurrencia exclusiva de transpiración.

Justamente, la dificultad en la medida por separado de estas variables ha obligado a introducir el concepto de evapotranspiración (Evp). Desde el punto de vista práctico, dado que la evapotranspiración depende entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad en el suelo y el desarrollo vegetal de la planta fue necesario introducir dos conceptos (Schulz y García, 2015):

- ✓ Evapotranspiración Potencial (ETP): Representa la cantidad total de agua que sería evapotranspirada, si las reservas fueran suficientes para

compensar las pérdidas máximas. Se supone un desarrollo vegetal óptimo y un suelo en su capacidad de campo máxima.

- ✓ Evapotranspiración Real (ETR): Es la que se produce en las condiciones naturales de humedad. Cuando la humedad del suelo es elevada, puede llegar a ser igual que la potencial.

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_0 , que ocurre sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas.

De las numerosas fórmulas que permiten evaluar la ET_0 (Tabla 1.4), Allen, et al. (2006) recomiendan el método FAO Penman-Monteith como único método estándar de cálculo, dado que tiene mejor comportamiento y consistencia en comparación con otros métodos, y debido a que existe una elevada probabilidad de que este método prediga correctamente los valores de ET_0 en una amplia gama geográfica y climática; además, cuenta con previsiones para su uso en situaciones de falta de datos.

Tabla 1.4. Métodos empíricos para calcular la Evapotranspiración (Sánchez, 2010).

Autores de las formulas	Insumos
Thornthwaite	Temperatura
Jensen-Heise	Temperaturas (medias, máximas y mínimas del mes más cálido), altitud, radiación solar
Hargreaves-Samani	Temperatura, radiación solar
Blanney-Criddle Makkink	Temperatura
Turc	Temperatura, horas reales de sol
Penman- Monteith	Temperatura, horas reales de sol, velocidad del viento, humedad relativa

Sin embargo, debido que en muchos casos no se tiene disponibilidad de datos meteorológicos como la humedad relativa, velocidad del viento, presión del vapor, entre otras, se recomienda usar el método de Hargreaves-Samani (1985), debido a

que ha producido resultados razonables de ET_0 con cierta validez global (Allen, et al., 2006).

A continuación, se cita el método de Hargreaves-Samani, por ser una de las fórmulas más utilizadas:

1. Fórmula de Hargreaves

La fórmula de Hargreaves y Samani (1985) requiere de los datos de temperatura y de radiación solar, específicamente de temperatura media (T_{med} en $^{\circ}C$), máxima ($T_{máx}$ en $^{\circ}C$) y mínima ($T_{mín}$ en $^{\circ}C$), así como de radiación solar extraterrestre (R_a en $mm/día$). La ecuación general es la siguiente (*Ecuación 1.5*):

$$ET_0 = 0135 (t_{med} + 17.78)R_s \quad (1.5)$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración de referencia diaria en $mm/día$

T_{med} = Temperatura media diaria en $^{\circ}C$

R_s = Radiación solar incidente en $mm/día$

La radiación solar incidente R_s se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); ésta última aparece según los autores como R_0 ó R_a , y se lee en tablas en función de la latitud del lugar y del mes. En este documento se refiriere a ella como R_a .

Para la obtención de la R_s Samani (2000) propone la siguiente fórmula (*Ecuación 1.6*):

$$R_s = R_a * KT * (T_{máx} - T_{mín})^{0.5} \quad (1.6)$$

Donde:

R_s = Radiación solar incidente en $mm/día$

R_a = Radiación solar extraterrestre en $mm/día$

KT = Coeficiente

$T_{máx}$ = Temperatura diaria máxima en $^{\circ}C$

T_{min} = Temperatura diaria mínima en °C

Puesto que los valores de R_a están tabulados y las temperaturas máximas y mínimas son datos empíricos relativamente fáciles de obtener, la dificultad para aplicar esta sencilla expresión la encontramos en el coeficiente KT .

El coeficiente KT es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica. Hargreaves (citado en Samani, 2000) recomienda $KT = 0.162$ para regiones del interior y $KT = 0.19$ para regiones costeras.

Para evaluar la Radiación Solar Extraterrestre R_a existen los valores obtenidos de varias tablas, todas ellas en función de la latitud y del mes, por ejemplo, existe la tabla de R_a de Allen, et al. (1998) en mm/día de agua evaporada.

A pesar de que la ET_0 se puede obtener por medio de estas ecuaciones, la expresión simplificada utilizada más comúnmente es (Ecuación 1.7):

$$ET_0 = 0.0023 (T_{med} + 17.78)(T_{máx} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (1.7)$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración de referencia diaria en mm/día

T_{med} = Temperatura media diaria en °C

R_a = Radiación solar extraterrestre en mm/día.

$T_{máx}$ = Temperatura diaria máxima en °C

T_{min} = Temperatura diaria mínima en °C

d) Infiltración

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 acuífero incrementando el volumen de agua acumulado anteriormente. Superada la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad. Este último proceso recibe el nombre de percolación, infiltración eficaz o infiltración profunda. El término de infiltración se aplica solamente en materiales no saturados, diferenciándose de la percolación que

es el tipo de movimiento que predomina en los materiales saturados (Schulz y García, 2015).

La infiltración del agua en el suelo juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico. Dependiendo de las condiciones geológicas, puede permanecer en el suelo en forma de humedad; escurrir como flujo subsuperficial y aflorar como un manantial; o recargar el acuífero, entre otros (Alvarado & Barahona, 2017).

Para el cálculo de la infiltración se tienen diversas metodologías, una de ellas es la adaptada por SEMARNAT (2005) para estimar la generación de líquidos percolados, basada en el método de balance de agua desarrollado por C. W. Thornthwaite (1948). Esta metodología, establece una relación entre la hidrología básica de superficie con la hidrología subterránea, a través de la cual las variaciones en la cantidad de agua en el suelo vienen determinadas por la diferencia entre las entradas y salidas de todas las fuentes posibles con injerencia en el balance.

Como entradas se consideran fundamentalmente las precipitaciones pluviales mensuales promedio. Así mismo, como salidas, se incluyen las evapotranspiraciones mensuales obtenidas sobre todo a partir de las temperaturas promedio mensuales, y la capacidad que el suelo tiene para retener humedad antes de lixiviarla (capacidad de campo del suelo). Además, la fracción de la precipitación pluvial que se pierde por escurrimiento sobre el suelo es también considerada como pérdida o salida.

Para estimar la infiltración real (I_r) ó eficaz (I_e) se requiere la *ecuación 1.8*:

$$I_r_j = I_p_j - ET_{0j} \quad (1.8)$$

Donde:

I_r_j = Infiltración real mensual en mm.

I_p_j = Infiltración potencial mensual en mm.

ET_{0j} = Evapotranspiración de referencia mensual en mm.

j = Indicador del mes considerado

La infiltración potencial (I_p) es calculada a través de la *ecuación 1.9*:

$$Ip_j = P_j - (P_j * Ce_j) \quad (1.9)$$

Donde:

Ip_j = Infiltración potencial mensual, en mm.

P_j = Precipitación mensual promedio, en mm.

Ce_j = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional (también llamado Ke_j).

j = Indicador del mes considerado.

1.4. Marco legal

El concepto de zonas de protección de manantiales no ha sido establecido de forma común en nuestro país. Por esta razón, en las leyes y reglamentos no existen menciones específicas a este término. Sin embargo, la protección genérica del agua contra la contaminación si se establece en varios lugares, como los que mencionan a continuación: La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1917), Ley de Aguas Nacionales (2016), Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales (2014), Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (2018), Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2018), Ley de Contribución de Mejoras por Obras Públicas Federales de Infraestructura Hidráulica (1990), Ley Agraria (2018), Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (2012).

En la **Ley de Aguas Nacionales**, Artículo 1º se establece lo siguiente “La presente Ley es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; ... y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable” (LAN, 2016).

En la **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente** conforme al Artículo 1º tiene por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para (LGEEPA, 2018):

- El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.

La **Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable** tiene como objetivo general conservar y restaurar el patrimonio natural y contribuir, al desarrollo social, económico y ambiental del país, mediante el manejo integral sustentable de los recursos forestales en las cuencas hidrográficas.

Así mismo, entre sus objetivos específicos se encuentran el coadyuvar en la ordenación y rehabilitación de las cuencas hidrográficas; así como recuperar y desarrollar bosques en terrenos forestales degradados y terrenos preferentemente forestales, para que cumplan con la función de conservar suelos y aguas, además de dinamizar el desarrollo rural (LGDFS, 2018).

La entidad cuenta con la **Ley del Agua para el Estado de México y Municipios** en la cual se señalan los siguientes objetivos (GEM, 2013):

- El control de la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas de jurisdicción estatal y municipal;
- La atención prioritaria de la problemática que presenten los recursos hídricos del Estado, su calidad y cantidad;
- La definición del marco general para la formulación y aplicación de normas para la gestión integral del agua;
- La implementación de acciones que propicien la recarga de acuíferos en el Estado y el manejo sustentable de sus recursos hídricos;
- La promoción y ejecución de medidas y acciones que fomenten la cultura del agua; y
- El establecimiento de un régimen sancionatorio que castigue la contaminación, el mal uso y el despilfarro de los recursos hídricos.

El **Código para la Biodiversidad del Estado de México** en el Artículo 2.59 considera prioritarias para efectos del otorgamiento de los estímulos fiscales que se establezcan conforme a la Ley de Ingresos del Estado las actividades relacionadas con: el ahorro, uso, aprovechamiento sostenible y la prevención de la contaminación del agua (GEM, 2006).

Continuando con el Código para la Biodiversidad del Estado de México en su Artículo 2.156. sección II, menciona que “para evitar la contaminación del agua el Gobierno del Estado a través de la Secretaría y los Ayuntamientos regulará: ... Las descargas de origen municipal y su mezcla incontrolada con otras descargas” (GEM, 2006).

El Artículo 2.157 señala que “no podrán descargarse o infiltrarse sin previo tratamiento en cualquier cuerpo o corriente de jurisdicción estatal o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población, aguas que contengan cualquier contaminante” (GEM, 2006).

1.5. Marco conceptual

Durante todo el proyecto se hace referencia a tres conceptos principales: manantial, cuenca y zona de captura potencial de un manantial por lo que a continuación se explica brevemente en que consiste cada uno de ellos:

Principalmente; cabe señalar, que los manantiales seleccionados para realizar el presente estudio son considerados manantiales de tipo hipodérmicos.

Manantial hipodérmico: los manantiales de tipo hipodérmicos en zonas montañosas tienen una estrecha relación con los patrones de precipitación, ya que tales flujos circulan de modo somero y rápido por ciertas formaciones permeables de escasa profundidad, que proceden de una rápida infiltración, una alta conductividad hidráulica y un retorno hacia la superficie, por lo que en zonas de menor altitud y pendientes este flujo no es relevante (López, 2018).

Cuenca: es el área geográfica por donde el agua se mueve hacia una corriente principal llegando hasta un punto común de salida, es también el territorio

en el que acontece el ciclo hidrológico. Debido a lo anterior se considera la cuenca como la unidad geográfica más funcional para administrar el agua.

Las cuencas son además los espacios geográficos donde los grupos y comunidades comparten identidades, tradiciones y cultura, y donde socializan y trabajan en función de la disponibilidad de recursos renovables y no renovables. En las cuencas, la naturaleza obliga a reconocer necesidades, problemas, situaciones y riesgos hídricos comunes, por lo que debería ser más fácil coincidir en el establecimiento de prioridades, objetivos y metas también comunes y la práctica de principios básicos, como el de corresponsabilidad y el de solidaridad en el cuidado y preservación de los recursos naturales, que permitan la supervivencia de la especie (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C.)

Zona de captura potencial (ZCP) de un manantial: se define como el área geográfica donde se infiltra agua que se dirige hacia el punto de descarga o manantial. A partir de esta zona de captura es posible definir zonas de protección. Para evitar la amenaza de contaminación del agua toda actividad potencialmente contaminante debe ser controlada o limitada a un nivel adecuado dentro de esta zona de protección. Sin embargo, debido a cuestiones socioeconómicas esta limitación resulta difícil de cumplir en su sentido amplio, por lo tanto, en la práctica se opta por realizar una división de la zona de captación en zonas menores para aplicar restricciones más severas en áreas cercanas al manantial (Vargas, 2002).

CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO

1.1. Localización

La cuenca presa de Guadalupe (CPG) se ubica en el Estado de México, al noroeste de la Ciudad de México, comprende parcialmente seis municipios: Nicolás Romero, Isidro Fabela, Jilotzingo, Atizapán de Zaragoza, Cuautitlán Izcalli y Tepotzotlán, principalmente los tres primeros; en los cuales queda incluido el 70% de la superficie total de la cuenca de aproximadamente 322 km² (Figura 2.1).

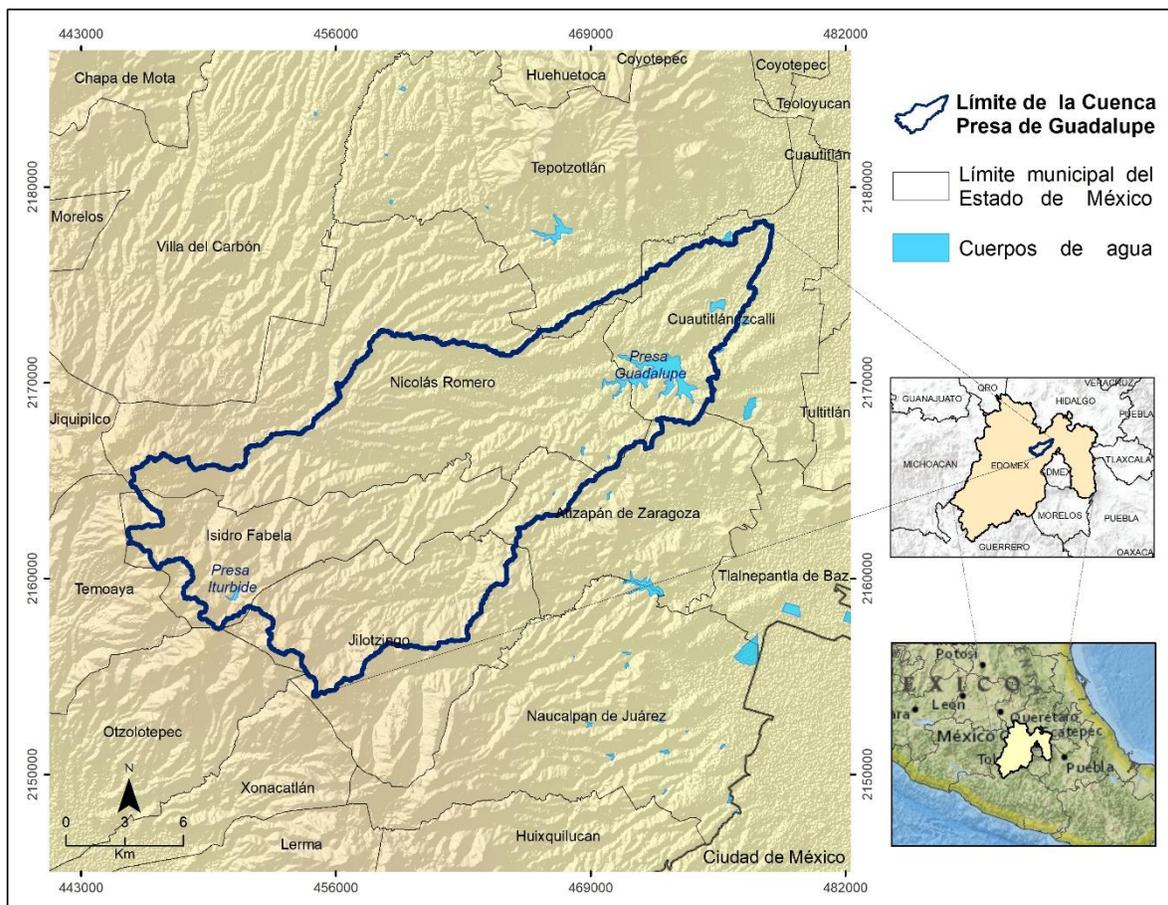


Figura 2.1. Mapa de ubicación de la cuenca presa de Guadalupe.

1.2. Medio físico

1.2.1. Relieve

La cuenca presa de Guadalupe se puede subdividir en tres zonas: la zona alta arriba de los 3,026 msnm; la zona media entre los 2,562 y 3,026 msnm y la zona baja, debajo de 2,562 msnm.

El parteaguas de la parte alta de la cuenca presa de Guadalupe comienza en la Sierra de Monte Bajo y Monte Alto; las altitudes más altas se encuentran en los límites municipales con Xonacatlán, Oztolotepec, Temoaya y Jiquipilco las cuales van de 3,500 a los 3,776 msnm (*Figura 2.2*) formando cerros y quebradas profundas. Dentro de la cuenca presa de Guadalupe la cota más alta alcanza los 3,776 msnm y se ubica entre los límites el parteaguas del municipio de Isidro Fabela.

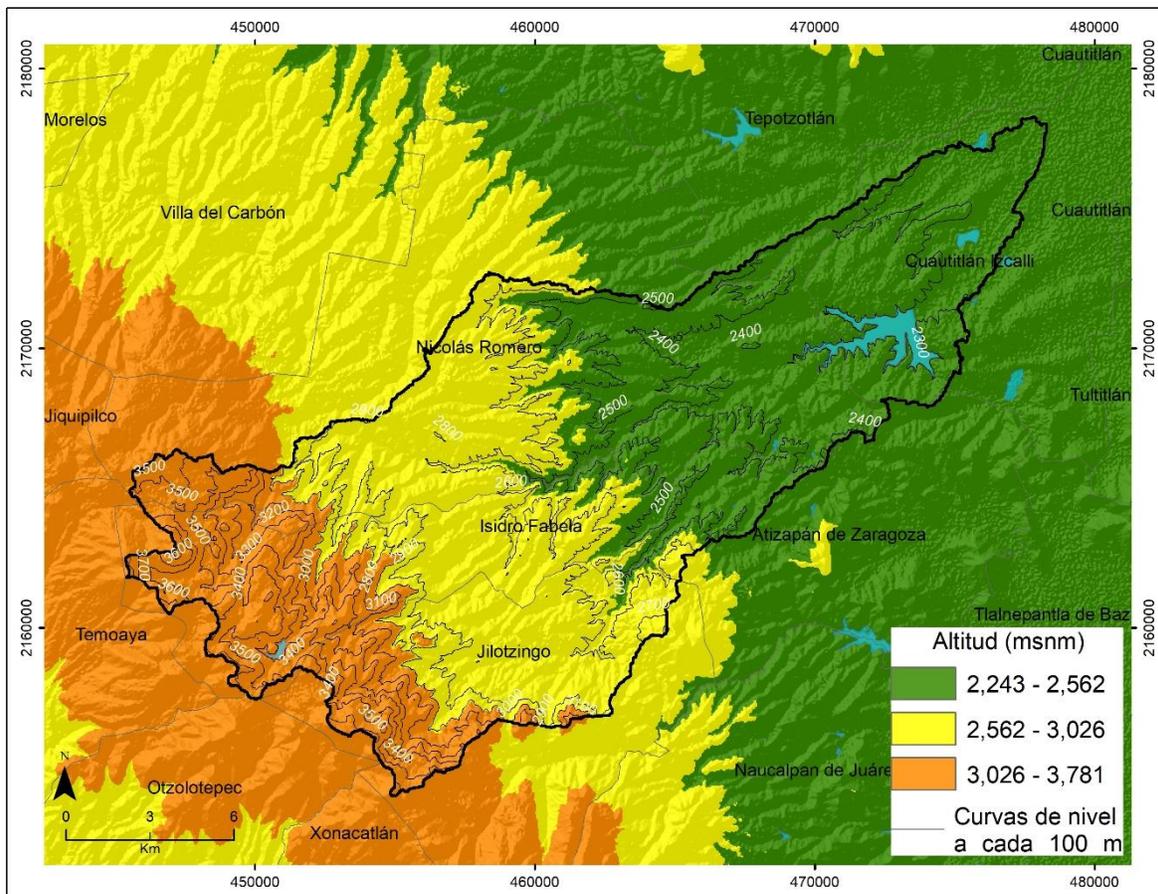


Figura 2.2. Mapa de altitud, con base en el Modelo Digital de Elevación.

Entre los cerros de mayor altura se encuentran los siguientes: Xitoxi, el Negro, Las Palomas, Las Navajas, Cervantes, Prieto, Los Puercos, San Pablo, Los Gavilanes, La Catedral, Los Vaqueros, Gorondani, Los Cerritos, Los quemados, La cocinera y Caideni (PDM, 2018).

Entre los llanos se encuentran: El Valle de la Luna, Laguna Seca, Tecuaní, Doña Juana, Las Mesas, de La Horca, San Toro, Muchachos Quemados, de las Navajas y el del Sol (PDM, 2018).

1.2.2. Clasificación climática

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1973), se identifican dos tipos de climas en la zona: semifrío subhúmedo en la parte alta y templado subhúmedo en la parte media- baja (*Figura 2.3*).

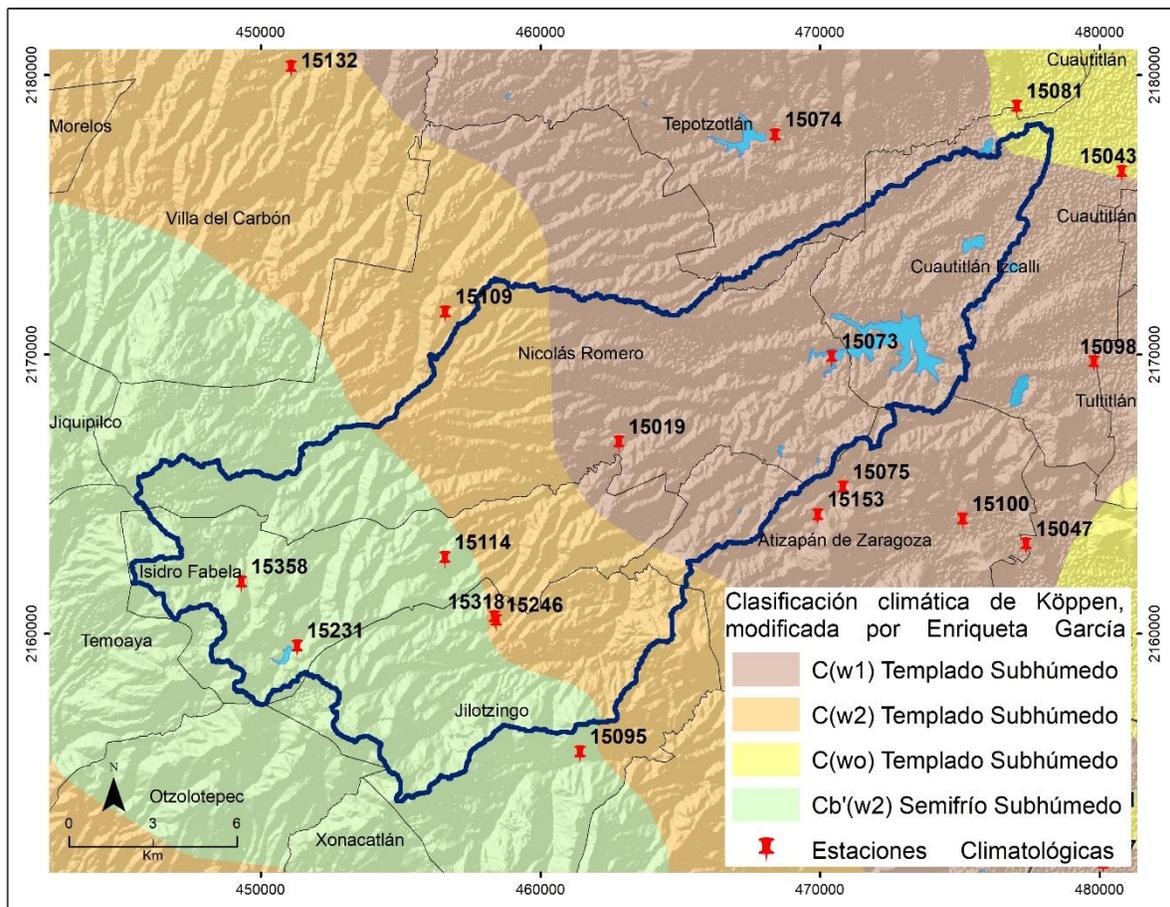


Figura 2.3. Clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1973). Fuente: IFOME GEM 2010.

En la *tabla 2.1*, se muestran las características de los tipos de clima ilustrados en la *figura 2.3*.

Tabla 2.1. Características de tipo de clima presente en el área de estudio tomado del Atlas Geológico - Ambiental del Estado de México, elaborado por el instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México IFOMEGEM, (2016).

Tipo	Características
Cb'(w2)	Templado, semifrío, con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, menos de cuatro meses con temperatura mayor a 10°C, subhúmedo, precipitación anual entre 200 y 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.
C (w2)	Templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.
C(w1)	Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
C(w0)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.

1.2.3. Precipitación

La precipitación media de la cuenca de la presa de Guadalupe, determinada a partir de la información disponible de las estaciones climatológicas en su área de influencia, es de 900 mm (*Figura 2.4*). Se presentan variaciones significativas respecto a la media, con años secos como el de 1986 con apenas 687.25 mm, o húmedos como 2003, donde casi se alcanzan los 1600 mm (PDM, 2018). El 90% de la lluvia se concentra en los meses de mayo a octubre. En los meses restantes la precipitación es muy escasa.

Las mayores precipitaciones se presentan en el área montañosa o parte alta de la cuenca presa de Guadalupe donde los valores medios anuales superan los 1,290 mm, por lo que constituye una de las zonas más húmedas del Valle de México.

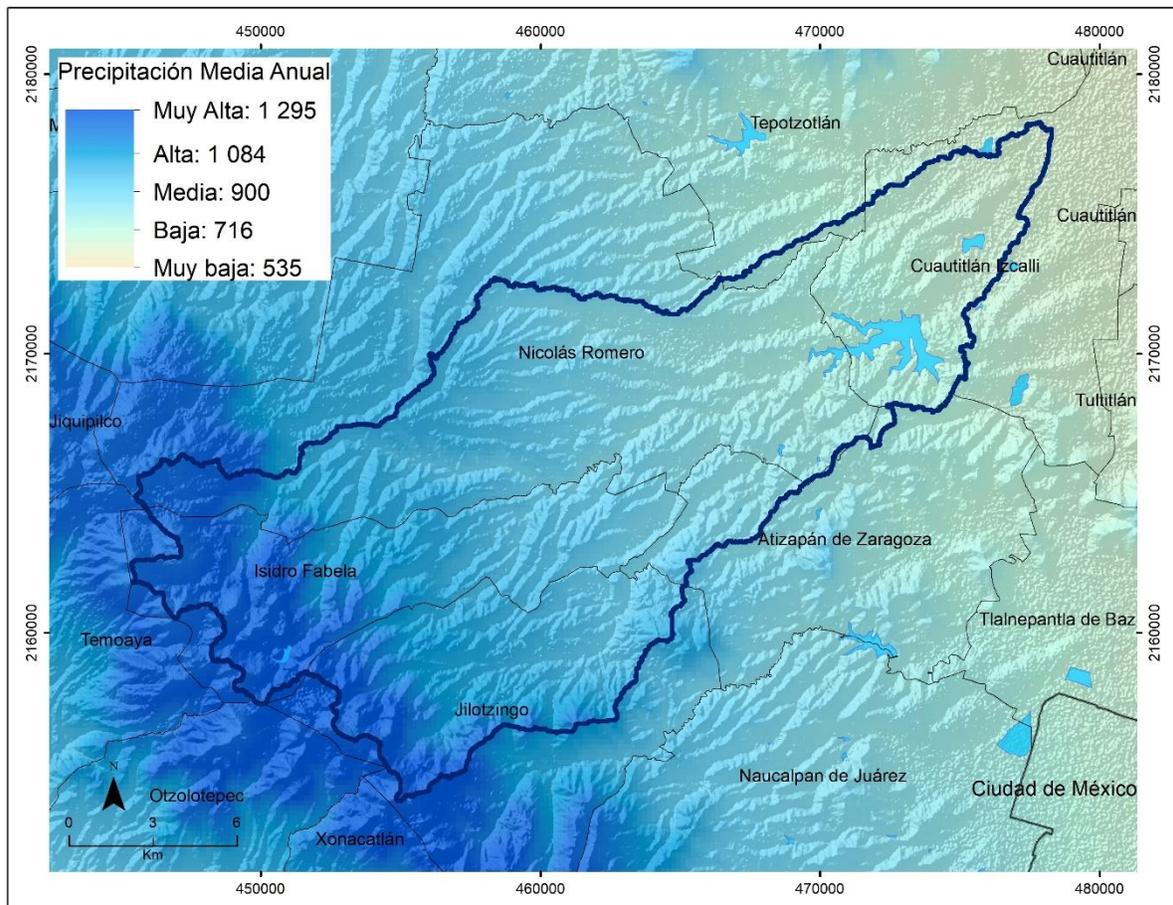


Figura 2.4. Mapa de precipitación media anual (1980-2010), con base en datos del SMN (2015) y Ordoñez (2015).

1.2.4. Temperatura

La temperatura media anual es de 12 °C. La temperatura máxima promedio se presentan en abril y mayo por arriba de los 17°C y la mínima promedio se presenta en los meses de enero y febrero por debajo de los 7°C. (Figura 2.5).

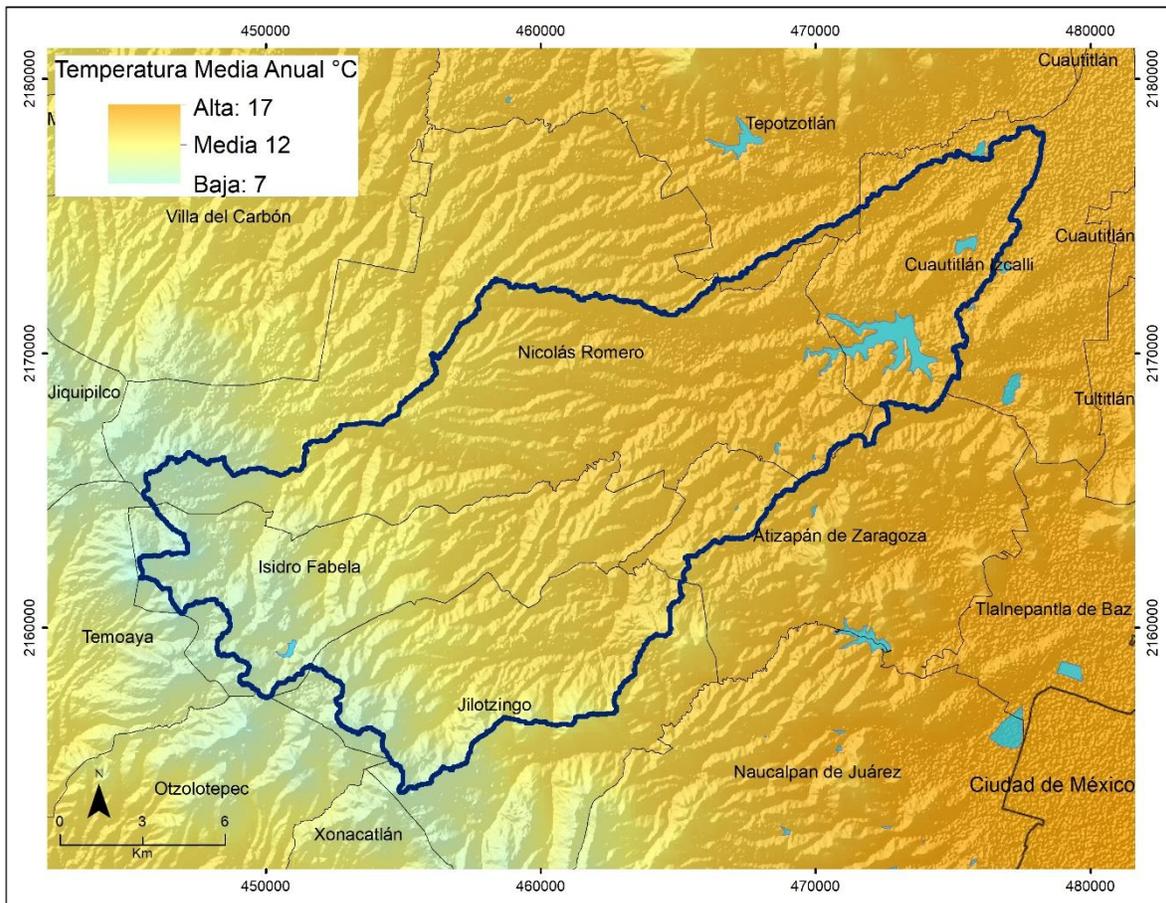


Figura 2.5. Mapa de temperatura media anual (1980-2010), con base en datos del SMN (2015) y Ordoñez (2015).

1.2.5. Uso del suelo y vegetación

La vegetación de la parte alta de la cuenca corresponde principalmente a bosque en donde se ubican las siguientes especies: oyamel (*Abies religiosa*), pino (*Pinus hartwegii*) y otras especies de *Pinus* y encino (*Quercus spp*), acompañadas de árboles como madroño (*Arbutus xalapensis*), aile (*Alnus jorullensis*), junípero (*Juniperus monticola*), aguacatillo (*Garrya laurifolia*), capulines (*Prunus serotina*), entre otros.

Cabe destacar que, en la parte alta de la cuenca pertenece al Parque Ecológico La Bufa-Zempoala (conocido comúnmente como Parque Otomí – Mexica del Estado de México), considerado como área natural protegida.



Figura 2.6. Bosque de oyamel talado en la parte alta de la CPG.

Sin embargo, la tala inmoderada y clandestina (*Figura 2.6*) ha terminado con zonas forestales, dejando a su paso zonas erosionadas irreversibles (PDM, 2018), lo

que además podría causar daños parciales o totales en la cantidad y/o calidad de agua de los manantiales que se ubican dentro de la cuenca.

Como se puede observar (*Figura 2.7*), En la parte alta de la CPG también encontramos algunos pastizales, áreas urbanas y agrícolas.

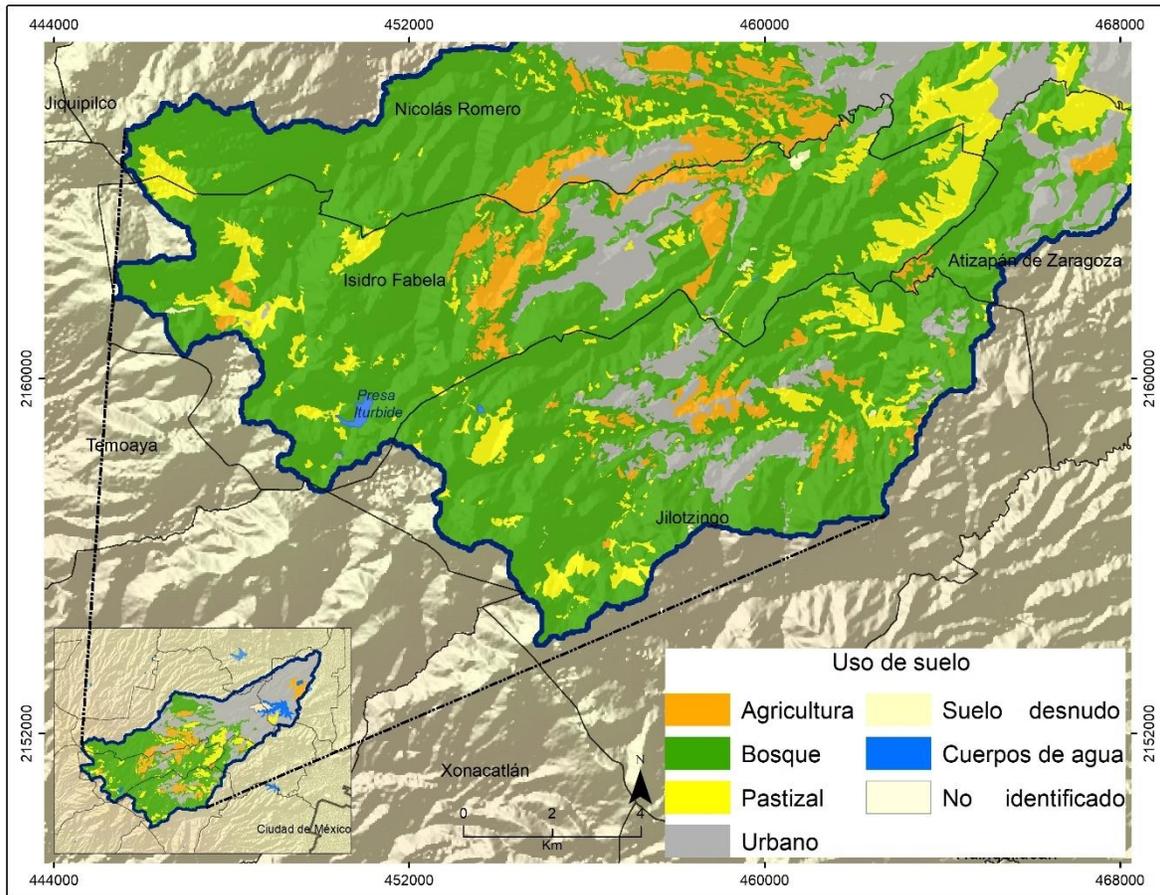


Figura 2.7. Mapa de uso de suelo de la parte alta de la cuenca presa de Guadalupe.

En la parte media se observa la presencia de áreas agrícolas y urbanas, pastizal en mayor proporción que en la parte alta y suelos desnudos.

De este modo la mayor porción de área urbana está concentrada en la parte baja de la cuenca abarcando más del 50% del área total de la cuenca; además de algunos cultivos de riego como maíz y avena principalmente.

1.2.6. Edafología

De acuerdo con la CONABIO (2009) y a la información obtenida del Atlas Geológico del Estado de México (2010), en la CPG se identificaron cuatro tipos de suelo: Andosol, Luvisol Feozem y Vertisol (*Figura 2.8*).

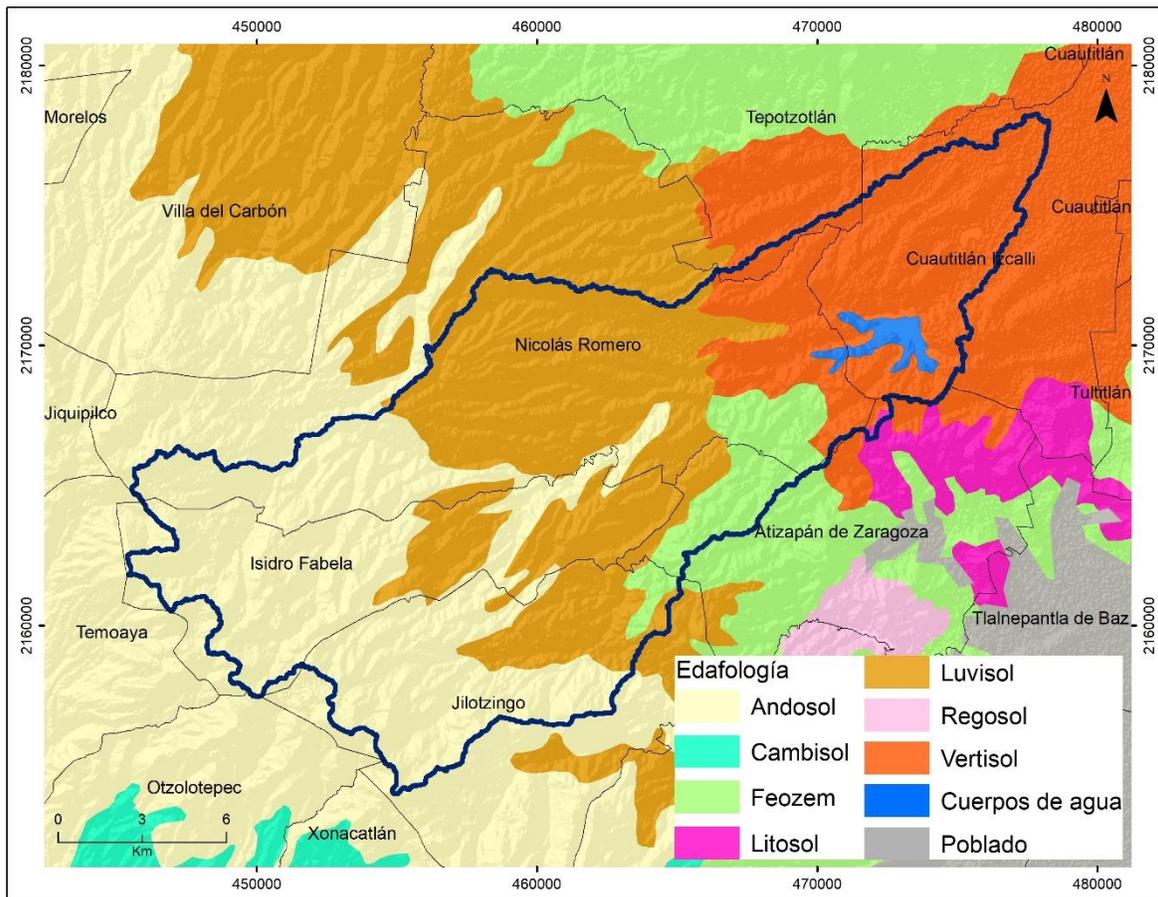


Figura 2.8. Mapa edafológico. Fuente: CONABIO 2009.

Los andosoles se ubican principalmente en la parte alta de la cuenca se originan a partir de cenizas volcánicas que se distinguen por su alta capacidad de retención de humedad, su vocación natural es forestal; en la agricultura su rendimiento es muy bajo, presentando alta susceptibilidad a la erosión.

Los luvisoles, se localizan en la parte media de la cuenca (*Figura 2.9*), y se caracterizan por su alta susceptibilidad a la erosión cuando son utilizados en la agricultura, y no se manejan adecuadamente. El uso forestal en estos suelos es de

gran importancia. Son suelos que se caracterizan por tener una profundidad no mayor de 10 cm que los condiciona, tanto a usos agrícolas, como urbanos.



Figura 2.9. Tipo de suelo luvisol de la zona de estudio.

Los feozem localizados en la parte media de la cuenca principalmente en el municipio de Atizapán de Zaragoza son suelos con una capa superficial oscura, rica en materia orgánica y nutrientes ideales para la agricultura.

Los vertisoles se ubican en la parte baja de la cuenca son suelos con un alto contenido de arcilla expansiva la cual se caracteriza por ser susceptible a producir grandes cambios de volumen, en directa relación con los cambios en la humedad del suelo.

1.2.7. Características geológicas

La cuenca presa de Guadalupe geológicamente está conformada por rocas de la era Cenozoica como Andesita-Dacita y Lahar-Toba Andesítica del tipo extrusivas y Aluvial de tipo sedimentaria (*Figura 2.10*).

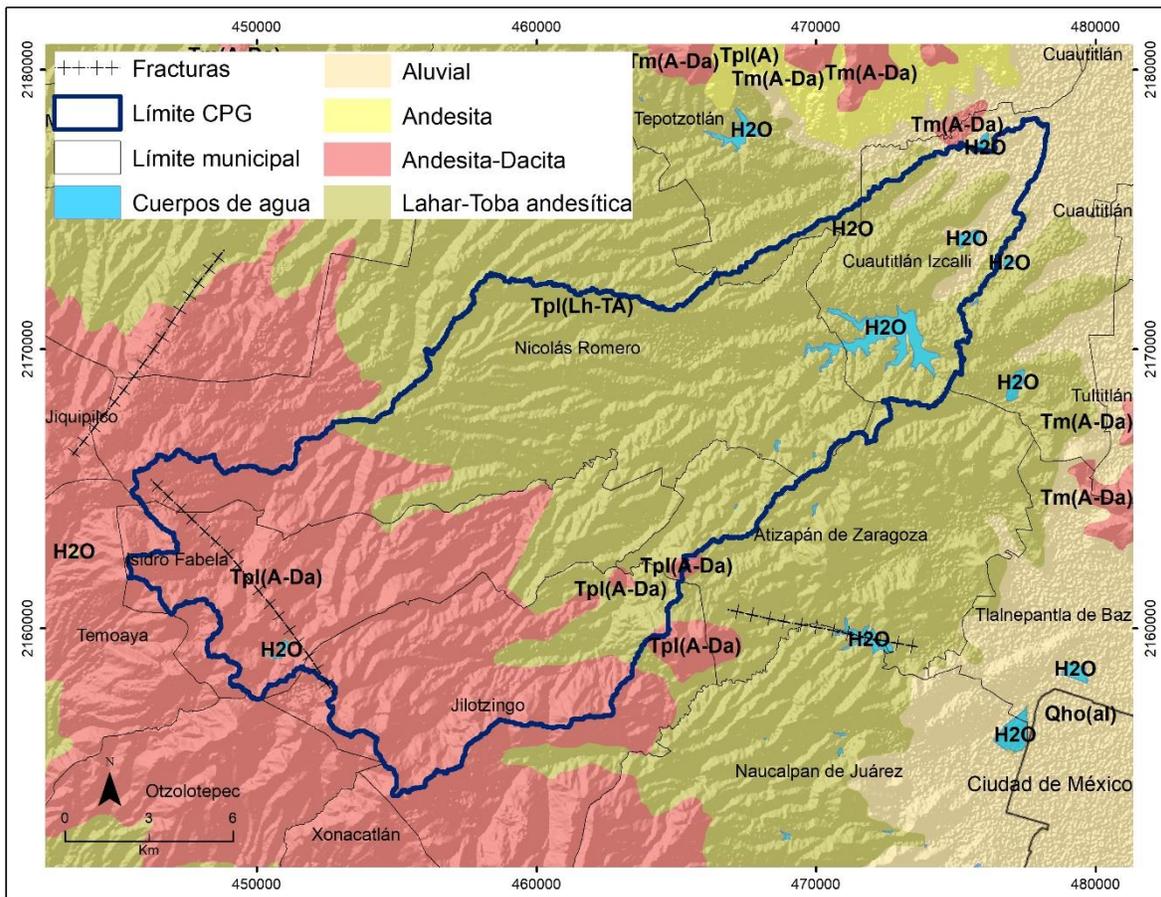


Figura 2.10. Mapa litológico. Fuente: IFOMEGEM 2010.

La zona de estudio se ubica dentro de la Faja Volcánica Transmexicana la cual consiste en una zona montañosa compuesta por rocas volcánicas del Cenozoico, con fosas profundas rellenas de material lacustre del Terciario y Cuaternario. Los derrames basálticos y la mayoría de las rocas son consideradas altamente permeables debido a su grado de fracturación.

Los derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial forman acuíferos locales independientes en rocas adyacentes. En las partes más bajas, los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos

lacustres y aluviales por lo que forman acuíferos de tipo semiconfinado. En superficie se encuentran los depósitos lacustres muy porosos y de poca permeabilidad del Plioceno Tardío formando acuitardos (Chávez et al., 2006).

1.2.8. Características hidrológicas

La zona de estudio pertenece a la subcuenca río Cuautitlán que deriva de la cuenca hidrográfica río Moctezuma que a su vez se deriva de la región hidrográfica número 26 Pánuco. La cuenca presa de Guadalupe es drenada por un conjunto de corrientes intermitentes pequeñas y por corrientes perennes, presentando un patrón de drenaje dendrítico (Figura 2.11). Los principales escurrimientos superficiales están conformados por los ríos: Arroyo Grande, Arroyo Chiquito y Arroyo Xinté.

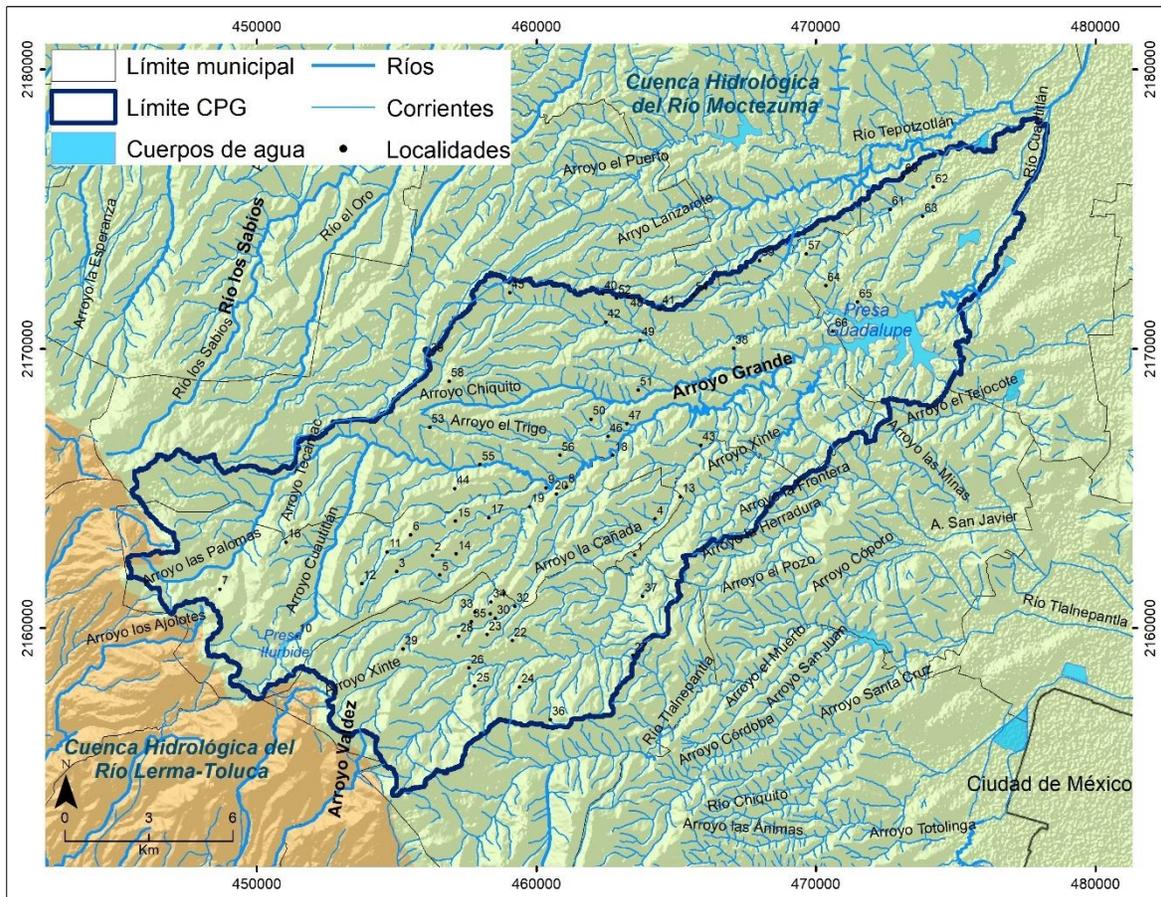


Figura 2.11. Mapa hidrológico. Fuente IFOMEGEM, 2010.

A continuación, se enlistan los nombres de las localidades de acuerdo con los números que aparecen en el mapa hidrológico (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Nombre de las localidades de acuerdo con los números en el mapa hidrológico de la figura 2.11.

Localidades de acuerdo con los números del mapa hidrológico (Figura 2.11).		
1. Los Gallos	23. San Miguel Tecpan	45. La Concepción
2. Tlazala de Fabela	24. Santa María Mazatla	46. El Tanque
3. Colonia Aurora	25. Dangú	47. Loma del Rio
4. Cañada de Onofres	26. Duditay	48. Joya del Tejocote
5. Colonia Laureles	27. Ejido Santa María Mazatla	49. Loma Larga
6. Colonia Palma	28. Quishiguada	50. Colonia Llano Grande
7. Ranchería Palomas	29. El Tular Peña de Lobos	51. Veintidós de Febrero
8. Los Panales	30. Barrio Damoshu	52. Colonia los Tubos
9. Ampliación Ejido Palma	31. Barrio de Dospí	53. Barrio de Guadalupe
10. Las Canoitas	32. Barrio Denxi	54. Loma de San José
11. Caixte	33. Barrio el Calvario	55. La Cantera
12. Enguido	34. Barrio las Manzanitas	56. La Estancia
13. Los Lavaderos	35. Barrio Gorondoni	57. Ampliación el Rosario
14. Colonia Miraflores	36. La Cruz	58. Loma de Chapultepec
15. Ejido Palma	37. La Cuesta de Xinte	59. Fraccionamiento Club Virreyes
16. Xitoxi	38. Villa Nicolas Romero	60. Huilango
17. Ejido Miraflores	39. Quinto Barrio	61. Ejido Santa María Tianguistenco
18. Ejido los Jarros	40. Caja de Agua	62. San Pablo de los Gallos
19. Ampliación Ejido Miraflores	41. Colonia Morelos	63. Las Tinajas
20. Los Panales	42. Progreso Industrial	64. Los Ailes
21. Santa Ana Jilotzingo	43. San Miguel Hila	65. Ejido de Guadalupe
22. Espíritu Santo	44. Transfiguración	66. Brisas del Lago

En esta zona se encuentra la presa Iturbide (*Figura 2.12*), una de las dos que existen en la cuenca; tiene una capacidad de 1.56 Mm (PDM, 2018) cuyas aguas se utilizan en la agricultura y en la recreación.



Figura 2.12. Presa Iturbide, Isidro Fabela, Estado de México.

Por otro lado, la presa o lago de Guadalupe tiene una capacidad de 65 millones de metros cúbicos y una superficie de 348 hectáreas; el 90% de esta presa corresponde al municipio de Cuautitlán Izcalli y el resto al municipio de Nicolás Romero. Las aguas residuales se descargan sin tratamiento a los arroyos, los cuales posteriormente desembocan a la presa de Guadalupe.

Esta presa fue construida entre 1936 y 1943, cuenta con un espejo de agua de 348 hectáreas. Por su importancia hidrológica, fue decretada el 13 de octubre del año 2004 como Parque Estatal, Santuario del Agua y Forestal Presa de Guadalupe.

En la presa de Guadalupe habitan ciertas especies acuáticas como carpa, tilapia y poecílicos; sin embargo, la actual calidad del agua no hace posible su aprovechamiento.

1.2.8.1. Manantiales en la cuenca presa de Guadalupe

En esta zona encontramos también una gran cantidad de manantiales que se suman a los abundantes escurrimientos superficiales en la época de lluvia y dan origen a el arroyo las Palomas, Cuautitlán, Xinté, entre otros.

Según datos actuales del Registro Público de Derechos del Agua (REPGA, 2019) dentro de la CPG se han registrado 29 manantiales. Estos manantiales se ubican en los municipios de Nicolás Romero, Isidro Fabela y Jilotzingo los cuales geomorfológicamente se localizan dentro de la parte media- alta de la cuenca.

Las *tablas 2.3 y 2.4* indican el nombre, uso, volumen designado y el titular de cada uno de estos manantiales.

Tabla 2.3. Manantiales ubicados dentro de la zona de estudio según datos del REPGA, 2019.

ID	Fuente	Uso	Volumen (m3/año)	Titular
1.	Manantial 1, 2 y 3	Agrícola	98,392	Luz María Bertha Leon Sauvinet
2.	Manantial Endeca	Acuacultura	1261440	Cria de engorda de truchas de Jilotzingo, S. A. de C. V.
3.	Manantial Endeca	Agrícola	960000	Ejido San Luis Ayucan
4.	Manantial El Risco	Diferentes usos	139968	Eliseo Mayen Mayen
5.	Manantial Meje y Escurrideros	Industrial	157000	Luis Felipe González Solana
6.	Manantial Tachos	Acuacultura	41967	Palomas Tachos Sociedad de Solidaridad Social
7.	Manantial Texandeje	Publico urbano	378432	Comite de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
8.	Manantial Seguyan	Publico urbano	29160	Comite de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
9.	Manantial Capotzi	Publico urbano	9720	Comite de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.

Tabla 2.4. Manantiales ubicados dentro de la zona de estudio según datos del REPDA, 2019 (continuación).

ID	Fuente	Uso	Volumen (m3/año)	Titular
10.	Manantial Capulines	Publico urbano	9720	Comite de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
11.	Manantial Los Muertos	Publico urbano	9720	Comite de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
12.	Manantial La Cumbre	Publico urbano	9720	Comite de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
13.	Manantial El Rincon	Publico urbano	19440	Comite de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, a. c.
14.	Manantial Plateros	Publico urbano	90508	Municipio de Isidro Fabela
15.	Manantial Tepozanes	Publico urbano	80416	Municipio de Isidro Fabela
16.	Manantial Los Capulines	Publico urbano	190477	Municipio de Isidro Fabela
17.	Manantial Las Aceitunas	Publico urbano	78209	Municipio de Isidro Fabela
18.	Manantial Agua Azul	Publico urbano	204668	Municipio de Isidro Fabela
19.	Manantial El Capulin	Publico urbano	45984	Municipio de Isidro Fabela
20.	Manantial La Cocinera	Publico urbano	94135	Municipio de Isidro Fabela
21.	Manantial Chinguiriteras y Panales	Acuacultura	63072	Borbollon de Lumbreras, S. de S. S.
22.	Manantial Peñas San Isidro	Acuacultura	204984	Enrique Vargas Santos
23.	Manantial Pozo Lipa	Acuacultura	283824	Alejo Gonzalez Alba
24.	Manantiales Tachos, Cienegas, Muchachos Quemados y Cocineras	Acuacultura	788400	Sociedad de Solidaridad Social Tlazala de Fabela
25.	Manantiales Texandeje, Seguayan, Capotzi, Capulines, La Lumbre,	Agricola	441936	Vecinos del pueblo de Santa Ana Jilotzingo
26.	Manantial Frutillial	Acuacultura	630720	Asociacion Ejidal San Luis Ayucan S. de S. S.
27.	Manantial Ojito de Agua	Agricola	31536	Manuel Jasso Rojas
28.	4 Manantiales sin nombre	Acuacultura	409968	Sociedad de Solidaridad Social "Tlatzallan"
29.	Manantial "Natrillate"	Acuacultura	210660	Sociedad de Solidaridad Social "Tlatzallan"

De acuerdo con estos datos; el uso del agua en los manantiales de la CPG se clasifica en 5 tipos: público urbano, industrial, agricultura, acuacultura y diferentes usos por lo que el agua de los manantiales de la CPG es utilizada en un 4% para diferentes usos, 4% para uso industrial, 13% agricultura, 31% acuacultura y 48% para uso público urbano (*Figura 2.13*).

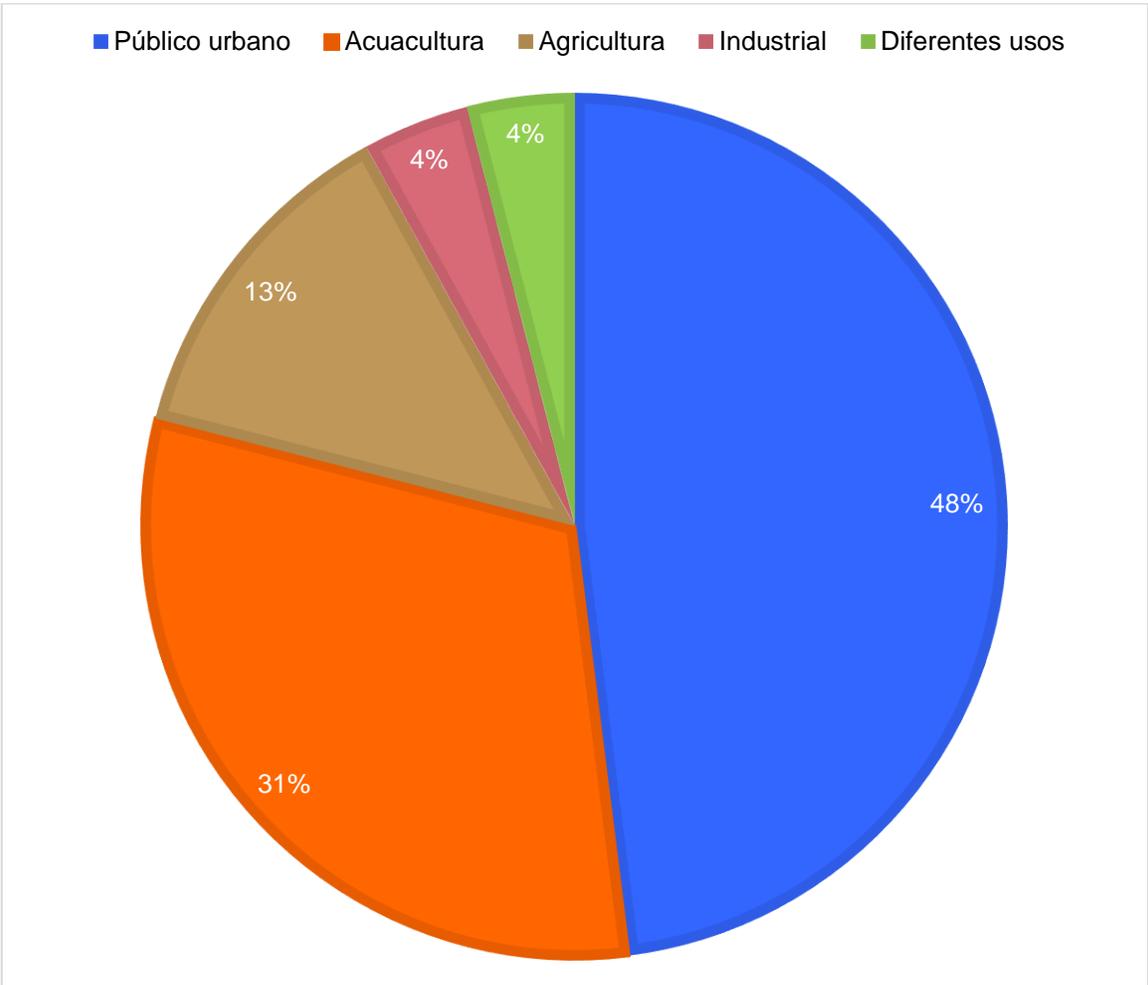


Figura 2.13. Porcentaje del uso del agua de los manantiales en la CPG. Fuente: REPDA, 2019.

1.3. Geografía social

1.3.1. Población

De acuerdo con los datos del Censo Intercensal 2015, realizado por el INEGI, en los municipios que integran la cuenca habitan un total de 1,485,051 habitantes

siendo éstos los principales beneficiarios de los servicios ecosistémicos que brinda la cuenca. En la *tabla 2.5* se muestra el número total de habitantes por municipio.

Tabla 2.5 Número de habitantes por municipio. Elaboración propia con datos del Censo Intercensal INEGI 2015.

Municipio	Población total
Isidro Fabela	10,308
Jilotzingo	17,970
Tepotzotlán	88,559
Nicolás Romero	366,602
Atizapán de Zaragoza	489,937
Cuautitlán Izcalli	511,675
Total	1,485,051

En las *tablas 2.6 y 2.7* se muestra la población existente por grupo quinquenal y la proporción entre hombres y mujeres, con ayuda complementaria de la *figura 2.14*, se puede visualizar que el grupo de edad que tiene mayor presencia en los municipios de la CPG son de los 20 a 24 años seguidos del grupo 10 a 14, por lo que se puede considerar una población relativamente joven.

Tabla 2.6 Población por grupo quinquenal de hombres y mujeres.

Área de estudio	Grupo quinquenal	Población total	Hombres	Mujeres
Cuenca presa de Guadalupe	00-04 años	126,522	64,085	62,437
	05-09 años	133,195	67,913	65,282
	10-14 años	127,061	64,694	62,367
	15-19 años	135,620	68,173	67,447
	20-24 años	136,774	67,539	69,235
	25-29 años	125,573	60,976	64,597
	30-34 años	119,812	56,669	63,143
	35-39 años	119,016	56,081	62,935
	40-44 años	102,108	47,979	54,129
	45-49 años	89,515	42,171	47,344
	50-54 años	78,876	37,053	41,823
	55-59 años	58,328	28,063	30,265
	60-64 años	43,384	20,992	22,392

Tabla 2.7. Población por grupo quinquenal de hombres y mujeres (continuación).

Área de estudio	Grupo quinquenal	Población total	Hombres	Mujeres
Cuenca presa de Guadalupe	65-69 años	26,968	13,119	13,849
	70-74 años	18,103	8,466	9,637
	75-79 años	10,756	4,927	5,829
	80-84 años	6,608	2,712	3,896
	85-89 años	3,619	1,388	2,231
	90-94 años	1,256	428	828
	95-99 años	497	161	336
	100 años y más	103	29	74
	No especificado	21,357	10,679	10,678
	Total		1,485,051	724,297

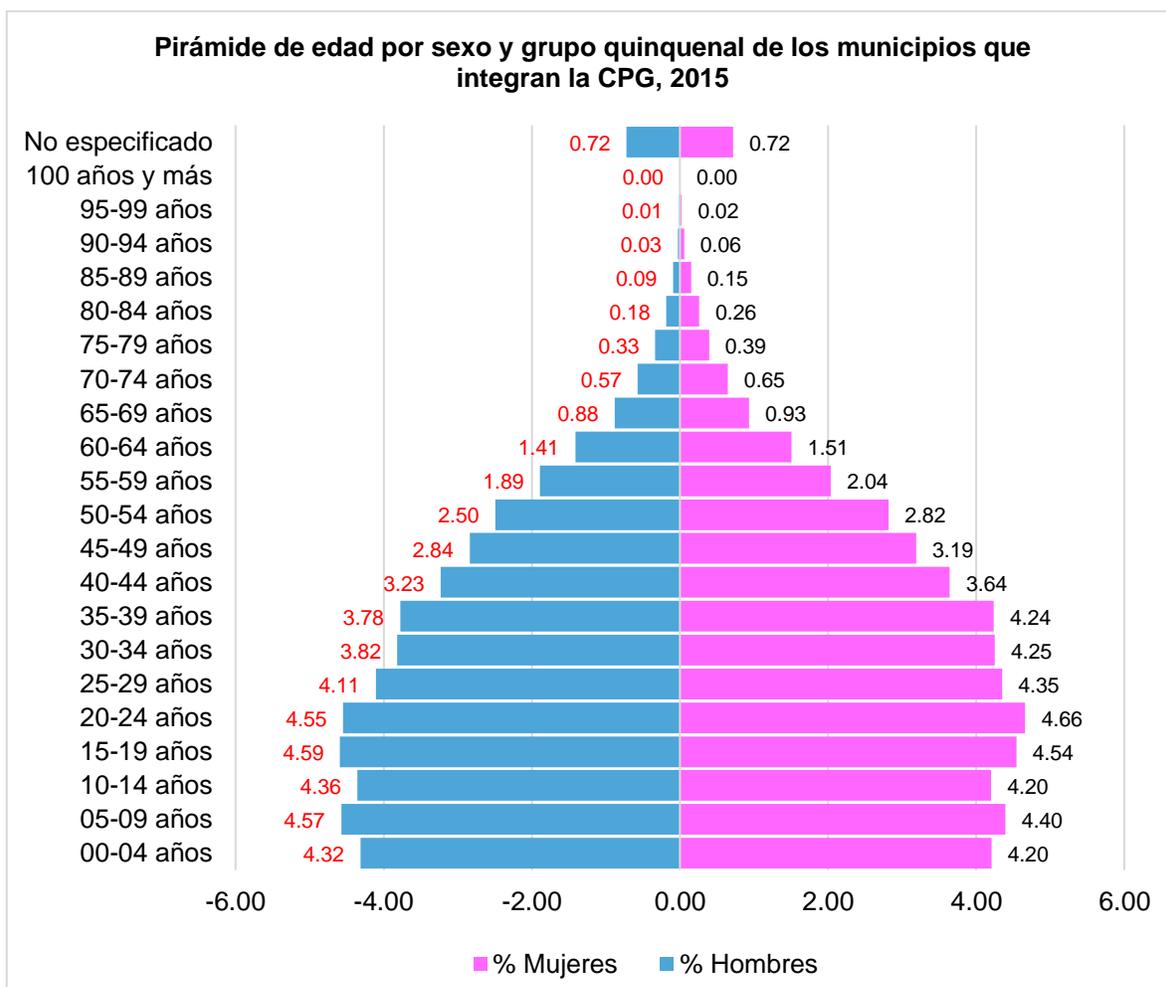


Figura 2.14 Pirámide de población en la CPG. Elaboración propia con datos de INEGI, 2015.

1.3.2. Actividades económicas

De acuerdo con los datos del DENUE (2020) las actividades económicas que predominan en la cuenca presa de Guadalupe se pueden clasificar en tres según el SIAN (2018) la primera representa actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales como: DIF, registro civil, estación de bomberos; etc.; la segunda se refiere otros servicios excepto actividades gubernamentales como: autolavados, capillas, cerrajerías, barberías bisutería, estéticas, funerarias, iglesias, joyerías, panteones, tintorerías, vulcanizadoras, etc.; y la última incorpora servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas como: cafeterías, cocinas económicas, pizzerías, restaurantes, taquerías, etc.; ubicadas en la *figura 2.15*.

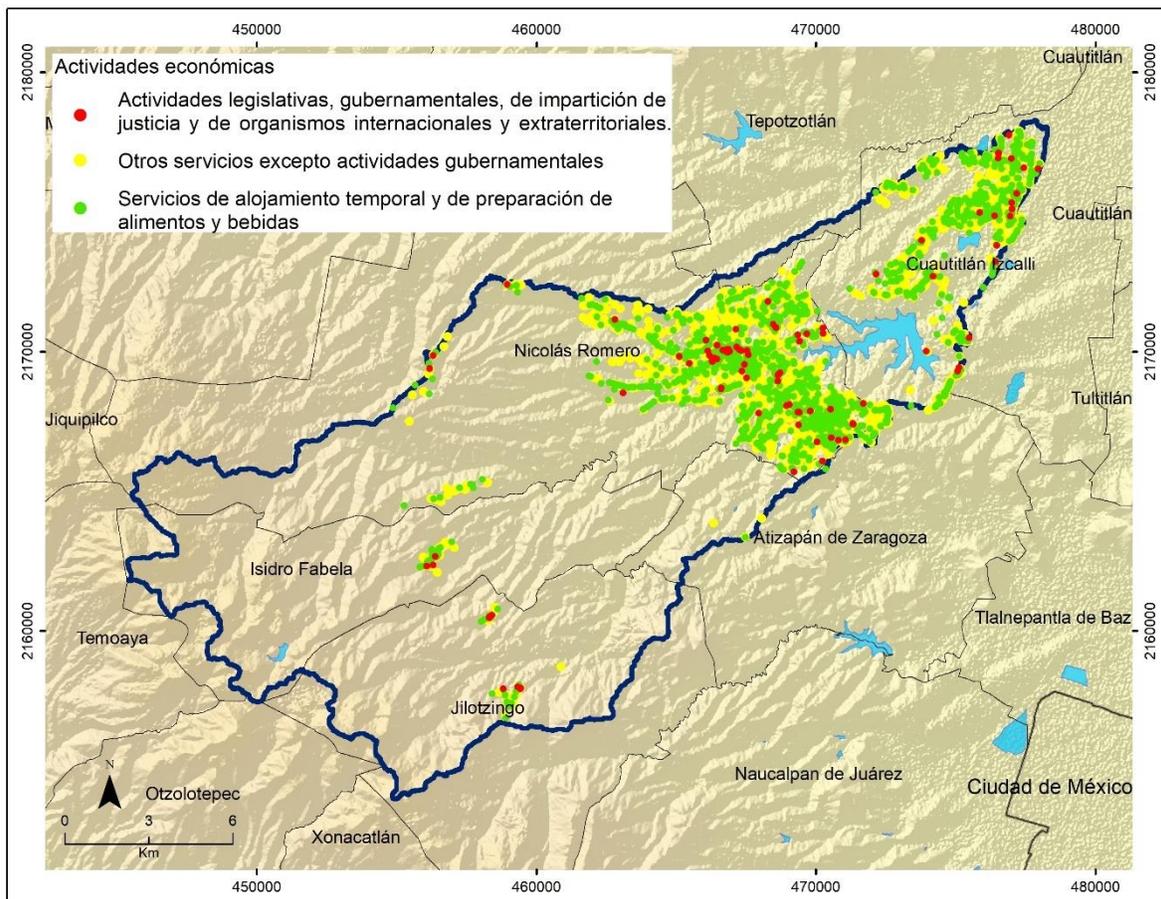


Figura 2.15. Actividades económicas con base al SIAN, 2018.

Las principales actividades económicas que se desarrollan dentro de la cuenca son las que tienen que ver con otros servicios excepto actividades gubernamentales con 3284 establecimientos, en segundo lugar se encuentran las actividades relacionadas a servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas con 21154 establecimientos y en tercer lugar las actividades relacionadas a las actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales con 114 establecimientos (*Figura 2.16*).

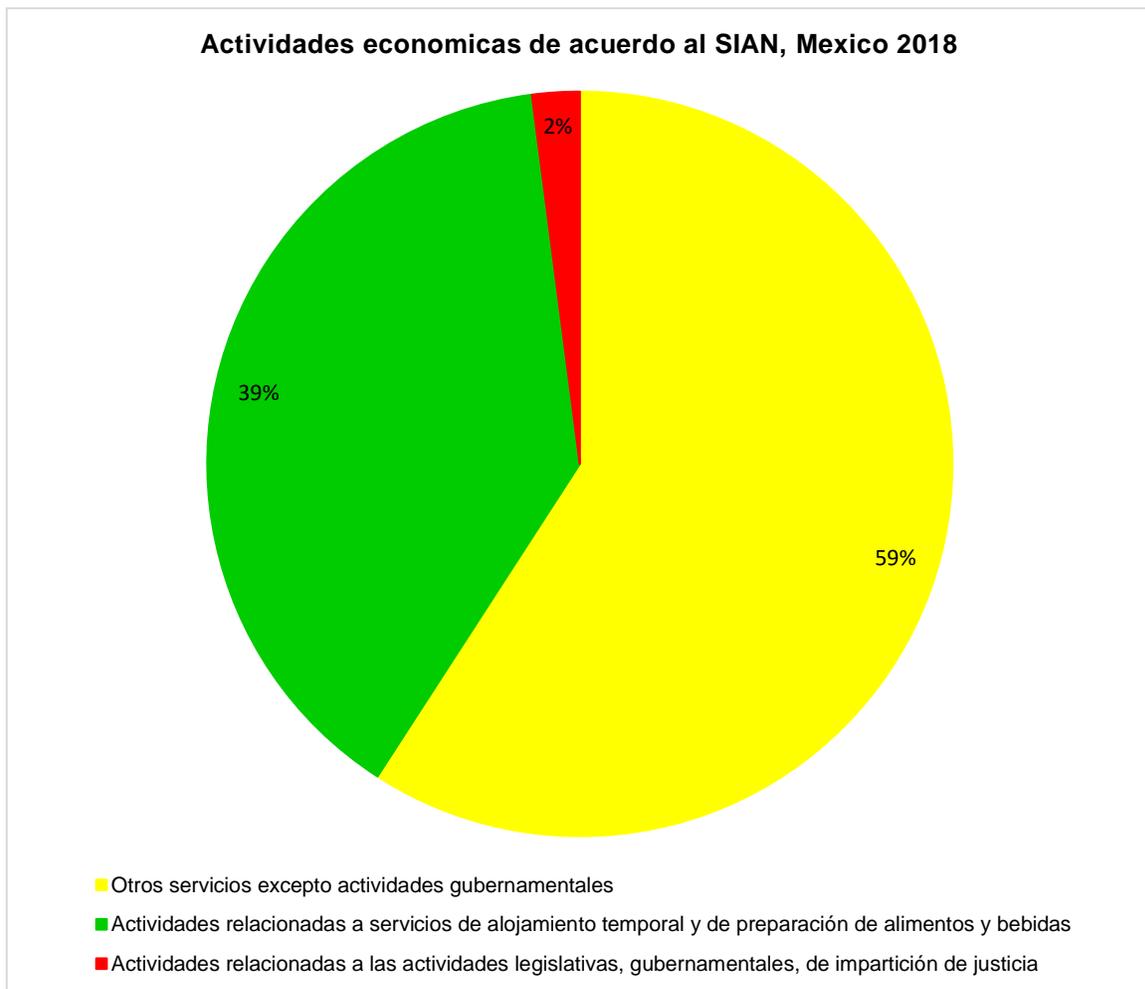


Figura 2.16. Principales actividades económicas de acuerdo con el SIAN, México 2018.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

A fin de alcanzar los objetivos planteados se aplicó una metodología que consta de cinco pasos (*Figura 3.1*). El manejo de la información se realizó mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), de acuerdo con el tipo de información y análisis se trabajó con dos softwares: ArcGis 10.2 e IDRISI TerrSet.

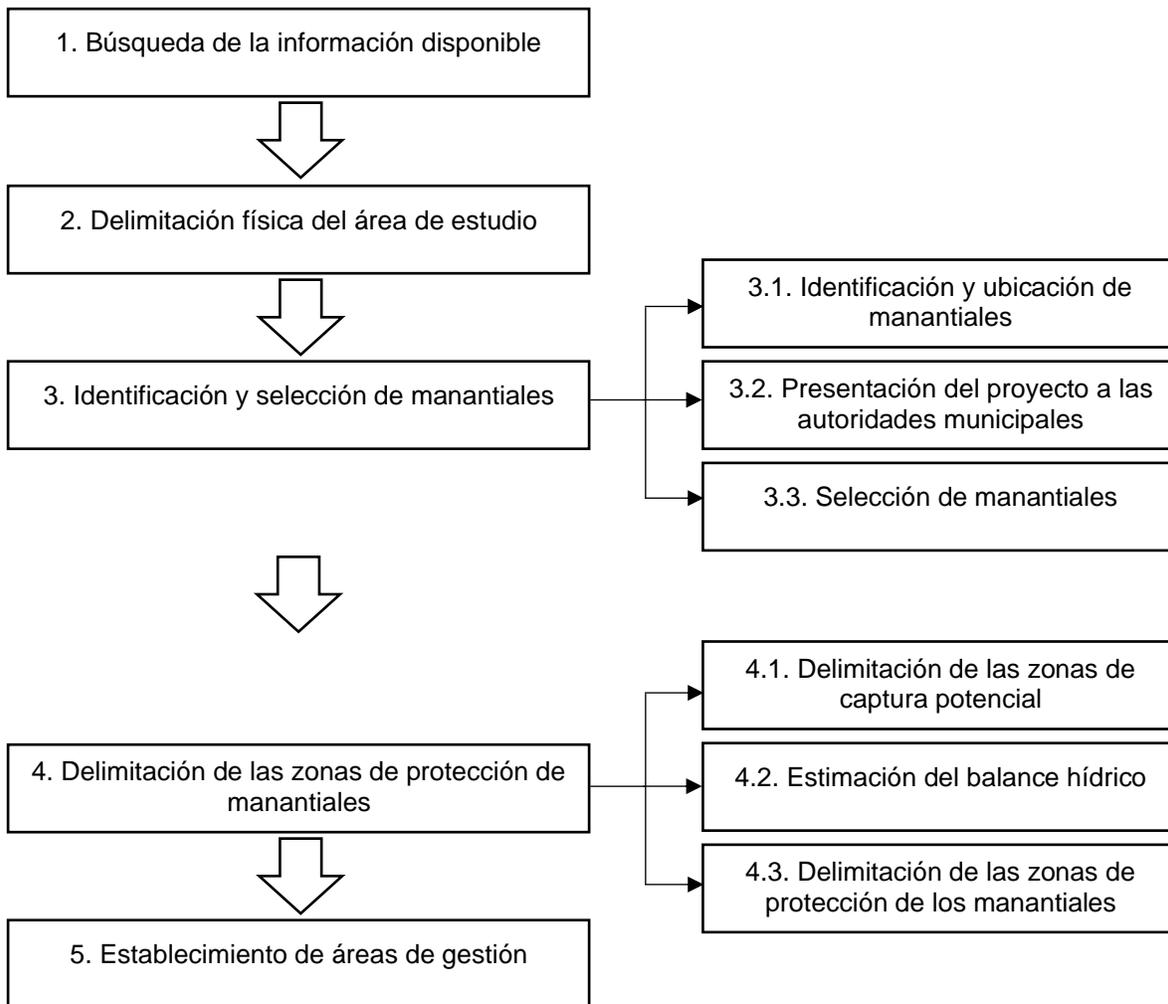


Figura 3.1. Esquema metodológico.

3.1. Búsqueda de la información disponible

Se llevó a cabo una búsqueda de la información disponible referente a la zona de estudio. Las principales fuentes de consulta fueron: revistas indexadas, libros, organismos públicos, tesis e informes y sitios web para la recopilación de información cartográfica.

Las instituciones consultadas han sido: Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México (SMA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la biodiversidad (CONABIO) Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y United States Geological Survey (USGS).

La información cartográfica se obtuvo en distintos formatos: tabular, vectorial y ráster:

Información tabular:

- a. La información de los manantiales se obtuvo de la base de datos del REPDA, 2019 de las aguas superficiales del Estado de México.
- b. Los datos de población se obtuvieron de los censos y conteos de población nacional de INEGI, 2015.

Datos vectoriales:

- a. Límites político-administrativos estatales y municipales obtenidos de INEGI, 2015.
- b. La geología escala 1:250,000 del IFOMEGEM, 2010.
- c. Localidades, clasificación climática, fracturas, ríos, corrientes y cuerpos de agua obtenidos a partir de datos vectoriales escala 1:50,000 IFOMEGEM, 2010.

- d. Las estaciones climáticas del SMN 2018.
- e. El uso de suelo y cuerpos de agua proporcionados por el Doctor Víctor Ávila.
- f. Cuencas hidrológicas y edafología por CONABIO, 2009.

Información ráster

- a. Modelo digital de elevación (MDE) por la USGS.
- b. Las imágenes de temperatura y precipitación mensual y promedio anual se obtuvieron de la base de datos generada por Ordoñez, 2015 con datos de CLICOM (Clima Computarizado) de 1980 a 2010 (SMN, 2015).
- c. La radiación solar fue obtenida de CGIAR-CSI, 2016.

De acuerdo con los objetivos planteados la información base se convirtió de datos tabulares a vectoriales y/o ráster según el uso; y se transformó del sistema de coordenadas geográficas NAD 1927, ITRF 1992 y WGS 1984 al sistema de coordenadas métricas Universal Transversal de Mercator (UTM por sus siglas en inglés) UTM WGS 1984 Zona 14 Norte.

3.2. Delimitación física del área de estudio

Para llevar a cabo la delimitación física del área de estudio se trabajó con el software IDRISI Terset utilizando el módulo Watershed (*Figura 3.2*). Este módulo identifica las cuencas hidrográficas a partir de una imagen de superficie raster, generalmente de un modelo de elevación digital (MDE), ya sea automáticamente para toda la zona de estudio o para una imagen característica de un punto definido por el usuario.

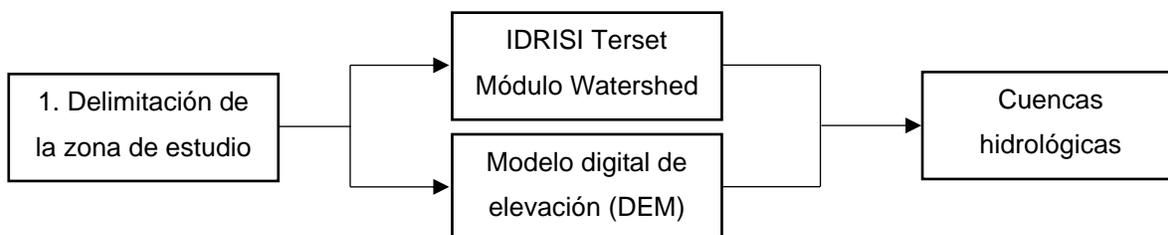


Figura 3.2. Diagrama para la generación de cuencas hidrológicas en el software IDRISI Terset.

3.3. Identificación y selección de manantiales

Esta etapa metodológica consto de 3 fases (*Figura 3.3*) con la finalidad de seleccionar los manantiales de mayor importancia para la cuenca considerando el uso de agua para consumo humano y su volumen de agua asignado.

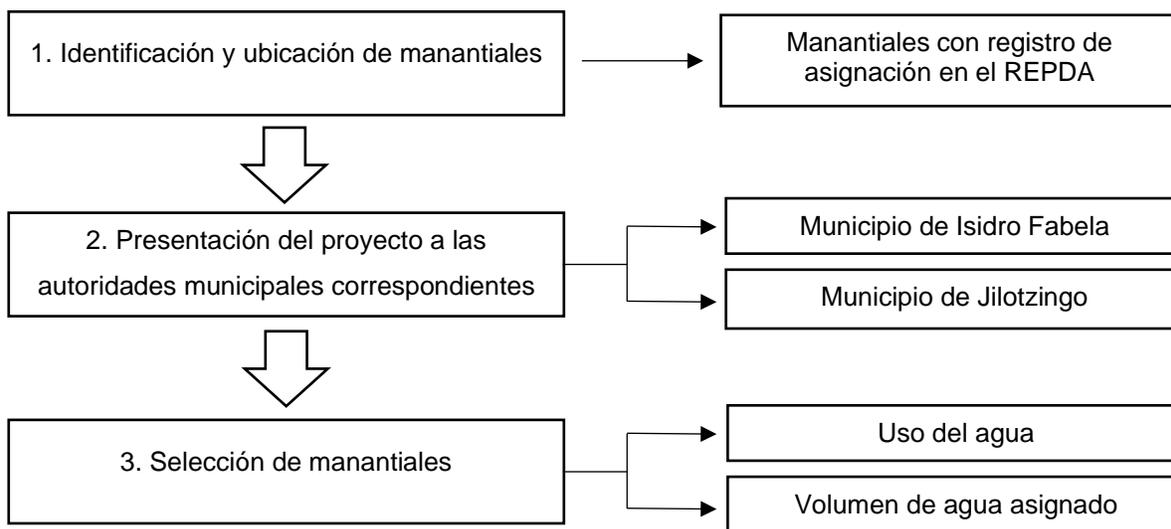


Figura 3.3. Secuencia metodológica para la selección de manantiales.

3.3.1. Identificación y ubicación de manantiales

Los manantiales de la cuenca presa de Guadalupe fueron identificados y ubicados en un mapa a partir de la base de datos de concesiones del REPDA (2019).

Se contempló trabajar con la base de datos del REPDA (2019) la cual contiene información de los manantiales con títulos de asignación de 2 municipios de la cuenca, para que apoyados de las autoridades municipales se procediera a elegir los manantiales que tienen mayor necesidad de protección. La información obtenida en esta base de datos fue la siguiente:

- Titular (usuario)
- Título de concesión
- Uso
- Fecha de registro
- Anexo (número de aprovechamientos concesionados)

- Volumen de asignación de agua (m³/año)
- Municipio
- Región hidrológica
- Cuenca
- Fuente
- Afluente
- Coordenadas geográficas

3.3.2. Presentación del proyecto a las autoridades municipales correspondientes

Una vez ubicados los manantiales, se informó a las autoridades competentes de cada municipio (Isidro Fabela y Jilotzingo) sobre el proyecto a fin de solicitar más información referente a los manantiales y apoyo en las visitas a campo para corroborar la ubicación de los manantiales; ya que, se encontraron algunas inconsistencias en la ubicación geográfica de los manantiales del REPDA.

3.3.3. Selección de manantiales

Se dio prioridad a los manantiales de uso público urbano debido a su importancia como fuentes de abastecimiento de agua potable; además se consideraron los de mayor volumen de asignación porque tienen una relación directa con la cantidad de población a la que abastecen.

Esta fase, además de contar con el trabajo de gabinete contó con trabajo de campo para verificar las características de los manantiales. La cual consta de tres tareas:

3.3.3.1. Planificación de la visita a los manantiales seleccionados

El trabajo de campo es considerado un proceso, una secuencia de acciones, de comportamientos y de acontecimientos, no todos controlados por el investigador. El trabajo de campo suele referirse al periodo y el modo que la investigación cualitativa dedica a la generación y registro de información (Monistrol, 2007).

Hay diferentes fases de la investigación en relación con el trabajo de campo, distinguiendo cuáles son previas, cuáles se realizan durante el trabajo de campo y las tareas del investigador después del campo; en este sentido, para conocer las características de los manantiales seleccionados se realizó lo siguiente:

- Se buscó información relacionada con la ubicación de los manantiales para la elaboración de un itinerario, planeación de rutas y conocimiento de las distancias.
- Se programaron las visitas a los manantiales con los Ayuntamientos y Organismos Operadores de agua potable (asignatarios de agua del uso público-urbano).

3.3.3.2. Caracterización de los manantiales visitados en campo

Para conocer las características físico-sociales de los manantiales se realizaron dos campañas de trabajo de campo para reconocimiento y muestreo de los manantiales: la primera llevada a cabo en el mes de marzo de 2019 (etapa de reconocimiento) y la segunda en el mes de mayo de 2019 (etapa de muestreo). Para dicho reconocimiento:

- Se verificó la ubicación de los manantiales y se observaron las características del contexto geográfico y social.
- Se hizo la medición de parámetros fisicoquímicos tales como la temperatura del agua, pH, Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Totales Disueltos (STD), Salinidad y Potencial Redox (ORP).
- Se tomaron muestras de rocas de los sitios de los manantiales, las cuales fueron llevadas al Laboratorio de Geología de la Facultad de Geografía de la UAEM para su análisis y definir el medio rocoso que caracteriza la surgencia de dichos manantiales.

3.3.3.3. Equipos y materiales utilizados en el trabajo de campo

Para medición de parámetros fisicoquímicos in situ se empleó un equipo multiparamétrico OrionStar A329 con electrodos de pH (potencial de Hidrógeno), Conductividad Eléctrica y ORP (Potencial Redox). Cada uno de los electrodos fue calibrado en campo con estándares preestablecidos. En el caso del electrodo de la conductividad eléctrica, la calibración se efectuó con soluciones estándar (NaCl) de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 12.9 mS/cm ; el electrodo del pH fue calibrado con soluciones buffer de pH 4.01, 7.01 y 10.01 (a 20 $^{\circ}\text{C}$). Cada uno de los electrodos midió distintos parámetros (*Tabla 3.1*).

La precisión en las medidas de temperatura es de ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$, en la conductividad eléctrica es de ± 1 % del fondo de escala (a 25 $^{\circ}\text{C}$) y en el pH de ± 0.01 unidades de pH.

Tabla 3.1. Parámetros medidos por los electrodos de pH, Conductividad Eléctrica.

Electrodo de pH	Electrodo de conductividad eléctrica
<ul style="list-style-type: none">pH (potencial de Hidrógeno)	<ul style="list-style-type: none">Conductividad Eléctrica en microsiemens/cm (C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$).Temperatura del agua en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$).Sólidos Totales Disueltos en partes por millón (S.T.D. en ppm).Salinidad en unidades prácticas de salinidad (psu).

3.4. Delimitación de las zonas de protección de manantiales

A fin de alcanzar los objetivos planteados, se delimitaron las zonas de protección de los manantiales a partir de tres etapas: a) se delimitó la zona de captura potencial de cada manantial, b) se estimó la recarga anual dentro de las zonas de captura, la cual es capaz de alimentar el caudal del manantial, y c) finalmente se delimitaron espacialmente las zonas de protección de los manantiales una vez estimada la recarga anual (*Figura 3.4*).

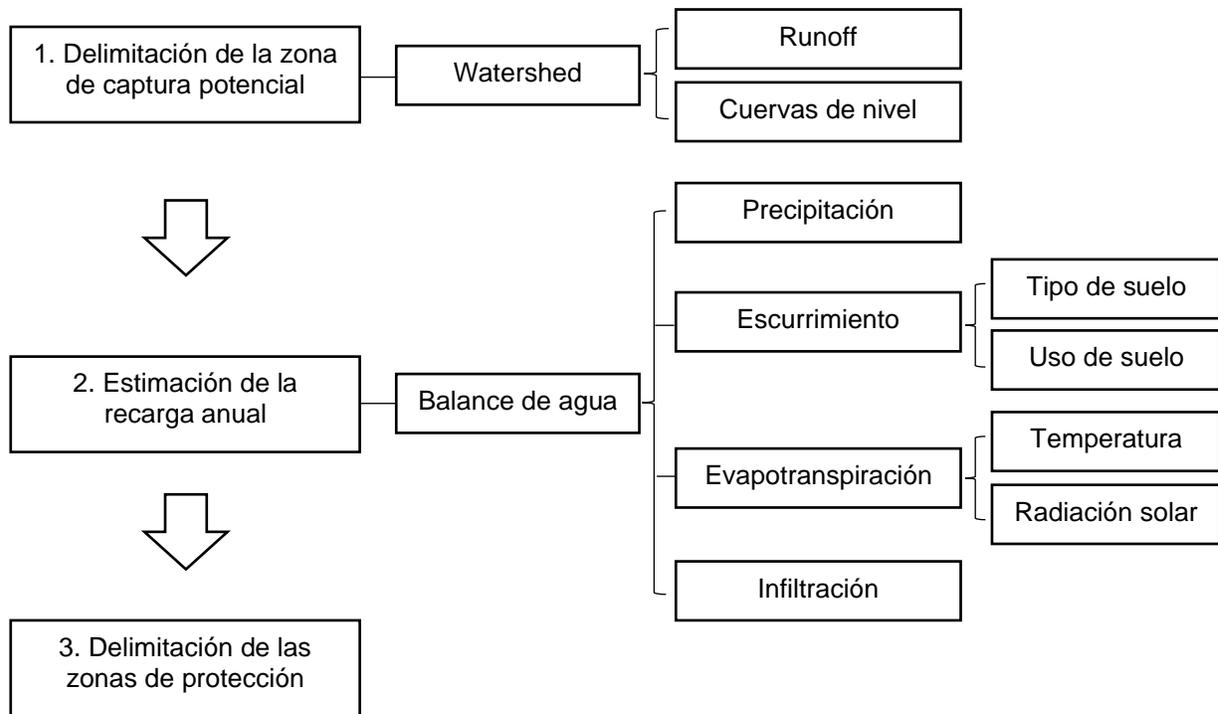


Figura 3.4. Secuencia metodológica para la delimitación de zonas de protección de manantiales. Modificado de López 2018.

3.4.1. Delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales

Para llevar a cabo la delimitación de las zonas de protección de manantiales, primero se delimitó las zonas de captura potencial de los mismos.

El proceso de delimitación de las áreas de captura potencial se hizo en el software IDRISI TerrSet, utilizando los módulos *Runoff*, *Watershed*, para procesar la información se requirió del MDE de la zona de estudio y de los datos puntuales en formato ráster de los manantiales seleccionados.

Considerando la topografía del área de estudio se realizó la delimitación de la zona de captura potencial.

3.4.2. Estimación del balance hídrico

Una vez delimitada la zona de captura potencial, se estimó la infiltración anual para delimitar espacialmente las zonas de protección de los manantiales.

Para estimar la infiltración de las zonas de captura se requirió hacer el cálculo de los procesos involucrados en el balance hídrico: precipitación, escorrentía y evapotranspiración, mediante la preparación de información base, tanto fisiográfica como climática del área de estudio.

3.4.2.1. Precipitación

Se realizó un análisis espacial de la precipitación mensual con la finalidad de comparar la variabilidad pluvial. Los datos de precipitación mensual fueron obtenidos de la base de datos generada por Ordoñez (2015) con datos de CLICOM (Clima Computarizado) de 1980 a 2010 (SMN, 2015).

3.4.2.1. Escurrimiento superficial

Para estimar el escurrimiento superficial de la zona de estudio se aplicó la siguiente fórmula (*Ecuación 3.1*):

$$Q = P * Ce \quad (3.1)$$

Donde:

Q = Altura de la lámina de escurrimiento anual en mm

P = Precipitación anual promedio en mm

Ce = Coeficiente adimensional de escurrimiento promedio

El Ce se calculó según la Norma Oficial Mexicana, NOM-011-CONAGUA-2000 (DOF, 2002). Se requirió de la precipitación, el tipo y uso de suelo de la zona de estudio. Con las dos últimas variables se calcularon los valores de K .

A. Tipo de suelo (textura y permeabilidad)

El tipo de suelo se clasificó de acuerdo con su grado de permeabilidad, debido a que permite en mayor o menor medida el paso del agua. Se utilizó la información edafológica de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2009) a través de su base de datos, en donde el tipo de suelo fue clasificado de acuerdo con el tipo de textura: gruesa, mediana y fina, y se asoció al grado de permeabilidad del suelo según el criterio de CONAGUA (DOF, 2002):

suelos permeables, suelos medianamente permeables y suelos casi impermeables respectivamente.

B. Uso de suelo

La clasificación del uso de suelo para la zona de estudio fue elaborada a detalle por el Doctor en Ciencias Víctor Ávila Akerberg.

C. Valores de K en función del tipo y uso del suelo

Una vez agrupadas las clases se asignaron valores de K en función de la relación del tipo y uso de suelo; y dependiendo del porcentaje de cobertura del pastizal y bosque (*Tablas 3.2 y 3.3*).

Como los valores de precipitación anual estuvieron dentro del rango de 922 a 992 mm anuales y los valores de K resultaron mayores de 0.15, el Ce se calculó mediante la siguiente fórmula (*Ecuación 3.2*):

$$Ce = K \frac{(P - 205)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad (3.2)$$

Donde:

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual, en mm

K = Parámetro que depende del tipo y uso de suelo

P = Precipitación anual, en mm

Tabla 3.2. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002).

Uso del suelo con base en la NOM-011- CONAGUA-2000		Tipo de suelo			Uso del suelo, con base en la clasificación del Doctor Akerberg
		A	B	C	
1.	Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3	Suelo desnudo
	Cultivos:				Agrícola
2.	En Hileras	0.24	0.27	0.3	
3.	Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3	
4.	Granos pequeños	0.24	0.27	0.3	
	Pastizal (% del suelo cubierto o pastoreo):				Pastizal/matorral
5.	Más del 75% - Excesivo	0.14	0.2	0.28	

Tabla 3.3. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002) (continuación).

Uso del suelo con base en la NOM-011- CONAGUA-2000		Tipo de suelo			Uso del suelo, con base en la clasificación del Doctor Akerberg
		A	B	C	
6.	Del 50 al 75% - Regular	0.2	0.24	0.3	Pastizal/matorral
7.	Menos del 50% - Poco	0.24	0.28	0.3	
Bosque (% del suelo cubierto):					
8.	Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24	Bosque
9.	Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26	
10.	Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28	
11.	Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3	
12.	Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32	Urbano
13.	Caminos	0.27	0.3	0.33	Suelo desnudo
14.	Pradera permanente	0.18	0.24	0.3	Sin categoría

3.4.2.3. Evapotranspiración

Para el cálculo de la evapotranspiración de se aplicó el Método de Hargreaves ya que es el más recomendado (después del método FAO Penman-Monteith) debido a que ha producido resultados razonables de evapotranspiración (López, 2018).

A. Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia mediante la fórmula de Hargreaves

Se utilizó la fórmula simplificada de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) para estimar la ET_0 . Requirió de la temperatura media (T_{med} °C), máxima ($T_{máx}$ °C) y mínima mensual ($T_{mín}$ °C) y de la Radiación Solar diaria (R_a , mm/día). La ecuación simplificada para la estimación de la ET_0 fue (Ecuación 3.3):

$$ET_0 = 0.0023(T_{med} + 17.78)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (3.3)$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración de referencia diaria en mm/día

T_{med} = Temperatura media diaria en °C

R_a = Radiación solar extraterrestre en mm/día.

$T_{m\acute{a}x}$ = Temperatura diaria máxima en °C

$T_{m\acute{i}n}$ = Temperatura diaria mínima en °C

La $T_{m\acute{a}x}$, T_{med} y $T_{m\acute{i}n}$ se obtuvieron de la base de datos generada por Ordoñez (2015) con datos de CLICOM de 1980 a 2010. La radiación solar extraterrestre R_a se obtuvo de los datos del Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI, 2016).

El Consorcio de Información Espacial es una iniciativa del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), que vincula a las comunidades internacionales de ciencia, investigación y desarrollo, con científicos, socios nacionales e internacionales y otros que trabajan en la aplicación y avance de la ciencia geoespacial para el desarrollo sostenible, la conservación y la reducción de la pobreza en los países en desarrollo (López, 2018).

CGIAR-CSI brinda un conjunto de datos que se pueden descargar gratuitamente y están disponibles en su GeoPortal. Las imágenes de R_a tienen una resolución de 30 segundos de arco o - 1km en ecuador de datos promedio mensuales de 1950 a 2000 a nivel mundial que fueron recortadas al área de estudio (CGIAR-CSI, 2009).

La ecuación de la ET_0 de Hargreaves se desarrolló mediante el uso del Macro Modeler de IDRISI TerrSet. Para practicidad del uso de la ecuación se hicieron las operaciones por separado (figura 3.5).

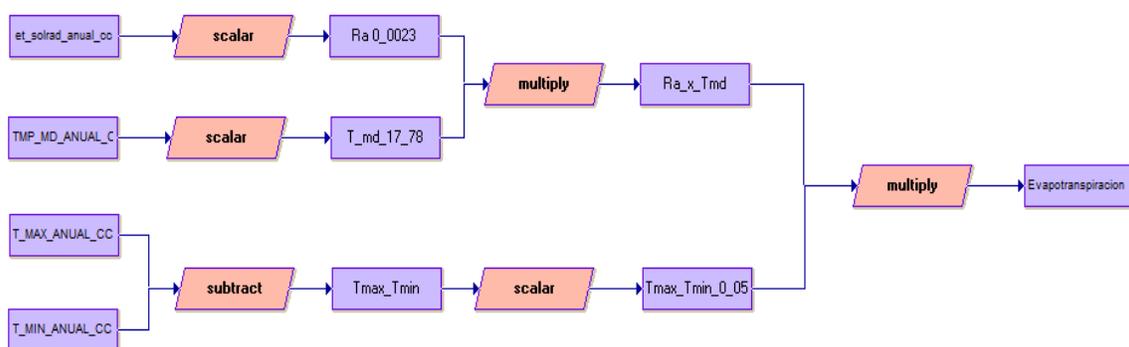


Figura 3.5. Proceso del cálculo de la ET_0 mediante la fórmula de Hargreaves.

Primero se multiplicó la R_a (et_solrad_anual_cc) por 0.0023 (Ra_0_0023); después a la T_{med} (TMP_MD_ANUAL_CC) se le sumó 17.78 (T_md_17_78); y se hizo la resta de la $T_{máx}$ menos la T_{min} , el resultado se elevó a la 0.5 (Tmax_Tmin_0_05). Finalmente se multiplicaron y obtener la ET_o .

3.4.2.4. Infiltración

La infiltración Real (Ir) o también llamada Eficaz (Ie) se obtuvo a través de la metodología adaptada por la SEMARNAT (2005) basada en el método de balance de agua de Thornthwaite. Para llevarla a cabo primero se calculó la I_p una vez estimado el Ce. La ecuación para la estimación de la I_p fue (Ecuación 3.4):

$$I_p_j = P_j - (P_j * C_{e_j}) \quad (3.4)$$

Donde:

I_p_j = Infiltración potencial mensual, en mm.

P_j = Precipitación mensual promedio, en mm.

C_{e_j} = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional (también llamado K_{e_j}).

j = Indicador del mes considerado.

Una vez estimadas tanto la I_p_j como la ET_p , se llevó a cabo la operación de sustracción de imágenes para obtener finalmente Ir (Ecuación 3.5):

$$I_r_j = I_p_j - ET_p_j \quad (3.5)$$

Donde:

I_r_j = Infiltración mensual real, en mm.

I_p_j = Infiltración potencial mensual en mm.

ET_p = Evapotranspiración potencial de referencia mensual, en mm.

j = Indicador del mes considerado

3.4.3. Delimitación de las zonas de protección de los manantiales

La delimitación de las zonas de protección de manantiales se realizó a partir de la adaptación de la metodología británica para la delimitación de zonas de protección

de fuentes de agua (Environment Agency, 2009) de acuerdo con la disponibilidad de información del área de estudio.

De este modo, en lugar de considerar los tiempos de tránsito de un contaminante se consideró la recarga anual, para calcular el agua que potencialmente llegaría al manantial en un año.

De esta manera se logró delimitar dentro de las zonas de captura potencial las zonas de protección: interna, externa y de contribución potencial a largo plazo.

La primera, llamada zona de protección interna (ZP I), se definió inmediatamente adyacente al manantial, mediante un radio fijo, en donde el flujo de agua tarda en llegar en cuestión de días a la captación del manantial. La ZP I está definida en algunos casos por un límite perimetral de construcción.

La segunda, zona de protección externa (ZP II), fue calculada a partir de la estimación de la recarga media anual. Se estimó a partir del diagrama de Todd (1980) que muestra la relación entre la descarga media de los manantiales, la recarga media anual y el área de recarga (*Figura 3.6*), y con la modificación del método del radio fijo (Vargas, 2002; Martínez & García, 2003).

La modificación del método del radio fijo fue la siguiente (*Ecuación 3.6*):

$$A = Q/R \quad (3.6)$$

Donde:

A = Área de alimentación (m^2)

Q = Volumen anual (m^3)

R = Recarga anual (m)

El área de alimentación resultante es el área lo suficientemente capaz de soportar el caudal del manantial en un año.

La tercera zona de protección (ZP III) es el resto de la zona de captura potencial del manantial, en la que el agua puede potencialmente llegar en un largo plazo al manantial (más de un año).

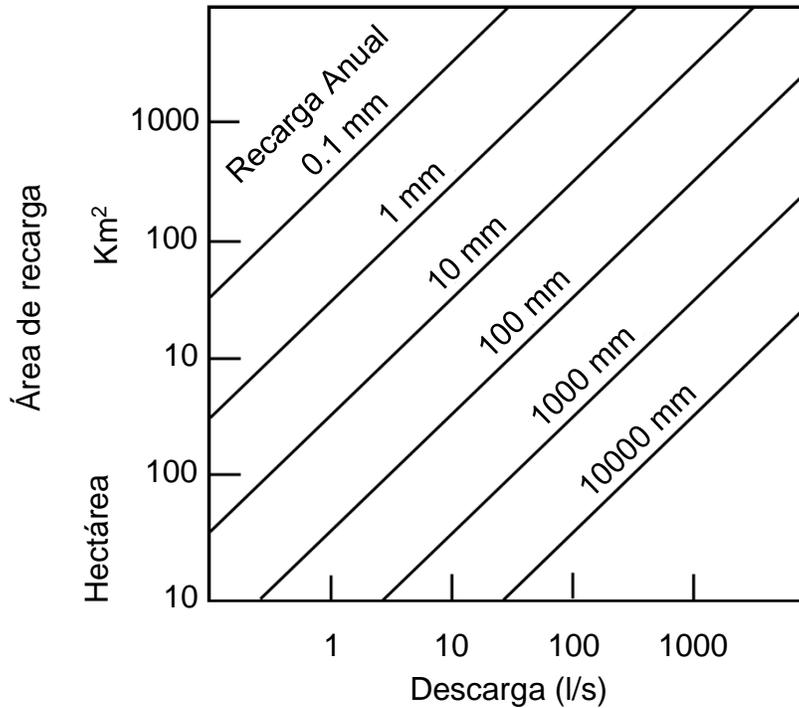


Figura 3.6. Diagrama de Todd, que muestra la relación de la descarga media del manantial, la recarga media anual y el área de recarga (Vargas, 2002).

3.5. Establecimiento de áreas de gestión

El constante crecimiento poblacional, la industrialización y los servicios que conlleva la vida moderna, han favorecido la contaminación de los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, dañando con ello la salud y la economía de importantes grupos sociales (CONAGUA, 2015).

Generalmente los contaminantes se encuentran asociados a una fuente, que a su vez se relaciona con una utilidad o uso específico. Por esta razón, una de las principales tareas que es necesario realizar cuando se establecen un plan de zonas de protección, es la determinación de todas las fuentes potenciales de contaminación, establecer su localización exacta en el mapa base y definir cuáles son los tipos de compuestos químicos que se pueden presentar asociados con dichas fuentes.

Por lo cual; la parte final del proyecto consistió en identificar los focos potenciales de contaminación que pudiesen modificar la cantidad y calidad del agua de los

manantiales; permitiendo a las autoridades correspondientes tomar acciones que permitan conservar dichas fuentes de agua potable; ya que, el consumo de agua contaminada por microorganismos o sustancias químicas puede provocar la aparición de una gran variedad de enfermedades.

Muchas de las fuentes potenciales de contaminación son relativamente obvias y fáciles de localizar. En este rubro se mencionan gasolineras, rellenos sanitarios, fábricas, entre otras. Sin embargo, la ubicación e identificación de las fuentes potenciales de contaminación no siempre es un paso sencillo, sobre todo cuando se trata de contaminantes relacionados con actividades no comerciales o a pequeña escala, como puede ser el aceite usado que es arrojado en una depresión natural del terreno por una persona que realizó personalmente el cambio de aceite de su carro.

Otro tipo de fuentes potenciales de contaminación difíciles de localizar se relaciona con sitios que dejaron de funcionar hace mucho tiempo; como, por ejemplo, el primer basurero municipal que dejó de utilizarse hace más de 30 años, el taller mecánico que realizaba cambios de aceites y lubricantes que cerró hace más de 10 años. En resumen, las posibilidades son variadas, por lo que esta actividad tiene que realizarse con el mayor de los detalles investigando información histórica diversa.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Delimitación física del área de estudio

Los SIG se han convertido en una herramienta importante para el manejo y análisis de información cartográfica, ya que mediante su uso se integra información procedente de diferentes fuentes facilitando su correlación o vinculación; además, comprende una geo-base de datos (metadatos, información vectorial y ráster) que propicia el mejor control y manejo de la información, así como la visualización de resultados.

Sin embargo, la aplicación de los métodos y técnicas para la protección de los manantiales dependerá fundamentalmente de la información disponible, así como del objetivo que se persigue.

La delimitación del área de estudio se llevó a cabo mediante el módulo *watershed* del software IDRISI Terset, el cual se basa en la altitud de terreno del modelo digital de elevación para delimitar cuencas hidrológicas.

Del lado izquierdo de la figura que se muestra a continuación se observa una imagen ráster del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona de estudio, descargada de la página oficial de la USGS, la cual se procesó posteriormente en el módulo *watershed*, lo que generó 58 microcuencas dentro del DEM. Posteriormente se seleccionó la cuenca dentro de la cual se ubica la Presa de Guadalupe identificada en la *figura 4.1* por el número 27 de color morado, este procedimiento se realizó con una herramienta llamada *reclass* que permite asignarle valor de 1 al elemento de interés y 0 a los elementos restantes.

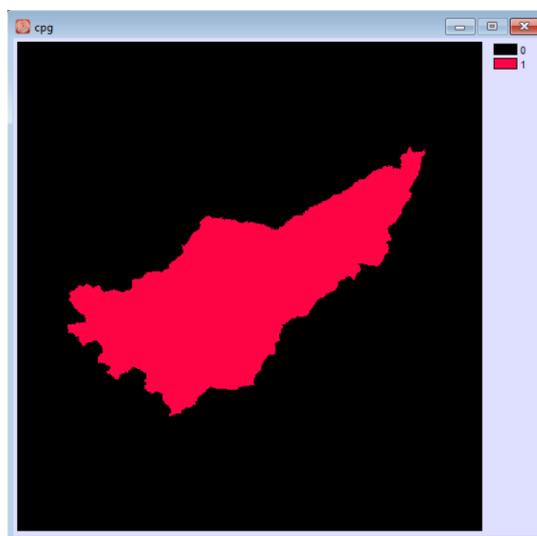
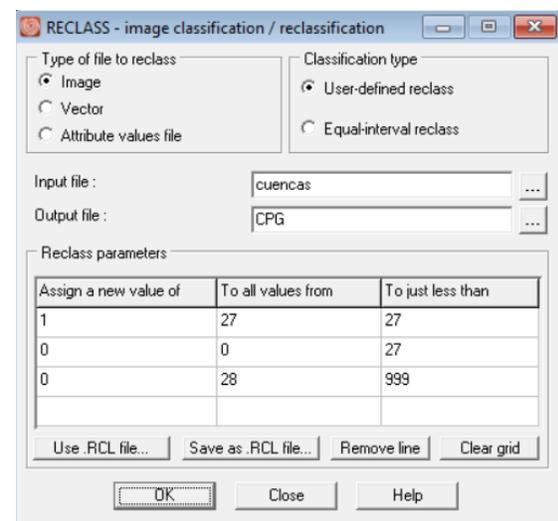
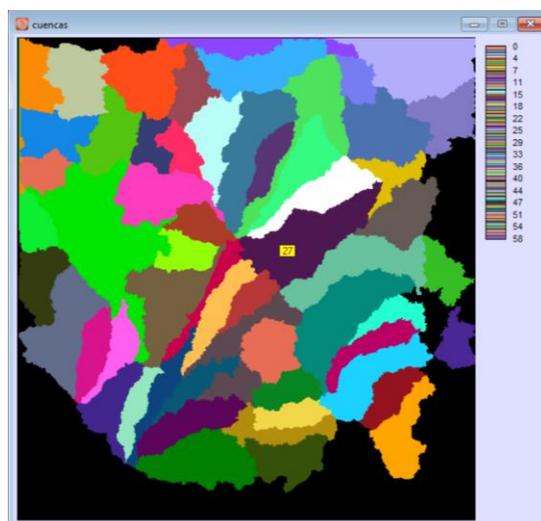
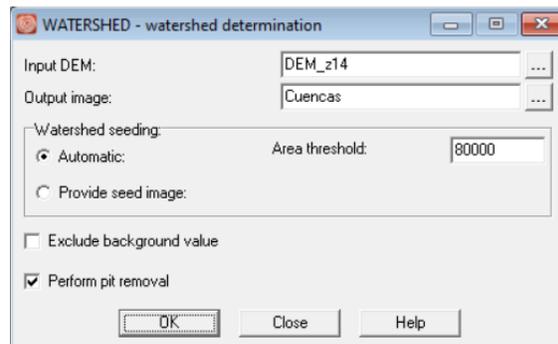
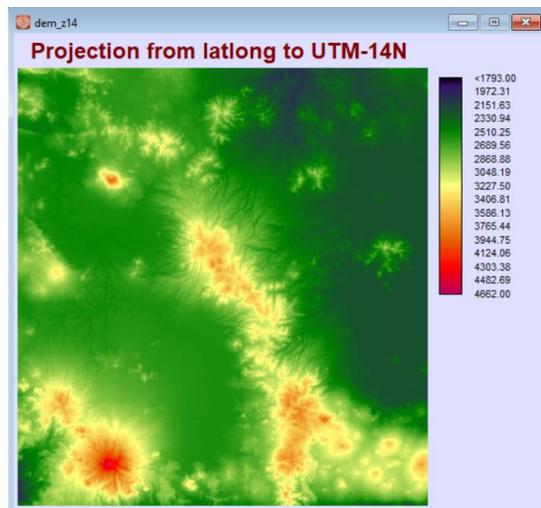


Figura 4.1. Delimitación de la cuenca presa de Guadalupe.

4.2. Identificación y selección de manantiales

En este apartado se identificaron los manantiales ubicados dentro de la cuenca presa de Guadalupe con base a los datos del REPDA 2019.

4.2.1. Identificación y ubicación de manantiales

De acuerdo con los objetivos planteados se seleccionaron los manantiales de uso público urbano tomando como referencia los títulos de asignación del REPDA 2019 (*Tablas 4.1 y 4.2*), por su importancia como fuente de abastecimiento de agua potable por lo que tienen preferencia respecto a cualquier otro uso según la Ley de Aguas Nacionales (LAN, 2014). Por lo que es indispensable hacer énfasis en su protección; dichos manantiales se encuentran ubicados en dos de los municipios de la cuenca presa de Guadalupe: Isidro Fabela y Jilotzingo.

Tabla 4.1. Manantiales de uso público urbano en la cuenca presa de Guadalupe.

ID	Fuente	Uso	Volumen asignado (m ³ /año)	Titular
1.	Manantial Texandeje	Público urbano	378,432	Comité de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
2.	Manantial Agua Azul	Público urbano	204,668	Municipio de Isidro Fabela
3.	Manantial los Capulines	Público urbano	190,477	Municipio de Isidro Fabela
4.	Manantial la Cocinera	Público urbano	94,135	Municipio de Isidro Fabela
5.	Manantial Plateros	Público urbano	90,508	Municipio de Isidro Fabela
6.	Manantial Tepozanes	Público urbano	80,416	Municipio de Isidro Fabela
7.	Manantial las Aceitunas	Público urbano	78,209	Municipio de Isidro Fabela
8.	Manantial el Capulín	Público urbano	45,984	Municipio de Isidro Fabela
9.	Manantial Seguyan	Público urbano	29,160	Comité de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.

Tabla 4.2. Manantiales de uso público urbano en la cuenca presa de Guadalupe (continuación).

ID	Fuente	Uso	Volumen asignado (m3/año)	Titular
10.	Manantial el Rincón	Público urbano	19,440	Comité de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, a. c.
11.	Manantial Capotzi	Público urbano	9,720	Comité de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
12.	Manantial Capulines	Público urbano	9,720	Comité de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
13.	Manantial los Muertos	Público urbano	9,720	Comité de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.
14.	Manantial la Cumbre	Público urbano	9,720	Comité de agua potable de Santa Ana Jilotzingo, A. C.

4.2.2. Presentación del proyecto a las autoridades municipales correspondientes

Partiendo de la información anterior se solicitó información y apoyo social para realizar visitas de campo al comité de agua potable de Santa Ana Jilotzingo y al de Isidro Fabela.



Figura 4.2. Comité de agua de la 7ta regiduría del H. Ayuntamiento de Isidro Fabela.

Sin embargo, solo se obtuvo respuesta favorable del regidor Israel Osnaya Rosas (Figura 4.2) encargado del comité de agua de Isidro Fabela quien amablemente

también presto sus servicios en coordinación con su equipo de trabajo para realizar algunas de las visitas a los manantiales (Figura 4.3).



H. AYUNTAMIENTO CONSTITUCIONAL
ISIDRO FABELA 2019-2021



"2019, Año del Centésimo Aniversario Luctuoso de Emiliano Zapata Salazar, EL CAUDILLO DEL SUR"

ISIDRO FABELA, ESTADO DE MÉXICO A 13 DE AGOSTO DE 2019

OFICIO NO. IF7REG/22/2019
ASUNTO: INFORMACIÓN DE MANANTIALES
Y DEPÓSITOS
EXPEDIENTE: UAEM

LIC. RAQUEL SEGUNDO SANDOVAL
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA
EN ANÁLISIS ESPACIAL Y GEO INFORMÁTICA
EN LA FACULTAD DE GEOGRAFÍA DE LA UAEM
P R E S E N T E.

Sirva el medio para enviarle un cordial saludo, así mismo en atención a su oficio MAEG_047_2019, con fecha 09 de Agosto de 2019, le hago llegar la siguiente información referente a los pozos y manantiales ubicados en el municipio de Isidro Fabela. El Municipio de Isidro Fabela cuenta con 7 manantiales registrados con el siguiente No. De Título de Concesión: 13MEX103479/HOGR98, los cuales son los siguientes:

- Manantial Plateros
- Manantial Los Tepozanes
- Manantial des Capulines
- Manantial Las Aceitunas
- Manantial Agua Azul
- Manantial el Capulín
- Manantial la Cocinera

La información solicitada se la hago llegar mediante una tabla, así mismo le comunico que algunos datos enviados fueron recabados de las concesiones de los mismos manantiales (un ejemplo es el volumen de extracción m³/año, el dato registrado fue el obtenido de la última concesión) En cuanto a la población, no tengo el dato exacto de cuantas personas se benefician con cada manto acuífero, ya que las localidades son abastecidas por más de un manantial y/o depósito.

Sin más por el momento y esperando le sea útil la información proporcionada, me despido de Usted.

ATENTAMENTE

C. ISRAEL OSNAT ROSAS
SÉPTIMO REGIDURÍA

C.c.p.- Archivo
IOR/aich

SÉPTIMA REGIDURÍA
AV. CONSTITUCIÓN NO. 1, COLONIA LAURELES
ISIDRO FABELA, MÉX. C.P. 54480, TEL 89 94 62 92

Figura 4.3. Oficio de respuesta de la comisión de agua potable de la 7ta regiduría del H. Ayuntamiento de Isidro Fabela, Estado de México.

4.2.3. Selección de manantiales

Se seleccionaron los tres manantiales con mayor volumen de extracción al año, los cuales son manantial Agua Azul, manantial los Capulines y manantial la Cocinera (*Tabla 4.3*).

Tabla 4.3. Manantiales con mayor volumen de extracción de agua al año, del municipio de Isidro Fabela, Estado de México.

ID	Fuente	Uso	Volumen (m3/año)	Titular
1.	Manantial Agua Azul	Público urbano	204,668	Municipio de Isidro Fabela
2.	Manantial los Capulines	Público urbano	190,477	Municipio de Isidro Fabela
3.	Manantial la Cocinera	Público urbano	94,135	Municipio de Isidro Fabela
4.	Manantial Plateros	Público urbano	90,508	Municipio de Isidro Fabela
5.	Manantial Tepozanes	Público urbano	80,416	Municipio de Isidro Fabela
6.	Manantial las Aceitunas	Público urbano	78,209	Municipio de Isidro Fabela
7.	Manantial el Capulín	Público urbano	45,984	Municipio de Isidro Fabela

Posteriormente se realizó la primera campaña de trabajo en campo, en marzo de 2019 para el reconocimiento de dichos manantiales, durante la cual se pudo corroborar la ubicación, y las condiciones en las que se encontraban dichos manantiales.

4.2.3.1. Manantial la Cocinera

El manantial la Cocinera brota en el paraje la Cocinera (*figura 4.4*), se capta en la caja rompedora de la Cocinera donde se envía a la red principal de los Capulines; de donde abastece a colonia Palma, colonia Miraflores y ejido Miraflores (*tabla 4.4*).

Tabla 4.4. Localidades a las que abastece el manantial los Capulines.

No.	Localidades	Cantidad de habitantes INEGI 2010			Grado de marginación
		Hombres	Mujeres	Población total	
1.	Colonia Palma	713	746	1,459	Medio
2.	Colonia Miraflores	368	409	777	
3.	Ejido Miraflores	515	502	1,017	
	Total	1,596	1,657	3,253	



Figura 4.4. Manantial La Cocinera, Isidro Fabela, Estado de México.

Este manantial se encuentra ubicado en una zona considerada como región Indígena Mazahua- Otomí, dentro del acuífero 1508 Cuautitlán- Pachuca y pertenece a la cuenca hidrológica del río Moctezuma.

El lugar en el que se ubica (parte alta de la CPG) presenta un clima semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, la temperatura media anual varía entre 5°C y 12°C, la temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco es menor a los 40 milímetros.

El tipo de suelo en el que se encuentra es Andosol (An) y el tipo de roca es ígnea extrusiva básica de la era cenozoica.

4.2.3.2. Manantial los Capulines

El manantial los Capulines brota en la localidad de las Palomas (*Figura 4.5*), se capta en el depósito o caja rompedora de los capulines de 4m x4m de profundidad 2.50 hasta el depósito de Iglesia Vieja de donde se hace la distribución a Colonia Palma, Colonia Miraflores y Ejido Miraflores (*Tabla 4.5*).



Figura 4.5. Manantial los Capulines, Isidro Fabela, Estado de México.

Tabla 4.5. Localidades a las que abastece el Manantial los Capulines.

No.	Localidades	Cantidad de habitantes INEGI 2010			Grado de marginación
		Hombres	Mujeres	Población total	
1.	Colonia Palma	713	746	1,459	Medio
2.	Colonia Miraflores	368	409	777	
3.	Ejido Miraflores	515	502	1,017	
	Total	1,596	1,657	3,253	

Este manantial se ubica a menos de 500 metros de distancia del manantial la Cocinera en la parte alta de la cuenca presa de Guadalupe; por lo que presentan las mismas características higrológicas y geográficas descritas anteriormente.

Además, ambos manantiales se encuentran ubicados dentro del Parque Estatal ecológico, turístico y recreativo, Zempoala- la Bufo, denominado Parque Otomí Mexica del Estado de México; las principales causas que justifican la creación de este parque son entre otras las siguientes: reforestación, control de corrientes pluviales, absorción de aguas, prevención de inundaciones y erosiones, mejoramiento y bonificación de suelos, desarrollo de programas silvícolas, de saneamiento y aprovechamiento forestal, agrícolas y ganaderos de montaña, infraestructura turística, prohibición de construcciones que dificulten su buen funcionamiento y restricción de asentamientos humanos.

Por lo que, de llevarse a cabo dichas acciones podrían favorecer la protección, el cuidado y la conservación de estos manantiales.

4.2.3.3. Manantial Agua Azul

El manantial Agua Azul brota en el paraje Chinguiriteras (*Figura 4.6*), posteriormente se capta en el depósito Agua Azul y suministra por bombeo a tres localidades ejido los Jarros Cañada de Onofres y ejido Miraflores (*Tabla 4.6*).



Figura 4.6. Manantial Agua Azul, Isidro Fabela, Estado de México.

Tabla 4.6. Localidades a las que abastece el manantial Agua Azul.

No.	Localidades	Cantidad de habitantes INEGI 2010			Grado de marginación
		Hombres	Mujeres	Población total	
1.	Ejido los Jarros	427	396	823	Alto
2.	Cañada de Onofres	325	327	652	
3.	Ejido Miraflores	515	502	1,017	Medio
	Total	1,267	1,225	2,492	

A menos de dos metros de distancia del manantial pasa un río, en el cual se vierte el drenaje de las localidades aguas arriba del municipio de Isidro Fabela.

El predio en el cual se ubica este manantial presenta las siguientes características: se ubica dentro del acuífero 1508 Cuautitlán- Pachuca y pertenece a la cuenca hidrológica del río Moctezuma. Presenta un clima templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12° C y 18° C, la temperatura del más frío oscila entre -3°C y 18°C, y la temperatura del más caliente bajo 22° C. La precipitación en el mes más seco es menor a los 40 mm.

El tipo de suelo en el que se encuentra es Andosol (An) y el tipo de roca es volcanoclástica de la era cenozoica; el tipo de vegetación pertenece a bosque de pino-encino. Además, de que también se encuentra ubicado en una zona considerada como región Indígena Mazahua-Otomí.

Los tres manantiales antes descritos se encuentran cercados, lo cual permite restringir al acceso a personas no autorizadas. Además, sirve para aislar la entrada de contaminantes, como: cartones, botellas de vidrio, bolsas de plástico, latas, envases vacíos de aceites o, para el caso de las áreas agrícolas (incluidos los invernaderos) envases vacíos de fertilizantes; también para no permitir la entrada de animales y otros objetos que puedan contaminar u obstruir la conducción del agua.

En dicha visita surgió en interés de algunos de los habitantes de la cuenca de incluir en el presente estudio un manantial más el cual es conocido como manantial la Planta; ya que, este manantial es aprovechado por muchas de las localidades de los municipios de Isidro Fabela y Nicolás Romero para uso y consumo humano como se observa en la *figura 4.7*.

4.2.3.4. Manantial la Planta



Figura 4.7. Manantial la Planta, Isidro Fabela, Estado de México.

Las características del manantial la Planta son un tanto similares a las características del manantial Agua Azul ya que ambos se encuentran ubicados en la parte media alta de la cuenca presa de Guadalupe. La única diferencia es que el tipo de vegetación pertenece a bosque de encino.

El mapa que se muestra a continuación (*figura 4.8*) muestra la ubicación exacta de cada uno de los manantiales antes descritos: la Cocinera, los Capulines, Agua Azul y a Planta.

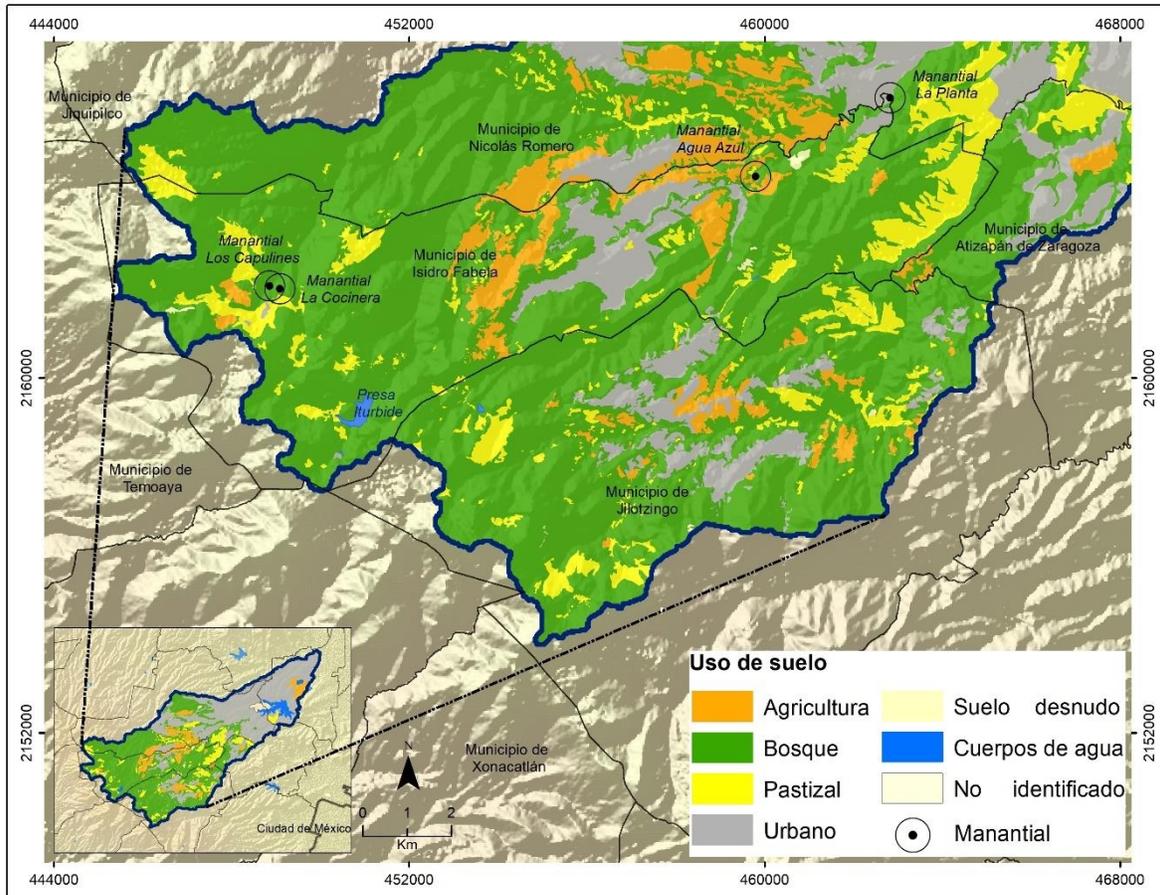


Figura 4.8. Mapa de ubicación del manantial los Capulines, la Cocinera, Agua Azul y la Planta.

Como se puede ver en la *figura 4.8*, el manantial los Capulines y el manantial la Cocinera se encuentran ubicados en la parte alta de la cuenca presa de Guadalupe; en donde la mayor parte del uso de suelo es bosque y pastizal; por lo tanto, no se ven directamente afectados por las actividades humanas, en tanto se mantenga restringido el paso al personal no autorizado, ganado u otro tipo de actividades y/o acciones distintas al mantenimiento del manantial en el punto de surgencia y se conserve el área boscosa de la parte alta de la cuenca, la cantidad y calidad de los manantiales no se verá afectada; pues no existe una fuente directa de contaminación.

Sin embargo, los manantiales Agua Azul y la Planta se encuentran más cercanos a las zonas urbanas, cuerpos de agua contaminados, basureros, áreas agrícolas en mayor proporción, panteones, autolavados, etc.; lo cual, podría causar daños en la calidad de agua de los manantiales siendo más vulnerables a los efectos de la contaminación si no se toman las medidas necesarias; razón por la que se les ha dado prioridad a estos dos manantiales en la toma de parámetros fisicoquímicos, generación de zonas de protección e identificación de focos potenciales de contaminación.

4.2.4. Parámetros fisicoquímicos de los manantiales

En el mes de mayo de 2019 se realizó una segunda visita a campo con la finalidad de tomar mediciones in- situ de los parámetros fisicoquímicos del agua de los manantiales la Planta y Agua Azul (*figura 4.9 y 4.10*) respectivamente, por ser los más susceptibles a cambios en la calidad de agua por contaminantes; apoyados en esta visita por el Doctor en Ciencias del Agua José Luis Expósito y por estudiantes de Doctorado del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) así como por el Doctor en Ciencias Víctor Ávila Akerberg del Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR, UAEMéx).

Además de tomar los parámetros fisicoquímicos del agua (*Tabla 4.7*) se hicieron mediciones el caudal en ambos manantiales, lo cual es un factor determinante para delimitar las zonas de captura potencial de los manantiales.

Tabla 4.7. Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua de los manantiales.

Manantial	Fecha de muestreo	Tem °C	pH	C.E. µS/cm	S.T.D. ppm	Sal psu
Manantial Agua Azul	21/05/2019	15.0°	7.29	50.0	26.0	0.112
Manantial la Planta	21/05/2019	21.0°	8.03	50.0	26.0	0.118

Tem. °C = Temperatura del agua en grados centígrados

pH = potencial de Hidrógeno

C.E. µS/cm = Conductividad Eléctrica en microsiemens/cm

S.T.D. ppm = Sólidos Totales Disueltos en partes por millón

Sal. psu = Salinidad en unidades prácticas de salinidad



Figura 4.9. Medición el caudal del manantial la Planta.



Figura 4.10. Medición el caudal del manantial Agua Azul.

a. Temperatura

La temperatura del agua en el manantial la Planta y Agua Azul fue de 21° y 15° respectivamente. Estas aguas se pueden consideradas como aguas no termales, son provenientes de sistemas de flujos someros con temperaturas parecidas a la temperatura ambiente.

La temperatura del manantial la Planta, presentó las temperaturas más altas debido a que las mediciones se hicieron de agua procedente de las tuberías lo cual es un factor de alteración de la temperatura. Por lo tanto, este manantial también se verá afectado por el resto de los parámetros fisicoquímicos.

b. pH

El pH del agua indica la acidez o alcalinidad del líquido. La Norma Oficial Mexicana NOM127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 1994) ha establecido el rango de pH 6.5 a 8.5 para el agua potable. Este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua.

Tanto el manantial la Planta como el manantial Agua Azul tienen un pH mayor a 7.0 por lo tanto, son considerados como ligeramente alcalinos, lo cual indica que se encuentran dentro de los rangos permisibles de la Norma Oficial Mexicana de calidad del agua.

c. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para transmitir corriente eléctrica, y en general depende de la temperatura. La conductividad eléctrica del agua de los manantiales tuvo un promedio de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual en relación con la cantidad de STD es indicador de agua de buena calidad fisicoquímica.

Cuanto mayor sea la conductividad del agua, mayor será la cantidad de sólidos o sales disueltas en ella, ya que la conductividad eléctrica del agua es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos.

d. Sólidos Totales Disueltos (STD)

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible de STD establecido para el agua destinada al consumo humano es de 1000 mg/l (equivalentes a 1000 ppm) (Secretaría de Salud, 1994); sin embargo, para la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1993) es de 500 mg/l.

En los manantiales la concentración de STD no sobrepasa los límites establecidos, que de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana y a la de la OMS, indica que se trata de aguas de buena calidad. Los STD de los manantiales fueron de 26.0 ppm.

e. Salinidad

El grado de salinidad de los manantiales oscila entre 0.112 y 0.118 psu los cuales están relacionados con el resto de los parámetros.

Los resultados obtenidos confirman que estamos en manantiales cuyas aguas son de reciente información, dado los valores tan bajos de STD.

4.3. Delimitación de zonas de protección de los manantiales seleccionados

Para delimitar la zona de protección de los manantiales primero se delimito la zona de captura potencial y posteriormente las zonas de protección mediante la estimación de la recarga anual.

4.3.1. Delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales

Como bien se ha mencionado, la zona de captura potencial es el área geográfica donde se infiltra agua que se dirige hacia el punto de descarga de dicha fuente. A partir de la zona de captura potencial es posible definir zonas de protección.

Se delimitó la zona de captura potencial considerando la topografía y la red de drenaje de área de estudio como se puede ver en la *figura 4.11*, la zona de captura potencial se encuentra al suroeste de los manantiales.

Dada la cercanía de los manantiales: Capulines y la Cocinera ambos comparten una misma zona de captura potencial; lo cual, resalta la importancia de llevar a cabo un adecuado manejo de los recursos forestales pues, son los principales responsables de los recursos hídricos que se generan dentro del área; por lo que es preciso mencionar que aunque para este estudio solo se trabajó con dos manantiales de la parte alta de la cuenca dada la importancia de tienen con respecto a la cantidad de agua que generan, existen otros manantiales con menor caudal,

pero con la misma importancia para los ecosistemas que habitan dentro de la cuenca presa de Guadalupe.

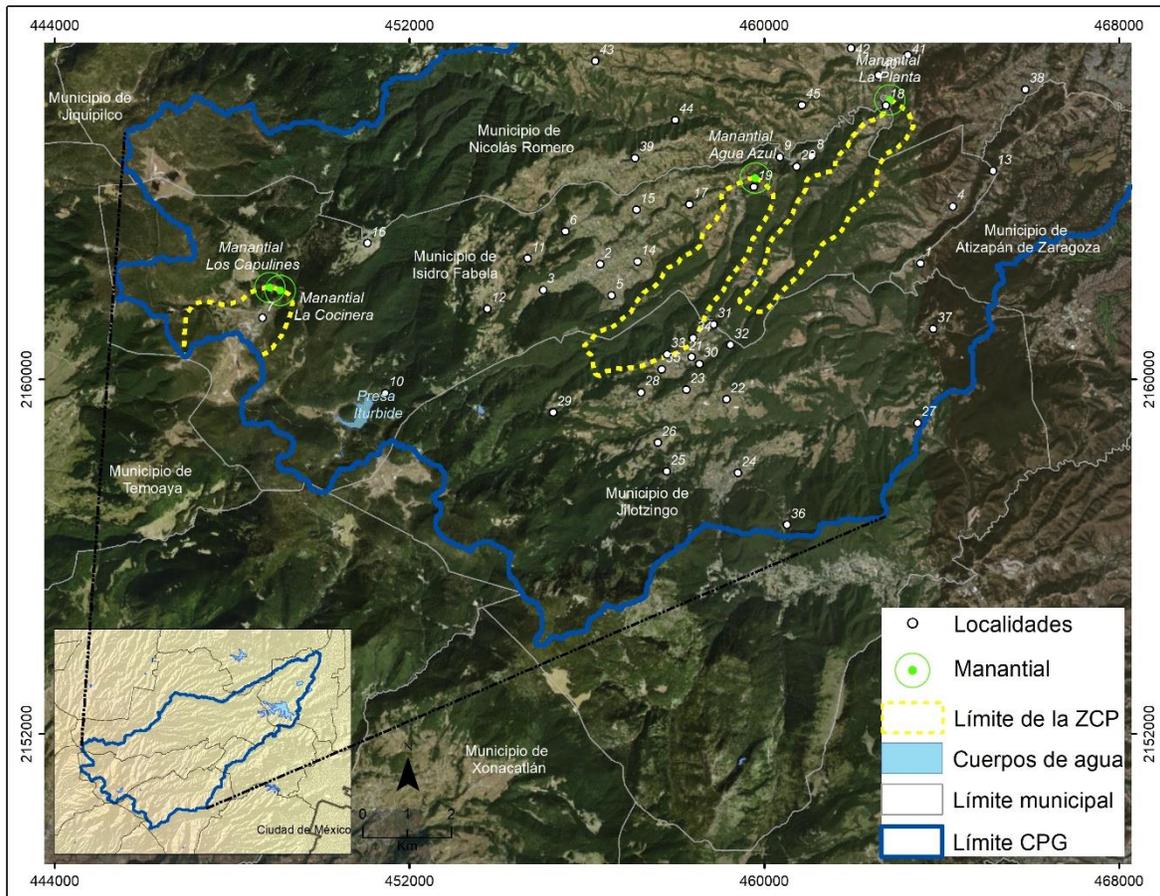


Figura 4.11. Mapa de la zona de captura potencial del manantial Agua Azul y la Planta

A continuación (Tablas 4.8 y 4.9), se enlistan los nombres de las localidades de acuerdo con los números que aparecen en los mapas de las figuras: 4.11, 4.14, 4.15, 4.16, 4.18 4.20 y 4.23.

Tabla 4.8. Nombre de las localidades de acuerdo con los números en los mapas.

Localidades de acuerdo con los números que aparecen en los mapas de las figuras: 4.11, 4.14, 4.15, 4.16, 4.18 4.20 y 4.23.		
1. Los Gallos	16. Xitoxi	31. Barrio Dospí
2. Tlazala de Fabela	17. Ejido Miraflores	32. Barrio Denxi (Los Alcanfores)
3. Colonia Aurora	18. Ejido los Jarros	33. Barrio el Calvario
4. Cañada de Onofres	19. Ampliación Ejido Miraflores	34. Barrio las Manzanitas

Tabla 4.9. Nombre de las localidades de acuerdo con los números en los mapas (continuación).

Localidades de acuerdo con los números que aparecen en los mapas de las figuras: 4.11, 4.14, 4.15, 4.16, 4.18 4.20 y 4.23.		
4. Cañada de Onofres	19. Ampliación Ejido Miraflores	34. Barrio las Manzanitas
5. Colonia Laureles	20. Los Panales	35. Barrio Gorondoni
6. Colonia Palma	21. Santa Ana Jilotzingo	36. La Cruz
7. Ranchería Palomas (Los Tachos)	22. Espíritu Santo	37. La Cuesta de Xinte
8. Los Panales (Mina los Panales)	23. San Miguel Tecpan	38. San Miguel Hila
9. Ampliación Ejido Palma (Chinguiriteras)	24. Santa María Mazatla	39. Transfiguración
10. Las Canoitas (Presa Iturbide)	25. Dangú	40. El Tanque
11. Caixte	26. Doditay	41. Loma del Río
12. Endeguido	27. Ejido Santa María Mazatla	42. Colonia Llano Grande (Nuevo Ejido)
13. Los Lavaderos	28. Quishiguada	43. Barrio de Guadalupe
14. Colonia Miraflores	29. El Tular Peña de Lobos	44. La Cantera
15. Ejido Palma (Ejido San Francisco)	30. Barrio Damoshu	45. La Estancia

La extensión superficial de las zonas de captura potencial de los manantiales se puede observar en la siguiente tabla (Tabla 4.10):

Tabla 4.10. Extensión superficial de las zonas de captura potencial de los manantiales.

No.	Manantial	Área (m ²)
1	Agua Azul	6,405,821
2	La Planta	5,109,898
3.	Los Capulines y la Cocinera	2,357,197

La zona de captura potencial del manantial Agua Azul abarca dos municipios Isidro Fabela y Jilotzingo, la del manantial la Planta se ubica principalmente en Isidro Fabela, pero también toma una pequeña parte del municipio de Nicolas Romero; y

la del manantial los Capulines y la Cocinera ocupa una pequeña porción del municipio de Isidro Fabela en la parte alta de la cuenca.

4.3.1.1. Zona de captura potencial del manantial Agua Azul.

- *Acuífero*

Se ubica dentro del acuífero 1508 Cuautitlán-Pachuca.

- *Área Natural Protegida Estatal*

El 14.5% de la ZCP del manantial Agua Azul (928,305.271 m²) pertenecen al ANP Estatal Zempoala La Bufa “Otomí- Mexica”.

- *Climas*

Dentro de la ZCP se desarrollan dos tipos de climas el 39% del área total corresponde a un clima semifrío subhúmedo Cb'(w2) característico de la parte alta de la cuenca y 61% a un clima templado subhúmedo C(w2).

- *Localidades indígenas*

Se han identificado tres localidades consideradas con población indígena: Barrio el Calvario, Barrio las Manzanitas y Ampliación Ejido Miraflores, con menos de 40% de PI y menos de 150 indígenas entre su población total. (*Tabla 4.11*).

Tabla 4.11. Localidades con población indígena dentro de la ZCP del manantial Agua Azul.

No.	Nombre de la localidad	Municipio	Altitud	Población total	Cantidad de viviendas	Ámbito	Grado de marginación
1.	Barrio el Calvario	Jilotzingo	2,803	195	44	Rural	Alto
2.	Barrio las Manzanitas		2,782	146	33	Rural	Medio
3.	Ampliación Ejido Miraflores	Isidro Fabela	2,565	238	59	Rural	Medio

4.3.1.2. Zona de captura potencial del manantial la Planta.

- *Acuífero*

Se ubica dentro del acuífero 1508 Cuautitlán-Pachuca.

- *Climas*

El área total de la ZCP corresponde a un clima semifrío subhúmedo Cb'(w2).

- *Localidades indígenas*

Se ha identificado una localidad considerada con población indígena: Ejido los Jarros, con menos de 40% de PI y menos de 150 indígenas entre su población total.

(Tabla 4.12).

Tabla 4.12. Localidades con población indígena dentro de la ZCP del manantial la Planta.

No.	Nombre de la localidad	Municipio	Altitud	Población total	Cantidad de viviendas	Ámbito	Grado de marginación
1.	Ejido los Jarros	Isidro Fabela	2451	427	189	Rural	Alto

4.3.1.3. Zona de captura potencial del manantial los Capulines y la Cocinera.

- *Acuífero*

La zona de captura potencial (ZCP) del manantial los Capulines y la Cocinera se ubica en mayor proporción dentro del acuífero 1501 Valle de Toluca y el acuífero 1508 Cuautitlán-Pachuca.

- *Área Natural Protegida Estatal*

El 100 % de la ZCP pertenece al ANP Estatal Zempoala La Bufa "Otomí- Mexica" con una superficie de 928,305.271 m², y 3,920 m² del área total corresponden a Santuario del Agua y Forestal Subcuenca Tributaria Río Mayorazgo-Temoaya.

- *Climas*

Dentro de la ZCP se desarrollan dos tipos de climas el 64% del área total corresponde a un clima templado subhúmedo C(w2) característico de la parte media de la cuenca y 36% a un clima templado subhúmedo C(w1).

- *Localidades indígenas*

Se han identificado una localidad considerada con población indígena: Ranchería las Palomas comúnmente conocidos como los Tachos, con menos de 40% de PI y menos de 150 indígenas entre su población total (*Tabla 4.13*).

Tabla 4.13. Localidades con población indígena dentro de la ZCP del manantial los Capulines y la Cocinera.

No.	Nombre de la localidad	Municipio	Altitud	Población total	Cantidad de viviendas	Ámbito	Grado de marginación
1.	Ranchería Palomas (Los Tachos)	Isidro Fabela	3397	139	32	Rural	Alto

4.3.2. Estimación de la infiltración para la delimitación de las zonas de protección de los manantiales

La estimación de la infiltración del suelo se llevó a cabo utilizando un método basado en el balance hídrico pero aplicado en forma matricial (ráster); donde se estimó además de la infiltración, la precipitación, escorrentía y evapotranspiración del área de estudio. Posteriormente con base a esta información se lograron delimitar las tres zonas de protección de los manantiales.

4.3.2.1. Precipitación

Para llevar a cabo el cálculo de la precipitación se utilizaron imágenes de precipitación mensual del área de estudio las cuales comprenden un periodo de treinta años 1980-2010 (*Figura 4.12*).

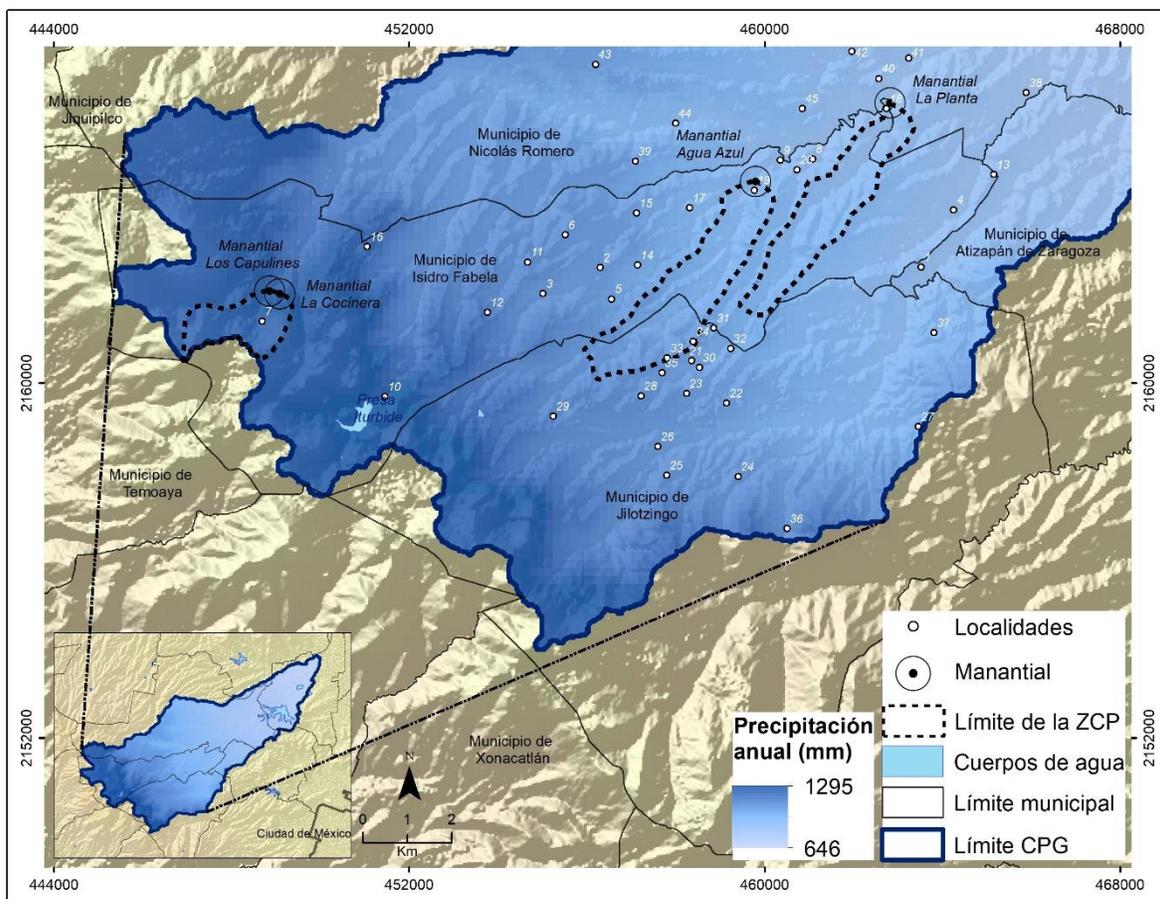


Figura 4.12. Mapa de precipitación media anual (1980-2010), con base en datos del SMN (2015) y Ordoñez (2015) y zonas de captura potencial de los manantiales.

En las zonas de captura potencial del manantial Agua Azul y del manantial la Planta la precipitación media anual osciló entre los 922.3 a 992 mm anuales; ambos ubicados en la parte media de la cuenca presa de Guadalupe, mientras que el del manantial Capulines y la Cocinera es de 1,243.9 mm anuales superando a los otros dos manantiales con 321.6 mm y 251.9 mm anuales respectivamente. (Tabla 4.14).

Tabla 4.14. Precipitación media mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).

No.	Manantial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1.	Agua Azul	13.4	14.4	12.9	31.4	69.8	162.6	211.7	197.2	173.8	79.0	16.4	9.6	992.2
2.	La Planta	12.5	12.6	12.2	29.6	65.4	152.5	194.2	186.5	158.7	76.4	14.6	7.2	922.3
3.	Capulines y la Cocinera	18.5	18.0	15.9	40.1	87.8	213.4	257.9	238.1	223.0	95.4	24.9	11.1	1,243.9

De acuerdo con los datos de Servicio Meteorológico Nacional en el mes de mayo comienzan las lluvias más frecuentes, pero es de junio a septiembre cuando cambian drásticamente los patrones (*Figura 4.13*), disminuyendo gradualmente en octubre en las tres zonas de captura. Por lo tanto, se puede considerar que los “meses de lluvias” son de junio a septiembre y los de estiaje de octubre a mayo.

En los meses de lluvia es cuando más agua se logra infiltrar en suelo alimentando tanto al acuífero como a los manantiales. Este evento se ve reflejado en el volumen del caudal de agua de los manantiales, ya que en época de estiaje se produce una ligera disminución del caudal.

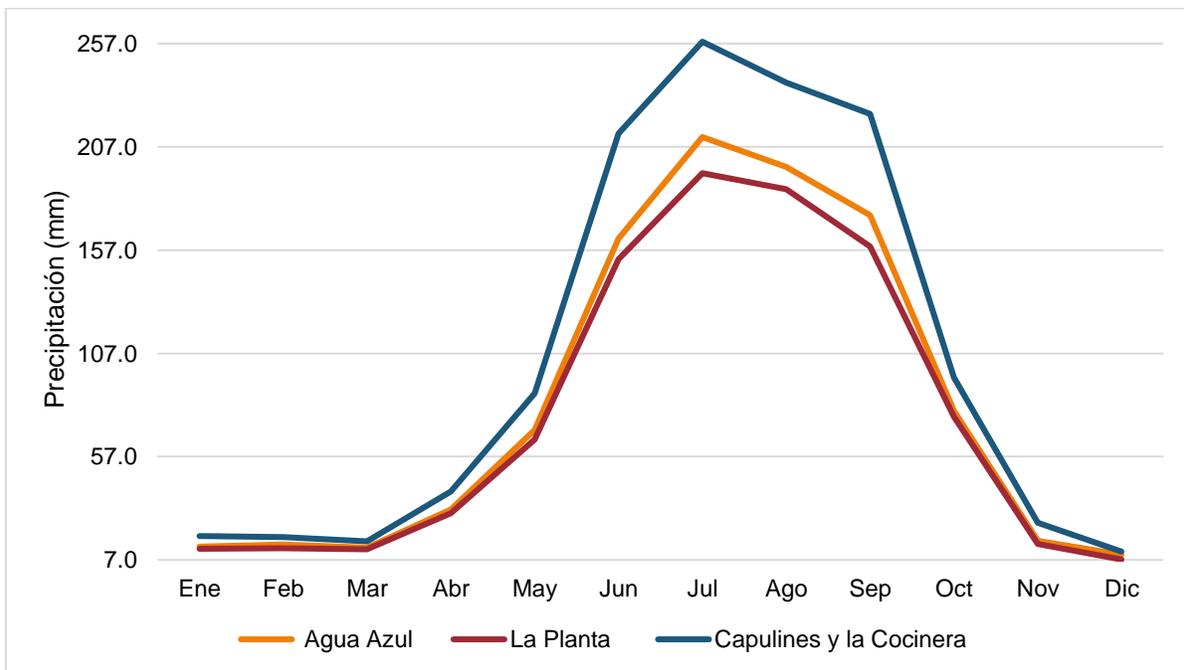


Figura 4.13. Histograma de precipitación media mensual de las zonas de captura de los manantiales.

4.3.2.2. Esguerrimiento superficial

Para la obtención del coeficiente de esguerrimiento superficial se eligió el método de CONAGUA, citado anteriormente en la metodología; debido a que es el más utilizado en estudios de carácter gubernamental.

Coeficiente de esguerrimiento (C_e) se obtuvo a partir del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, y del volumen de precipitación anual.

a. Tipo de suelo (Textura y permeabilidad)

El tipo de suelo influirá en su capacidad de infiltración. Entre más poroso sea y menor contenido de material coloidal posea, tendrá una mayor capacidad de infiltración, lo cual retardará la aparición del escurrimiento superficial.

Se obtuvo la clasificación del tipo de suelo de CONABIO (Figura 2.8), con la que se realizó una reclasificación con base en la textura del suelo en: gruesa, media y fina, y se asoció a su grado de permeabilidad en tres diferentes tipos: A (suelos permeables o textura gruesa); B (suelos medianamente permeables o textura media), y C (suelos casi impermeables o textura fina) respectivamente.

Las zonas de captura de los tres manantiales en general se ubican dentro de un suelo medianamente permeable (textura media), como se observa en la figura 4.14.

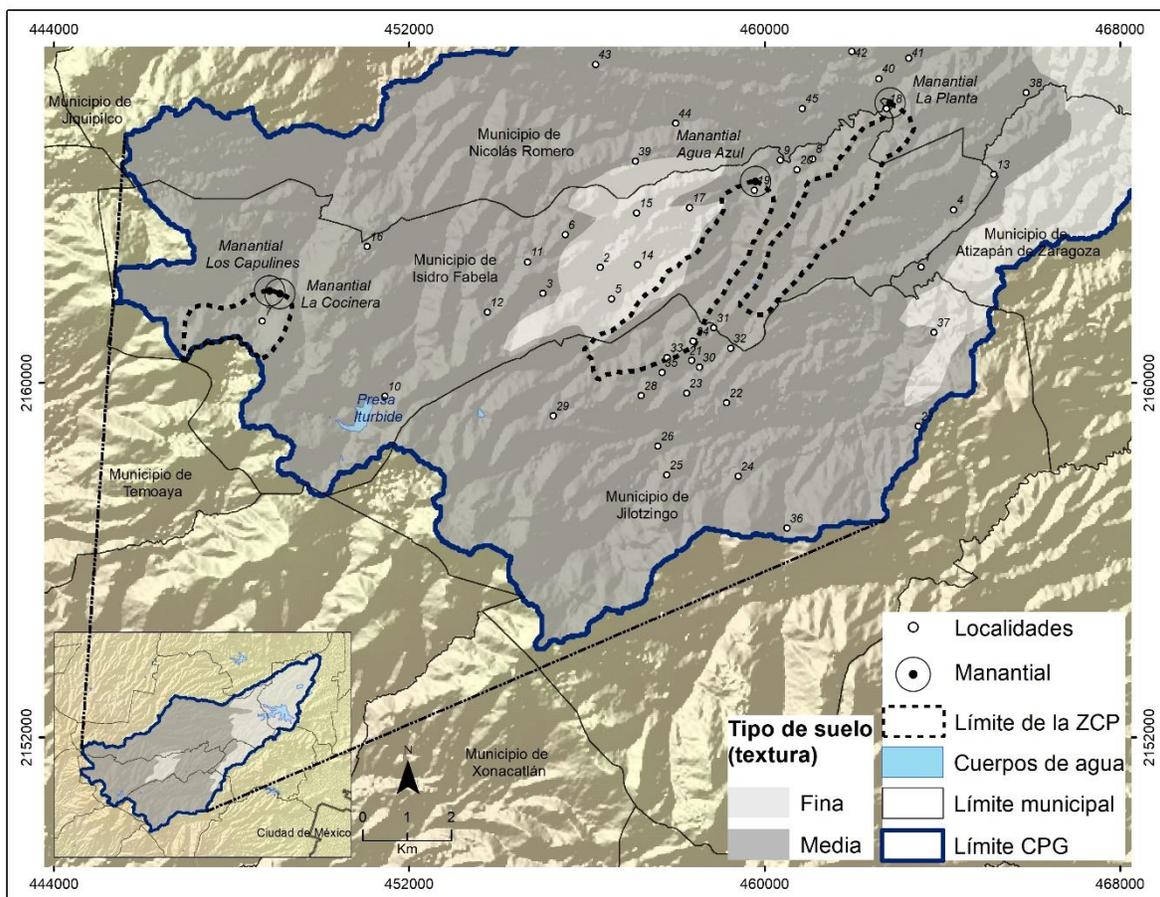


Figura 4.14. Tipo de suelo según su textura y zonas de captura potencial de los manantiales (CONABIO, 2019).

b. Uso de suelo

Si hizo una clasificación del uso de suelo con base a la clasificación del Doctor Víctor Ávila, donde se lograron definir 6 clases: pastizal, agricultura, urbano, suelo desnudo, bosque y cuerpos de agua. De la clasificación cuatro fueron las categorías que entran dentro de la zona de captura potencial: agricultura, bosque, pastizal y urbano (*Figura 4.15*).

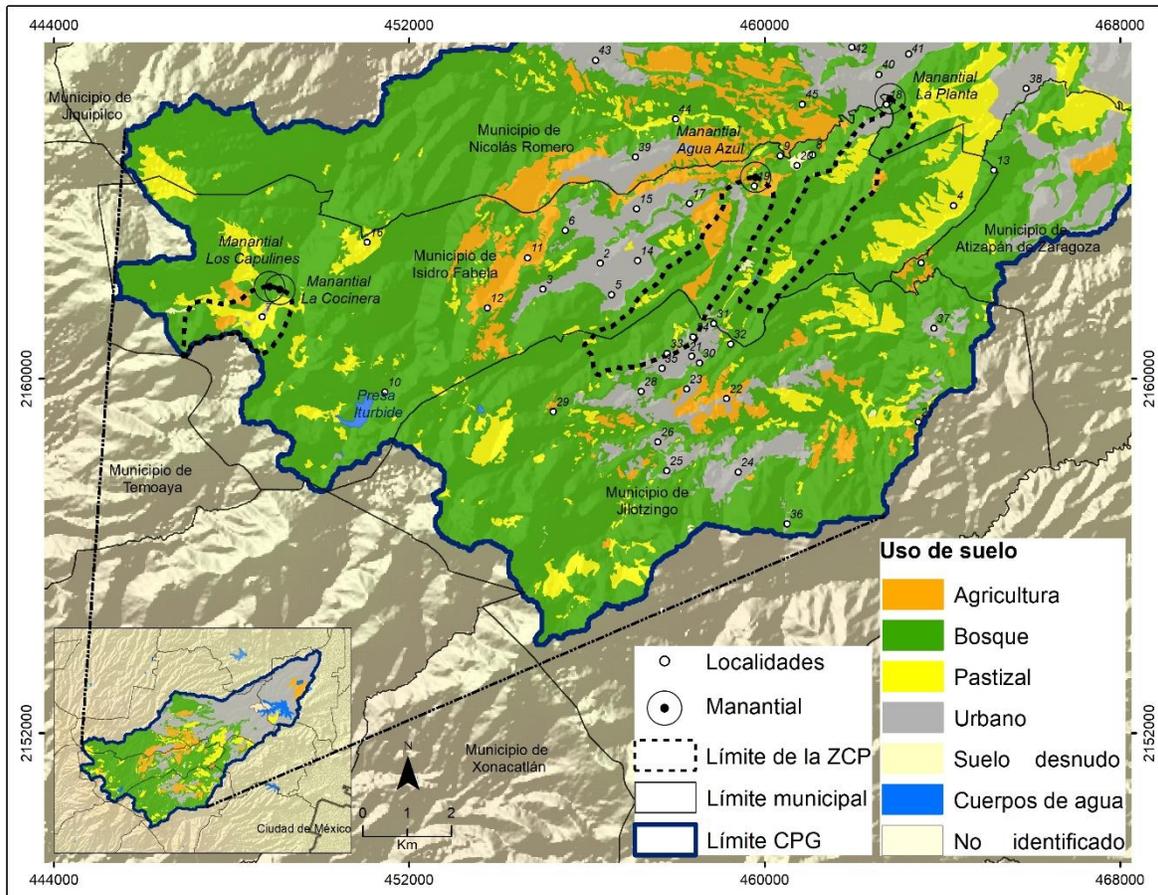


Figura 4.15. Mapa de uso del suelo y zonas de captura potencial de los manantiales.

En las zonas de captura potencial del manantial Agua Azul y la Planta predomina el bosque en más de la mitad de la superficie; el resto corresponde a cultivos, pastizal y zonas urbanas. El área boscosa en la parte alta de la ZCP del manantial Agua Azul corresponde al Área Natural Protegida “Parque Otomí Mexica del Estado de México”; el pastizal solo ocupa una pequeña porción de la superficie y son las zonas agrícolas y los asentamientos urbanos los que se encuentran más próximos al

manantial. En la ZCP del manantial la Planta los pastizales y los asentamientos urbanos, se encuentran más cercanos al manantial y el área agrícola ocupa solo una pequeña porción de la superficie.

La ZCP del manantial los Capulines y la Cocinera abarca una pequeña rancharía conocida como las Palomas, también podemos encontrar áreas dedicadas a la siembra y en mayor proporción pastizal y bosque del Área Natural Protegida “Parque Otomí Mexica del Estado de México”.

c. Valores de K en función del tipo y uso del suelo.

Tomando en consideración el tipo y uso de suelo se pudieron asignar los valores de K para determinar el Ce. Fueron cinco las categorías obtenidas, los valores de K varían de 0.16 a 0.3 con base en el método de CONAGUA (Tabla 4.15). Los valores más altos representan mayor escurrimiento, y por lo tanto menor infiltración y los valores más bajos menor escurrimiento y por ende más infiltración del agua en el suelo.

El promedio del valor de K (parámetro que depende del tipo y uso de suelo) para la zona de captura potencial del manantial Agua Azul, la Planta los Capulines y la Cocinera fue de 0.23. Dado que K fue mayor de 0.15, el coeficiente de escurrimiento anual (Ce) se calculó mediante la fórmula mencionada en el apartado de la estimación del balance hídrico de la metodología.

Tabla 4.15. Valores de K en función del tipo y uso del suelo (DOF, 2002).

No.	Uso del suelo	Tipo de suelo	
		B	C
1.	Cultivos	0.27	0.3
	Pastizal (% de suelo cubierto o pastoreo)		
2.	Del 50 al 75% - Regular	0.24	0.3
3.	Menos del 50% - Poco	0.28	0.3
	Bosque (% de suelo cubierto)		
4.	Cubierto más del 75%	0.16	0.24
5.	Cubierto del 50 al 75%	0.22	0.26
6.	Zonas urbanas	0.29	0.32

d. Coeficiente de escurrimiento anual.

El Ce tomó valores comprendidos entre -0.013 y 0.063. Los valores altos se localizan dentro de los asentamientos urbanos y en zonas con pastizal, mientras que los valores medios en áreas agrícolas y boscosas.

e. Escurrimiento superficial anual y mensual

Finalmente, el proceso de multiplicación de imágenes de Ce y de precipitación anual dio como resultado el escurrimiento superficial anual de las zonas de estudio (*Figura 4.16*). El escurrimiento superficial anual más elevado se presenta principalmente en las zonas urbanas esto se puede explicar debido a la falta de vegetación que no favorece la retención del agua de lluvia en el suelo.

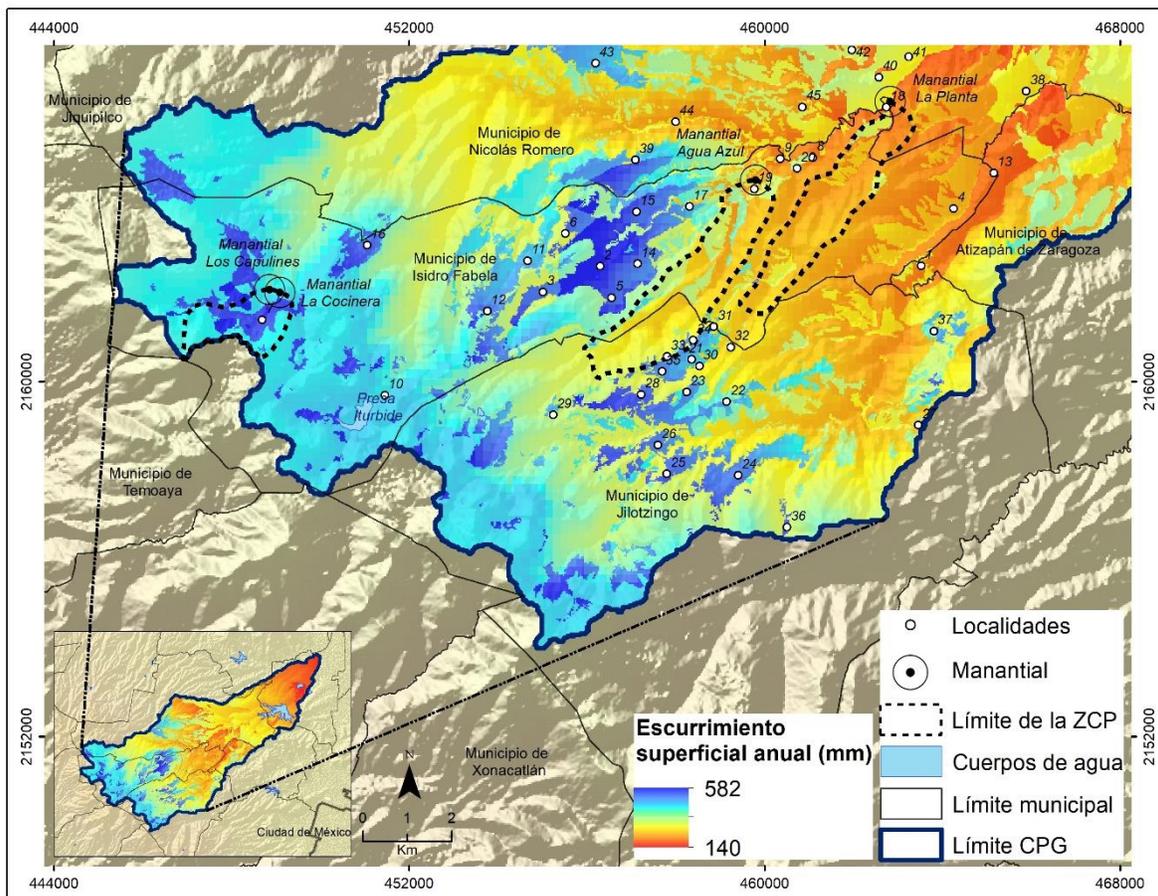


Figura 4.16. Mapa de escurrimiento superficial anual y zonas de captura potencial.

En la parte alta de la cuenca el escurrimiento está directamente relacionado a la cantidad de lluvia, (mayor precipitación, mayor escurrimiento); sin embargo, las

áreas boscosas atenúan este proceso, favoreciendo la absorción del agua en el suelo.

En la *tabla 4.16* y *figura 4.17* se puede observar el comportamiento temporal del escurrimiento superficial mensual. En los meses de lluvias comprendidos de junio a septiembre la cantidad de escurrimiento aumenta.

Tabla 4.16. Escurrimiento superficial mensual y anual de las zonas de captura potencial (mm).

No.	Manantial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1.	Agua Azul	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	46.9	72.2	66.1	57.0	12.4	0.0	0.0	255.3
2.	La Planta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.2	60.2	57.5	46.9	10.1	0.0	0.0	213.9
3.	Capulines y la Cocinera	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8	77.7	100.9	91.1	86.2	24.9	0.0	0.0	394.6

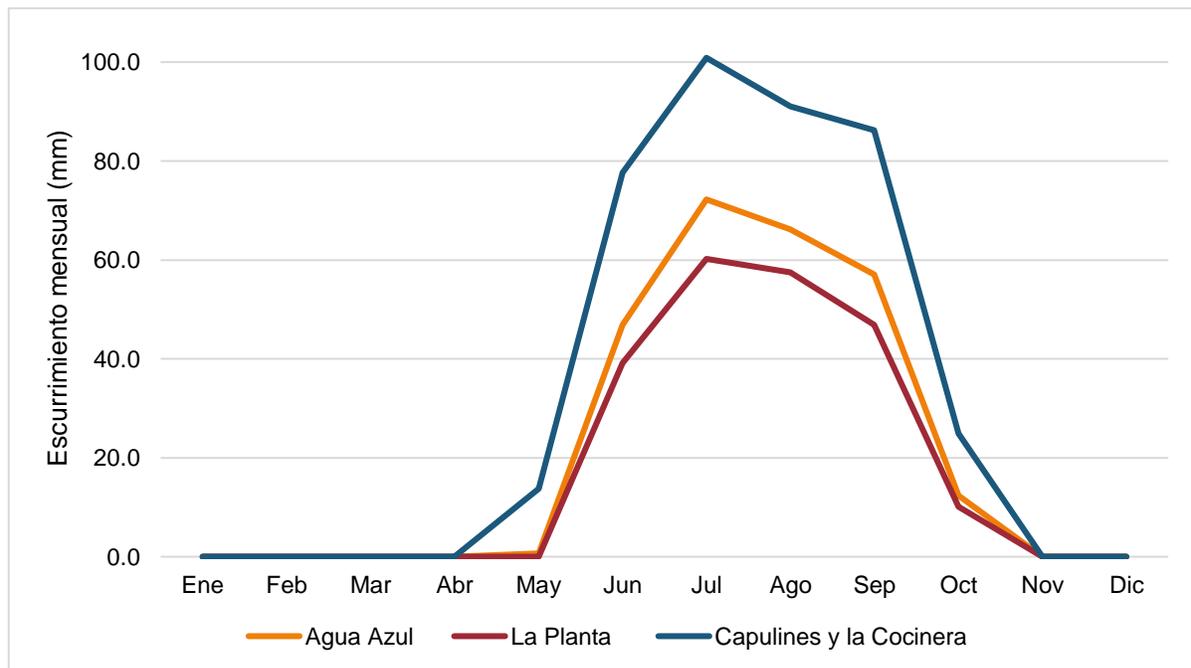


Figura 4.17. Histograma de escurrimiento superficial mensual de las zonas de captura potencial.

4.3.2.3. Evapotranspiración

Para el calcular la evapotranspiración se aplicó el método de Hargreaves. La temperatura anual promedio para las zonas de captura de los manantiales oscilo entre los 6 y los 16 °C (*Figura 4.18*), siendo los meses más calurosos de abril a septiembre y los más fríos de diciembre a febrero (*Tabla 4.17*).

La zona de captura potencial del manantial los Capulines y la Cocinera presenta las temperaturas más bajas, debido a la altitud en la que se encuentran.

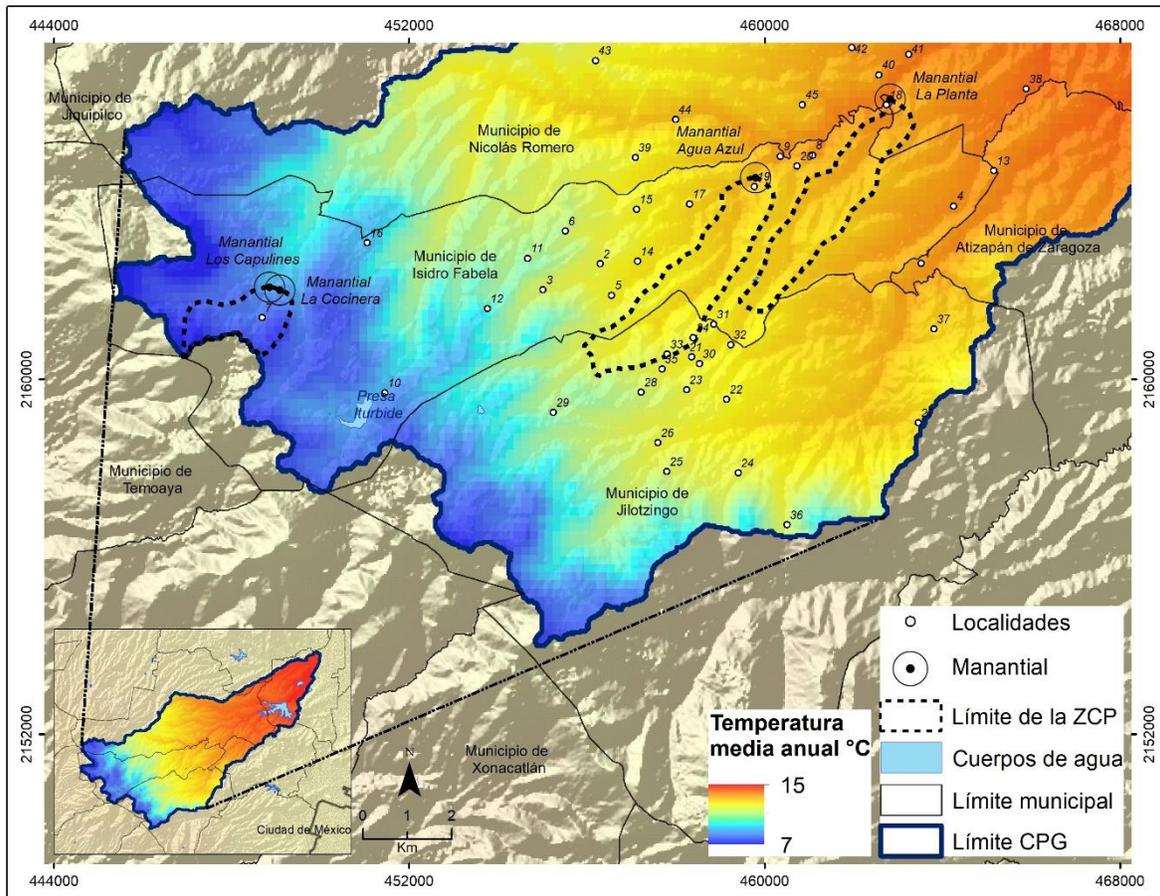


Figura 4.18. Temperatura media anual y zonas de captura potencial de los manantiales.

Tabla 4.17. Temperatura promedio mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (°C).

No.	Manantial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1.	Agua Azul	11.0	11.8	13.5	14.8	15.3	14.9	14.2	14.1	13.9	13.2	11.9	10.9	13.3
2.	La Planta	11.4	12.2	14.0	15.4	16.0	15.7	14.9	14.8	14.6	13.7	12.3	11.3	13.9
3.	Capulines y la Cocinera	7.2	7.5	8.7	9.8	10.3	9.9	9.2	9.5	9.0	8.2	7.7	6.9	8.7

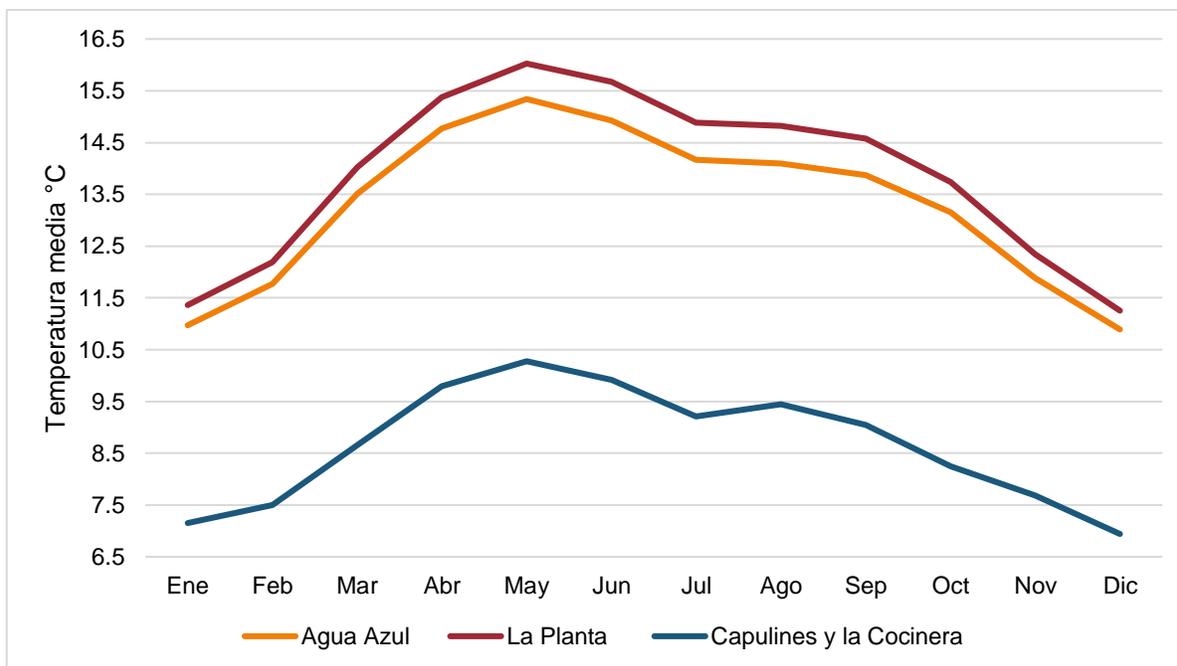


Figura 4.19. Histograma de temperatura media mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.

Por otro lado, la radiación solar más baja se presenta en el mes de diciembre, mientras que la más alta en los meses de mayo a julio (Tabla 4.18). La temperatura y la radiación solar tienen una estrecha relación, pues los meses de temperatura más alta coinciden con los de radiación solar.

Tabla 4.18. Radiación solar mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.

No.	Manantial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1.	Agua Azul	11.1	12.6	14.3	15.5	16.1	16.1	16.0	15.7	14.7	13.1	11.5	10.7
2.	La Planta	11.1	12.5	14.3	15.5	16.1	16.1	16.0	15.7	14.7	13.1	11.5	10.6
3.	Capulines y la Cocinera	11.1	12.6	14.3	15.5	16.1	16.1	16.0	15.7	14.7	13.1	11.5	10.7

La ET_0 más baja se presenta en las zonas más altas del área de estudio, e incrementa gradualmente en las zonas de menor altitud (Figura 4.20).

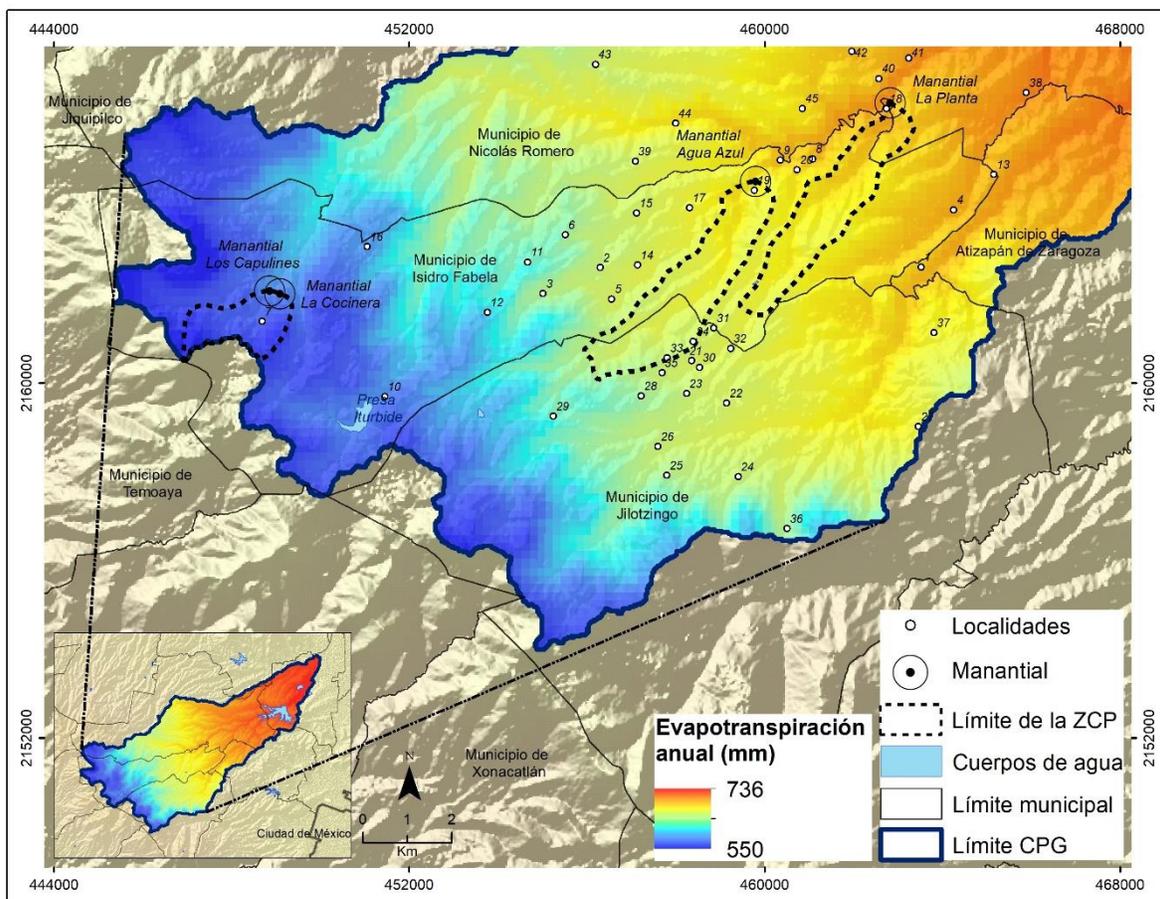


Figura 4.20. Mapa de evapotranspiración potencial anual y las zonas de captura potencial.

En las zonas de captura potencial la ET_0 anual oscilo de 36 mm a 74 mm anuales de agua evaporada anualmente.

En este sentido, es posible establecer una relación entre variables, los meses de temperatura más alta coinciden con los de radiación solar y en consecuencia son los de ET_0 más alta (Tabla 4.19).

Tabla 4.19. Evapotranspiración potencial mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).

No.	Manantial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1.	Agua Azul	40.9	41.6	56.8	63.9	71.1	67.4	65.1	63.1	57.8	53.9	44.0	40.2	665.8
2.	La Planta	40.9	41.8	57.5	65.4	73.3	69.8	67.2	65.3	59.7	55.0	44.3	40.0	680.2
3.	Capulines y la Cocinera	38.1	37.0	48.1	54.0	59.8	56.9	54.8	54.9	49.3	45.1	39.5	36.7	574.2

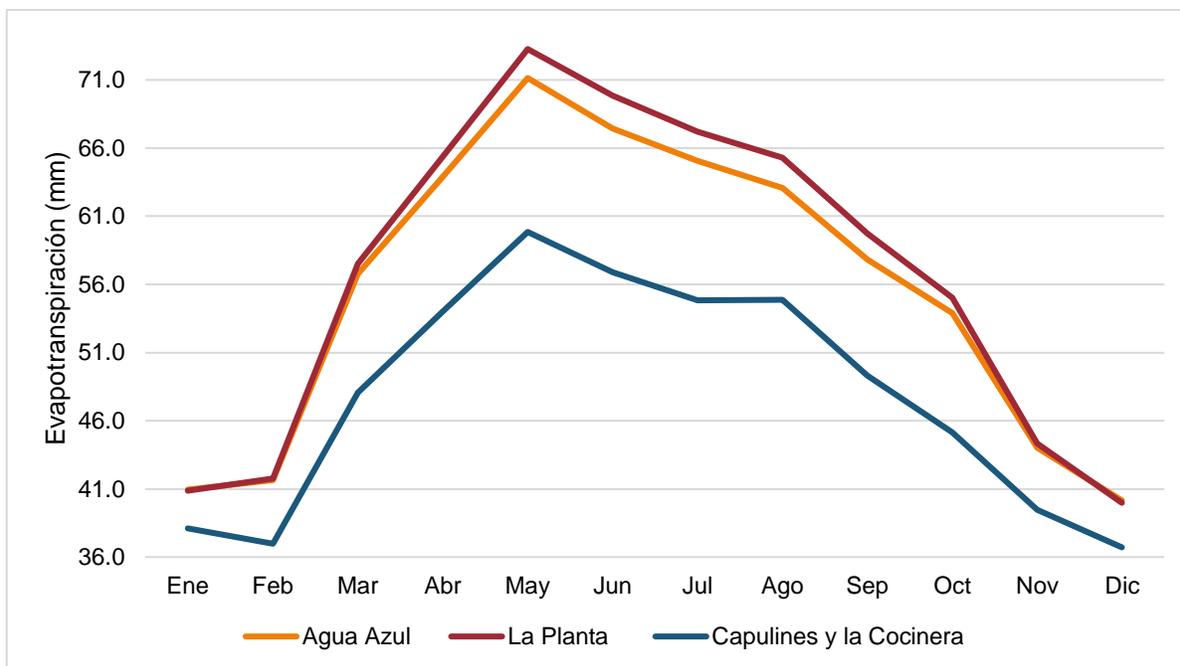


Figura 4.21. Histograma de evapotranspiración de referencia mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.

4.2.3.4. Infiltración

Para obtener la infiltración real primero se obtuvo la infiltración potencial, en la que intervienen dos variables, precipitación y escurrimiento. A la cantidad de agua precipitada se le resta la cantidad de agua escurrida, los resultados se muestran en la tabla 4.20 y en la figura 4.24.

Tabla 4.20. Infiltración potencial mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).

No.	Manantial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1.	Agua Azul	13.4	14.4	12.9	31.4	69.1	115.8	139.5	131.1	116.7	66.7	16.4	9.6	736.9
2.	La Planta	12.5	12.6	12.2	29.6	65.4	113.3	134.0	129.0	111.8	66.3	14.6	7.2	708.4
3.	Capulines y la Cocinera	18.5	18.0	15.9	40.1	74.0	135.7	157.0	147.1	136.8	70.4	24.9	11.1	849.4

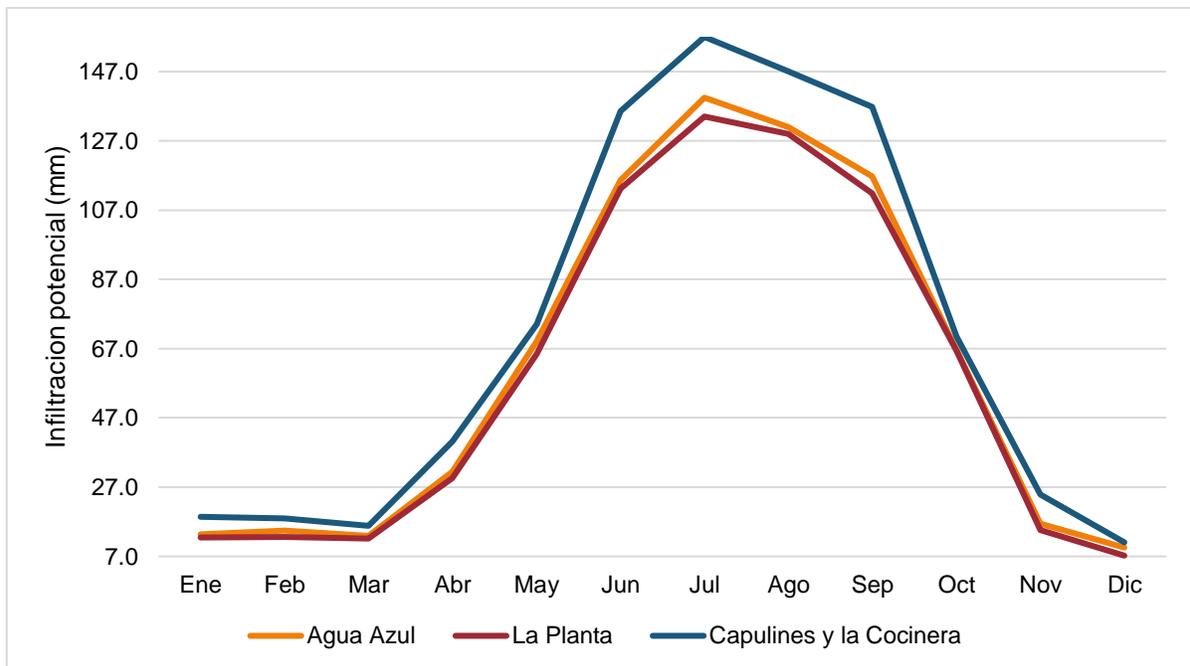


Figura 4.22. Histograma de infiltración potencial mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.

Una vez obtenida la I_p se obtuvo la I_r anual (Figura 4.23), restando el escurrimiento y la evapotranspiración a la cantidad de agua precipitada. Los resultados de la infiltración real anual muestran mayor cantidad de infiltración en el área de captura del manantial los Capulines y la Cocinera y en las partes altas y con vegetación del manantial Agua Azul y la Planta disminuyendo gradualmente en las áreas agrícolas, pero más aún dentro de los asentamientos urbanos.

En general los valores más altos de Infiltración real se encuentran en la parte alta de la cuenca, pero principalmente en las áreas con mayor vegetación, resaltando nuevamente la importancia del bosque para seguir conservando la cantidad y calidad del agua de los manantiales.

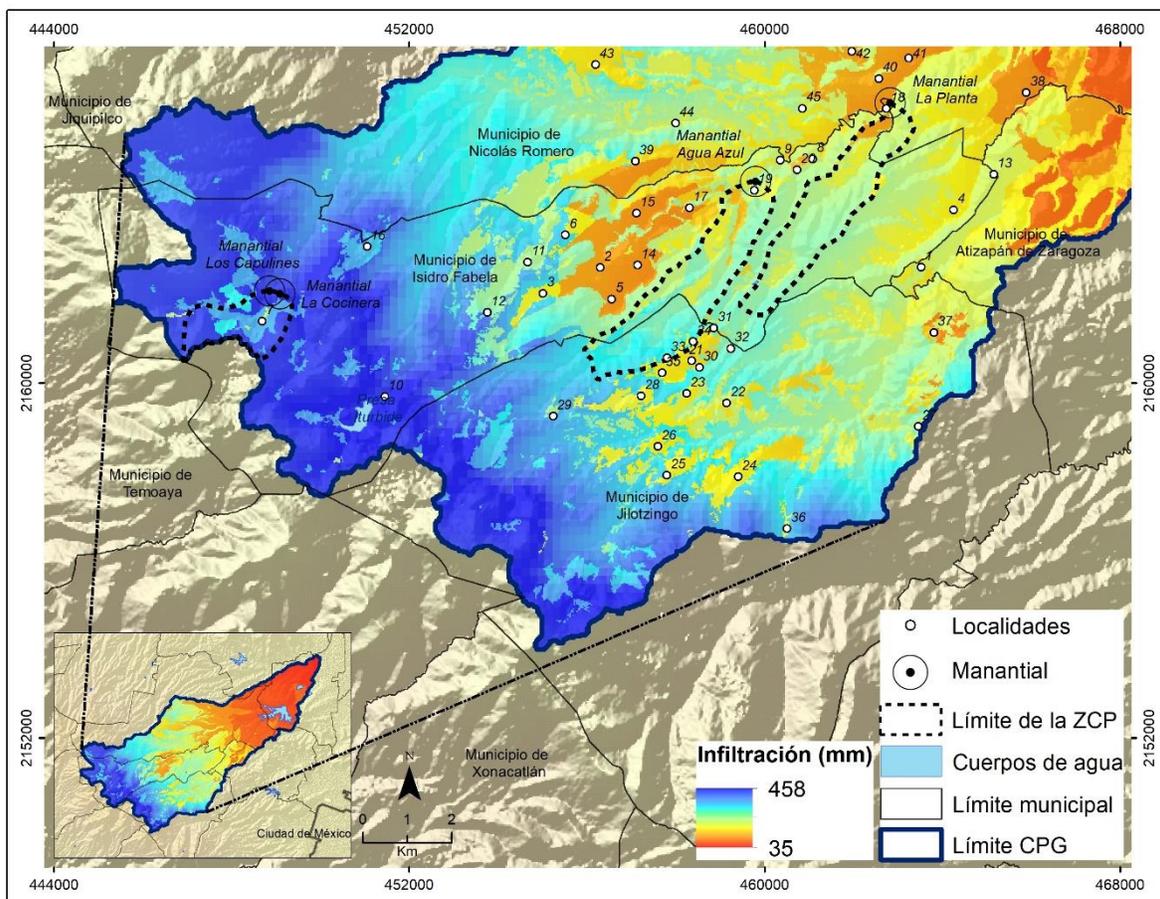


Figura 4.23. Mapa de infiltración real anual y zonas de captura potencial de los manantiales.

Los resultados de la infiltración real anual de las zonas de captura muestran que de noviembre a abril la cantidad de infiltración es despreciable (*Tabla 4.21*), dado que el agua que precipita en la zona tiende a evaporarse, ya que el escurrimiento en estos meses también tiende a ser escaso (*Figura 4.24*).

Tabla 4.21. Infiltración real mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).

No.	Manantial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1.	Agua Azul	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	48.3	74.4	68.0	58.9	12.8	0.0	0.0	263.1
2.	La Planta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.5	66.8	63.7	52.1	11.3	0.0	0.0	237.4
3.	Capulines y la Cocinera	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	78.8	102.2	92.2	87.5	25.3	0.0	0.0	400.0

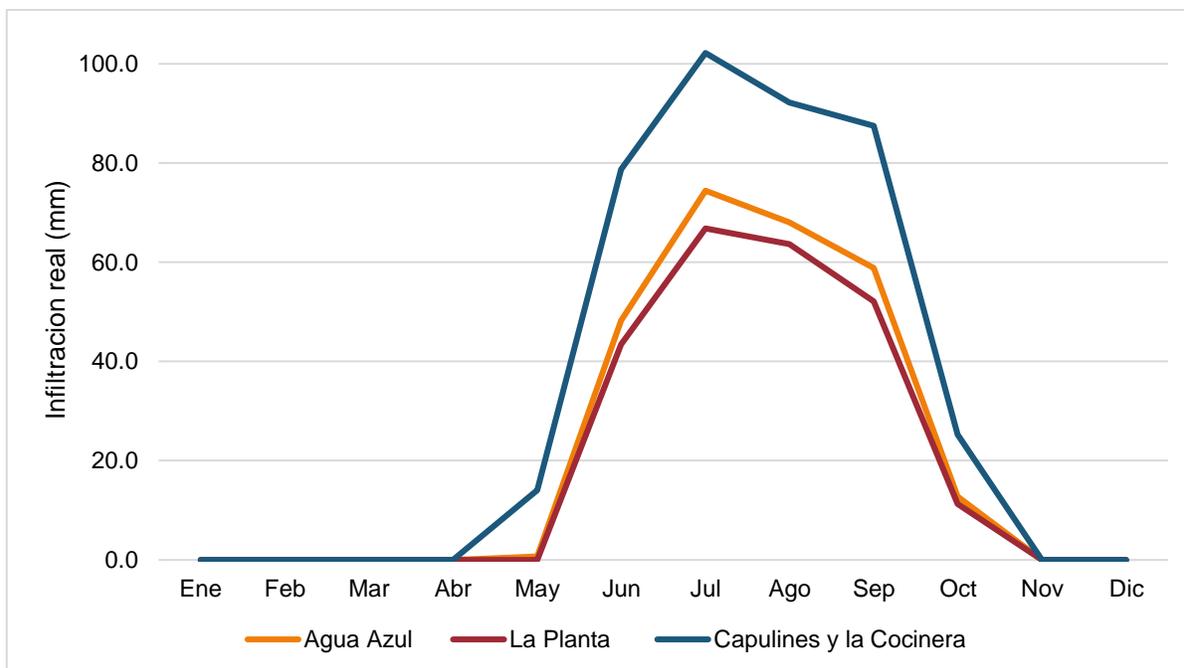


Figura 4.24. Histograma de infiltración real mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.

4.3.3. Delimitación de las zonas de protección de los manantiales

La zona de captura potencial de los manantiales se dividió en distintas áreas para su protección, con la finalidad de evitar la amenaza de contaminación del agua y agotamiento del recurso. Dicha subdivisión resultó de la modificación del método británico para la delimitación de zonas de protección de fuentes de agua (Environment Agency, 2009) que, en lugar de considerar los tiempos de tránsito de un contaminante, consideró la recarga anual, estimada como el agua que potencialmente llegaría al manantial en ese tiempo.

De este modo se lograron diferenciar tres zonas de protección: interna, externa y de contribución potencial a largo plazo.

La zona de protección interna (ZP I) se ubicó inmediatamente adyacente al manantial. Es caracterizado por el límite perimetral (cerca, malla, reja o barda) que rodea al manantial, diseñado para proteger contra la transmisión de contaminantes que podrían representar un riesgo significativo para las aguas subterráneas. Es un

límite fijo cuyo objetivo es reducir el riesgo de contaminación por químicos y algunos patógenos.

La zona de protección externa (ZP II) consideró la relación de la recarga anual, la descarga y el área de recarga. La recarga anual de las zonas de captura potencial supone un tiempo de tránsito de 365 días, tiempo que tarda el agua en alcanzar el manantial desde el momento en que se infiltra. Su extensión superficial puede variar.

La zona de contribución potencial del manantial (ZP III) corresponde al área restante de la zona de captura potencial. Es el área en la cual toda la recarga de aguas subterráneas se podría descargar en la fuente a largo plazo.

4.3.3.1. Zonas de protección del manantial Agua Azul

El manantial Agua Azul tiene como ZP I una casita pequeña construida de tabique, la cual se mantiene cerrada con llave la mayor parte del tiempo y a la cual solo el personal autorizado tiene acceso. Además de que se cercó con malla protegiendo con cadena y candado la entrada, para restringir el acceso a personas ajenas a la gestión de este, y el vertido directo de contaminantes (*Figura 4.25*).



Figura 4.25. Zona de protección interna del manantial Agua Azul.

La ZP II ocupa más de la mitad de la zona de captura potencial del manantial, es la zona que anualmente aporta agua suficiente para alimentar a los manantiales debido a las condiciones del tipo de suelo. Esta zona está ocupada principalmente por bosque de pino y encino en un 60% por áreas agrícolas de temporal en un 25%

y por zona urbana en un 15%. La ZP III se extiende hasta el Área Natural Protegida (ANP) Estatal: Zempoala La Bufa "Otomí Mexica" (Figura 4.26).

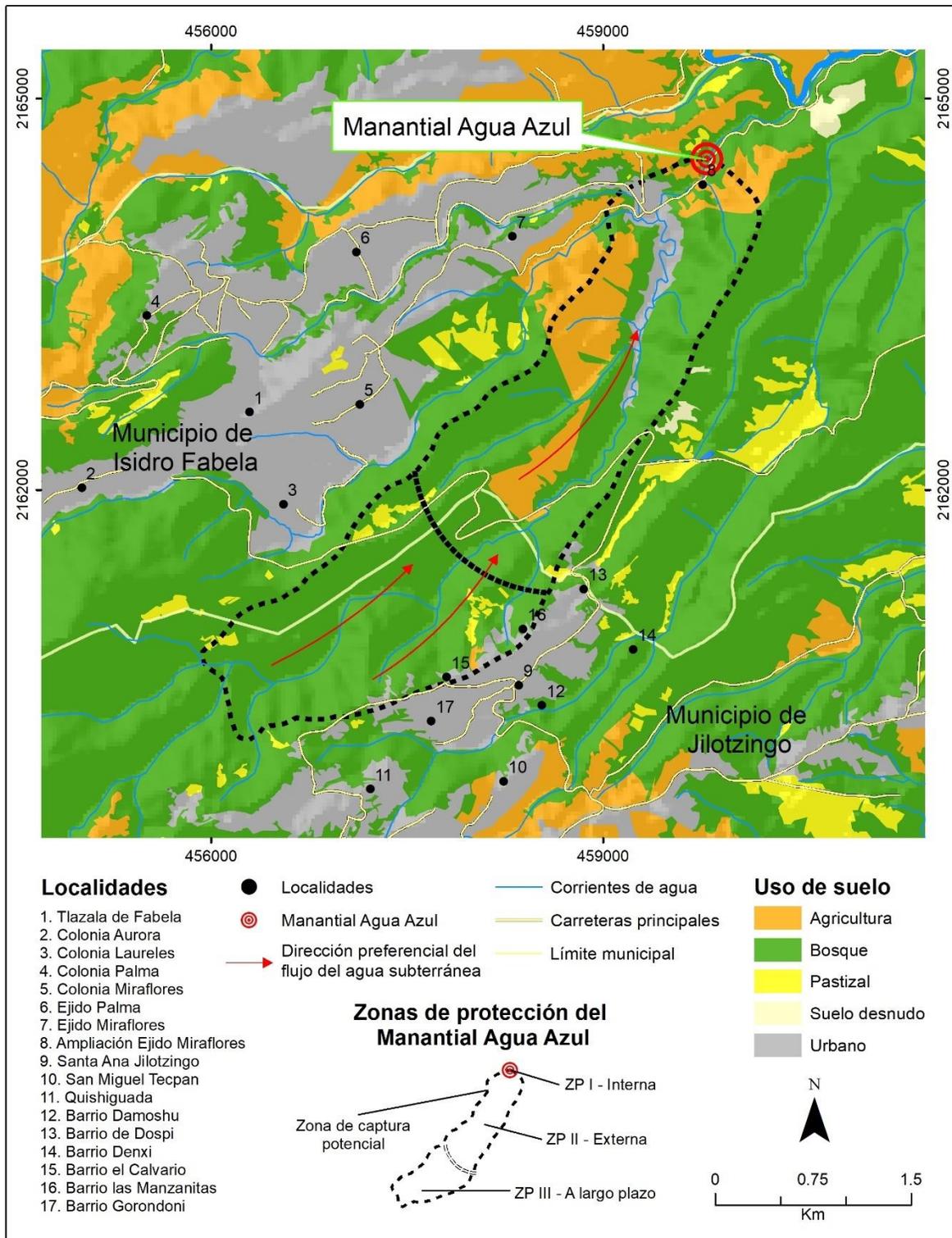


Figura 4.26. Zona de captura potencial para el manantial Agua Azul, Isidro Fabela.

Se debe prestar especial atención a las actividades que se realizan en las localidades situadas sobre todo en la zona II y III para evitar o minimizar el grado contaminación y la demanda de agua, sobre todo porque a pesar de que el manantial emerge en una zona con vegetación abundante, la ZP II presenta inmediatamente una extensión de cultivos que, de utilizar productos químicos como fertilizantes y/o abonos, podrían penetrar en el subsuelo hasta alcanzar el flujo de agua y afectar o degradar la calidad del agua manantial en un año o en meses dependiendo la cantidad de productos químicos utilizados en el suelo.

4.3.3.2. Zonas de protección del manantial La Planta

La ZP I del manantial La Planta es inexistente, cuenta únicamente con la caja de captación, el agua del manantial es utilizada por los habitantes de la zona para uso y consumo humano.

La ZP II ocupa menos de la mitad de la zona de captura potencial del manantial, es la zona más importante ya que anualmente aporta agua suficiente para alimentar al manantial dadas las condiciones del tipo de suelo. Esta zona está ocupada principalmente por bosque de encino y una localidad de nombre “Ejido Los Jarros” siendo una de las principales localidades consumidoras del agua de este manantial.

En este sentido, las localidades que se sitúan dentro de los límites de la ZP II deben establecer las medidas necesarias para evitar o minimizar la degradación de la calidad del agua que llega al manantial.

La ZP III se localiza en las zona media y alta de la cuenca, ocupa la mayor proporción de la zona de captura potencial; el uso de suelo que predomina en esta zona es principalmente bosque de encino y de coníferas, teniendo una función importante como área de recarga ya que, como vimos anteriormente las zonas con mayor vegetación favorecen la infiltración del agua de lluvia en el subsuelo; sin embargo, más del 25% del área de la ZP III está ocupada por pastizal es por lo que, las autoridades competentes deberán implementar campañas de reforestación en dichas áreas con la finalidad de evitar que con el tiempo la cantidad de agua que se obtiene del manantial disminuya o termine por agotarse (*Figura 4.27*).

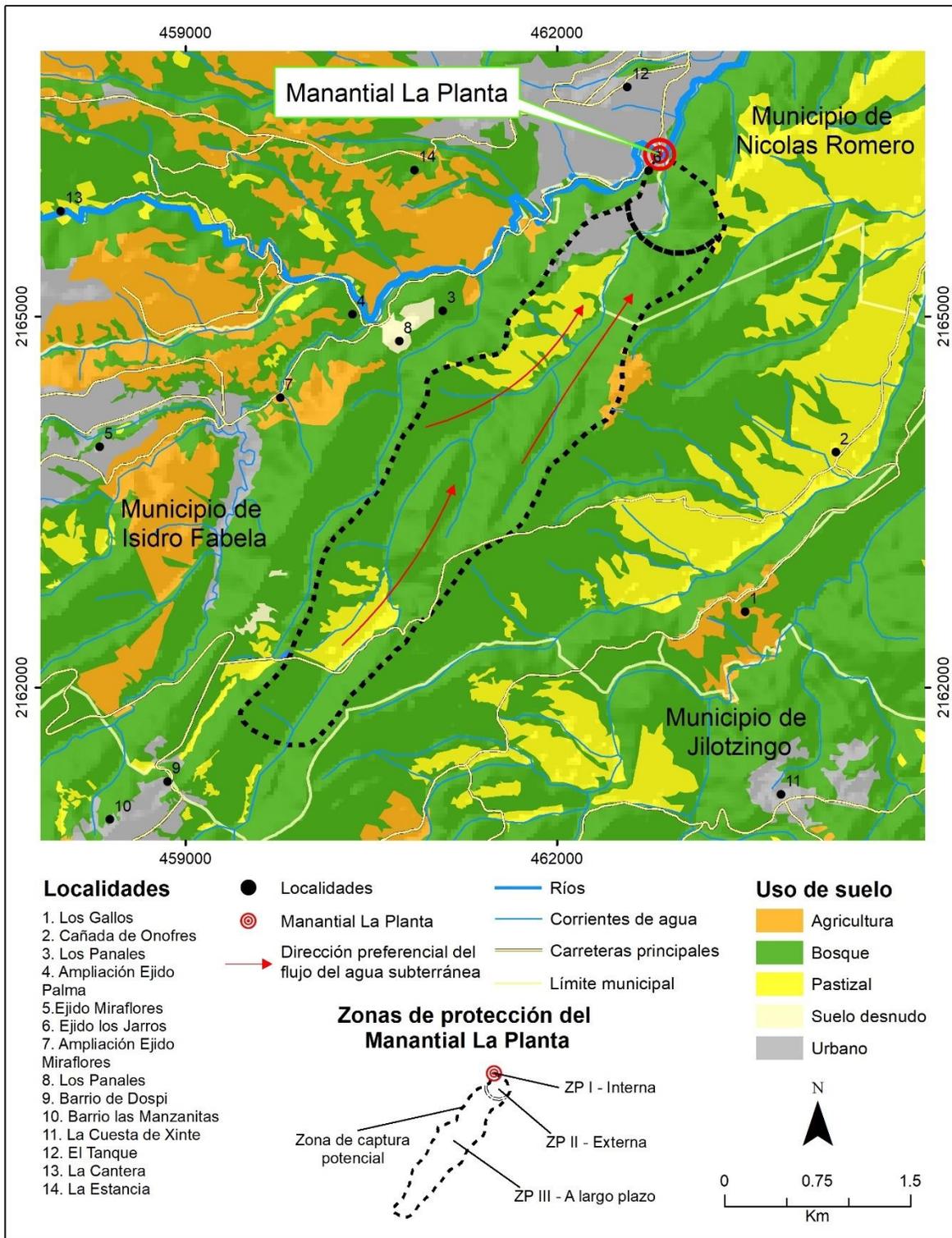


Figura 4.27. Zona de captura potencial para el manantial Agua Azul, Isidro Fabela.

4.3.3.2. Zonas de protección del manantial los Capulines y la Cocinera.

No se delimitaron zonas de protección para el manantial los Capulines y el manantial la Cocinera ya que, como se ha mencionado anteriormente ambos se encuentran ubicados en la parte alta de la cuenca presa de Guadalupe; en donde la mayor parte del uso de suelo es bosque y pastizal; por lo tanto, no se ven directamente afectados por las actividades humanas, en tanto se mantenga restringido el paso al personal no autorizado, ganado u otro tipo de actividades y/o acciones distintas al mantenimiento del manantial en el punto de surgencia y se conserve el área boscosa de la parte alta de la cuenca, la cantidad y calidad de los manantiales no se verá afectada; pues no existe una fuente directa de contaminación.

Dentro de la zona de captura potencial del manantial los Capulines y el manantial la Cocinera, se ubica una localidad conocida como Ranchería las Palomas (figura 4.28), hasta el momento esta localidad no representa un foco potencial de contaminación; sin embargo, en caso de que el número de habitantes y viviendas aumente, las autoridades o los encargados municipales deberán gestionar la instalación de un adecuado sistema de drenaje, para no afectar la calidad del agua de los manantiales.



Figura 4.28. Ranchería Las Palomas

4.4. Establecimiento de áreas de gestión

El establecimiento de áreas de gestión consistió en identificar focos potenciales de contaminación para que las autoridades correspondientes identifiquen dichos puntos y puedan tomar acciones que favorezcan el aprovechamiento sustentable del agua de los manantiales.

4.4.1. Inventario de focos potenciales de contaminación

Los focos potenciales de contaminación se han recopilado de las siguientes fuentes de información:

- Inventario de campo. Focos de contaminación puntuales más próximos al manantial identificados en las visitas de campo.
- Focos de contaminación del mapa de uso de suelo.

4.4.1.1. Focos potenciales de contaminación en el Manantial Agua Azul

- *Actividad agrícola*

Los cultivos que se sitúan sobre esta zona corresponden principalmente a cultivos de maíz, haba y papa que ocupan un área de 81 ha.

- *Actividad ganadera*

Se identificó un criadero de gallos dentro de la ZP- II.

- *Actividad industrial*

No existen actividades industriales en el entorno de la captación. El núcleo urbano y las actividades relacionadas con el mismo se sitúan aguas abajo de la captación.

- *Residuos sólidos urbanos*

En la parte alta de la ZP- II se ubica un basurero municipal.

- *Aguas residuales*

Los habitantes que no cuentan con letrinas o fosas sépticas vierten sus aguas residuales al río o arroyo; ya que no cuentan con una adecuada red de drenaje.

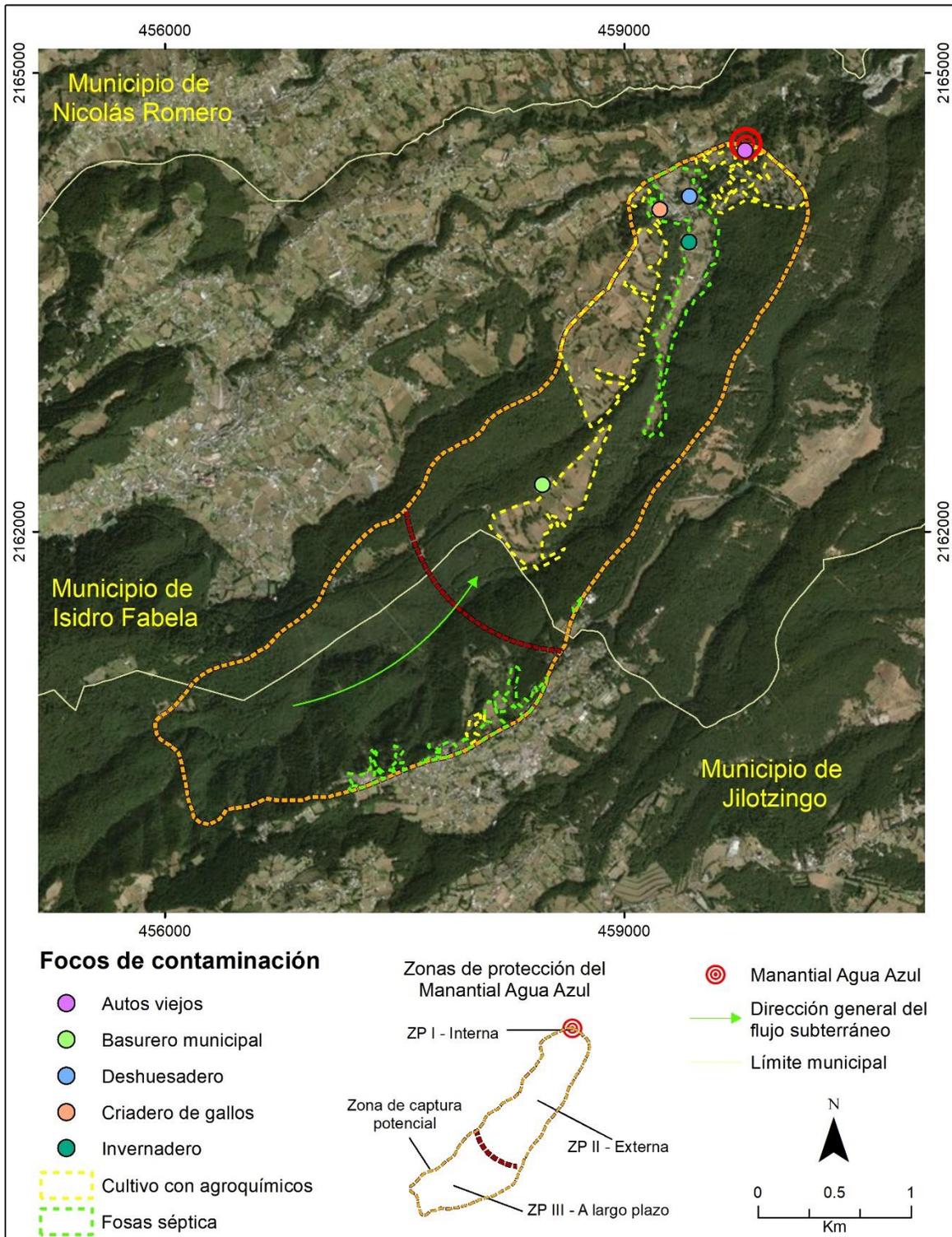


Figura 4.29. Identificación de los focos potenciales de contaminación en las zonas de protección del Manantial Agua Azul.



Figura 4.30. Fotografías donde se muestran los principales focos de contaminación del manantial Agua Azul.

La mayoría de los focos potenciales de contaminación se sitúan dentro de la ZP II-Externa, la ubicación exacta se muestra en la figura 4.29.

4.4.1.1. Focos potenciales de contaminación en el manantial La Planta

- *Actividad agrícola*

Los principales cultivos identificados en la zona corresponden a maíz y trigo los cuales abarcan 4 ha.

- *Actividad ganadera*

No existen emplazamientos ganaderos en las zonas de recarga de las captaciones ni en sus zonas próximas, por lo que el grado de afección es nulo.

- *Actividad industrial*

No existen actividades industriales en el entorno de la captación. El núcleo urbano y las actividades relacionadas con el mismo se sitúan aguas abajo de la captación.

- *Residuos sólidos urbanos*

No se han encontrado vertidos de residuos sólidos urbanos en la zona de recarga del manantial, por lo que no suponen una afección a las aguas subterráneas.

- *Aguas residuales*

La comunidad más cercana al manantial no cuenta con una adecuada red de drenaje por lo que la población hace uso de letrinas o fosas sépticas y algunas viviendas más, vierten sus aguas residuales al río o arrollo más cercano.

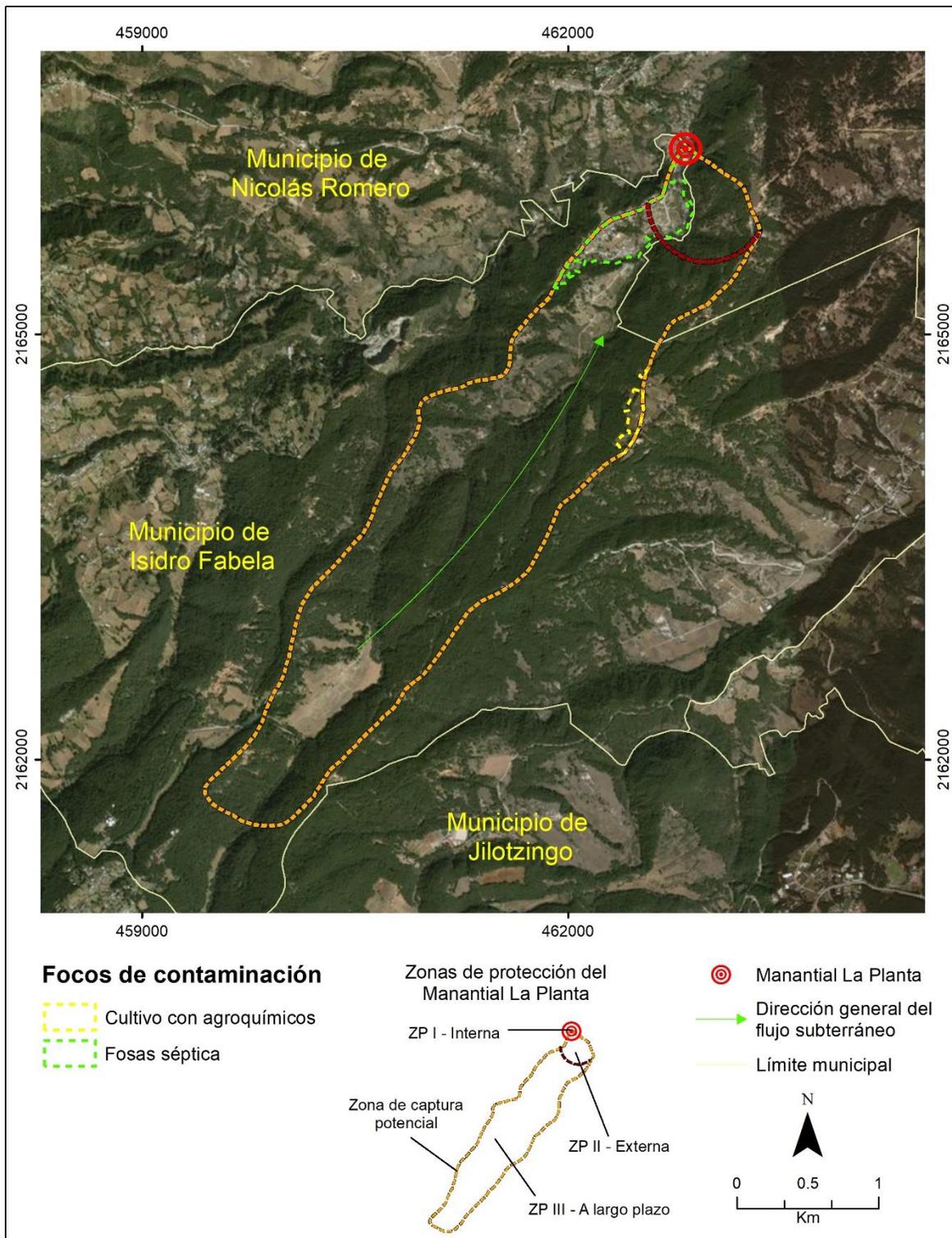


Figura 4.31. Identificación de los focos potenciales de contaminación en las zonas de protección del Manantial La Planta.



Figura 4.32. Fotografías donde se muestran los principales focos potenciales de contaminación del manantial La Planta.

La mayoría de los focos potenciales de contaminación se sitúan dentro de la ZP III- A largo plazo, la ubicación exacta se muestra en la *figura 4.31*.

Actividades que deberán prohibirse, regularse y/o gestionarse dentro de las zonas de protección:

Zona de Protección I- Interna

En esta zona se evitarían todas las actividades, excepto las relacionadas con el mantenimiento y la explotación de la captación.

Zona de Protección II- Externa

- Gestionar la instalación de una adecuada red de drenaje para evitar el uso de letrinas, fosas sépticas y el vertimiento de las aguas residuales a los cuerpos de agua.
- Prohibir el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas.

- Prohibir el almacenamiento de estiércol.
- Prohibir las granjas porcinas, de vacuno, de aves y de conejos.
- Prohibir asentamientos industriales, canteras, minas, almacenamiento o conducción de hidrocarburos
- Prohibir la construcción de cementerios, zonas deportivas y piscinas públicas.

Zona de Protección III- A largo plazo

- Gestionar la instalación de una adecuada red de drenaje para evitar de manera permanente el uso de letrinas, fosas sépticas y el vertimiento de las aguas residuales a los cuerpos de agua.
- Regular el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas.
- Regular el almacenamiento de estiércol.
- Regular las granjas porcinas, de vacuno, de aves y de conejos.
- Regular zonas deportivas y piscinas públicas.
- Prohibir los asentamientos industriales, canteras, minas, almacenamiento o conducción de hidrocarburos.
- Prohibir la construcción de cementerios.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El presente trabajo permitió identificar los manantiales para uso y consumo humano de la cuenca presa de Guadalupe seleccionando los principales tres con mayor caudal al año, identificando sus características ambientales y sociales con visitas en campo para conocer la condiciones físicas en la que se encontraban, en dichas visitas se agregó un manantial más al estudio ya que representaba una importancia cultural y social para dos municipios de la cuenca (Isidro Fabela y Nicolas Romero); se realizó una medición de los parámetros físico-químicos del agua con la finalidad de conocer el origen y la calidad de agua de los manantiales, concluyendo que son aguas de reciente infiltración las cuales se verán afectadas por el clima y el uso de suelo en la cuenca.

Dado el origen de los manantiales se delimitó la zona de captura potencial apoyados de los softwares ArcGIS e IDRISI Terset, tomado en cuenta el modelo digital de elevación y la red hidrográfica; para estimar la cantidad de infiltración y delimitar las zonas de protección de los manantiales; de acuerdo con los resultados obtenidos en el área delimitada la infiltración comienza en mayo y terminan en octubre pero los meses con valores más altos van de junio a septiembre, por lo que dentro de este periodo la cantidad de agua de los manantiales tiende a ser más alta, y los contaminantes que se encuentran en la superficie dentro de la zona de captura potencial llegan más rápido al punto de salida .

Una vez delimitada la zona de captura potencial y en base a la infiltración y al caudal de los manantiales se delimitaron las zonas de protección de los manantiales: la zona de protección interna (ZPI) consiste en el área perimetral cerca o malla que rodea al manantial, la zona de protección externa (ZP II) consideró la relación de la recarga anual, la descarga y el área de recarga y finalmente la zona de contribución a largo plazo (ZP III) corresponde al área restante de la zona de captura potencial.

La parte final del proyecto consistió en hacer un inventario de los focos potenciales de contaminación ayudados del mapa de uso de suelo y de visitas de campo identificando actividades agrícolas, ganaderas, de residuos urbanos y cuerpos de aguas residuales.

Cabe destacar que este proyecto estuvo apoyado en la metodología de López (2018): “Estrategias para la protección de manantiales: propuesta metodológica de acuerdo al entorno físico- social y proyección de escenarios”, lo que nos ha permitido integrar distintas estrategias para la protección de manantiales en la cuenca presa de Guadalupe considerando variables tanto físicas como sociales.

Los Sistemas de Información Geográfica han sido una herramienta útil y eficaz en el procesamiento de la información espacial, permitiéndonos analizar desde un mismo lugar distintas variables del espacio geográfico, desde realizar la caracterización de un área de estudio hasta distintas operaciones matemáticas como las utilizadas para el cálculo del balance hídrico, modificando y complementando la información que se tiene hasta el momento del área de estudio.

El municipio de Isidro Fabela es uno de los dos municipios con manantiales dentro de la cuenca presa de Guadalupe y representa un foco potencial de contaminación en la región, ya que de acuerdo con la información recabada carece de un adecuado sistema de drenaje el cual solo se instaló el centro del municipio y debido a que la planta tratadora de aguas negras ha sido inhabilitada desde hace ya algunos años; termina depositando las aguas residuales en los cuerpos de agua que pasan aguas abajo contaminando de esta manera gran parte de la red fluvial de la cuenca.

En general, el municipio y demás instituciones públicas y privadas podrán hacer uso de la información generada, como una herramienta para las planificaciones y toma de decisiones, incorporándola en los planes reguladores y de proyección hacia las comunidades; fundamentalmente porque dependen del agua de manantial como principal fuente para uso y consumo humano.

Como se explica en todo el documento las áreas forestales en la cuenca, principalmente en la parte alta favorecen la cantidad y calidad del agua de los

manantiales, la tala clandestina y los cambios de uso de suelo en zonas forestales podría propiciar la desecación de las fuentes; por lo cual, se deben gestionar acciones como la reforestación y el cuidado del bosque para no afectar de manera permanente las fuentes de abastecimiento de agua potable.

Recomendaciones

Ante los resultados obtenidos para la gestión de los recursos hídricos enfocados a manantiales en la cuenca presa de Guadalupe se recomienda:

-Actualizar la base de datos de los registros de fuentes de agua del REPDA, a fin de tener información actual y confiable sobre la ubicación y datos del volumen de asignación de agua d los manantiales.

-Se sugiere construir limites perimetrales de protección como parte de la ZPI a fin de proteger directamente la captación de agua de agentes contaminantes.

-Plantear un sistema de vigilancia ante la posible afección de actividades potencialmente contaminantes, para llevar a cabo un seguimiento de la eficiencia del perímetro de protección delimitado, que garantice el mantenimiento de la calidad del agua en los manantiales.

-Debido a la actividad agrícola que se realiza en la zona es aconsejable, sobre todo durante y después de lluvias de cierta importancia, hacer algunos análisis para comprobar la posible presencia de contaminación de origen orgánico, así como, especies nitrogenadas, fosforadas, pesticidas y fungicidas. En cualquier caso, se aconseja que este control sea semestral. Se establece como punto de control la propia captación de abastecimiento.

-En caso de producirse una situación especial que provoque un vertido potencialmente contaminante, en las proximidades de la captación, se recomienda llevar a cabo una campaña de seguimiento de la calidad del agua, con el análisis de los parámetros que en cada momento se juzgue necesario determinar, y con la periodicidad que aconsejen las circunstancias.

- Incluir en los planes, programas, políticas de ordenamiento territorial, planes de desarrollo urbano y gestión de cuencas las zonas de protección de manantiales que controle los cambios de uso de suelo en terrenos forestales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and drainage paper 56 ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., 2006. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje 56 ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Alvarado, A., 2009. *Análisis multicriterio para identificar y jerarquizar fuentes de agua*. Toluca: Tesis de Maestría, UAEMex-CIRA.

Alvarado, C. & Barahona, M., 2017. Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), pp. 23-33.

Aparicio, F., 2005. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México D. F.: Limusa.

Banzato, C., Governa, M., Petricig, M. & Vigna, B., 2015. The Importance of Monitoring for the Determination of Aquifer Vulnerability and Spring Protection Areas. *Engineering Geology for Society and Territory*, Volumen 5, pp. 1379-1385.

Barquín, J. & Scarsbrook, M., 2008. Management and conservation strategies for coldwater springs. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(Hamilton, Nueva Zelanda), p. 580– 591.

Benítez, C., Arias, W. & Quiroz, J., 1980. *Manual de Conservación de suelos y agua*. Lima, Perú: Manual de conservación de suelos y agua.

Biava, F. y otros, 2014. Delineation of Protection Zones for the Main Discharge Area of the Gran Sasso Aquifer (Central Italy) through an Integrated Geomorphological

and Chronological Approach. *Journal of Water Resource and Protection*, Volumen 6, pp. 1816-1832.

CGIAR-CSI, 2009. *Global Aridity Index (Global-Aridity) and Global Potential EvapoTranspiration (Global-PET) Methodology and Geospatial Dataset Description*. 2 ed. Washington, DC, United States: Consortium for Spatial Information.

CGIAR-CSI, 2016. *Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)*. [En línea] Available at: <http://www.cgiar-csi.org/data> [Último acceso: 18 noviembre 2018].

Chávez, R., Lara, F. & Sención, R., 2006. El agua subterránea en México: condición actual y retos para un manejo sostenible. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), pp. 115-126.

Civita, M., 2008. An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data. *Hydrogeology Journal*, Volumen 16, p. Hydrogeology Journal.

CONABIO, 2009. *Uso de suelo y vegetación*. [En línea] Available at: <https://www.gob.mx/conabio> [Último acceso: 05 enero 2019].

CONAGUA, 2007. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Delimitación de las zonas de protección de pozos para agua*. 2007 ed. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA, 2015. *Disponibilidad del agua subterránea por acuífero*. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA, 2015. *Registro Público de Derechos de Agua*. [En línea] Available at: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115> [Último acceso: 20 septiembre 2019].

DOF, 2002. *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. México: Diario Oficial de la Federación.

Elhatip, H. & Afşin, M., 2001. Roles of hydrogeochemical evaluations in estimating protection zones of Koçpınar springs in Aksaray, central Anatolia, Turkey. *Environmental Geology*, Volumen 40, pp. 1010-1016.

Environment Agency, 2009. *Groundwater Source Protection Zones: Review of Methods*. Reino Unido: Environment Agency.

Esquivel, J. M., 2008. *Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas como herramienta para facilitar su uso sustentable: manantiales de Almoloya de Juárez, Estado de México*. Tesis de Licenciatura. Toluca: UAEMex.

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. [En línea] Available at: <https://agua.org.mx/que-es-una-cuenca/> [Último acceso: 10 agosto 2020].

Foster, S. y otros, 2002. *Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington, D.C: Banco Mundial.

Galleani, L., Vigna, B., Banzato, C. & Lo Russo, S., 2011. Validation of a Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas: The VESPA index. *Journal of Hydrology*, p. 233–245.

García, E. y otros, 2012. Calidad de agua de manantiales urbanos en la ciudad de Tijuana. *Revista Aristas*, pp. 34-40.

GEM, 2006. Código para la Biodiversidad del Estado de México. Secretaria de Asuntos Parlamentarios. LIX legislatura.

GEM, 2013. Ley del Agua para el Estado de México y Municipios. Secretaria de Asuntos Parlamentarios. LIX legislatura.

González Cortés, J. C., Cabrera González, A. & Ayala Gómez, J. M., 2006. Flujo, calidad de agua y uso potencial de los manantiales de la microcuenca Atécuaro, Morelia, Michoacán, México. *Biológicas*, Issue 8, pp. 31-46.

Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), pp. 96-99.

He, Q. y otros, 2010. The use of nitrate, bacteria and fluorescent tracers to characterize groundwater recharge and contamination in a karst catchment, Chongqing, China. Volumen 18, p. 1281–1289.

IFOMEGEM, 2014. *Carta Geológica del Estado de México escala 1:250,000*. Juriquilla: Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México.

INEGI, 2015. *Marco Geoestadístico Nacional*. [En línea] Available at: <http://www.inegi.org.mx> [Último acceso: 6 febrero 2019].

Kresic, N., 2010a. Sustainability and management of springs. En: N. Kresic & Z. Stevanovic, edits. *Groundwater Hydrology of Springs*. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, pp. 1-30.

LAN, 2016. Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada DOF ed. México: Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión.

LGEEPA, 2018. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Última reforma publicada DOF ed. México: Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión.

LGDFS, 2018. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Última reforma publicada DOF ed. México: Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión.

López, J. A. y otros, 1996. *Guía para la elaboración de perímetros de protección de las aguas minerales y termales*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.

López, S. 2018. Estrategias para la protección de manantiales: propuesta metodológica de acuerdo con el entorno físico-social y proyección de escenarios. Tesis de Doctorado. Toluca: CIRA-UAEMex.

Marín, A. I. & Andreo, B., 2010. Delineating Source Protection Zones of Karst Springs. The Case Study of Villanueva del Rosario Spring (Southern Spain). *Environmental Earth Sciences*, pp. 317-322.

Martínez, C. & García, Á., 2003. *Perímetros de Protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación del territorio*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Monistrol, O., 2007. El trabajo de campo en investigación cualitativa. *Nure Investigación*, Issue 28.

OMS, 1993. *Estándares europeos de la calidad del agua potable*. Génova: Organización Mundial de la Salud (OMS).

Ordoñez, J. J., 2011. *¿Qué es una cuenca hidrológica?* primera ed. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.

Ordoñez, R., 2015. *Modelado espacio temporal de desfase y amplitud de la variabilidad climática en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago*. Tesis de Maestría. Toluca: CIRA-UAEMex.

Plan de Desarrollo Municipal 2016-2018. H. Ayuntamiento de Isidro Fabela.

Pochon, A. y otros, 2008. Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland. *Hydrogeology Journal*, Volumen 16, p. 1267–1281.

Qian, J. y otros, 2006. Fractured-karst spring-flow protections: a case study in Jinan, China. *Hydrogeology Journal*, Volumen 14, p. 1192–1205.

REPDA, 2015. *Base de datos del Registro Público de Derechos de Agua*. [En línea] Available at: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115> [Último acceso: 03 agosto 2019].

Samani, Z., 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), pp. 265-267.

Secretaría de Salud, 1994. *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. s.l.:s.n.

Silva, T. y otros, 2010. Vulnerabilidad acuífera como herramienta de política ambiental para la protección de manantiales en Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(1), pp. 5-16.

SMN, 2015. *Base de datos del CLICOM*. México: Servicio Meteorológico Nacional.

Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), pp. 55-94.

Todd, D. K., 1980. *Groundwater hydrology*. Nueva York: John Wiley.

Vargas, A., 2002. Manantiales de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, Volumen 27, pp. 39-52.