



IITCA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL
AGUA

PRIORIZACIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE FUENTES DE AGUA
SUBTERRÁNEA MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTICRITERIO EN UN
ENTORNO SIG. REGIÓN MINERA DE TEMASCALTEPEC, ESTADO DE
MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:

LIC. ARIANNA VALLE GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO

CO-DIRECTORES DE TESIS

DRA. MARÍA V. ESTELLER ALBERICH

DR. JUAN MANUEL ESQUIVEL MARTÍNEZ

TOLUCA MÉXICO, DICIEMBRE 2021

RESUMEN

En México, el acceso al recurso hídrico en cantidad y calidad adecuada resulta inequitativa, siendo las comunidades marginadas las que padecen en mayor medida las consecuencias de la falta de acceso al vital recurso. Aunado a ello, las problemáticas sociales que derivan de la escasez y/o contaminación de las aguas destinadas a abastecer a las poblaciones van en aumento. Los sistemas de flujo de agua cada vez son más vulnerables debido a las presiones antropogénicas, siendo las aguas subterráneas aquellas que constituyen una mayor reserva y calidad. Por ejemplo, los sistemas de flujo locales, como lo son los manantiales, generalmente abastecen a las comunidades más dispersas y con limitado acceso al agua, de ahí nace la importancia de su adecuada gestión.

En esta investigación se realizó un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico sobre las fuentes de abastecimiento de agua subterránea en la región minera de Temascaltepec, Estado de México. Con base en el Análisis Multicriterio se priorizaron para su protección aquellas fuentes que potencialmente estuvieran afectadas en cantidad y calidad a causa de la actividad minera. El primer paso consistió en la búsqueda y análisis de la información bibliográfica y cartográfica, la cual permitió obtener una serie de mapas que ayudaron en la caracterización del área de estudio; posteriormente, se lograron ubicar espacialmente los fundos y desarrollos mineros así como las fuentes de abastecimiento de agua subterráneas aledañas a estos, con el fin de seleccionar solo aquellas que tuvieran una relación directa con las minas.

Se determinó el funcionamiento hidrogeológico de las fuentes y durante la temporada de lluvias y estiaje del año 2019, se realizaron muestreos fisicoquímicos in situ de las aguas y mediciones de caudal con el propósito de clasificar los tipos de fuentes. Para la delimitación de sus zonas de protección fue necesario delimitar las zonas de captura potencial y estimar la recarga anual de las mismas. De esta manera, se logró priorizar las fuentes que requerían una mayor protección a través del Análisis Multicriterio, que empleó el método AHP y que al ser ejecutado la tasa de consistencia resultó aceptable (0.08). Finalmente, los resultados mostraron al Barreno y al Socavón de Guadalupe como las fuentes con alta prioridad de protección, a los manantiales Trancas y Bosque con prioridad media y con prioridad baja a la Laja, Ciénega 1 y 2, Palma y Peña.

SUMMARY

In Mexico, access to water resources in adequate quantity and quality is inequitable, with marginalized communities suffering the most from the consequences of the lack of access to this vital resource. In addition, the social problems resulting from the scarcity and/or contamination of the water used to supply the population are on the rise. Water flow systems are increasingly vulnerable due to anthropogenic pressures, with groundwater being the most important source of reserves and quality. For example, local flow systems, such as springs, generally supply the most dispersed communities with limited access to water, hence the importance of their proper management.

In this research, a hydrogeological and hydrogeochemical study was conducted on the groundwater supply sources in the mining region of Temascaltepec, State of Mexico. Based on the Multicriteria Analysis, those sources that were potentially affected in quantity and quality due to mining activities were prioritized for protection. The first step consisted of a search and analysis of bibliographic and cartographic information, which allowed us to obtain a series of maps that helped in the characterization of the study area; subsequently, we were able to spatially locate the mining estates and developments, as well as the subway water supply sources adjacent to them in order to select only those that had a direct relationship with the mines.

The hydrogeological functioning of the sources was determined and during the rainy and dry season of 2019, in situ physicochemical water sampling and flow measurements were carried out in order to classify the types of sources. For the delimitation of their protection zones, it was necessary to delimit the potential capture zones and estimate their annual recharge. In this way, it was possible to prioritize the sources that required greater protection through the Multicriteria Analysis that used the AHP method and that when executed, the consistency rate was acceptable (0.08). Finally, the results showed Barreno and Socavón de Guadalupe as the sources with high protection priority, Trancas and Bosque springs with medium priority and Laja, Ciénega 1 and 2, Palma and Peña with low priority.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA Y CONTEXTUAL	2
HIPÓTESIS	3
OBJETIVOS	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
1.1. Localización y características generales	5
1.2. Clima	6
1.3. Marco geológico	9
1.4. Hidrología.....	13
1.5. Uso de suelo y vegetación	15
1.6. Edafología.....	17
1.7. Aspectos sociodemográficos	20
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	24
2.1. La protección del agua subterránea como elemento clave para su manejo sustentable.....	24
2.2. La problemática de los recursos hídricos en entornos mineros	26
2.2.1. En un contexto global.....	26
2.2.2. En el contexto nacional	29
2.2.3. Estrategias para la protección de manantiales en entornos mineros	32
2.2.4. El AMC en un entorno SIG como herramienta para la protección de las fuentes de agua subterránea.....	38
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	44
3.1. Búsqueda y análisis de la información bibliográfica y cartográfica	45
3.2. Ubicación de los fundos y desarrollos mineros de la región así como de la selección de las principales fuentes aledañas	45
3.3. Caracterización hidrogeológica y fisicoquímica.....	46
3.3.1. Trabajo de gabinete	46
3.3.2. Trabajo de campo.....	46
3.3.3. Clasificación de las fuentes y selección del método de protección.....	49
3.4. Delimitación de las zonas de protección.....	49
3.4.1. Delimitación de las zonas de captura potencial	50

3.4.2. Estimación de las zonas de recarga	51
3.4.2.1. Justificación de la escala y el periodo del balance hídrico.....	52
3.4.2.2. Precipitación.....	53
3.4.2.3. Esguerrimiento superficial	55
3.4.2.4. Evapotranspiración real.....	58
3.4.2.5. Infiltración.....	58
3.4.3. Delimitación de las zonas de protección	59
3.4.4. Delimitación de las zonas de protección del Socavón de Guadalupe y Barreno de exploración.....	61
3.5. Priorización de las fuentes de abastecimiento mediante el Análisis Multicriterio	62
3.5.1. Definición del objetivo.....	63
3.5.2. Identificación de los factores	63
3.5.3. Reescalamiento de los factores.....	65
3.5.4. Ponderación de los factores.....	66
3.5.5. Agregación de los factores	67
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
4.1. Recopilación de la información disponible	68
4.2. Ubicación de los fundos y desarrollos mineros de la región así como de la selección de las fuentes aledañas	68
4.3. Caracterización hidrogeológica y físicoquímica.....	75
4.3.1. Trabajo de gabinete.....	75
4.3.2. Trabajo de campo.....	75
4.3.3. Clasificación de las fuentes de abastecimiento y delimitación de zonas de protección.....	90
4.4. Delimitación de las zonas de protección.....	91
4.4.1. Delimitación de las zonas de captura potencial	91
4.4.2. Estimación de las zonas de recarga de las fuentes	96
4.4.2.1. Justificación de la escala y el periodo del balance hídrico.....	96
4.4.2.2. Precipitación.....	96
4.4.2.3. Esguerrimiento superficial	99
4.4.2.4. Evapotranspiración real.....	108
4.4.2.5. Infiltración.....	111
4.4.3. Delimitación de las zonas de protección	114
4.4.3.1. Zonas de protección del Barreno y Socavón de Guadalupe.....	114

4.4.3.2. Zonas de protección del manantial La Ciénega 1 y 2.....	114
4.4.3.3. Zonas de protección del manantial La Laja	117
4.4.3.4. Zonas de protección del manantial El Bosque	117
4.4.3.5. Zonas de protección del manantial Las Trancas	120
4.4.3.6. Zonas de protección del manantial La Peña.....	120
4.4.3.7. Zonas de protección del manantial La Palma.....	120
4.5. Priorización de las fuentes de abastecimiento mediante el Análisis Multicriterio	124
4.5.1. Definición del objetivo.....	124
4.5.2. Identificación de los factores	124
4.5.3. Reescalamiento de los factores	127
4.5.4. Ponderación de los factores.....	128
4.5.5. Agregación de los factores	130
4.5.6. Priorización de las fuentes de abastecimiento a proteger.....	130
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	134
7. REFERENCIAS	137
8. ANEXOS.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio.....	5
Figura 1.2. Mapa de elevación.....	7
Figura 1.3. Mapa de climas.....	8
Figura 1.4. Mapa geológico.....	12
Figura 1.5. Sección longitudinal A- A'	13
Figura 1.6. Mapa hidrológico	14
Figura 1.7. Mapa de uso de suelo	16
Figura 1.8. Mapa edafológico.....	19
Figura 1.9. Pirámide poblacional por rango de edad del municipio de Temascaltepec.....	20
Figura 1.10. Disponibilidad en los servicios de vivienda del municipio.	20
Figura 1.11. Mapa de grado de marginación en las comunidades rurales del área de estudio	22
Figura 2.1. Efecto de la topografía en los patrones de flujo de las aguas subterráneas	33
Figura 2.2. Modelo idealizado de los manantiales de la cuenca de Thulokhola.....	34
Figura 2.3. Funciones de pertenencia difusa para reescalar factores	41

Figura 2.4. Estrategia de decisión triangular	43
Figura 3.1. Secuencia del proceso metodológico.	44
Figura 3.2. Ficha de identificación de los manantiales.....	48
Figura 3.3. Secuencia metodológica para la delimitación de las zonas de protección de los manantiales	50
Figura 3.4. Diagrama de Todd, que muestra la relación de la descarga media del manantial, la recarga media anual y el área de recarga.....	52
Figura 3.5. Descarga de las imágenes de temperatura y precipitación de la página de DAYMET.	54
Figura 3.6. Proceso para el cálculo de la precipitación media mensual del área de estudio.....	55
Figura 3.7. Descarga de las imágenes de ETr de la página de AppEEARS.	59
Figura 3.8. Cálculo de la infiltración mensual en TerrSet.	59
Figura 3.9. Delimitación del área de captura potencial de un manantial y de las zonas de protección I, II y III	60
Figura 3.10. Delimitación de la zona de protección en drenes de agua subterránea.	62
Figura 3.11. Secuencia metodológica para la selección de fuentes de abastecimiento de agua subterránea prioritarias para su protección utilizando el Análisis Multicriterio.....	63
Figura 4.1. Mapa de ubicación de los fundos, desarrollos mineros y las fuentes de agua.....	72
Figura 4.2. Mapa de ubicación de los fundos mineros y fuentes seleccionadas de agua.....	74
Figura 4.3. Entorno geológico y ubicación de fuentes de abastecimiento y actividades mineras.	76
Figura 4.4. Manantial Las Trancas.	77
Figura 4.5. Ficha de identificación del Socavón de Guadalupe.....	79
Figura 4.6. Antigua perforación minera Socavón de Guadalupe, El Peñón, Temascaltepec.....	82
Figura 4.7. Antigua perforación minera Barreno de exploración, El Peñón, Temascaltepec.....	83
Figura 4.8. Manantial La Ciénega 1 y 2, El Peñón, Temascaltepec.	84
Figura 4.9. Manantial La Laja, Cerro Pelón, Temascaltepec.	85
Figura 4.10. Manantial El Bosque, San Pedro Tenayac, Temascaltepec.....	86
Figura 4.11. Manantial Las Trancas, Las Trancas, Temascaltepec.	87
Figura 4.12. Manantial La Peña, San Francisco la Albarrada, Temascaltepec.....	88
Figura 4.13. Manantial La Palma, San Francisco la Albarrada, Temascaltepec.....	89
Figura 4.14. Zonas de captura potencial de las fuentes seleccionadas.	92
Figura 4.15. Zona de captura potencial del manantial La Ciénega 1 y 2.....	93
Figura 4.16. Zona de captura potencial del manantial La Laja.....	93
Figura 4.17. Zona de captura potencial del manantial El Bosque.	94
Figura 4.18. Zona de captura potencial del manantial Las Trancas.....	94

Figura 4.19. Zona de captura potencial del manantial La Peña.....	95
Figura 4.20. Zona de captura potencial del manantial La Palma.....	95
Figura 4.21. Histograma de precipitación media mensual de las zonas de captura potencial de las fuentes.....	96
Figura 4.22. Mapa de precipitación media anual de las zonas de captura de las fuentes (periodo 2003-2018).....	98
Figura 4.23. Tipo de suelo según su textura y zonas de captura potencial de las fuentes	100
Figura 4.24. Mapa de uso de suelo para el 2014 y zonas de captura potencial de las fuentes.....	102
Figura 4.25. Mapa de valores de K y zonas de captura potencial de las fuentes.....	103
Figura 4.26. Mapa de coeficiente de escurrimiento anual y zonas de captura potencial de las fuentes.	105
Figura 4.27. Mapa de escurrimiento superficial anual y zonas de captura de las fuentes.	106
Figura 4.28. Histograma de escurrimiento superficial mensual en cada una de las zonas de captación de las fuentes de agua.	107
Figura 4.29. Evapotranspiración real (ET _r) y potencial (ETP) anual del área de estudio.	108
Figura 4.30. Mapa de evapotranspiración real anual en las zonas de captura potencial de las fuentes (periodo 2003-2018).....	110
Figura 4.31. Histograma de evapotranspiración real mensual en las zonas de captura potencial de las fuentes.....	111
Figura 4.32. Mapa de infiltración anual en las zonas de captura potencial de las fuentes (periodo 2003-2018).....	112
Figura 4.33. Histograma de infiltración mensual en las zonas de captura potencial de las fuentes. .	113
Figura 4.34. Zona de protección de las fuentes Socavón-Barreno.	115
Figura 4.35. Zona de protección del manantial La Ciénega	116
Figura 4.36. Zona de protección del manantial La Laja.	118
Figura 4.37. Zona de protección del manantial El Bosque.....	119
Figura 4.38. Zona de protección del manantial Las Trancas.	121
Figura 4.39. Zona de protección del manantial La Peña.	122
Figura 4.40. Zona de protección del manantial La Palma.	123
Figura 4.41. Mapas reescalados.....	129
Figura 4.42. Mapa de prioridad de las fuentes de abastecimiento.....	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Población total y grado de marginación por localidad en el área de estudio	21
Tabla 2.1. Sustancias químicas utilizadas en las operaciones de mina subterránea.....	31
Tabla 2.2. Escala de puntaje para la comparación por pares.....	42
Tabla 3.1. Valores de K en función del tipo y uso de suelo.....	57
Tabla 4.1. Fuentes de abastecimiento localizadas aledañas a los fundos y desarrollos mineros	70
Tabla 4.2. Fuentes de agua subterránea seleccionadas.....	73
Tabla 4.3. Parámetros fisicoquímicos in situ del agua de las fuentes	78
Tabla 4.4. Parámetros fisicoquímicos in situ del agua de las minas.....	78
Tabla 4.5. Caudal de las fuentes de agua subterránea.....	90
Tabla 4.6. Precipitación media mensual y anual de las zonas de captura potencial de las fuentes (mm)	97
Tabla 4.7. Valores de K en función del tipo y uso de suelo.....	104
Tabla 4.8. Valores de K, Ce, y escurrimiento promedio anual (Q) de las fuentes.....	107
Tabla 4.9. Escurrimiento superficial mensual y anual de las zonas de captura potencial (mm)	107
Tabla 4.10. Valores anuales de Evapotranspiración en la zona de estudio por diferentes métodos.....	107
Tabla 4.11. Evapotranspiración real mensual y anual de las zonas de captura potencial de las fuentes (mm).....	111
Tabla 4.12. Infiltración anual y mensual de las zonas de captura potencial de las fuentes.....	113
Tabla 4.13. Evidencias de contaminación por metales las fuentes de abastecimiento.....	125
Tabla 4.14. Inclusión de los fundos mineros en las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento.....	126
Tabla 4.15. Número de habitantes abastecidos por cada fuente.....	126
Tabla 4.16. Fuente única de abastecimiento	127
Tabla 4.17. Coeficientes de ponderación de los factores y sus pesos.	130

INTRODUCCIÓN

La escasez junto con la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado repercuten en la seguridad alimentaria, en la salud de la población, en los medios de subsistencia y en la oportunidad de educación para las familias de escasos recursos en todo el mundo (ONU, 2020). De igual manera, se requieren mayores cantidades de agua para la producción de alimentos que abastezcan a las crecientes poblaciones. Las aguas subterráneas representan una fuente muy importante para el riego; al mismo tiempo seguirán siendo la fuente predominante de agua doméstica para la población rural de los países en desarrollo (Foster et al., 2000).

En México, el 38.9% del volumen total concesionado para usos consuntivos procede de agua subterránea (CONAGUA-SEMARNAT, 2018a). Esta tiene una hidrodinámica que responde a flujos locales que alimentan manantiales, flujos intermedios que nutren acuíferos superficiales y flujos regionales vinculados con acuíferos profundos. (Agua para todos, 2014). Los sistemas de flujo locales (que nutren manantiales) son de gran importancia en la actualidad debido a la escala de tiempo, la cual es suficientemente corta para reaccionar a las actividades humanas (Blanco, 2021).

Al experimentar una creciente amenaza por contaminación, resulta necesario la zonificación de la protección para el control de la calidad de las aguas subterráneas, basado en criterios sostenibilidad ambiental como con criterios más limitados de beneficio económico, de tal manera que se garantice tanto el equilibrio de la protección de los recursos de aguas subterráneas y fuentes específicas como pozos y manantiales (Foster, 2003).

El área de estudio se localiza en la región minera en Temascaltepec, Estado de México, donde se pone de manifiesto la necesidad de protección de aquellas fuentes de agua subterránea que son de uso y consumo humano, y que son potencialmente afectadas en cantidad y calidad por los desarrollos mineros. En este sentido, el presente trabajo pretende priorizar la protección de dichas fuentes a través de la aplicación del Análisis Multicriterio en un entorno SIG, debido a que es una herramienta que permite lidiar con la jerarquización de muchas alternativas para seleccionar la que mejor se adecue a la solución del problema.

JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA Y CONTEXTUAL

Desde el punto de vista contextual, alcanzar el manejo sustentable de las aguas subterráneas es vital para proveer una mejor calidad de vida a las personas y ecosistemas; además, permite impulsar el desarrollo social y económico de las naciones, así como lograr la reducción de la pobreza.

La adecuada planificación de los recursos hídricos es una tarea compleja en la que se necesita la colaboración de todos los actores involucrados para lograr la protección de las fuentes agua, de igual manera, debe existir prioridad en las zonas en las que la contaminación puede afectar a un manantial o pozo de bombeo que provee de agua potable a las comunidades.

En el Estado de México, la marginación social muchas veces se vincula con el acceso inadecuado a un sistema de agua potable, donde la cantidad y la calidad no son suficientes para satisfacer las necesidades básicas de las personas, es ahí donde la vulnerabilidad socioambiental cobra mayor fuerza desencadenando una serie de problemas vinculados al agua, principalmente los relacionados con la salud humana debido a que el agua contaminada es un importante transmisor de enfermedades.

Tal es el caso del municipio de Temascaltepec, donde la única fuente de agua para uso y consumo humano son las fuentes de agua subterránea localizadas en la serranía; sin embargo, el municipio es un territorio minero; actividad que causa un riesgo latente de afectación al caudal y a la calidad del agua subterránea, y por ende a la salud y bienestar de la población; por lo tanto, establecer estrategias de protección para las fuentes de abastecimiento de agua es una tarea de gran relevancia.

En este marco contextual, la justificación científica de esta investigación se basa en la implementación de una metodología aplicable para el área de estudio y para otras regiones de similares características, esta permitirá priorizar fuentes de agua subterránea de acuerdo a sus necesidades de protección, mediante la aplicación del Análisis Multicriterio en un entorno SIG, esto facilitará el manejo sustentable del recurso hídrico de las fuentes para la conservación de su cantidad y calidad.

HIPÓTESIS

El análisis de las características hidrológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas mediante el Análisis Multicriterio en un entorno SIG, de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea cercanas a los desarrollos mineros localizadas en la región minera de Temascaltepec, permitirá la priorización de dichas fuentes de acuerdo con sus potenciales afectaciones en cantidad y calidad por la actividad minera y posteriormente se definirán medidas para su protección.

OBJETIVOS

Objetivo general

Priorizar las fuentes de abastecimiento de agua subterránea localizadas en la región minera de Temascaltepec, Estado de México, mediante el Análisis Multicriterio en un entorno SIG para definir medidas de protección considerando las potenciales afectaciones en cantidad y calidad por la actividad minera.

Objetivos específicos

1. Recopilar, seleccionar y analizar documentos afines al área de estudio y con la problemática en cuestión, para conformar una base de datos eficiente.
2. Localizar los desarrollos mineros de la región de estudio y las fuentes de abastecimiento aledañas, lo que permitirá seleccionar aquellas con mayor riesgo de afectación.
3. Caracterizar hidrogeológicamente el entorno de las fuentes de abastecimiento y sus aguas desde el punto de vista físico-químico, con la finalidad de establecer el tipo de fuente y la calidad de sus aguas.
4. Delimitar las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento para determinar si los desarrollos mineros pueden tener influencia sobre la cantidad y calidad del agua de las fuentes.
5. Priorizar las fuentes de abastecimiento de agua subterránea mediante el Análisis Multicriterio en un entorno SIG para su protección y propuesta de medidas de protección

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1. Localización y características generales

El área de estudio se localiza entre los paralelos 19°00' y 19°07' de latitud norte y los meridianos 100°03' y 100°12' de longitud oeste. Abarca una extensión territorial de 188 km² y se encuentra dentro de la región minera del municipio de Temascaltepec, aunque parcialmente abarca el municipio de Valle de Bravo, ambos del Estado de México (Figura 1.1).

El área se caracteriza por la presencia de la Sierra de Temascaltepec, complejo orográfico de mayor importancia dentro del municipio y que representa una prolongación del Nevado de Toluca (H. Ayuntamiento de Temascaltepec, 2004), atraviesa el área de este a oeste. Entre las elevaciones más importantes se encuentra el cerro El Peñón, localizado al suroeste de la mina La Guitarra en la comunidad que lleva el mismo nombre.

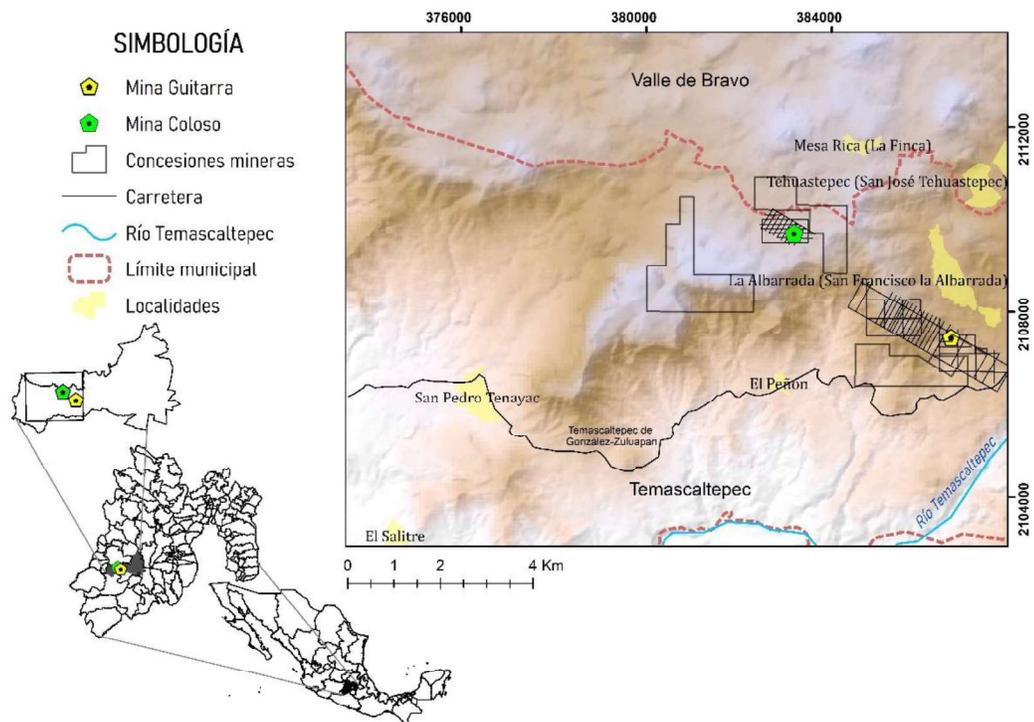


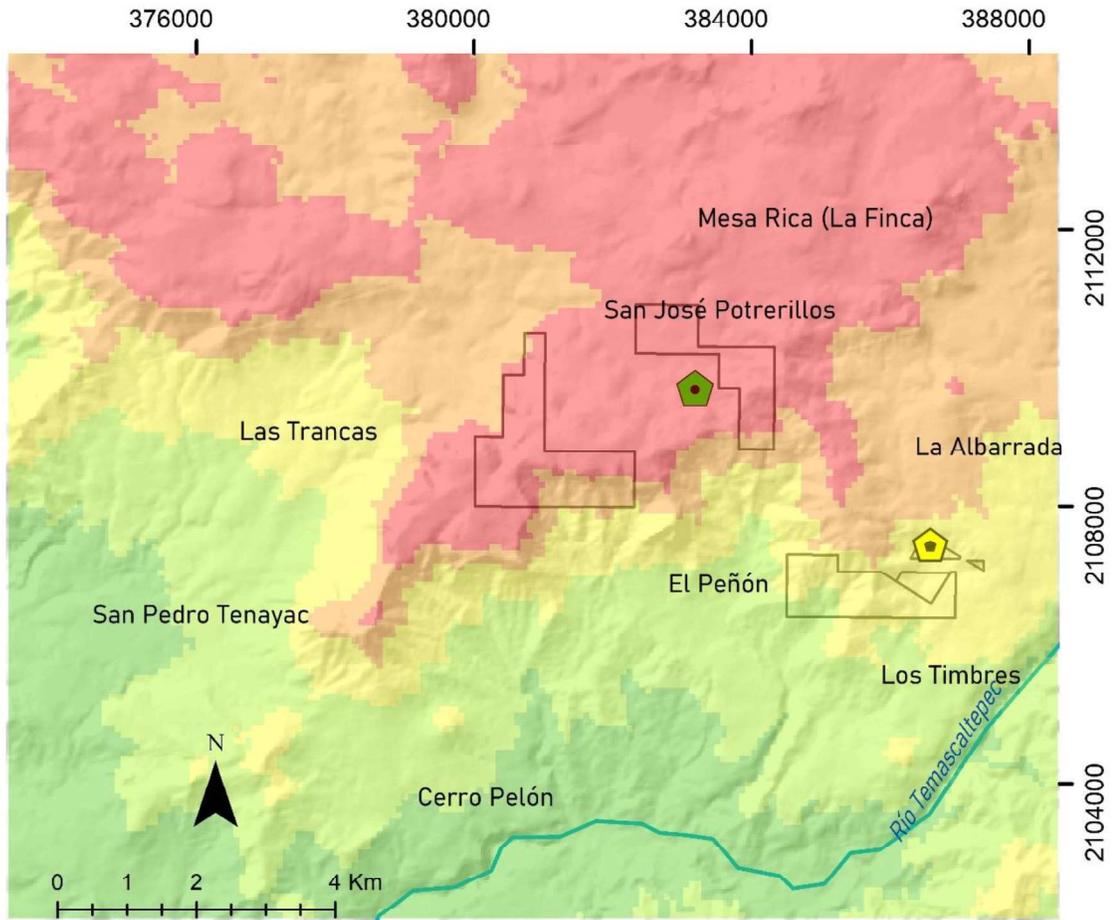
Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio (Con base en IFOMEGEM, 2014).

Dentro de área de estudio se ubican las localidades de El Peñón, Cerro Pelón, San Pedro Tenayac, Las Trancas y San Francisco La Albarrada.

1.2. Clima

El área de estudio presenta tres climas que están relacionados principalmente con la elevación (H. Ayuntamiento de Temascaltepec, 2004). La Figura 1.2 muestra que las elevaciones en el área de estudio varían desde los 1,407 msnm hasta alcanzar los 2,699 msnm en la comunidad de San José Potrerillos. La clasificación climática generada por el IFOMEGEM (2014) y con base en la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, identifica tres tipos de climas predominantes (Figura 1.3).

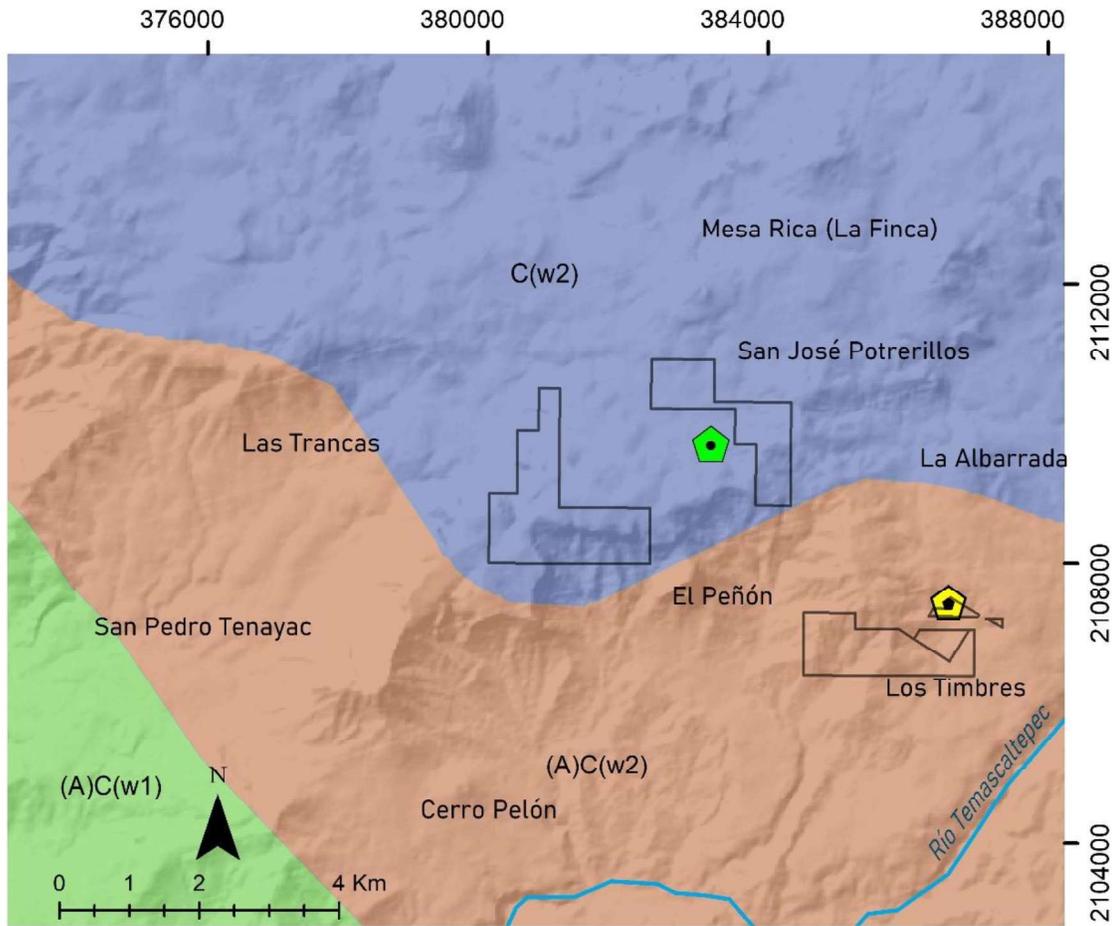
Al norte un clima templado subhúmedo C(w2) con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, el mes más frío varía entre -3°C y 18°C. En la zona centro y sur predomina un clima semicálido, templado-subhúmedo (A)C(w2), donde la temperatura media anual es de 18°C mientras que la temperatura del mes más caliente es mayor a 22°C y el mes más frío es menor a 18°C. Finalmente, hacia la porción suroccidental se localiza un clima (A)C(w1) con las mismas características que el clima anterior.



SIMBOLOGÍA



Figura 1.2. Mapa de elevación (con base en IFOMEGEM, 2014).



SIMBOLOGÍA

- | | | | | |
|---|---------------------|-------|---|--|
|  | Mina Guitarra | Clima |  | (A)C(w1) Semiclaído templado-subhúmedo |
|  | Mina Coloso | |  | (A)C(w2) Semiclaído templado-subhúmedo |
|  | Río Temascaltepec | |  | C(w2) Templado-subhúmedo |
|  | Concesiones mineras | | | |

Figura 1.3. Mapa de climas (con base en IFOMEGEM, 2014).

1.3. Marco geológico

De acuerdo con Damon et al. (1981) y Clark et al. (1982), el municipio de Temascaltepec se encuentra enclavado al extremo suroeste del cinturón de depósitos epitermales polimetálicos de México, motivo por el cual Camprubí et al. (2001), lo definen como el Cinturón Ignimbrítico Mexicano (o Sierra Madre Occidental), parcialmente superpuesto por el Cinturón Volcánico Transmexicano.

El cinturón ignimbrítico mexicano fue un proceso de levantamiento y erosión que ocurrió durante los últimos años del Eoceno al Oligoceno, donde fueron depositadas rocas ignimbritas, tobas riolíticas y andesitas (Camprubí et al., 2001). El ensamble volcánico calcialcalino forma un espesor de 350 m de riolita que incluye el cuello del Cerro del Peñón en Temascaltepec, con asociados radiales y no radiales de diques riolíticos que atraviesan material inífujo. De igual forma, en el área de estudio se presenta otra unidad que pertenece a este cinturón, y está formada por augita basal, flujos de andesita de 300 m de espesor, los cuales se encuentran cubiertos por series de riolita-ignimbrita.

En la zona de Temascaltepec se producen tres conjuntos de venas principales de NW a SE: El Coloso, La Guitarra, y Mina de Agua, las cuales, según estudios geológicos, se formaron a partir de una sola vena epitermal (Camprubí et al., 2001). El yacimiento más importante del distrito es el sistema La Guitarra, fue explotada para Ag-Au debido a que está compuesta por varios filones encajados en un stock granítico tardi-larámide (Figura 1.4), y se relaciona temporal y genéticamente con el vulcanismo andesítico-riolítico de la Sierra Madre Occidental (Camprubí, 1998).

El desplazamiento del afloramiento longitudinal del depósito de la vena formado por La Guitarra y El Coloso tiene en total más de 3.5 km, con una extensión vertical observable de unos 500 m y un grosor máximo de las venas de unos 15 a 20 m, con un promedio de 5 m. El depósito de La Guitarra es alojado en la suite de granito de la última Larámida, mientras que el de las venas de la zona de El Coloso se halla alojada en unidades cubiertas por los flujos de basalto y andesita del Cinturón Volcánico Transmexicano. Las venas epitermales fueron fechadas en $32.9 \pm 0,1$ y $33,3 \pm 0,1$ Ma, por el método $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ en muestras de adularia (Camprubí et al., 2006).

Las numerosas fracturas que se encuentran en el área de estudio se distribuyen principalmente entre los poblados de San Pedro Tenayac, El Peñón y La Alabarrada; en cuanto a fallas, se localiza una hacia el oriente y con sentido de norte a suroeste, cercana a la mina La Guitarra. Tanto las fracturas como las fallas están asociadas al vulcanismo y mineralización.

Alarcón (2006), describe las secuencias de unidades litológicas localizadas en el municipio de Temascaltepec (Figura 1.4), donde las rocas más antiguas que son del mesozoico están constituidas por pizarra y esquisto (unidad litológica Ji?(E-Pz)) de la denominada Serie o Secuencia vulcanosedimentaria metamorfizada. A continuación, se presenta la descripción de las secuencias:

Secuencia vulcano-sedimentaria metamorfizada. Según Elías et al. (1996), se encuentra ampliamente distribuidas hacia el sur del municipio y es una secuencia metavolcánica-sedimentaria (unidad KapMvs), también denominada “Secuencia metamórfica Tejupilco” donde las facies de esquisto verde tienen un metamorfismo de bajo grado que pertenece al basamento del municipio junto con la pizarra y filita.

Miembro inferior de la Formación Acapetlahuaya. Son alternancias de estratos de roca andesítica intercalada con arenisca, lutita, y toba de grano fino semiesquistosa (unidad KvKhMA-Mar), cuya edad data del Cretácico, estas a su vez cubren la secuencia anterior en algunos lugares al oriente y al occidente (Elías et al., 1996).

Miembro superior de la Formación Acapetlahuaya. Consiste en una alternancia de metacaliza de estratificación delgada y metalutita (unidad KapkaMcz-Mlu), con una edad Aptiano del Cretácico Inferior. Aflora al sur de la ciudad de Temascaltepec y se observa en el km 76 de la Carretera Federal No.134, que conduce a la ciudad de Tejupilco (Alarcón, 2006).

Formación Tizapotla. Formación del Oligoceno-Mioceno que aflora al oriente de San Pedro Tenayac, en la Sierra de los Tres Reyes, al norte del cono cinerítico denominado Cerro Pelón. Su afloramiento está constituido por brecha volcánica riolítica, toba lítica, toba riolítica, riolita, y toba vitrolítica riolítica y dacítica (unidad TmPr).

Rocas graníticas. La gran intrusión de granito (unidad ToGr), que forma esencialmente la Sierra de La Guitarra, es una roca equigranular, de grano medio a grueso; contiene ortoclasa,

cuarzo, biotita y, en algunas partes, presenta fenocristales de plagioclasa. En numerosos sitios el intemperismo ha causado una intensa disgregación, dando lugar a la producción de arena feldespática. La edad de este cuerpo intrusivo ha sido determinada por el método radiométrico K-Ar en 32 m.a., correspondiente al Oligoceno (Alarcón, 2006).

Aluvión. Se encuentran los derivados de rocas preexistentes al sur del Cerro Peñón, y que están constituidos por arcilla, arena, grava y aglomerados (unidad Qhoal).

La sección estratigráfica se tomó como base en la carta geológica de Valle de Bravo E14-A46 del Servicio Geológico Mexicano (2002). El perfil longitudinal se muestra con dirección centro-sureste (A-A') al sur de las minas El Coloso y La Guitarra (Figura 1.5). En este perfil, se observa un afloramiento de intrusión de granito (ToGr) que entra en contacto con el metamorfismo de esquisto-pizarra (unidad litológica Ji?E-Pz); asimismo, en la zona centro (A), se encuentran depósitos de ignimbrita-riolita (ToIg-R) sobre el material metamórfico, mientras que para la zona sureste (A') se muestra presencia de metandesíta-metarenisca (KakvMA-Mar) depositado sobre el esquisto-pizarra (Ji?E-Pz), es en este punto donde una falla inversa atraviesa ambas capas litológicas donde igualmente se deposita una capa de lahar (TpiLh) que está cubierta por basalto (QptB).

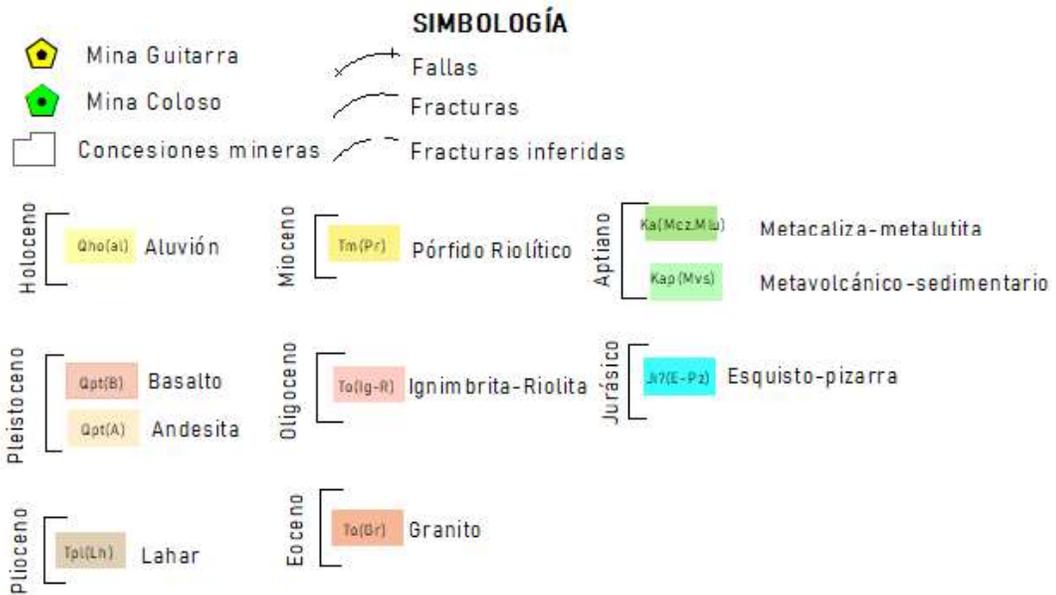
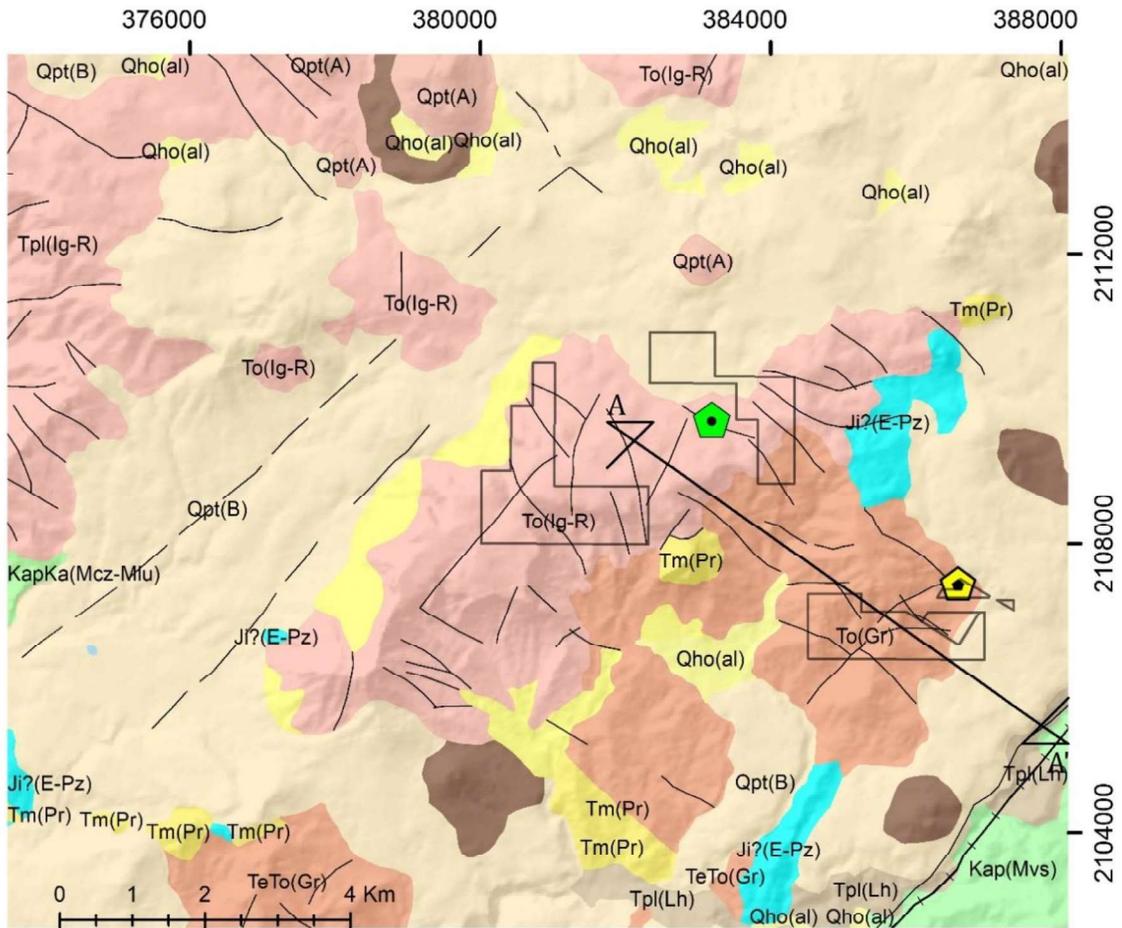


Figura 1.4. Mapa geológico (Con base en IFOMEGEM, 2014).

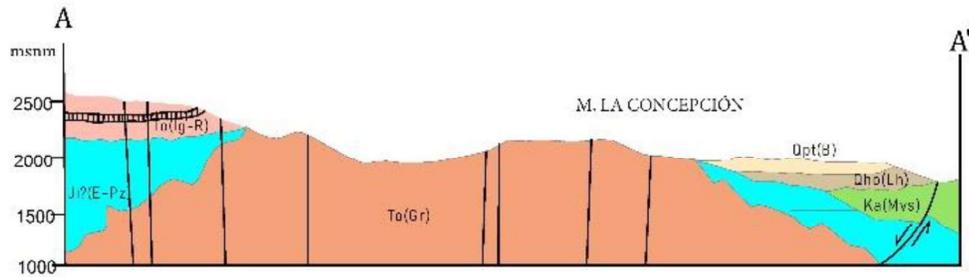
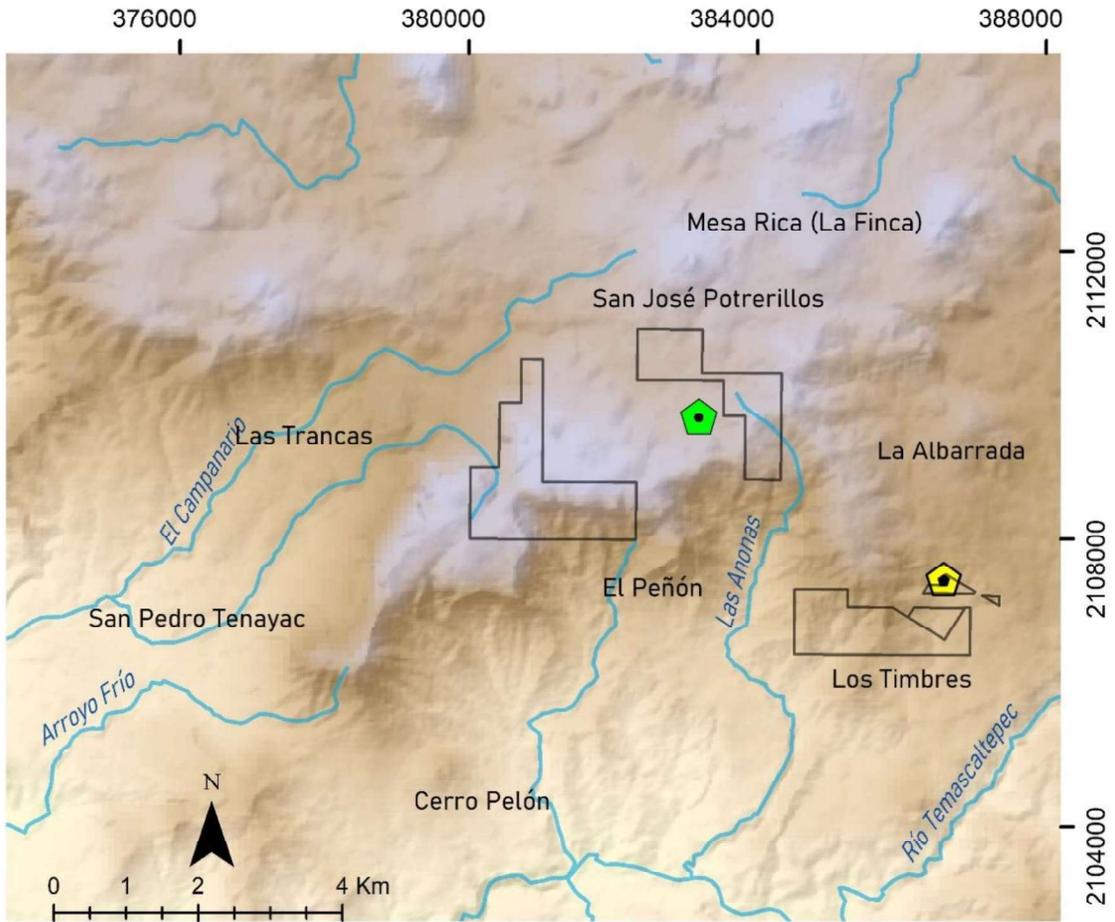


Figura 1.5. Sección longitudinal A- A' (Con base en SGM, 2000).

1.4. Hidrología

El área de estudio se ubica entre las cuencas de los ríos Balsas-Mezcala al oriente y en la cuenca del Río Cutzamala al poniente, ambas pertenecen a la Región Hidrológica del Río Balsas. Osorio (2018), menciona que en la cuenca Cutzamala se encuentra la Subcuenca del Río Temascaltepec que cubre una superficie de 1,224 km², donde el río Temascaltepec es la afluente de mayor importancia, además nace de la confluencia entre el río Verde y el río Vado, ambas fuentes se originan en el volcán Xinantécatl; posteriormente, aguas abajo el río Temascaltepec recibe el nombre de río Grande.

La subcuenca del Río Temascaltepec se extiende aproximadamente en el 90% de la superficie municipal, cuya conformación se encuentra dada por el parteaguas sur y poniente del Nevado de Toluca (H. Ayuntamiento de Temascaltepec, 2004). El arroyo Las Anonas nace cercano de la mina El Coloso, conecta aguas abajo con el río Temascaltepec y recibe por su margen izquierdo al arroyo Los Sabinos (CONAGUA, 2018b). Finalmente, el río Temascaltepec continúa hacia el sur convertido en el río Pungarancha para desembocar con el nombre de Cutzamala en el río Balsas (Alarcón, 2006) (Figura 1.6).



SIMBOLOGÍA

-  Concesiones mineras
-  Mina Coloso
-  Mina Guitarra
-  Rios

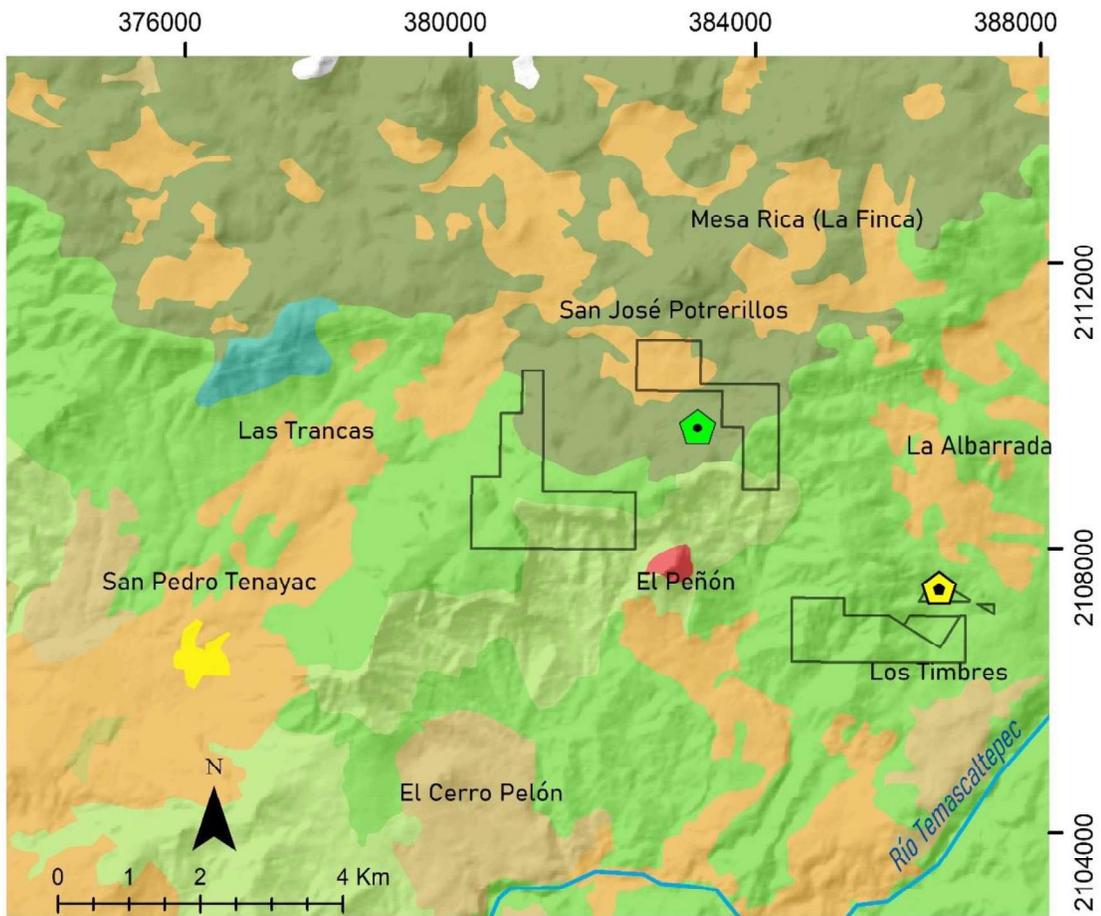
Figura 1.6. Mapa hidrológico (Con base en IFOMEGEM, 2014).

1.5. Uso de suelo y vegetación

En el municipio de Temascaltepec existe una gran variedad de flora que incluyen la presencia de vegetación de selva baja, bosques de transición, bosques de clima templado frío y zonas de pastizales de alta montaña (H. Ayuntamiento de Temascaltepec, 2016). En la zona de influencia este-centro el uso de suelo es urbano, boscoso en las zonas noreste, oriente y sureste, mientras que, en los puntos noroeste, occidente y suroeste predomina el uso pecuario (Osorio, 2018).

Rojas et al. (2016), realizaron la descripción y cartografía de las comunidades vegetales del municipio. En la Figura 1.7 se aprecia que la zona norte del área de estudio, primordialmente la ocupan especies de bosque de pino y algunas manchas de uso agrícola-pecuario. Esto se logra identificar en altitudes por encima de los 1,900 msnm. La especie vegetal de bosque *Quercus* se distribuye principalmente en esta zona. Este bosque puede encontrarse en relación cercana al bosque tropical caducifolio, pastizal, cultivos y vegetación secundaria (Rojas et al., 2016).

En la comunidad de San Pedro Tenayac se identifica el uso de suelo urbano, así como el agrícola-pecuario seguido de pastizal inducido y bosque de pino-encino, estas especies vegetales se encuentran entremezcladas de manera heterogénea. Lo mismo pasa en las comunidades de Las Trancas, El Peñón, La Albarrada y Tehuastepec, donde gran parte del uso del suelo agrícola-pecuario está rodeado por especies de bosque de pino-encino. Finalmente, el bosque mesófilo de montaña ocupa una pequeña porción de territorio al noroeste de la zona de estudio, y se halla en altitudes que varían desde los 1,900 a los 2,600 msnm.



SIMBOLOGÍA

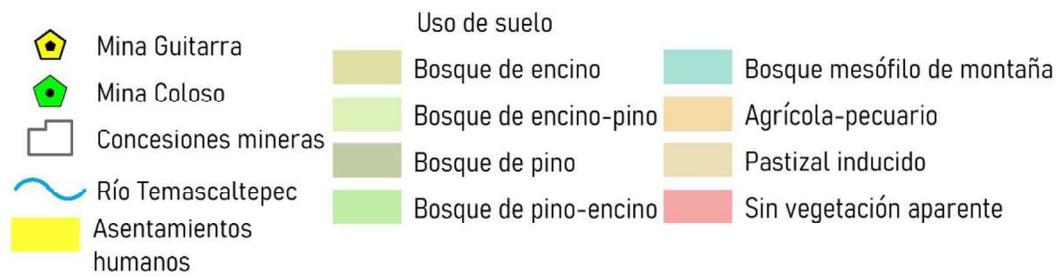


Figura 1.7. Mapa de uso de suelo (Con base en IFOMEGEM, 2014).

1.6. Edafología

El área de estudio está caracterizada por siete tipos de suelos, que son: Cambisol, Leptosol, Luvisol, Feozem, Regosol, Vertisol y Andosol (Figura 1.8), siendo los suelos tipos andosol y cambisol los que cubren una mayor superficie. Las características principales de estos suelos son descritas a continuación con base en lo publicado por la FAO (2014) y la USDA (1999).

Andosoles

Suelos de eyecciones volcánicas ricas en vidrio casi bajo cualquier clima (a excepción de zonas hiper áridas). Estos tienen alta capacidad de retención de humedad y susceptibles a la erosión eólica, son ricos en materia orgánica con alta cantidad de fósforo, pero muy ácida y pobre en nutrientes. La extensión de este tipo de suelos abarca la porción norte con un área de 53.55 km² y un porcentaje de superficie total del 28.37 %.

Cambisoles

Suelos constituidos por material de textura fina y se caracterizan por la ausencia de una capa de acumulación de arcilla y humus. Estos tienen evidentes cambios en su estructura, color, contenido de arcilla o contenido de carbonato. Se localizan principalmente en la zona centro del área de estudio, aunque también en pequeñas porciones hacia el sureste y suroeste. Tienen una extensión territorial del 51.83 km², lo que representa el 27.45 % del área total.

Leptosoles

Suelos pedregosos extremadamente jóvenes y delgados limitados en profundidad por una roca dura como el tepetate o caliche dentro de los 10 cm primeros de profundidad, se presentan en donde la erosión natural impide que el suelo alcance un cierto espesor (zonas abruptas de las montañas). Estos se distribuyen en la porción noroeste, sur y sureste del área de estudio, ocupando una extensión de 22.14 km² y representando el 11.73 % del total del territorio.

Luvisoles

Suelo con un mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en la superficie debido a procesos pedogenéticos, cuentan con un alto contenido de nutrientes y buen drenaje, técnicamente son caracterizados por una acumulación de humus y provienen de un material materno de gran variedad tanto de materiales no consolidados como depósitos aluviales y eólicos. Los Luvisoles cuentan con una textura fina y se localizan al oeste, sur y sureste del área de estudio con 33.37 km² que representan el 17.67 % del área total.

Feozem

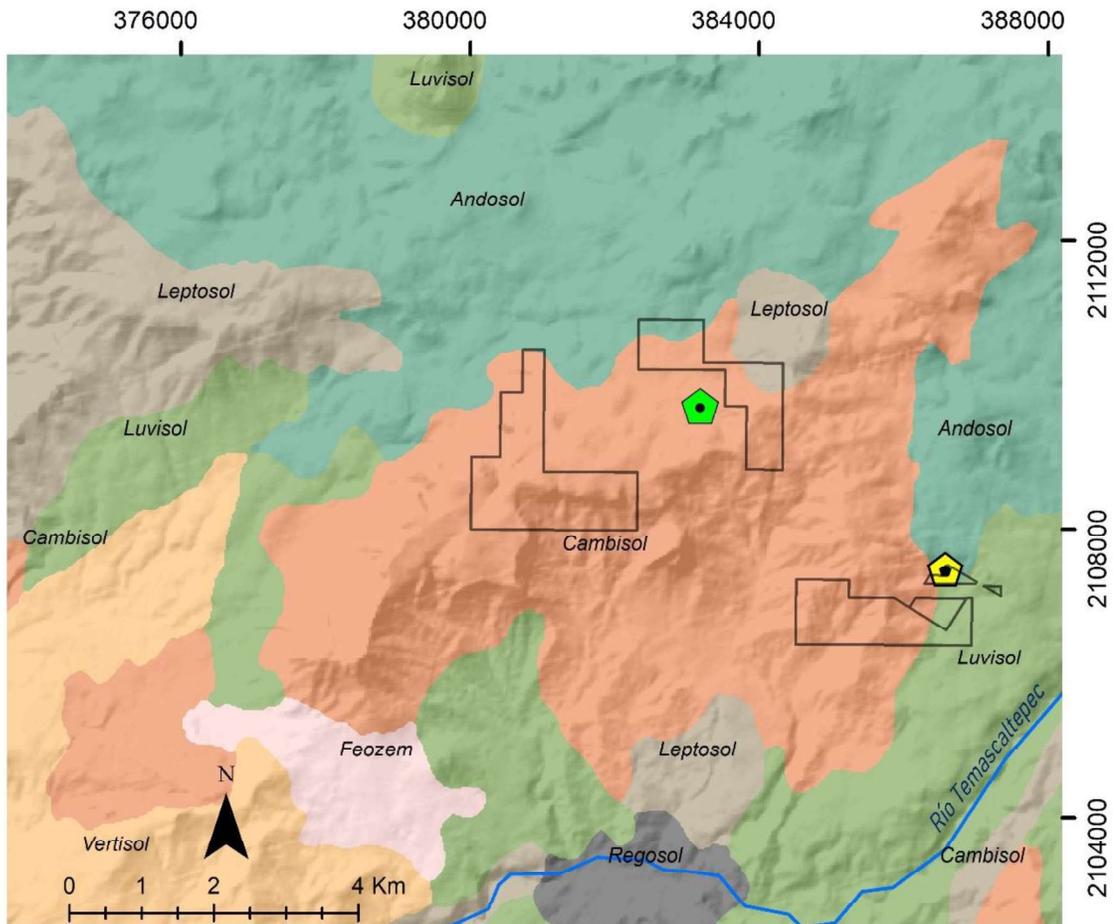
Suelos con textura media, generalmente profundos y situados en superficies planas. Este tipo de suelo tiene una extensión bastante pequeña, de 4.59 km², y se encuentra distribuido al suroeste del área de estudio. Representan el 2.43 % del área total.

Regosoles

Suelos jóvenes y poco evolucionados caracterizados por su poca profundidad, cuentan con una textura fina y son originados por material parental no consolidado principalmente de origen aluvial, están caracterizados por la ausencia de horizontes. Estos tienen poca distribución al sur del área de estudio, con una extensión de 4.23 km² y un porcentaje del 2.24 % del área total.

Vertisoles

Suelos con un alto contenido de arcilla expansiva que se forman en rocas como el basalto, cuentan con una textura uniforme fina o muy fina y un bajo contenido de materia orgánica. Son formados por hidrólisis progresiva de la roca subyacente y algunos otros son formados en sedimentos de textura fina. Específicamente, en el área de estudio se encuentran localizados en la proporción oeste y suroeste de la zona, cubriendo un área total de 19 km² y un porcentaje de superficie del 10 %.



SIMBOLOGÍA

	Mina Guitarra	Tipo de suelo		Luvisol	
	Mina Coloso		Andosol		Feozem
	Río Temascaltepec		Cambisol		Regosol
	Concesiones mineras		Leptosol		Vertisol

Figura 1.8. Mapa edafológico (Con base en IFOMEGEM, 2014).

1.7. Aspectos sociodemográficos

Con base en el Panorama Sociodemográfico del Estado de México del INEGI (2020), la población total del municipio de Temascaltepec estimada para dicho año fue de 35,014 habitantes, cifra que representa el 0.2 % de la población estatal. Por cada 96 hombres hay 100 mujeres y la edad media poblacional es de alrededor de 23 años. La Figura 1.9 representa la pirámide poblacional en cuanto a porcentaje de habitantes y rangos de edad en el municipio para el año 2020.

El porcentaje de población que tenía disponibilidad a los servicios de vivienda en el año 2015 se muestra en la Figura 1.10. El 30.6 % de la población contaba con disponibilidad de agua entubada; 76.2 % con disponibilidad de drenaje; 79.6 % contaban con servicio sanitario; y 97.3 % de la población tenían acceso a la electricidad (INEGI, 2015).

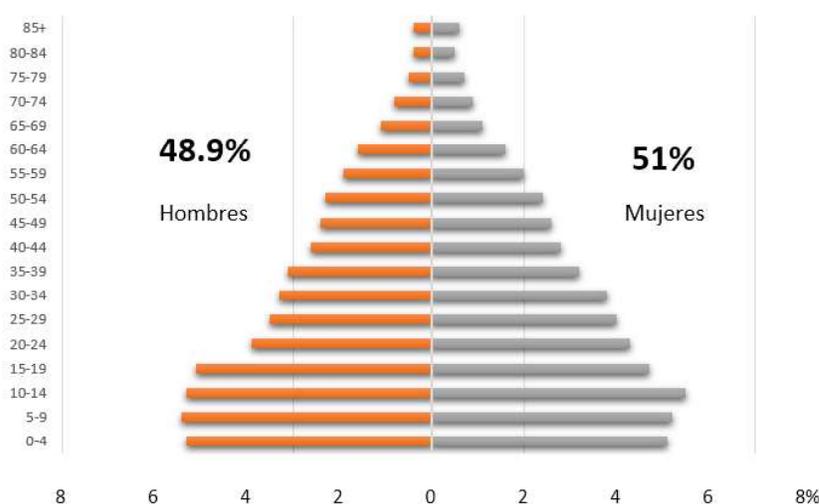


Figura 1.9. Pirámide poblacional por rango de edad del municipio de Temascaltepec (INEGI, 2020).

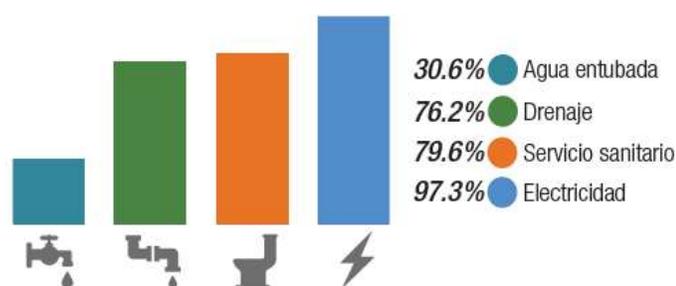


Figura 1.10. Disponibilidad en los servicios de vivienda del municipio (INEGI, 2015).

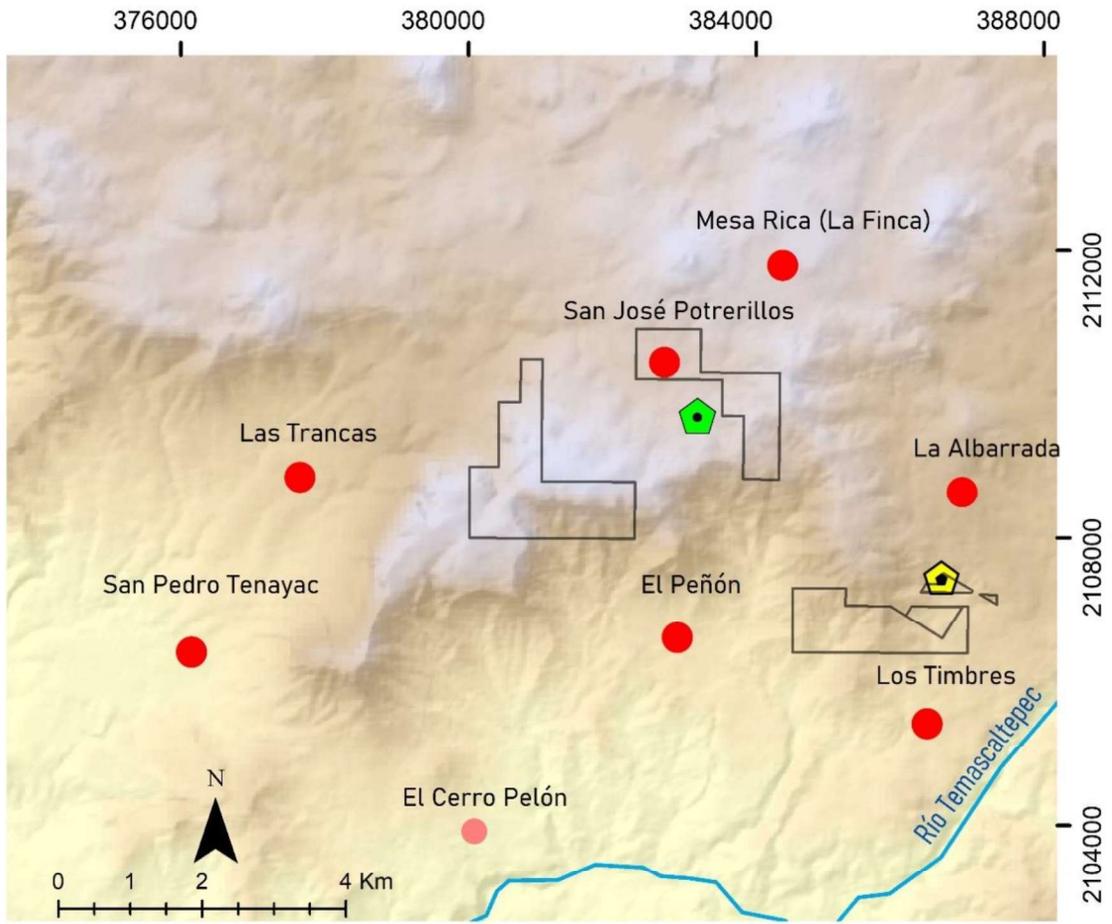
El municipio se ubica en el cuarto lugar por tamaño de población en relación con los pueblos indígenas originarios del Estado, donde predominan la cultura matlatzinca, náhuatl, otomí y mazahua. En 2018 existía un total de 1,214 hablantes de lengua matlatzinca y 772 de lengua náhuatl (H. Ayuntamiento de Temascaltepec, 2019).

Entre otros datos, en 2015 la población que se encontraba en pobreza representaba el 78.2% del total de población, de los cuales 56.2% en pobreza moderada y el 22.1% en pobreza extrema. Además, en relación con tema educativo, la condición de rezago afectó a 29.1% de la población (CONEVAL, 2015).

La Tabla 1.1 muestra las localidades que pertenecen al área de estudio, se observa el número de habitantes por localidad y su grado de marginación social. De manera similar se presenta un mapa con los datos de marginación (Figura 1.11).

Tabla 1.1. Población total y grado de marginación por localidad en el área de estudio (INEGI, 2020).

Localidad	Población total	Grado de marginación	Ámbito
La Albarrada (San Francisco la Albarrada)	1541	Alto	Rural
Mesa Rica (La Finca)	618	Alto	Rural
El Peñón	590	Alto	Rural
San José Potrerillos	1335	Alto	Rural
San Pedro Tenayac	2326	Alto	Rural
Los Timbres	290	Alto	Rural
Las Trancas	30	Alto	Rural
El Cerro Pelón	570	Medio	Rural



SIMBOLOGÍA

- | | | |
|---|---------------------|---|
|  | Mina Guitarra | Grado de marginación |
|  | Mina Coloso | |
|  | Río Temascaltepec |  Medio |
|  | Concesiones mineras |  Alto |

Figura 1.11. Mapa de grado de marginación en las comunidades rurales del área de estudio (Con base en CONABIO, 2010).

CONEVAL (2015), señaló que el 86.1% de la población total del municipio carecía de acceso a la seguridad social, 25% a servicios de salud y 21.6% reportó habitar en viviendas de mala calidad. Por su parte, INEGI indicó que el 9.1 % de la población no contaba con escolaridad, el 73.8 % tenía solamente el nivel básico, mientras que el 11.4% habían cursado el nivel medio superior y solamente el 5.4 % contaba con el nivel superior; además, el 0.3% no especificó algún nivel de escolaridad. Por otro lado, la tasa de alfabetización alcanzaba el 98.8 % en personas con edad entre 15 a 24 años y el 85.2 % entre 25 y más años.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. La protección del agua subterránea como elemento clave para su manejo sustentable

Actualmente, 3,600 millones de personas en todo el mundo viven en áreas con escasez de agua por lo menos un mes al año (OMS, 2019). Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, esto podría alcanzar de 4,800 a 5,700 millones para el 2050 (UN-Water, 2019). Asimismo, la Organización Mundial de la Salud (2019), señala que 844 millones de personas en todo el mundo no cuentan con la disponibilidad al servicio de agua potable, y de los cuales, alrededor de 2,000 millones de personas hacen uso de agua contaminada por no tener acceso a otras fuentes de suministro.

En el caso de las aguas subterráneas representan un recurso natural vital para el suministro económico y seguro de agua potable tanto en entornos urbanos como rurales, además, juegan un papel fundamental (a menudo poco apreciado) en el bienestar humano, así como en el de muchos ecosistemas acuáticos (Foster et al., 2015).

El considerar a las aguas subterráneas a la hora de planificar un proyecto de extracción es importante, debido a que los desafíos más graves que confrontan los acuíferos y la gestión del agua se relacionan directamente con el manejo irresponsable del recurso hídrico (AECID, 2017). Algunos autores, como Martínez y Patiño (2012), proyectaron que para el año 2030 varias regiones hidrológicas de México tendrán condiciones de disponibilidad extremadamente bajas. Por lo que, las campañas proactivas y las medidas prácticas para proteger la (generalmente excelente) calidad de las aguas subterráneas, son indispensables y pueden ser justificadas tanto por la necesidad de su sostenibilidad como por criterios de beneficio económico (Foster et al., 2015).

La protección de las aguas subterráneas requiere una gestión y preservación óptima para asegurar su disponibilidad, motivo por el cual la planificación correcta de la gestión de las aguas subterráneas debe basarse en estudios específicos, destinados a caracterizar las masas de agua subterránea en términos de calidad y cantidad, definiendo los valores umbrales de los contaminantes en agua, y delimitando las zonas de protección de las fuentes que proporcionan agua considerada como potable (Doveri et al., 2015).

Dicho lo anterior, es necesario que el agua subterránea sea un recurso de importancia estratégica, por lo cual es vital su explotación siguiendo criterios sustentables (Pérez, 2002). Gleeson et al. (2012), consideran que la sostenibilidad de las aguas subterráneas es un valor impulsado por un proceso de equidad intra e intergeneracional que equilibra el medio ambiente, la sociedad y la economía.

Kinzelbach y Kunstmann (1998), exponen algunos criterios básicos para alcanzar el uso sustentable del agua subterránea, representándolos de forma cuantitativa y cualitativa. Los aspectos cuantitativos consideran aquellos lineamientos que deben respetar los límites para la explotación de agua y la tasa de renovación del acuífero, además de conservar el caudal mínimo de las corrientes y humedales que dependen de ella, asimismo, mencionan que la sobreexplotación debe ser controlada a corto plazo para no generar daños irreparables a los acuíferos y ecosistemas. Por otro lado, los aspectos cualitativos, se basan en prevenir la contaminación incluyendo la intrusión salina en acuíferos costeros; en este sentido, se debe considerar que la contaminación de cuerpos de agua subterránea puede afectar a otros cuerpos de agua superficiales o costeros, e incluso a diversos recursos naturales (ejemplo; los suelos sufren el fenómeno de la salinización).

Según datos de la ONU (2020), lograr la sustentabilidad del recurso hídrico requiere de un especial énfasis en entornos rurales vulnerables, ya que este recurso representa un gran cambio de paradigma a nivel mundial. CONAGUA-SEMARNAT (2017), en el caso de México menciona que en el año 2015 solo el 84% de la población rural tenía acceso a fuentes de agua potable en comparación con la población urbana con 97%. Mientras que, las poblaciones rurales utilizan generalmente fuentes de agua subterránea representadas por manantiales, que usualmente se pueden usar sin tratamiento a condición de que estén adecuadamente protegidos (Agüero, 2004). Tal es el caso de las comunidades que conforman el municipio de Temascaltepec, donde el acceso al agua potable lo proveen las fuentes de agua subterránea que, con base en los testimonios de algunos pobladores han perdido caudal en los últimos años, además de que les atribuyen su contaminación debido a las actividades que origina la minería en el territorio.

2.2. La problemática de los recursos hídricos en entornos mineros

2.2.1. En un contexto global

En el año 2018, la ONU señaló que el promedio mundial de estrés hídrico es del 11 % y afecta alrededor de 2,000 millones de personas en todo el mundo, 31 países se encuentran entre el 25 % y 70 % y 22 están por encima del 70 % (UNESCO, 2019a). Esto implica mayores impactos en la sostenibilidad de los recursos hídricos, afectando sobre todo a las poblaciones marginadas donde se generan crecientes conflictos entre los usuarios por el acceso y disponibilidad al agua.

En cuanto a la calidad de agua a nivel mundial, se estima que los países ricos tratan aproximadamente el 70% de las aguas residuales urbanas e industriales que generan mientras que los países pobres, solo el 8% recibe algún tipo de tratamiento. Estas estimaciones apoyan la aproximación frecuentemente citada según la cual, a nivel mundial, más del 80% del total de las aguas residuales se vierten sin tratar (UN-Water, 2017). Por su parte, la PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (2018), prevé que aumenten las emisiones de nutrientes a las aguas superficiales con puntos candentes en Asia del Sur y Asia Oriental, partes de África, América Central y América Latina (UNESCO, 2019b). Esta degradación de la calidad del agua se traduce directamente en problemas ambientales, sociales y económicos (UNESCO, 2020).

Para el caso de las aguas subterráneas, que durante mucho tiempo se han considerado como el mejor recurso de agua para todos los tipos de uso, la presión, tanto en términos de cantidad y calidad está ascendiendo rápidamente (Zektser y Everett, 2004). Las actividades humanas y la variabilidad climática están aumentando las presiones sobre los recursos hídricos subterráneos y se registran graves problemas de contaminación en muchas partes del mundo, además, según el informe del Banco Mundial “Calidad desconocida: la crisis del agua invisible” (2019), existe una gran incertidumbre sobre la calidad del agua subterránea debido a la falta de información en muchas partes del mundo.

En el caso particular de América Latina y el Caribe, la contaminación industrial y minera constituye (después de la de origen doméstico y agrícola) una importante fuente contaminante, ya que esta presenta el inconveniente de localizarse en forma concentrada en

ciertas cuencas, generando graves problemas ambientales y de salud pública (CEPAL, 2018). Con relación a lo anterior FUNDAR (2002), manifiesta que la minería a nivel mundial se concibe como una actividad que provee múltiples beneficios para mejorar las condiciones de vida de las comunidades, fruto del paradigma económico dominante cuyo mecanismo expone a la minería como la encargada de la generación de empleos e infraestructura en zonas marginadas.

El consumo del agua por la minería es de escasa importancia a nivel agregado nacional, sin embargo, el análisis desagregado por cuencas permite observar que en los territorios mineros la demanda por los recursos hídricos locales puede ser muy fuerte (Monge, 2013). Desde esta perspectiva, el agua es indispensable para el procesamiento de los minerales, también se utiliza en los procesos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos, en el control de polvo en los vertederos de residuos y para consumo doméstico en los campamentos asociados con minas remotas (ICMM, 2012).

Las sustancias químicas utilizadas en la minería producen drenajes ácidos que contaminan fuentes de agua tanto superficiales como subterráneas, además de ocasionar graves problemas a la salud. Los elementos químicos tales como el arsénico, plomo, mercurio, cadmio, y uranio son dañinos para la salud; el cianuro es frecuentemente utilizados durante la explotación de oro (Conant y Fadem, 2011). En el caso de consumo de agua con arsénico durante períodos prolongado de 5-20 años puede provocar diversos efectos en la salud, incluido el desarrollo de cáncer en diferentes partes del cuerpo, además de enfermedades de los vasos sanguíneos, también se le atribuye diabetes, hipertensión arterial y trastornos reproductivos (OMS, 2020). Por tanto, la presencia de estos tóxicos en el ambiente y los alimentos pueden desencadenar daños irreparables en la salud humana (Londoño et al., 2016).

En casi todos los casos vinculados con actividades mineras se plantean temas de contaminación de cursos de agua (Monge, 2013). Bajo esta línea, Jhariya et al. (2016) hacen mención de los impactos de las actividades mineras sobre el agua subterránea lo cual se refleja en los siguientes puntos:

- a) La calidad del agua subterránea: Los drenajes ácidos de los estanques de relaves se infiltran hasta contaminar el agua subterránea.

- b) La cantidad de agua subterránea: Al desaguar las minas se crean conos de depresión de la superficie freática; asimismo, se genera una gran pérdida de vegetación en las zonas mineras, lo cual implica mayor escorrentía y menor infiltración que se refleja en una menor recarga y descenso del nivel del agua subterránea. Esto puede provocar a su vez subsidencia y aumenta la temperatura en las zonas mineras.

Algunos casos de estudio puntuales sobre los impactos en las aguas subterráneas provocados por la actividad minera se ejemplifican en las investigaciones de autores como Gajowiec y Witkowski (1993), quienes demostraron que la intensiva extracción de plomo y zinc en la mina de Trzebionka (Polonia), provocó contaminación de aguas subterráneas, ya que las muestras de agua tomadas de los manantiales mostraban el aumento del pH, de los sólidos disueltos totales (STD) y de sulfatos. Posteriormente, 30 años después se observaron aún repercusiones en el Acuífero Jurásico Medio por concentraciones de hierro, manganeso y sulfato (IAH, 2018).

Por otro lado, recientemente Karki y Verma (2020), realizaron un estudio al oeste de la India y encontraron que el suelo tenía un alto índice de contaminación en comparación con las aguas subterráneas a causa del desaguado de las minas, hecho que ocasionó la degradación de los campos de cultivo.

Fan et al. (2018), realizaron un estudio sobre el efecto de la minería de carbón en los manantiales de la zona minera de Yushenfu en China, donde evaluaron el antes y después de la minería a gran escala demostrando así que esta disminuyó el nivel de las aguas subterráneas, reduciendo el caudal de los manantiales y la superficie de los humedales.

Lo anterior, demuestra que la necesidad de una gestión responsable del agua por parte de las empresas mineras es un ingrediente clave para asegurar su contribución a la sostenibilidad, debido a que al ser declarado el acceso al agua y saneamiento un derecho humano fundamental, es importante entender los impactos sobre la salud social y humana por el uso de agua en competencia en cada localidad donde opera una mina (ICMM, 2012).

2.2.2. En el contexto nacional

Un estudio realizado por la UNAM (2018), demuestra que en el país las comunidades rurales son de poco interés para la inversión económica, donde sólo el 87% de esta población tiene acceso al agua entubada y un 77.5% al saneamiento. CONAGUA (2018a), establece que el análisis de la situación de los recursos hídricos en México para el año 2017, era de 451,585 hm³ anuales de agua renovable (agua que es factible de explotar de manera sustentable en una región). Aproximadamente el país recibe 1,449,471 hm³ anuales en forma de precipitación, donde se escurre un 21.4% a ríos o arroyos y se estima que se evapotranspira un 72.1%, lo restante se infiltra al subsuelo ayudando a la recarga natural de los acuíferos.

En el mismo año, CONAGUA realizó monitoreos de la calidad del agua tanto superficial como subterránea en 5,028 sitios de muestreo, con alta influencia antropogénica distribuidos en todo el país: 53.6 % de los sitios monitoreados tenían calidad excelente en DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno); 58.1% para DQO (Demanda Química de Oxígeno), mientras que para SST (Sólidos Suspendidos Totales) y para Coliformes Fecales fue de 24.9%. Los datos reflejan que en los sitios de muestreo los datos variaban de buena calidad a fuertemente contaminada, siendo la región más afectada el centro del país.

Se sabe que de los 653 acuíferos, se extrae el 39% del volumen de agua se utiliza para usos consuntivos y que 105 se encuentran en estado de sobreexplotación, 32 tienen presencia de suelos salinos y agua salobre, 18 tienen intrusión marina y 448 acuíferos se encuentran en condiciones de disponibilidad. De acuerdo con CONAGUA (2015), el pronóstico para el año 2030 revela que las repercusiones sobre los ecosistemas serán significativas, ya que existen mayores abatimientos de los niveles freáticos e incremento de la contaminación. En este sentido, cabe mencionar que la población rural depende de manera significativa del agua subterránea y en algunas zonas áridas la dependencia es total (UNAM, 2018).

Los principales contaminantes de los recursos hídricos, en general, son efluentes industriales, aguas residuales urbanas sin tratamiento, escorrentías superficiales, lixiviado de suelos, plaguicidas y desechos de la industria minera. En México, la minería es uno de los principales sectores que aporta a la economía (Cámara Minera de México, 2018).

La extracción minera requiere de grandes cantidades de agua, por lo que su descarga, flujo, drenaje y filtración incontrolados desde el sitio minero puede ocasionar un pronunciado impacto negativo en el ambiente circundante (Armendáriz, 2016). El Anuario de Actividades Extractivistas en México realizado por FUNDAR en el año 2018, muestra que existen múltiples implicaciones de las actividades mineras sobre todo para los recursos hídricos y en la salud humana. De igual forma, no existen instrumentos legales para diagnosticar y monitorear a nivel local los impactos a la salud de las operaciones mineras (Fundar, 2018). Castro (2013), expone algunos casos de las consecuencias de los riesgos provocados por las actividades mineras en México. Por ejemplo, en el año 2008 la mina La María localizada en Sonora fue la causante del derrame de miles de litros de jales a un arroyo; en 2010 en Chihuahua se originó sin control un derrame de cianuro de sodio por parte de la minera MINDFANDERS, mientras que otro caso que cobró tres muestras se registró en la mina de mercurio El Mono ubicada en Querétaro, debido a la intoxicación con monóxido de carbono.

Históricamente hablando, la actividad minera toma importancia en el Estado de México en la mina Rica de Albarrada (Municipio de Sultepec), ya que fue la primera localidad minera descubierta en 1531. Posteriormente, se continuaron realizando pequeñas exploraciones en varios lugares del estado, hasta que en 1787 al fundarse el Mineral del Oro (Municipio El Oro), esta actividad cobró gran importancia al alcanzar un lugar sobresaliente tanto a nivel nacional como internacional. El municipio de Temascaltepec pertenece a una de las zonas tradicionalmente más importantes de México en cuanto a minería; algunos de los depósitos minerales más conocidos dentro del Estado de México y sus cercanías son: Taxco, El Oro, Tlalpujahuá, Sultepec y Pachuca-Real del Monte (depósitos epitermales de baja sulfatación), y Tizapa-Santa Rosa (depósitos vulcanogénicos de sulfuros masivos) (Camprubí, 1998). Además, junto con Sultepec, Zacualpan y Taxco, Temascaltepec formó parte de la “Provincia de la Plata”, la cual destacó por la abundancia de su producción de plata y oro en las minas del Rey, Las Doncellas y El Rincón, entre otras (Cruz Lujan, 2013).

En el año 1555 da comienzo a la actividad minera dentro del municipio de Temascaltepec, concentrándose desde su inicio en tres áreas de alto valor para la industria con más de 100 vetas en total; una de estas zonas es identificada como La Guitarra. Las operaciones en La Guitarra comenzaron a principios del siglo XV y continuaron hasta el siglo XIX. Desde el

2012, esta mina es propiedad del consorcio canadiense First Majestic, siendo el sistema de vetas perteneciente a la mina el más productivo del distrito desde hace décadas (Cadena Política, 2018). A principios del 2013 se expandió la capacidad de la planta y en 2014, tanto las vetas Jessica como El Coloso, comenzaron a proporcionar material para molinos de flotación. Actualmente, la mina La Guitarra consta de dos centros de operación subterráneos y un molino de flotación con una capacidad de 500 toneladas por día (First Mjestic, 2020).

El proceso de flotación consiste en la extracción y concentración de las partículas del mineral. Ello significa que se le agrega agua en exceso, algunos reactivos que son importantes en la flotación, y se mantiene un pH alcalino (10 a 11). Para mantener este pH es necesario añadir un reactivo que usualmente es cal, que eleva el pH desde el 7 del agua natural hasta 10 u 11. El resultado de esta flotación fue un concentrado que contiene entre 20% y 40% de mineral (Olguín, 2008). Algunas sustancias utilizadas durante las actividades en minas subterráneas como lo son: nitrato de amonio, amex, aluminio en polvo, aceites, entre otros; mientras que en los concentradores se incluyen sustancias como espumantes, floculantes, aceites, resinas y grasas (Domínguez , 2020). La tabla 2.1 muestra las posibles afectaciones sobre la salud que puede derivar del contacto prolongado con dichas sustancias.

Tabla 2.1. Sustancias químicas utilizadas en las operaciones de mina subterránea y durante el proceso de flotación de los minerales (Domínguez, 2020).

Sustancia	Repercusiones sobre la salud
Amex y ANFO	El Nitrato de Amonio es un compuesto químico explosivo, la exposición prolongada puede causar micción y orina ácida, dolor de cabeza crónico y dermatitis.
Aluminio en polvo BD30	Su ingesta puede causar daño al sistema nervioso central, demencia, pérdida de la memoria, además de que su exposición aguda causa dermatitis, irritación y conjuntivitis.
Colector AERO 3894 PROMOTER	El Isopropanol se usa como colector para la flotación de partículas. La exposición crónica puede generar dermatitis y cáncer a la piel.
COLECTOR AT 420	Es utilizada en flotación y pertenece a la familia de los xantatos. Este presenta pocos riesgos con baja toxicidad oral, aunque su contacto prolongado puede causar irritaciones en la piel.
MIBC 98	Es usado como espumante en la flotación de minerales de oro y plata. La exposición crónica a esta sustancia puede provocar daños hepáticos, lesiones en la piel y en casos extremos dermatitis crónica.
CAL VIVA	Puede provocar quemaduras intensas, bronquitis y neumonías en casos muy especiales, ya que su acción irritante limita la exposición para que esto se produzca.

De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), en el área de estudio se han localizado más de 90 manantiales que abastecen a todas las comunidades del municipio (CONAGUA, 2019), y alrededor de 39 se localizan en las áreas concesionadas para actuales y futuros fondos mineros (superficie cuyo subsuelo ha sido concesionado a una determinada empresa o a algún minero ya sea para para su exploración o explotación; (Reygadas y Sariego, 2009); siendo los manantiales cercanos a los actuales desarrollos mineros los que podrán tener un mayor peligro de afectación con relación a las actividades mineras.

En 2017 la mina La Guitarra fue inspeccionada por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), y a través de un comunicado indicaron que las autoridades no encontraron evidencias sobre las denuncias de los pobladores en relación con la contaminación del suelo y de los recursos hídricos del área. Hasta el momento, los pocos datos indican que las posibles enfermedades relacionadas con la minería en Temascaltepec se reflejan en infecciones estomacales y problemas en la piel (Huerta, 2017). Actualmente, la mina se encuentra bajo mantenimiento ya que en 2018 la compañía decidió detener las actividades, debido a que existen proyectos de mayor prioridad que generan mejores tasas internas de rendimiento y una mejor economía (First Mjestic, 2020).

2.2.3. Estrategias para la protección de manantiales en entornos mineros

Daly et al. (2002), mencionan que la protección de las aguas subterráneas se logra a través de dos enfoques. El primero trata de proteger el recurso definido como toda masa de agua subterránea, mientras que el segundo enfoque se basa en proteger la fuente que puede ser un pozo de extracción o manantial cuyo caudal es aprovechado.

En la protección de los recursos hídricos subterráneos el objetivo es el acuífero, y la vía de transporte de la contaminación consiste esencialmente en la zona no saturada, donde el agua y los contaminantes se mueven hacia abajo por percolación; respecto a la protección de la fuente, el objetivo es el manantial o el pozo, y la vía de transporte incluye también la zona saturada del acuífero o sistema acuífero (Goldscheider, 2010). En este sentido, Kresic (2010) indica que la protección de los acuíferos y las fuentes debe incluir programas y medidas de control para la prevención de la contaminación, así como el adecuado manejo del uso de suelo e incluir programas de educación pública.

Morell (2018), define a los manantiales de manera precisa y sencilla como una surgencia natural de agua subterránea. Su importancia recae en que han desempeñado un papel fundamental en el patrón de asentamiento de los seres humanos, donde han servido como suministro de agua local (Fetter, 2001). El funcionamiento de los manantiales es claro si se tiene en cuenta que se han constituido como el desagüe o salida de un acuífero que recibe una recarga, por esta razón resulta importante considerar sus condiciones de recarga, casi siempre dependientes de modo principal de la infiltración de las precipitaciones (Samper, 2014).

Por otro lado, resulta preciso explicar que en muchos casos existen manantiales que no están alimentados por los grandes acuíferos regionales, sino por flujos locales (Ron, 1996). La topografía local produce sistemas de flujo locales poco profundos por encima de un sistema de flujo regional. Por tal motivo, el agua que entra en el área de recarga a un sistema de flujo local poco profundo descarga como manantial en el punto topográfico bajo más cercano. El área de origen de los manantiales asociados a la zona poco profunda puede ser fácilmente rastreada pendiente arriba dentro de las zonas altas de la topografía local (Figura 2.1) (Kreye et al., 1996).

La Figura 2.2 ejemplifica lo anterior referente al caso de estudio de la cuenca de Thulokhola, Nepal, donde existen manantiales de flujo local que emergen a la superficie por depresión y contacto, así como manantiales de flujo constante y regional que emergen por medio de foliaciones o fracturas (Poudel y Duex, 2017).

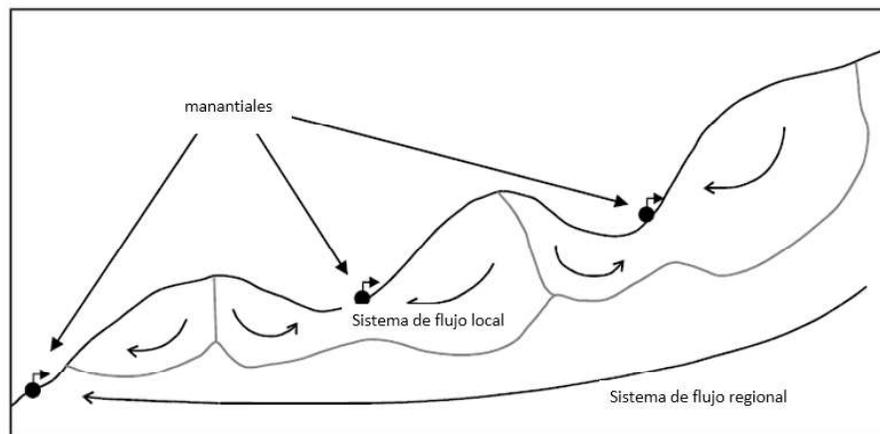


Figura 2.1. Efecto de la topografía en los patrones de flujo de las aguas subterráneas y la ubicación de las zonas de origen para los manantiales de descarga (Kreye et al., 1996).

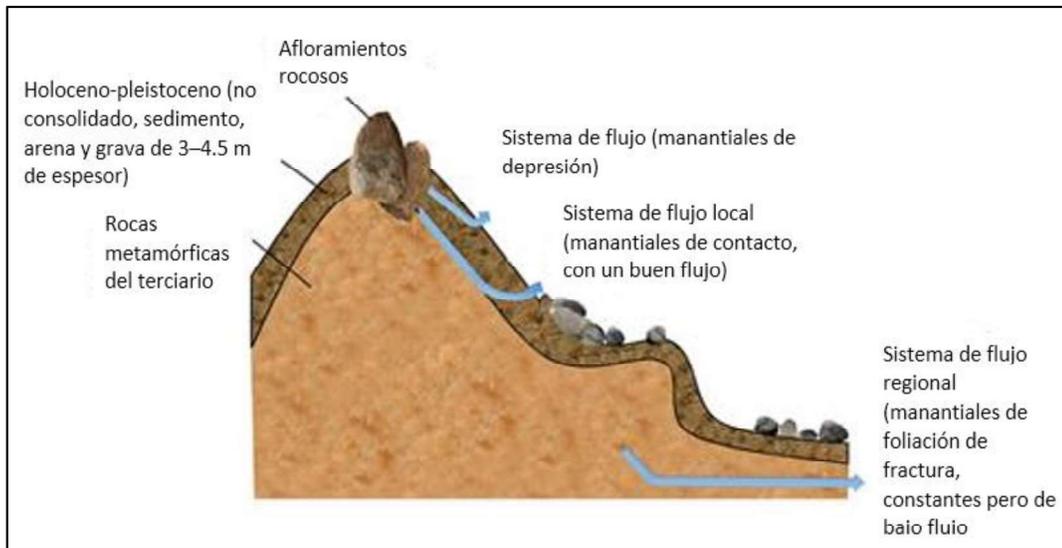


Figura 2.2. Modelo idealizado de los manantiales de la cuenca de Thulokhola (Poudel y Duex, 2017).

Los manantiales por propia condición sufren oscilaciones naturales de caudal que pueden llegar a provocar su total agotamiento, sobre todo tras periodos más o menos largos sin precipitación, aunque también es verdad que algunos manantiales nunca se han conocido secos por la gran extensión e inercia (flujo lento) de los acuíferos a los que drenan (Castillo, 2008).

Existen diversas clasificaciones de los manantiales que dependen, generalmente, de las características hidrogeológicas de la zona. Kresic (2010), considera los siguientes factores para la clasificación:

- Caudal de descarga y uniformidad.
- Carácter del potencial hidráulico que origina la descarga (descendente o de gravedad o ascendentes o manantiales artesianos).
- Estructura geológica y geomorfológica que controla la descarga (depresión, contacto, barrera y manantiales sumergidos).
- Calidad y temperatura del agua.

Alrededor de mundo los manantiales no son gestionados y conservados adecuadamente, motivo por el cual están desapareciendo rápidamente. Entre las principales amenazas para los manantiales figuran el drenaje urbano, la contaminación, la alteración del hábitat y las

especies invasoras. La conciencia pública de la pérdida de estos valiosos recursos y su protección es muy necesaria (Glazier, 2014).

López (2018), enfatiza que para determinar la protección de un manantial resulta fundamental para el investigador saber cuál es el área de captura del manantial, que en muchas ocasiones también es conocida como: cuenca hidrográfica, área de recarga o drenaje. Estos términos no deben ser manejados de manera indistinta debido a que el comportamiento del agua superficial no es la misma que la del agua subterránea; de igual forma, resulta necesario saber que tan vulnerable es el manantial frente a la contaminación. Por lo tanto, la protección de los manantiales obedecerá a las zonas de captación, en el sentido de la dirección del flujo del agua subterránea y la vulnerabilidad a ser contaminada.

En la literatura existen diferentes enfoques para la protección de las aguas subterráneas, algunos de los cuales son utilizados para delimitar perímetros de protección en pozos, además pueden aplicarse a manantiales como en el caso del radio arbitrario fijo, los modelos numéricos y la cartografía hidrogeológica (CONAGUA, 2007). A continuación, se describen los métodos:

1. El método del radio arbitrario fijo: uno de los más simples que se basa en delimitar la zona de protección del pozo, especificando unos metros como criterio de distancia de forma radial. La ventaja de este método es que puede representar un primer paso para la protección de una fuente de agua. Como ejemplo de su aplicación, en Nueva Zelanda, Moreau et al. (2014), utilizaron este método para determinar las distancias de protección de pozos y manantiales frente a los patógenos microbianos, para ello fue necesario utilizar un tiempo de tránsito apropiado que asegurara la muerte de los microbios, por lo que los criterios de distancia se basaron en directrices internacionales de 50 m y 300 m de distancia.
2. La modelación numérica: considera los tiempos de tránsito del agua subterránea mediante la relación de las variables no conocidas en puntos del dominio del flujo, y en diferentes tiempos a través de ecuaciones algebraicas. Al aplicarse se obtiene una mayor precisión para delimitar las zonas de protección, sin embargo, su utilización requiere mayor información geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica (CONAGUA, 2007). Biava et al. (2014), combinan la modelación de aguas

subterráneas con el análisis geomorfológico, para delinear zonas de protección en los manantiales y pozos del acuífero Gran Sasso en Italia central. El método consistió en lo siguiente: 1) Desarrollar un modelo conceptual del flujo de agua en el área de estudio; 2) Crear un modelo numérico 3D para simular el flujo de las aguas subterráneas; 3) Analizar la trayectoria del flujo mediante enfoques deterministas y estocásticos; y 4) Evaluar la vulnerabilidad del acuífero basada en un análisis geomorfológico de la zona de captación. Los resultados demostraron que la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación se extienden de 1 a 5 km hacia el noreste de los manantiales y pozos.

3. El método de cartografía hidrogeológica: se basa en identificar los acuíferos y los acuitardos, cartografiar los niveles de las aguas subterráneas, y determinar las direcciones de flujo. La desventaja del método radica en que debe ser realizado con la asistencia de un profesional hidrogeólogo (Nova Scotia Environment, 2009).

No obstante, López (2018), expone otros métodos y técnicas específicas para definir zonas y perímetros de protección de manantiales, entre los que se encuentran las pruebas de trazadores, el método VESPA, el método de radio calculado, método DISCO, método matemático analítico, el método estocástico, entre otros. Algunos autores utilizan una combinación de diferentes métodos, ya que no todos pueden adaptarse a las características de las áreas de estudio. A continuación se describen los métodos:

1. El uso de trazadores: Gusyev et al. (2012), delimitaron zonas de protección y zonas de captura para los pozos Putaruru y el manantial Blue en Nueva Zelanda, con ayuda de trazadores que determinaron la edad de las aguas subterráneas, mapeando así las zonas de protección y de captura mediante el modelo semi-analítico de aguas subterráneas. Por otro lado, Elhatip y Afşin (2001), estimaron zonas de protección de los manantiales Koçpinar en Aksaray Anatolia central, en Turquía. Con base en evaluaciones hidrogeoquímicas percibieron que las aguas de los manantiales cumplían con las normas de agua potable y de riego; no obstante, la zona se encontraba contaminada por desechos domésticos y agrícolas, por lo que sugirieron tres zonas de protección alrededor de los manantiales teniendo en cuenta las

propiedades hidrogeológicas, hidroquímicas y bacteriológicas de las aguas del manantial.

2. Método VESPA: se basa en un índice para determinar la vulnerabilidad de las zonas de protección de los manantiales, a través de datos de descarga, temperatura, y conductividad eléctrica que son medidos directamente en el manantial. Para el cálculo del índice se considera 1 año de datos obtenidos con sensores automáticos. Los resultados demuestran la fiabilidad del método para indentificar niveles de vulnerabilidad más altos, pero evidenció que produce cierta incertidumbre en la identificación de los niveles de vulnerabilidad bajos y medios (Banzato et al., 2017).
3. Método de radio calculado y metodo DISCO: en Suiza, se emplearon diversos métodos basados en definir la vulnerabilidad para delimitar zonas de protección en los manantiales fracturados. En la baja vulnerabilidad se utilizo el método de radio fijo, para un medio ligeramente heterogéneo un enfoque de radio calculado basado en resultados de la prueba del trazador ("método isócrona") y para una heterogeneidad alta un mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas ("método DISCO"), basado en la evaluación de discontinuidades, cobertura protectora y parámetros de esorrentía (Pochon et al., 2008).
4. Modelo de simulación: Luo et al. (2020), proponen un modelo de simulación para encontrar una estrategia de extracción óptima, que equilibre la relación competitiva entre la salida de los manantiales y la extracción del agua subterránea, con el objetivo de proteger y alcanzar la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos en un grupo de manantiales.

Por otra parte, se tienen metodos combinados, como son:

Métodos estadísticos y fisico-químicos: en China, He, et al. (2019), utilizaron métodos estadísticos y fisico-químicos para estudiar manantiales kársticos de gran importancia para la región. Los datos mostraron una disminución en el caudal, debido a los efectos del cambio climático y a las actividades antropogénicas; asimismo, se utilizó la prueba de Mann-Kendall para analizar la tendencia de las precipitaciones y la descarga de los manantiales, además de los datos fisicoquímicos para las variaciones de la calidad del agua. En cuanto a la protección de estos manantiales,

estos autores proponen regular las actividades mineras, establecer una red de prevención y control de la contaminación de las aguas subterráneas, y tratarse eficazmente las aguas residuales.

Metodos empleando SIG: en el Estado de México, López (2018), implementó otro método destinado a identificar las zonas de protección de los manantiales prioritarios en todo el estado, a través del uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). La delimitación de las zonas de protección se realizó a partir de tres etapas: a) Delimitar la zona de captura potencial de cada manantial; b) Estimar la recarga anual dentro de las zonas de captura, que es capaz de alimentar el caudal del manantial; y c) Delimitar espacialmente las zonas de protección de los manantiales una vez estimada la recarga anual. El objetivo se logró realizando el balance hídrico, que coadyuvo a estimar la recarga anual dentro de las zonas de captura del manantial.

2.2.4. El AMC en un entorno SIG como herramienta para la protección de las fuentes de agua subterránea

El Sistema de Información Geográfica (SIG), es capaz de tener y procesar información descriptiva de cualquier lugar físico existente. Estos sistemas permiten la entrada, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación, representación y salida eficiente de datos, de los atributos que presente (Martínez, 2007). Tienen una limitación en cuanto al análisis de datos, sin embargo, al integrar las técnicas de análisis multicriterio se logra obtener una herramienta de análisis que tiene como principal ventaja el uso de los juicios de valor con respecto a las alternativas y criterios del problema (Xolalpa, 2020).

El análisis multicriterio generalmente lidia con la jerarquización de muchas alternativas concretas basándose en múltiples criterios que conflictúan entre sí (Behzadian et al., 2010). En años recientes, muchos métodos de análisis multicriterio han sido propuestos para seleccionar las mejores alternativas. El desarrollo de estos métodos ha sido motivado no solo por la variedad de problemas del mundo real que requieren la consideración de múltiples criterios, sino también por el deseo de muchos practicantes para proponer mejores técnicas para la toma de decisiones (Wiecek et al., 2008).

En el caso de recursos hídricos, se ha utilizado el Análisis Multicriterio, por ejemplo, para la identificación de las áreas prioritarias a monitorear en las redes dinámicas de monitoreo del

agua subterránea (Esquivel, 2015); para la delimitación de zonas donde construir captaciones de aguas en acuíferos fisurados (Hanich, et al., 2008); o en la identificación de fuentes de abastecimiento de agua subterránea de uso urbano con mayor necesidad de protección (Alvarado, 2009).

El Análisis Multicriterio se puede aplicar en el SIG IDRISI Selva a través del módulo Decision Wizard, donde múltiples criterios son ponderados a través del módulo WEIGHT y hace uso de método AHP (Proceso de Jerarquía Analítica) para comparar por pares factores. Asimismo, el Análisis Multicriterio se desarrolla en cinco pasos y se describen a continuación:

Definir el objetivo

Está orientado a la solución de la problemática en cuestión.

Identificar los criterios

Los criterios se clasifican en factores y restricciones, se definen en función del objetivo de la investigación:

Factores: criterios que enriquecen o devalúan la viabilidad del objetivo en estudio. Estos criterios se seleccionan con base en la cartografía existente y en la opinión de un investigador o un grupo de expertos en el tema.

Restricciones: criterios que excluyen áreas del análisis.

Generalmente, los factores son variables (imágenes) de carácter cualitativo o cuantitativo que tienen diferentes escalas y unidades, para poder trabajar con ellos es necesario homogeneizar, es decir, transformar las imágenes a escalas comunes, por medio del software de SIG son transformados a escalas ya sea de tipo real (0 a 1) o byte (0 a 255). Por otra parte, las restricciones son criterios representados en imágenes booleanas; es decir, definidos como “sí” o “no” mediante 1 o 0 respectivamente.

Reescalar los criterios

En IDRISI el módulo FUZZY (difuso) cuya finalidad es reescalar los factores ya sea través de la escala byte o real y se emplea una de las funciones de pertenencia de grupos difusos (Eastman, 2012). La función definida debe ser la que mejor asigne la prioridad de cada píxel de la imagen, según el modelo de asignación de prioridad a los valores del factor que se requiera. Algunas de las funciones son (Eastman, 2016) (Figura 2.3):

1. Función lineal: la más sencilla, un cambio en el valor de factor produce un cambio en la conveniencia o ese atributo para la consecución del objetivo.
2. Función sigmoideal (sigmoide): la más usada en la lógica difusa, corresponde a la función coseno. Los puntos a, b, c y d representan los puntos de inflexión a medida que la función de pertenencia se eleva por encima de 0, se acerca a 1, cae por debajo de 1 de nuevo, y finalmente se acerca a 0. Con esta función, el cambio en el valor del atributo ubicado entre dos puntos de control provoca el más pequeño cambio en la conveniencia de ese atributo para la consecución del objetivo.
3. Función en forma de J: la función se aproxima a cero, sólo lo alcanza en el infinito. Por lo tanto, los puntos de inflexión a y d indican los puntos en los que la función alcanza 0,5 en lugar de 0.
4. Función de usuario: adecuada en el caso de que la relación entre el grupo de la pertenencia difusa y el criterio no siga ninguna de las funciones anteriores. La normalización mediante esta función debe realizarse de forma separada en el modelo FUZZY.

La forma de la función se elige respondiendo a la que mejor describa la relación del objetivo, entre las que se encuentran:

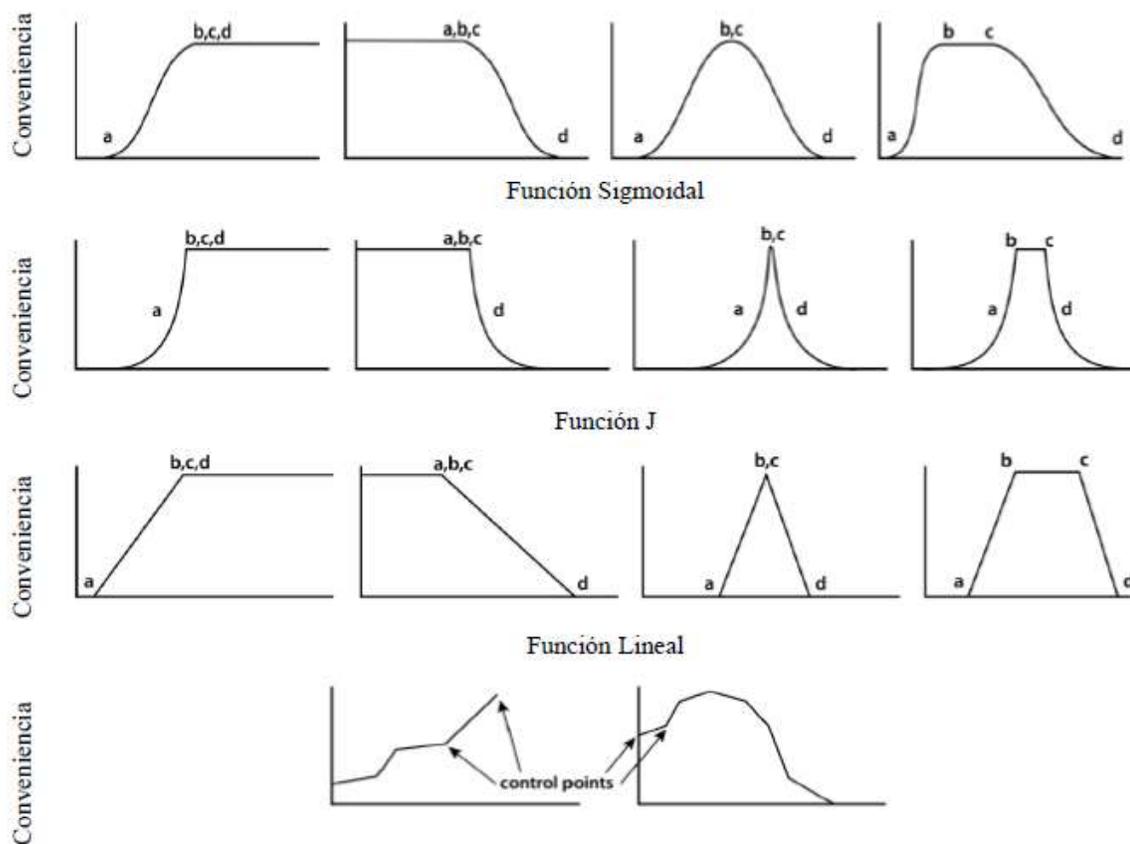


Figura 2.3. Funciones de pertenencia difusa para reescalar factores (Eastman, 2016).

1. Monótonicamente creciente: los valores mínimos no son convenientes para el logro del objetivo, pero al ir aumentando van resultando más convenientes hasta un valor en el que todos tienen la misma prioridad para la protección. La posibilidad de la adecuación se eleva de 0 a 1 y nunca disminuye.

2. Monótonicamente decreciente: el valor mínimo tiene la misma prioridad y los valores mayores son gradualmente menos convenientes para cumplir el objetivo, hasta un valor que resulta inconveniente, por lo tanto, tiene la menor prioridad de protección. La máxima adecuación comienza en 1, luego disminuye y permanece en 0.

3. Simétrica: indica que el valor mínimo es poco conveniente para el logro del objetivo. Conforme va aumentando este valor, los valores llegan a un intervalo de valores que resulta conveniente y valores mayores resultan ser menos convenientes hasta no serlo. Es decir, la posibilidad de adecuación al objetivo crece, se mantiene constante en un intervalo y posteriormente decrece.

Ponderación de los criterios

El método del Proceso Analítico Jerárquico AHP implica el uso del módulo WEIGHT para ponderar los pesos de cada factor. Este procedimiento realiza, de manera automatizada, una comparación por pares con base en la Matriz de Saaty (1994), la cual, utiliza una escala ordinal de acuerdo con la intensidad de importancia entre los valores 1/9 a 9. Los números enteros indican una mayor importancia mientras que las fracciones menos importancia (Tabla 2.2).

El proceso de ponderación se inicia con la construcción de una matriz cuadrada de comparación de criterios (contiene los mismos factores a ponderar tanto en las filas como en las columnas). En esta matriz los valores de la diagonal son “1” porque es la comparación de cada factor entre sí mismo, lo que se considera que tiene la misma importancia. La diagonal divide en dos partes a la matriz, por lo que solo se hace la comparación de los pares de la parte inferior pues la superior tendría los valores recíprocos de la parte inferior resuelta. Cuando el factor de la fila es menos importante para la consecución del objetivo que el criterio de la columna, se coloca en forma de fracción, en caso contrario se coloca un número entero. La matriz de comparación asigna pesos a cada factor de acuerdo con su grado de importancia considerando la relación “causa-efecto”.

Agregación de los criterios

El paso final del Análisis Multicriterio es la agregación de los criterios. En IDRISI existen tres procesos de evaluación del riesgo, este paso incluyen las siguientes lógicas (Figura 2.4):

1. Intersección booleana (And lógico). Método para imágenes booleanas, es decir aquellas imágenes cuyos atributos para todos los píxeles son 1 o 0, de tal forma que los sitios que cumplen una condición (AND u OR) están representados con el valor 1 y aquellos que no cumplen con el valor 0. Este tipo de evaluación implica una multiplicación de imágenes.

Tabla 2.2. Escala de puntajes para la comparación por pares (Eastman, 2016).

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extremo	muy alto	alto	moderado	igual	moderado	alto	muy alto	extremo
Menos importante				Más importante				

2. Combinación lineal ponderada (WLC). El método multiplica a cada uno de los factores, cuyos valores han sido previamente ajustados a una escala común (estandarizado), por el peso relativo asignado al factor (cada celda dentro de cada mapa tiene el mismo peso del factor), y luego suma los resultados. Marinoni (2004); Drobne y Lisec (2009) emplean la siguiente fórmula para el WLC, esta incluye la restricción :

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i * \Pi C_j$$

Siendo:

S = Idoneidad

n = Número de los factores

W_i = Peso del factor i

X_i = Valor del factor i

C_j = Puntuación de la restricción j

Π = Producto de las restricciones (desde $j = 1$ hasta $j = n$)

3. Promedio ponderado ordenado (OWA). Además de los pesos de los factores, los pesos asociados al orden permiten controlar la manera en que los factores son agregados y puede diferir en cada píxel de una misma imagen.



Figura 2.4. Estrategia de decisión triangular (Eastman, 2016).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de los potenciales efectos negativos de los desarrollos mineros del municipio de Temascaltepec, Estado de México, y su impacto en el uso sustentable de los manantiales de la región, se llevó a cabo mediante 5 pasos metodológicos (Figura 3.1), que se definieron en función de los objetivos planteados, donde se especifica claramente los resultados esperados.

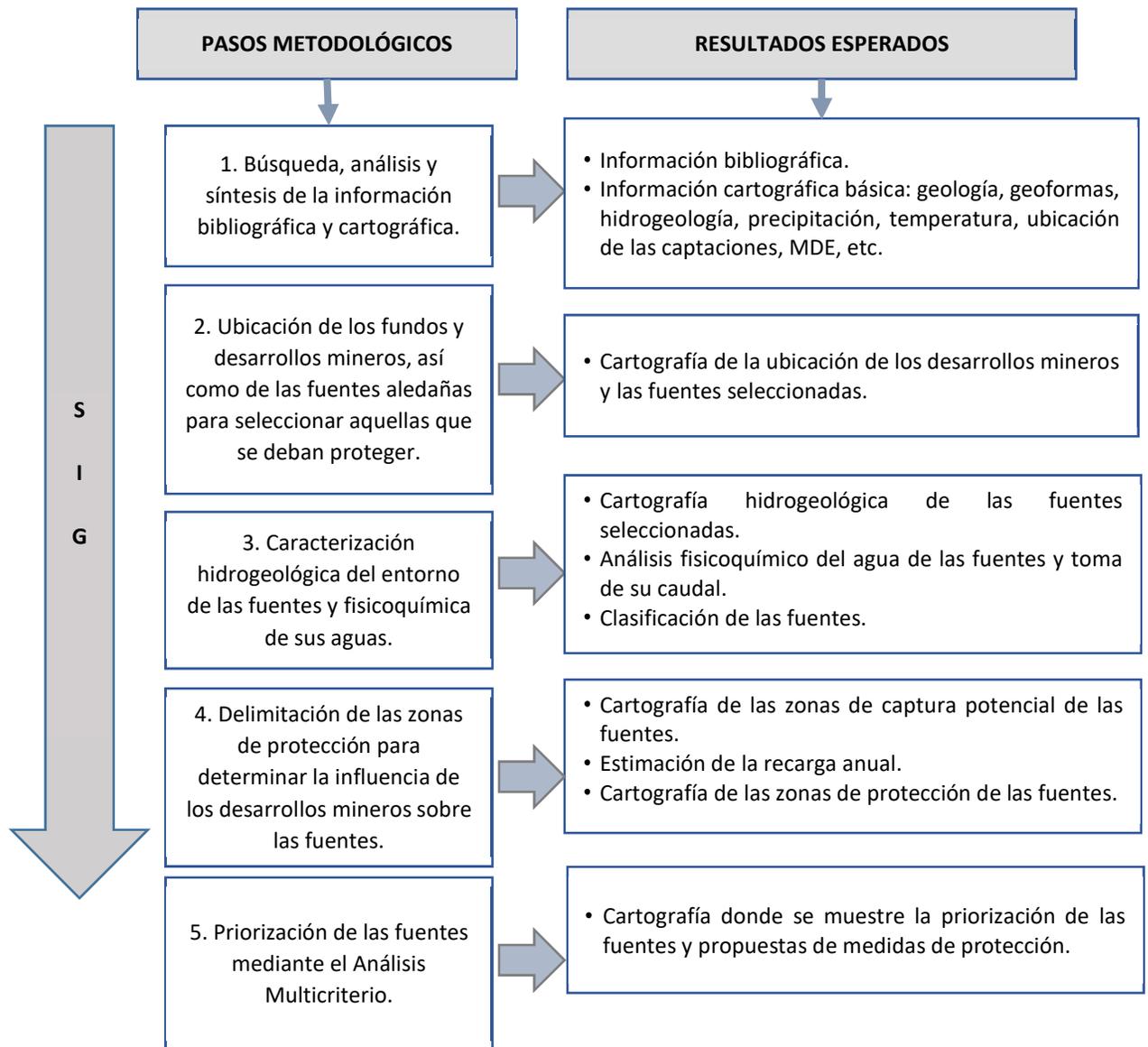


Figura 3.1. Secuencia del proceso metodológico.

3.1. Búsqueda y análisis de la información bibliográfica y cartográfica

Se llevó a cabo la recopilación de información y documentos necesarios para la investigación. Algunas consultas se realizaron en instituciones y organismos públicos y gubernamentales, tales como: la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); Servicio Geológico Mexicano (SGM); Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM); Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO); Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA); Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex); Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Además, se consultaron libros, revistas indexadas, tesis e informes del área de estudio y sitios web para la recopilación de la información cartográfica.

El procesamiento de la información cartográfica se realizó en software de SIG, ya que permite el control y manejo de la información para poder visualizar de mejor manera los resultados (Segundo, 2020).

3.2. Ubicación de los fondos y desarrollos mineros de la región así como de la selección de las principales fuentes aledañas

Partiendo de la geo-base de datos obtenida de las diferentes fuentes de consulta, se logró ubicar espacialmente los fondos y desarrollos mineros que operan en el municipio de Temascaltepec. Este objetivo se desarrolló en dos etapas:

1. En la primera etapa se localizaron en un área de 188 km² los fondos y desarrollos mineros, y los manantiales aledaños encontrados en el Registro Público de Derechos del Agua de la CONAGUA (CONAGUA, 2019). También se incluyeron algunos manantiales considerados por la población que estaban siendo afectados por los desarrollos mineros, así como un antiguo socavón minero cuyo caudal es utilizado en actividades agrícolas y un barreno de exploración que representa una potencial fuente de agua subterránea solicitada por los lugareños.
2. En la segunda etapa se realizó la selección de las fuentes a ser estudiadas bajo el criterio de que los propios pobladores las consideran afectadas a causa de la minería,

y tomando en cuenta sus ubicaciones dentro las microcuencas del área de estudio. De manera general, las fuentes localizadas aguas abajo de las zonas donde se desarrolla la actividad minera tienen mayor probabilidad de ser afectadas por la misma.

La delimitación de las microcuencas se realizó en el software ArcMap 10.4 donde se introdujo el Modelo Digital de Elevación (MDE) a una resolución de 30 m, se aplicó la herramienta “Fill” con la finalidad de corregir alguna imperfección del MDE, posteriormente, al resultado se aplicó la herramienta “Flow Direction” para conocer la dirección de la red hídrica seguido de la herramienta “Flow Accumulation”; finalmente, se aplicó la herramienta “Basin” para identificar las diferentes microcuencas del área de estudio.

3.3. Caracterización hidrogeológica y fisicoquímica

Este objetivo tuvo dos fases metodológicas. En primera instancia se realizó trabajo previo de gabinete para recabar la información disponible del entorno físico y características de las fuentes de abastecimiento. La segunda fase consistió en realizar vistas a campo en las que se verificaron los datos recabados en gabinete, se tomaron datos in situ de los parámetros fisicoquímicos de las fuentes y se midieron los caudales de estas.

3.3.1. Trabajo de gabinete

Para conocer las características geológicas donde se ubican las fuentes seleccionadas, se utilizó como información base la carta geológica de Valle de Bravo E14-A46 escala 1:50,000 (IFOMEGEM, 2014), se ubicaron de manera espacial las fuentes para observar las principales características litológicas de las rocas y así clasificarlas con base en su porosidad, ya sea en porosas o fracturadas.

3.3.2. Trabajo de campo

Se elaboró un itinerario con la información recabada en gabinete identificando así la ubicación exacta de las fuentes de abastecimiento. Se realizaron las visitas a campo con la ayuda de algunos representantes de las comunidades involucradas, así como de los representantes de la mina La Guitarra, Corporativo First Majestic. Las campañas de muestreo se llevaron a cabo durante dos temporadas del año 2019, la primera en época de estiaje (de enero a abril) y la segunda en la temporada de lluvias (octubre y noviembre).

Durante las visitas a campo: a) se corroboró la información recabada en gabinete con el objetivo de caracterizar el entorno físico de las fuentes seleccionadas; b) se realizó una determinación in situ de los parámetros fisicoquímicos y muestreo de agua y c) se midieron los caudales.

a) Corroboración de la información recabada en gabinete con la obtenida en campo

Para conocer las características físicas de las fuentes fue necesario comprobar que la información obtenida durante el trabajo de gabinete coincidiera con la recabada en campo, por lo tanto, se observaron y registraron los datos del entorno de las fuentes, como lo fueron, su geología y uso de suelo.

b) Determinación in situ de los parámetros fisicoquímicos y muestreo de agua

Se elaboró una bitácora en las que se registró la siguiente información: fecha, participantes de cada visita, nombre de la fuente, coordenadas, altitud, descripción de la fuente e información adicional (Figura 3.2). Consecutivamente, con ayuda del equipo multiparamétrico (equipo ORION THERMO) se determinaron in situ los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT) del agua. Para el análisis de cationes y aniones mayoritarios y elementos minoritarios, las muestras recolectadas de agua fueron trasladadas en envases de 250 mL al Laboratorio de Geoquímica de la UNAM (Campus Juriquilla).

Ficha de identificación de fuentes de agua				
1. Identificación				
Nombre:				
Tipo de fuente:	Manantial			
No. Título de concesión				
Fecha:				
Hora:				
Flujo LPS:				
2. Localización				
Comunidad	Municipio		Ejido	
Cuenca	Región Hidrológica		Afluente	
Datum WGS84		X	Y	Altitud
3. Uso del agua:				
Parámetros				
		1. Temperatura		
		2. pH		
		3. CE		
		4. STD		
		5. Salinidad		
Encargado:				
Participantes:				
4. Descripción				
5. Información adicional				

Figura 3.2. Ficha de identificación de los manantiales.

Los resultados permitieron observar los indicadores de contaminación por metales para las fuentes, además, de comparar los valores de los parámetros medidos con los límites máximos permisibles de la norma NOM-127-SSA1-2017 y con los criterios de OMS (2004) para agua de uso y consumo humano.

c) Medición de los caudales

La medición de los caudales se realizó en campo con base en el método volumétrico, consiste en la medición directa del tiempo que se tarda en llenar un recipiente de volumen conocido. Este flujo que descarga en el recipiente fue medido con un cronómetro para saber el tiempo que demoró su llenado, en este caso se utilizó una cubeta de 6 litros. En cada punto se tomaron tres medidas sucesivas con las que se estimó un promedio para obtener un resultado más aproximado de caudal.

3.3.3. Clasificación de las fuentes y selección del método de protección

Una vez analizada la información anterior se clasificaron los manantiales considerando el análisis litológico, el tipo de descarga, la temperatura y los resultados de los parámetros fisicoquímicos. Las antiguas perforaciones mineras que son flujos de descarga artificial conllevan otro tipo de análisis que se explicará en las etapas siguientes.

Se seleccionó el método para la delimitación de las zonas de protección de los manantiales propuesto por López (2018). Este método se recomienda para regiones que necesitan proteger sus fuentes teniendo poca información hidrogeológica, asumiendo que las divisiones topográficas de las zonas de captura coinciden con las del flujo subterráneo. Además, se considera apto para ser aplicado en zonas volcánicas montañosas donde los flujos locales (flujos hipodérmicos) son los que alimentan la fuente.

3.4. Delimitación de las zonas de protección

La Figura 3.3 describe los pasos metodológicos para delimitar las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento.

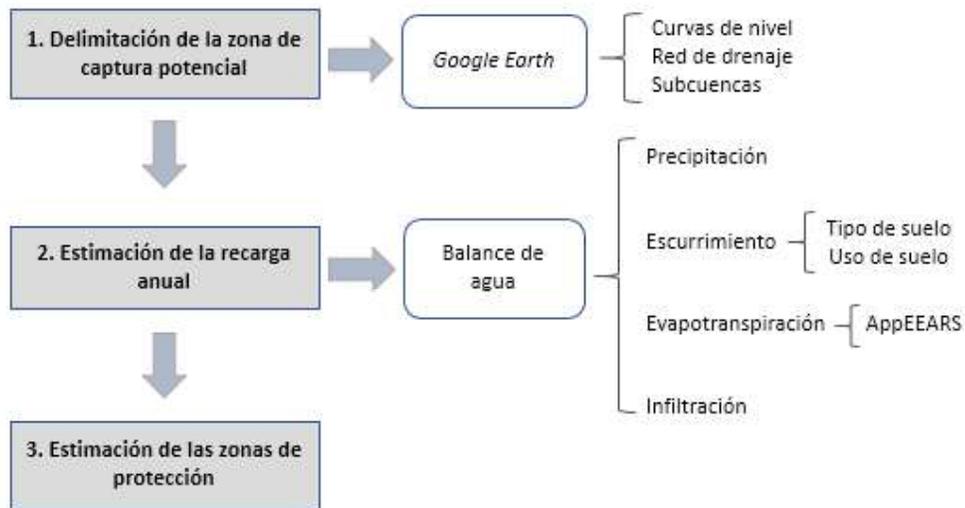


Figura 3.3. Secuencia metodológica para la delimitación de las zonas de protección de los manantiales (Con base en López, 2018).

3.4.1. Delimitación de las zonas de captura potencial

El primer paso para delimitar las zonas de protección consiste en delimitar las zonas de captura potencial de los manantiales. Para las antiguas perforaciones mineras no se realizó tal delimitación debido a que su funcionamiento es similar a los drenes de agua subterránea y solo se llegó hasta la delimitación de la zona de protección II. En la delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales, se tomó en cuenta que la dirección de las corrientes de agua superficiales concuerda con el flujo de agua subterránea. Esta delimitación se logró de dos formas.

En el software ArcMap 10.4 se ingresó el Modelo Digital de Elevación (DEM) y la red hídrica junto con los datos puntuales de los manantiales, y mediante el módulo “*watershed*” se procesó la información para delimitar las zonas de manera automatizada. Debido a que las zonas son bastante pequeñas y los escurrimientos no se encuentran bien definidos, el software no fue preciso al realizar la delimitación de la mayoría de los manantiales, por lo que fue necesario utilizaron criterios interpretativos meramente topográficos e hidrográficos de la siguiente manera:

- Con ayuda del DEM se generaron las curvas de nivel cada 20 m.
- En *Google Earth*, se importaron las capas de los ríos, las curvas de nivel, los parteaguas y las fuentes de abastecimiento.

- Mediante la inspección visual y manual se modificaron los límites de las zonas de captura potencial.
- Las zonas de captura fueron digitalizadas de manera correcta en el software ArcMap.

3.4.2. Estimación de las zonas de recarga

Las zonas de recarga son aquellas en las que se supone que el agua infiltrada sostiene la descarga anual de los manantiales (Q) (López et al., 2021). Para determinar las dimensiones de las zonas de protección de las fuentes dentro de las zonas de captura potencial, López (2018), realiza la modificación de la ecuación 3.1, partiendo del método del radio fijo (Vargas, 2002; Martínez y García, 2003) y el Diagrama de Todd, que expresa la relación entre la descarga media del manantial, la recarga media anual y el área de recarga (Figura 3.4).

$$A = Q/R \quad (3.1)$$

Donde:

A = Área de alimentación (m^3)

Q = Volumen anual (m^3)

R = Recarga anual (m)

R es un valor que se obtiene a partir de la infiltración (I) dentro de la zona de captura potencial.

Para la estimación de la infiltración de las zonas de captura se realizó el cálculo de las variables involucradas en el balance hídrico: precipitación, escorrentía y evapotranspiración; esto con base en el método de SEMARNAT (2005) y Thornthwaite (1948).

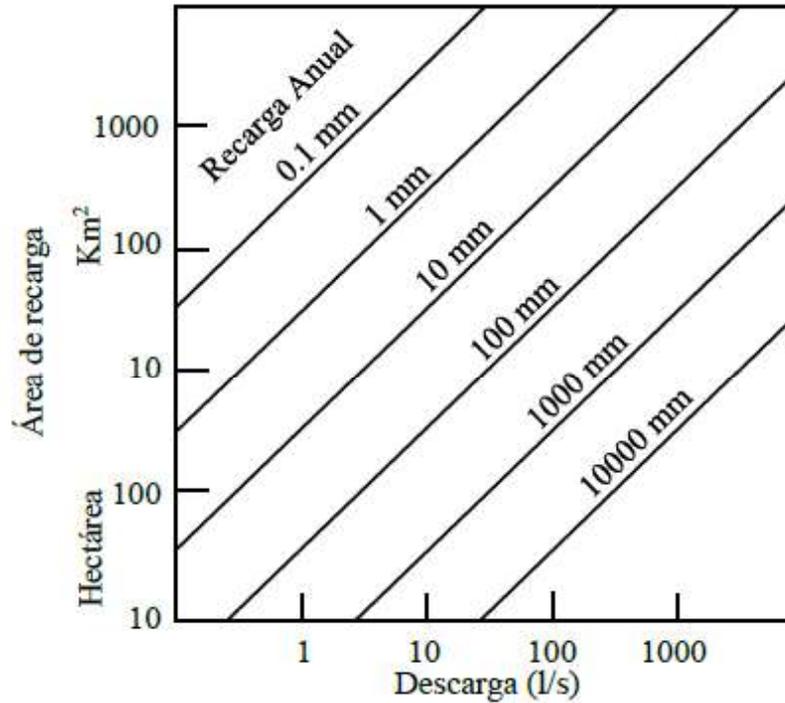


Figura 3.4. Diagrama de Todd que muestra la relación de la descarga media del manantial, la recarga media anual y el área de recarga (Vargas, 2002).

La información, tanto fisiográfica como climática, fue procesada a través de software de SIG. El cálculo de la infiltración (I), así como de las demás variables, se realizó en el software TerrSet por medio del álgebra de mapas (ecuación 3.2).

$$I = P - Es - ETr \quad (3.2)$$

I = Infiltración en el terreno (mm/t)

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

Es = Escurrimiento superficial (mm/t)

ETr = Evapotranspiración real (mm/t)

3.4.2.1. Justificación de la escala y el periodo del balance hídrico

Los métodos de recarga tienen asociado un intervalo de tiempo en el que sus resultados tienen validez. La escala de tiempo puede oscilar entre instantánea y geológica, pasando por estacional, anual e histórica (Custodio, 2019). Lerner et al. (1990), argumentan que, para el caso de la recarga mediante el método de balance de agua en cuestión de escalas de tiempo,

resulta aplicable utilizar escalas instantáneas y a escalas estacionales, anuales e históricas mediante la integración de resultados a escalas menores o realizando extrapolaciones a partir de datos hidrométricos.

La lluvia como única fuente de alimentación de los procesos hidrológicos en una cuenca hidrológica es, sin duda, uno de los componentes más importantes dentro de la ecuación de balance, ya que en países con regímenes de lluvia estacionales se pueden presentar periodos largos de escasez o de exceso de lluvia (Aparicio et al., 2006). Si bien, los períodos medios recomendables para tipificar el fenómeno son del orden de 30 años, se considera que de acuerdo con el análisis requerido es factible realizar un balance para un período más corto (UNESCO, 1982). Este cálculo considerará periodos que permitan la identificación de un ciclo (diurno, mensual, estacional, anual, interanual o decadal) o la comparación de las tendencias entre ciclos, según el objetivo del estudio (UE, 2015). Bajo esta consideración, para la presente investigación se trabajó con una temporalidad corta debido a que autores como Soria (2016), han definido un periodo mínimo de 15 años en el cálculo del balance. A continuación, se describe la obtención de las variables:

3.4.2.2. Precipitación

El trabajar con un área de estudio relativamente pequeña la información hidrométrica es insuficiente para realizar interpolaciones representativas, por tal motivo, se utilizaron los productos de DAYMET y AppEEARS debido a que facilitan datos espaciales y temporales de las variables, a partir de las interpolaciones y extrapolaciones de observaciones terrestres óptimas para el uso en análisis de este tipo.

Partiendo de los productos DAYMET se realizó un análisis de la precipitación del área de estudio. DAYMET cuenta con el apoyo de la NASA a través del Sistema de Información y Datos de Ciencias de la Tierra (ESDIS) y el Programa TE. Los conjuntos de datos climáticos mensuales que proporciona tienen una resolución espacial de 1 km por 1 km. (DAYMET, 2020).

La ventaja de su utilización es que proporciona estimaciones cuadrículadas, continuas y a largo plazo de las variables diarias mediante la interpolación y extrapolación de observaciones terrestres. En la plataforma existen resúmenes climatológicos mensuales del

periodo 1980-2018. Para el estudio en cuestión, se consideró trabajar con un periodo de 15 años (2003-2018), ya que existe una alta variabilidad de la precipitación a través del tiempo, por lo que este periodo permite reflejar las condiciones climáticas actuales del área de estudio, con el mínimo número de años a considerar en el cálculo de balance hídrico.

De esta manera se obtuvieron de DAYMET un total de 180 superficies mensuales de precipitación para el periodo 2003-2018 (Figura 3.5). Los datos fueron procesados en el software TerrSet ya que permite el seguimiento y modelado de datos geospaciales. Las imágenes se agruparon de manera mensual mediante un álgebra de mapas y se recortaron al área de estudio para reprojectarlas al sistema de referencia *latlong* y así trabajar con datos homogéneos.

Posteriormente, se realizaron los promedios mensuales de enero a diciembre obteniendo como resultado 12 imágenes de precipitación, de esta manera, la suma de las imágenes permitió obtener la precipitación media anual en el área de estudio (Figura 3.6).



Figura 3.5. Descarga de las imágenes de temperatura y precipitación de la página de DAYMET.

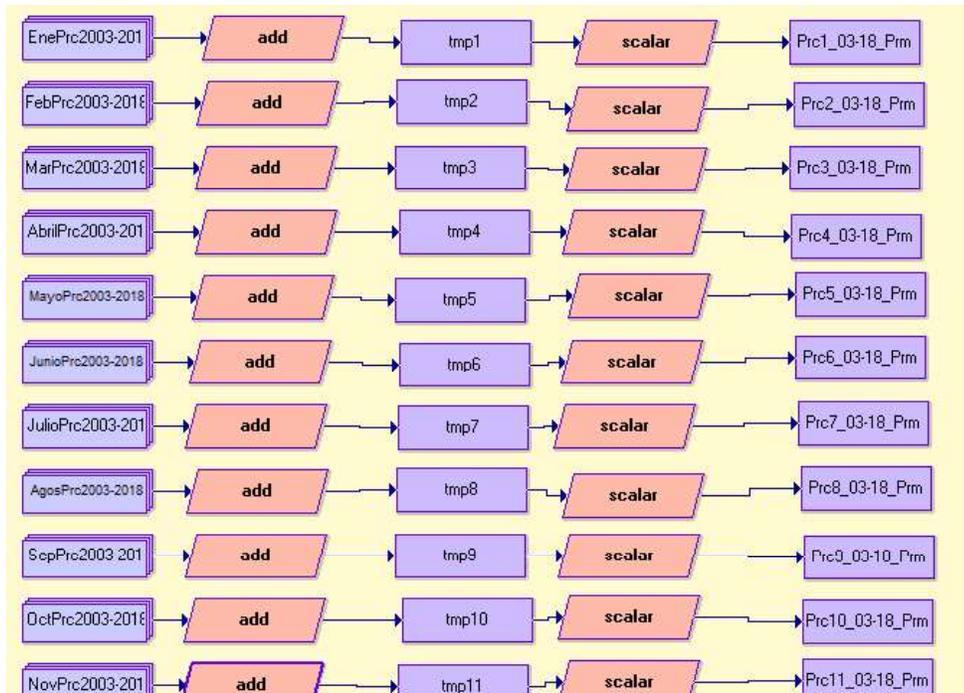


Figura 3.6. Proceso para el cálculo de la precipitación media mensual del área de estudio.

3.4.2.3. Escurrimiento superficial

La escorrentía es la parte del agua precipitada que no se evapora, no se evapotranspira ni se intercepta, ni se almacena ni se infiltra. El coeficiente de escorrentía (C_e) es la porción de agua que circula en superficie en relación con el agua total precipitada, expresándose en tanto por uno (Moll, 2013). Para estimar el escurrimiento superficial del área de estudio se empleó la ecuación 3.3 establecida en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 (DOF, 2002), donde se especifica el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales:

$$Q = P * C_e \quad (3.3)$$

Donde:

Q = Altura de la lámina de escurrimiento anual en mm

P = Precipitación anual promedio en mm

C_e = Coeficiente adimensional de escurrimiento promedio

El método especificado en la norma es de los más utilizados en estudios de carácter gubernamental, además de que no involucra una elevada complejidad si se dispone de los datos necesarios.

Algunos autores como Marsh (1978) y Benítez et al. (1980), utilizan la pendiente para el cálculo del escurrimiento ya que a medida que aumenta este indicador también lo hace la escorrentía; sin embargo, Madrigal et al. (2016), realizaron una comparación del método propuesto por la norma mexicana, para el cálculo de la escorrentía y el modelo matemático de “precipitación-escorrentía, TÉMEZ”, los resultados demostraron ser próximos en las estaciones medidas por ambos métodos. De este modo se muestra la fiabilidad del método de la norma para cualquier análisis.

Partiendo de los datos de precipitación, textura de suelo y uso de suelo fue posible calcular los valores de K, el cual expresa la relación entre la lámina de agua precipitada derivada de la precipitación (P), y la lámina de agua que escurre superficialmente (Peña et al., 2015).

a) Tipo de suelo (textura y permeabilidad)

Se utilizó la información edafológica de la base de datos de IFOMEGEM (2014), donde el tipo de suelo fue clasificado de acuerdo con su grado de permeabilidad, considerando su textura gruesa, mediana o fina con base en los criterios de la norma (DOF, 2002). Los suelos de textura gruesa son permeables mientras que los de textura fina son casi impermeables.

b) Uso de suelo

La reclasificación de los usos de suelo se realizó con los datos de IFOMEGEM (2014), también bajo los criterios de la NOM-011-CONAGUA-2000 (DOF, 2002), de esta manera se obtuvieron 5 categorías: suelo desnudo, suelo agrícola, pastizal, bosque denso y uso urbano. Las diferentes clases de bosques se agruparon en una sola debido a que predominó una cubierta vegetal de bosque denso.

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

Una vez asignadas las clases, se asignaron valores de K en función del tipo y uso de suelo en el software TerrSet mediante un álgebra de mapas (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002).

	Uso de suelo con base en la NOM-011-CONAGUA-2000	Tipo de suelo			Uso de suelo clasificado
		A	B	C	
1	Barbechos, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3	Suelo desnudo
Cultivos:					
2	En hilera	0.24	0.27	0.3	Agrícola
3	Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3	
4	Granos pequeños	0.24	0.27	0.3	
Pastizal (% de suelo cubierto o pastoreo)					
5	Más del 75% - Excesivo	0.14	0.2	0.28	Pastizal matorral
6	Del 50 al 75% - Regular	0.2	0.24	0.3	
7	Menos del 50% - Poco	0.24	0.28	0.3	
Bosque (% de suelo cubierto)					
8	Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24	Bosque denso y bosque poco denso
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	Sin categoría
14	Pradera permanente	0.18	0.24	0.3	Sin categoría

La NOM-011-CONAGUA-2002 establece las ecuaciones 3.4 y 3.5 para determinar el Coeficiente de escurrimiento (C_e). Como los valores de precipitación anual estuvieron dentro del rango de 350 a 2150 mm anuales y los valores de K resultaron mayores a 0.15, el C_e se calculó mediante la ecuación 3.4.

a) Si K resulta menor o igual que 0.15

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} \quad (3.4)$$

b) Si K resulta mayor que 0.15

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad (3.5)$$

Donde:

C_e = Coeficiente de escurrimiento anual (mm)

K = Parámetro que depende del tipo y uso de suelo

P = Precipitación anual (mm).

3.4.2.4. Evapotranspiración real

Las imágenes de evapotranspiración real (ETr) fueron obtenidas a través de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), en conjunto con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a través de la aplicación web AppEEARS, que proporciona a los usuarios subconjuntos de datos espaciales, temporales y por capa, y donde existen dos tipos de solicitudes de muestra disponibles: muestras puntuales de coordenadas geográficas o muestras de áreas de polígonos vectoriales (USGS, 2021).

Estos productos combinan la tecnología de teledetección y los métodos de balance energético de superficie, para proporcionar estimaciones precisas y replicables de la evapotranspiración real (ETr). El enfoque basado en el balance energético da un valor de ETr "total" que es una suma de la ET de todas las fuentes de agua, incluyendo la lluvia, la humedad del suelo o el agua subterránea en la zona vadosa y el riego (Savoca et al., 2013).

Las imágenes se encuentran a una resolución de 1 km a escala nacional y regional. Se descargaron los productos mensuales para el mismo periodo (2003–2018) con un total de 180 imágenes (Figura 3.7). Posteriormente, se importaron las imágenes al software TerrSet, al igual que en el caso de la precipitación se agruparon los datos por mes y se recortaron al área de estudio donde también se reproyectaron al sistema de referencia a *latlong*, con las mismas dimensiones de los datos de precipitación. Además, se realizaron los promedios mensuales de enero a diciembre obteniendo como resultado 12 imágenes de ETr. La suma de estas imágenes permitió obtener la evapotranspiración real anual para el área de estudio.

3.4.2.5. Infiltración

La infiltración fue estimada por medio de un álgebra de mapas en TerrSet con base en la ecuación 3.2 y gracias a los insumos calculados previamente. En la Figura 3.8 se muestra el proceso en la calculadora científica del software para obtener la infiltración mensual, donde a la precipitación se les resta el escurrimiento y la evapotranspiración real, posteriormente, la suma de todos los meses proporcionó la infiltración total anual.

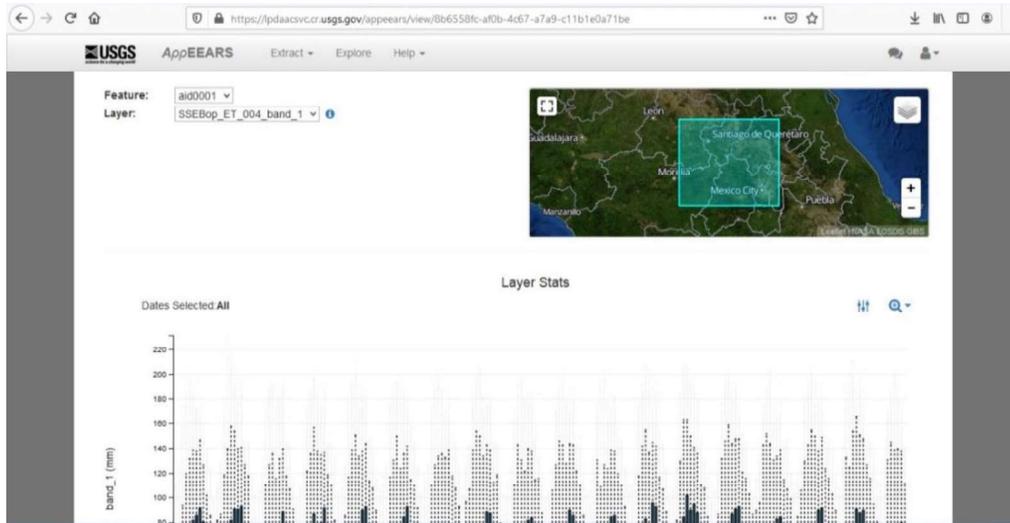


Figura 3.7. Descarga de las imágenes de ETr de la página de AppEEARS.

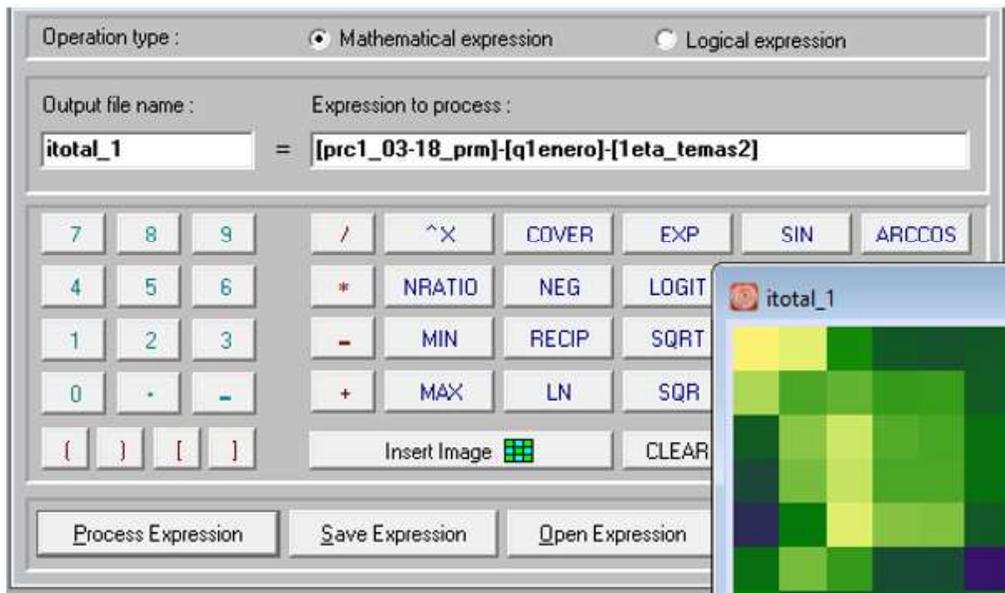


Figura 3.8. Cálculo de la infiltración mensual en TerrSet.

3.4.3. Delimitación de las zonas de protección

La Environmental Agency (2009), establece el método para delimitar zonas de protección en pozos de abastecimiento de uso humano, donde se consideran aquellos factores que provocan contaminación y que puede alcanzar al pozo o campos de pozos de extracción. López (2018), modifico el método para definir zonas de protección en manantiales, donde las define como superficies del terreno y subsuelo que se encuentran aguas arriba del manantial (en el caso de manantiales de gravedad), las cuales tienen el objetivo de proteger la cantidad y calidad

del agua de los manantiales y con ello resguardar la salud y estabilidad de la población que hace uso de este recurso como fuente de abastecimiento.

El método original considera los tiempos de tránsito de un contaminante, sin embargo, en el caso de los manantiales se analiza la recarga anual estimada como el agua que potencialmente llegaría al manantial en ese tiempo. De esta manera se delimitan tres zonas de protección (Figura 3.9):

1. La zona de protección interna (ZP I): puede ser considerado mediante el método de radio fijo contiguo al manantial. Se puede delimitar por un límite perimetral, una malla o cerca que rodea la fuente.
2. La zona de protección externa (ZP II): considera la recarga anual de la zona de captura potencial, ya que supone un tiempo de tránsito de 365 días que sería el tiempo en que el agua llega a la descarga desde el momento en que se infiltra.
3. La zona de contribución potencial del manantial (ZP III): considera toda el agua que podría descargar en el manantial, ya que es el área restante de la zona de captura potencial.

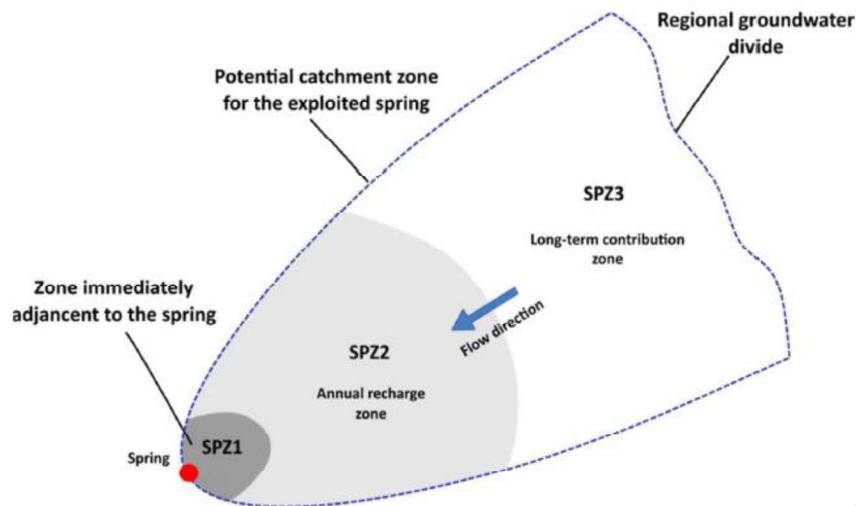


Figura 3.9. Delimitación del área de captura potencial de un manantial y de las zonas de protección I, II y III (López et al., 2021).

3.4.4. Delimitación de las zonas de protección del Socavón de Guadalupe y Barreno de exploración

Al ser flujos en profundidad de antiguas perforaciones mineras su delimitación no se encuentra dada por la topografía regional, por lo cual, solo se delimitaron las zonas de protección I y II empleando cálculos asemejando drenes de agua subterránea. Generalmente, este tipo de perforaciones tienen una longitud de captación de alrededor de 200 m, donde los flujos de agua subterránea van directamente a la perforación (Figura 3.10). La zona de protección II es el área que soporta el caudal anual de la fuente, y en dichas perforaciones esta área es equivalente al área de alimentación calculada previamente con la ecuación 3.1. Para su digitalización, fue necesario determinar el ancho de frente de captura de los drenes despejando la ecuación 3.6.

$$A = b * h + \frac{\pi}{2} * \left(\frac{b}{2}\right)^2 \quad (3.6)$$

A = Área de alimentación (m²)

b = Ancho de frente de captura (m)

h = Longitud de la captación (m)

$$b = \frac{-h + \sqrt{h^2 - 4 * \left(\frac{\pi}{8}\right) * (-A)}}{2 * \left(\frac{\pi}{8}\right)} \quad (3.7)$$

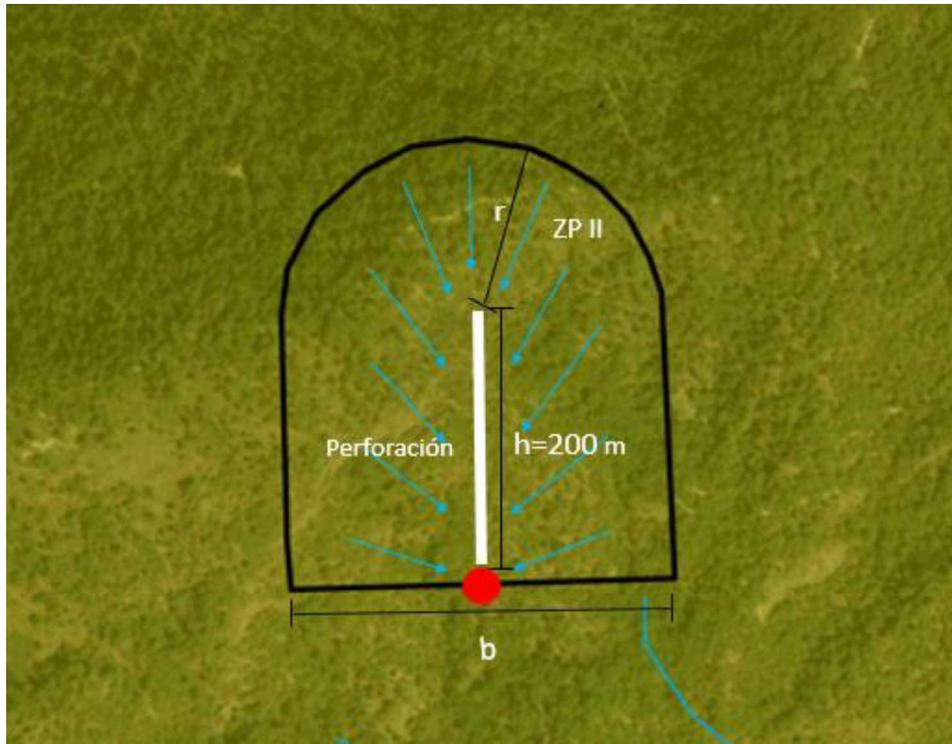


Figura 3.10. Delimitación de la zona de protección en drenes de agua subterránea.

3.5. Priorización de las fuentes de abastecimiento mediante el Análisis Multicriterio

Esquivel (2015), hace uso del software IDRISI para implementar la metodología del Análisis Multicriterio y conocer áreas prioritarias que necesitan puntos de monitoreo en las redes de monitoreo del acuífero del Valle de Toluca. Este software cuenta con el módulo MCE, el cual, genera un mapa continuo de idoneidad que puede ser enmascarado por una o más restricciones booleanas para dar cabida a los criterios cualitativos y finalmente obtener una decisión final (Eastman, 2016). Este módulo tiene implícito el método AHP (Proceso Analítico Jerárquico), que realiza comparaciones binarias (por pares) y atribuye valores numéricos a los juicios (preferencias), por último, asigna pesos o ponderaciones para cada factor y las enlaza hasta la obtención de la imagen que constituye la mejor decisión (Esquivel, 2015).

La Figura 3.11 describe las etapas del Análisis Multicriterio.

3.5.1. Definición del objetivo

El objetivo planteado se definió como priorizar las fuentes de abastecimiento de agua subterránea localizadas en la región minera de Temascaltepec, considerando las potenciales afectaciones en cantidad y calidad por la actividad minera.

3.5.2. Identificación de los factores

A partir de la información disponible del área de estudio, se seleccionaron cuatro factores los cuales representan una mayor influencia relacionada con la presión que genera la población y la actividad minera, sobre la cantidad y calidad de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea. A continuación se realiza su descripción:

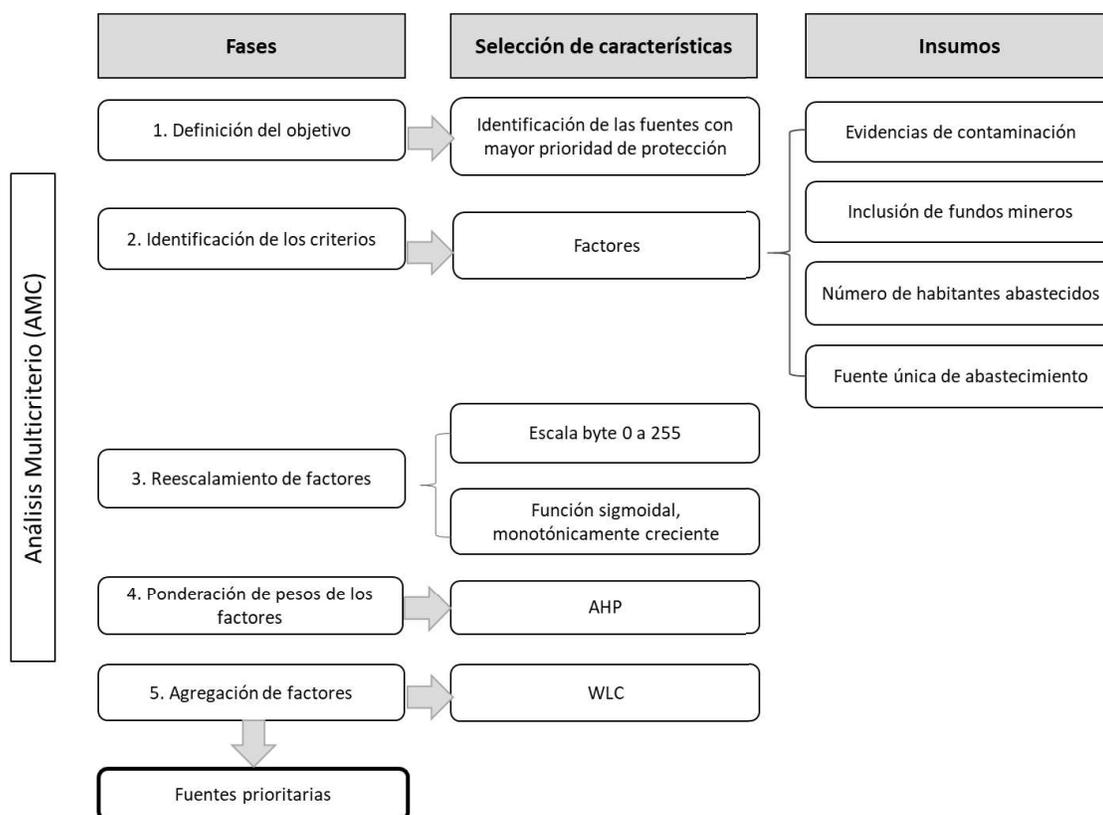


Figura 3.11. Secuencia metodológica para la selección de fuentes de abastecimiento de agua subterránea prioritarias para su protección utilizando el Análisis Multicriterio.

1. Evidencias reales de contaminación del agua de las fuentes por metales pesados

De acuerdo con el Centro Nacional de Epidemiología Prevención y Control de Enfermedades del MINSA, en su vigilancia epidemiológica “Exposición a metales pesados” realizado en el 2019, identifican a la minería como la principal fuente de contaminación de metales pesados exceptuando al arsénico, que representa una fuente natural (Cayetano, 2019). Los metales pesados como el arsénico se encuentran generalmente en componentes naturales de la corteza terrestre, no obstante, al estar en contacto con el agua no son degradados de forma natural o biológica (Abollino et al., 2002); además, las consecuencias de su consumo sobre la salud humana derivan en: erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, cáncer de pulmón, afecciones cardíacas, óseas, testiculares y del sistema nervioso central y periférico o la muerte (Pabón et al., 2020).

Para el caso de la presente investigación, los resultados de los análisis fisicoquímicos permitieron identificar las fuentes cuyas aguas presentan contaminación por metales pesados, potencialmente atribuidos a los desarrollos mineros. Por tanto, dichas fuentes tendrán la prioridad más alta a proteger en el presente estudio.

2. Inclusión de los fundos mineros en las zonas de protección de las fuentes (ZP1, ZP2 y ZP3).

Una concesión minera es un acto administrativo a través del cual el Estado otorga a particulares un derecho condicionado para aprovechar los recursos minerales, identificados en un espacio delimitado y por tiempo prefijado (Delgadillo, 2009).

Las concesiones o fundos mineros son un factor de riesgo a futuro, en caso de que las operaciones mineras alcancen las zonas de protección de las fuentes de agua subterránea, lo cual derivaría en contaminación o pérdida de caudal de dichas fuentes, además de disputas sociales entre la población y la minera. Es por ello, que considerar su inclusión dentro de las zonas de protección como un factor que determine la priorización de las fuentes, resulta relevante para el tema en estudio.

3. Número de habitantes abastecidos por cada fuente

La población abastecida es aquella a la que se le suministra agua por parte de la fuente. El incremento de la población y el crecimiento del sector industrial y comercial, generan una gran presión sobre las fuentes de abastecimiento porque acrecientan la demanda del recurso (Tuesca et al., 2015). Este factor considera que las fuentes que abastezcan a un mayor número de habitantes tendrán mayor prioridad para su protección, sin desvincular la importancia para la protección de las que abastezcan a una menor población.

4. Fuente única de abastecimiento

Las diferentes fuentes de agua constituyen el elemento primordial en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable. Pueden ser una o varias captaciones entre pozos y manantiales, para que en conjunto se obtenga la cantidad de agua necesaria destinada a la demanda de una comunidad (López, 2018).

Los manantiales representan las fuentes de abastecimiento de agua subterránea más importantes en el área de estudio, por lo que dependiendo del número de fuentes en una comunidad será el grado de prioridad para su protección, y aquellas que son única fuente de abastecimiento tendrán más peso dentro del Análisis Multicriterio.

3.5.3. Reescalamiento de los factores

Los factores seleccionados fueron reescalados a una escala común (escala byte de 0 a 255) en IDRISI. Este reescalamiento tuvo como objetivo que los factores se correlacionen positivamente con la idoneidad. La ecuación 3.8 es la utilizada por el software para dicho proceso (Drobne et al., 2009):

$$Xi = \frac{(Ri - Rmin)}{(Rmax - Rmin)} * SR \quad (3.8)$$

Xi = Nuevo valor, estandarizado por píxel

Ri = Valor del factor por píxel

$Rmin$ = Valor mínimo del factor por píxel

R_{max} = Valor máximo del factor por píxel

SR = Umbral máximo del rango a estandarizar (255 para este caso)

En tal caso fue necesario conocer los valores mínimo y máximo de la escala original (imágenes ingresadas), y a través del módulo Fuzzy (Difuso) se evaluaron las posibilidades de pertenencia empleando la función sigmoïdal monótonicamente creciente y se asignaron los valores correspondientes a los puntos de control a y b.

3.5.4. Ponderación de los factores

La ponderación consiste en asignar pesos de importancia a los factores de acuerdo con la importancia que tiene uno respecto al otro y con base en el objetivo a alcanzar. Este procedimiento requiere del apoyo de un grupo de expertos en el tema, donde con base en sus experiencias y a las particularidades de cada factor, logran determinar la influencia en mayor o menor medida de los factores respecto a la priorización de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea en el área de estudio.

La asignación de los pesos no debe ser arbitraria, por lo que la opinión de los expertos hidrólogos e hidrogeólogos se realizó a través de encuestas que les permitieron comparar y jerarquizar los factores. El método utilizado para el Análisis Multicriterio fue el AHP y fue aplicado a través del módulo WEIGHT de IDRISI, este realiza la comparación por pares de manera automatizada.

El método AHP establece una matriz de comparación donde existe una escala de nueve puntos que tienen una importancia: 1 = igual, 3 = moderado, 5 = alto, 7= muy alto, 9 = extremo y 2, 4, 6 y 8 se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores por lo que se consideran valores intermedios de preferencia (Saaty, 2006). Además, se calculó la tasa de consistencia “CR”. Según Saaty (1994), cuando el CR es inferior a 0.1, los coeficientes de ponderación son aceptables (ecuación 3.9). La consistencia es definida como (Drobne y Liseć, 2009):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.9)$$

Siendo:

CR = Tasa de consistencia

RI = Índice de aleatoriedad

CI = Índice de consistencia

El índice de consistencia es calculado como:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.10)$$

Siendo:

$\lambda_{max} = \sum \lambda_i * \text{Total } i$

$\lambda =$ Vectores o ponderación por factor

$n =$ Número de factores

3.5.5. Agregación de los factores

Finalmente, se eligió el método de combinación lineal ponderada (“WLC” Weighted Linear Combination). El objetivo del método WLC es generar un mapa que resulta de la multiplicación de los factores por su peso. Este método es una aplicación de la técnica de algebra de mapas, está basada en una serie de operaciones algebraicas y lógicas aplicadas a un grupo de datos en formato raster (Eastman, 2016). En este proceso se utilizó como base la fórmula empleada por Marinoni (2004); Drobne y Lisec (2009), esta fue adecuada en relación con el objetivo de la investigación (ecuación 3.11):

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (3.11)$$

Siendo:

$S =$ Idoneidad

$n =$ Número de los factores

$W_i =$ Peso del factor i

$X_i =$ Valor del factor i

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Recopilación de la información disponible

Los datos recopilados de cartografía que se encontraron en diversos formatos (ráster, tabular y vectorial) se describen a continuación:

Datos vectoriales:

- a. Geología y uso de suelo en escala 1:50,000 del IFOMEGEM (2014).
- b. Límites político-administrativos estatales y municipales, minas, concesiones mineras, localidades, carreteras, curvas de nivel, clasificación climática, litología, fallas y fracturas, ríos y cuerpos de agua obtenidos a partir de datos vectoriales escala 1:50,000 de IFOMEGEM (2014).
- c. Cuencas hidrológicas, edafología.

Información ráster:

- a. Modelo digital de elevación (MDE) por la IFOMEGEM (2014).

Información tabular:

- a. La información de los manantiales se obtuvo de la base de datos del REPDA (2019), se convirtieron los datos tabulares a vectoriales y posteriormente los vectoriales a ráster según el uso; de igual manera, se transformaron del sistema de coordenadas geográficas (NAD 1927, ITRF 1992 y WGS 1984) al sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) WGS 1984 Zona 14 Norte, zona donde se ubica el área de estudio.

4.2. Ubicación de los fondos y desarrollos mineros de la región así como de la selección de las fuentes aledañas

Los resultados de las etapas 1 y 2 se describen a continuación:

Etapas 1

Por medio de la información proporcionada por la compañía First Majestic, se ubicaron y situaron cartográficamente los fondos y desarrollos mineros adquiridos en el municipio de Temascaltepec. Los resultados se observan en la Figura 4.1 así como los planos de las

secciones longitudinales que unirán ambas minas durante la excavación subterránea. Se decidió estudiar un área de 188 km², ya que la cartografía mostraba que esta abarcaba a las poblaciones cuyas fuentes se vinculaban a la problemática minera debido a su cercanía. Se localizaron con apoyo de los habitantes de la zona y de los datos del REPDA, 37 manantiales y dos antiguas perforaciones mineras (el Barreno de exploración y Socavón de Guadalupe), cuya importancia recae en el uso que la población les da a sus caudales (Tabla 4.1 y Figura 4.1).

Respecto a los títulos de asignación de los manantiales del municipio de Temascaltepec del REPDA (2019), se consiguió la siguiente información:

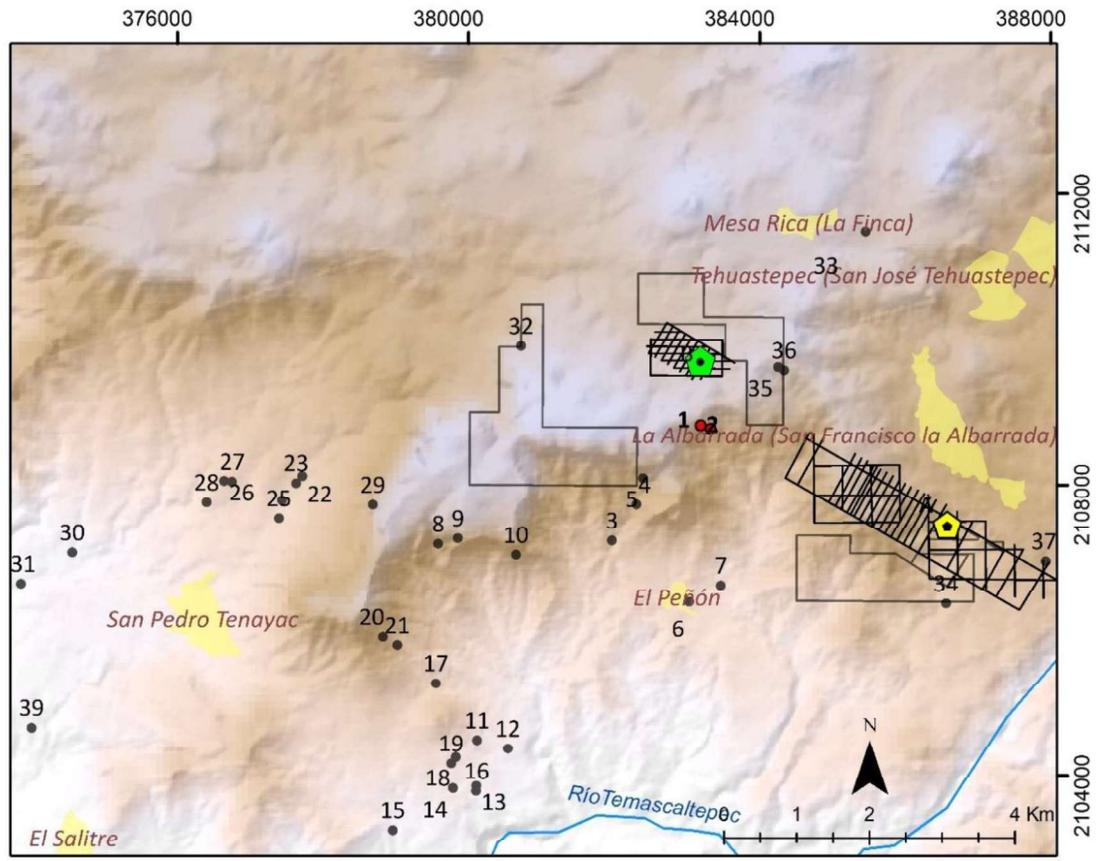
- Titular (usuario)
- Título de concesión
- Uso
- Fecha de registro
- Anexo (número de aprovechamientos concesionados)
- Volumen de asignación de agua (m³/año)
- Municipio
- Región hidrológica
- Cuenca
- Fuente
- Afluente
- Coordenadas geográficas

Tabla 4.1. Fuentes de abastecimiento localizadas aledañas a los fundos y desarrollos mineros.

ID	Comunidad	Nombre	Tipo de fuente	Coordenadas		Z
				X	Y	
1	El Peñón	Socavón Guadalupe	Socavón	383192	2108820	2082
2	El Peñón	Barreno de Exploración	Barreno	383328	2108771	2118
3	El Peñón	El Puerto	Manantial	381971	2107234	1759
4	El Peñón	La Peña	Manantial	382310	2107735	1882
5	El Peñón	La Ciénega 1 y 2	Manantial	382400	2108096	2095
6	El Peñón	El Nancial	Manantial	383031	2106394	1970
7	El Peñón	Las Tortugas	Manantial	383465	2106619	1773
8	Cerro Pelón	Brinco de león	Manantial	379584	2107189	1934
9	Cerro Pelón	La Laja	Manantial	379856	2107265	2044
10	Cerro Pelón	El Zaus	Manantial	380655	2107039	1991
11	Cerro Pelón	El Platanal	Manantial	380119	2104492	1614
12	Cerro Pelón	El Fresno	Manantial	380543	2104377	1667
13	Cerro Pelón	El Borbollón	Manantial	380109	2103857	1681
14	Cerro Pelón	El Ojo del Agua	Manantial	379787	2103827	1623
15	Cerro Pelón	Los Plátanos	Manantial	378962	2103252	1633
16	Cerro Pelón	El Charrito	Manantial	380105	2103790	1657
17	Cerro Pelón	El Ojo de Agua 2	Manantial	379553	2105268	1824
18	Cerro Pelón	Los Lampacitos	Manantial	379825	2104257	1730
19	Cerro Pelón	Los Lampacitos 2	Manantial	379764	2104172	1731
20	Cerro Pelón	El Zapote	Manantial	378827	2105913	1878
21	Cerro Pelón	El zapote 2	Manantial	379024	2105798	1803
22	San Pedro Tenayac	La Prepa	Manantial	377716	2108123	1753
23	San Pedro Tenayac	El Bosque (depósito grande)	Manantial	377634	2108027	1751

Tabla 4.1. Fuentes de abastecimiento localizadas aledañas a los fundos y desarrollos mineros (continuación).

ID	Comunidad	Nombre	Tipo de fuente	Coordenadas		Z
				X	Y	
24	San Pedro Tenayac	Depósito de San Pedrito	Manantial	377437	2107788	1835
25	San Pedro Tenayac	El Bosque (Barrio Seco)	Manantial	377398	2107543	1742
26	San Pedro Tenayac	Los Acebedos	Manantial	376643	2108056	1741
27	San Pedro Tenayac	Los Acebedos 4	Manantial	376752	2108046	1829
28	San Pedro Tenayac	El Carrizal 2	Manantial	376404	2107761	1789
29	San Pedro Tenayac	La Peña de San Luis	Manantial	378688	2107730	2143
30	El Potrero de Tenayac	El Abrojo	Manantial	374556	2107071	1621
31	El Potrero de Tenayac	Los Mangos	Manantial	373850	2106643	1683
32	Las Trancas	Las Trancas	Manantial	380724.26	2109913	2297
33	San Francisco la Albarrada	Borbollón	Manantial	385459	2111488	2258
34	San Francisco la Albarrada	El Alto	Manantial	386564	2106372	2250
35	San Francisco la Albarrada	Pequeño	Manantial	384256	2109624	2375
36	San Francisco la Albarrada	La Peña	Manantial	384338	2109576	2363
37	San Francisco la Albarrada	La Palma	Manantial	387933	2106948	1863
38	San Francisco la Albarrada	El Pino	Manantial	388692	2108977	2013
39	La Finca de Tenayac	Guadaleva	Manantial	373996	2104662	1463



SIMBOLOGÍA

- | | | | |
|---|---------------------|---|--------------------------|
|  | Mina Coloso |  | Secciones longitudinales |
|  | Mina Guitarra |  | Manantiales |
|  | Localidades |  | Fuentes alternas |
|  | Concesiones mineras | | |

Figura 4.1. Mapa de ubicación de los fundos, desarrollos mineros y las fuentes de agua.

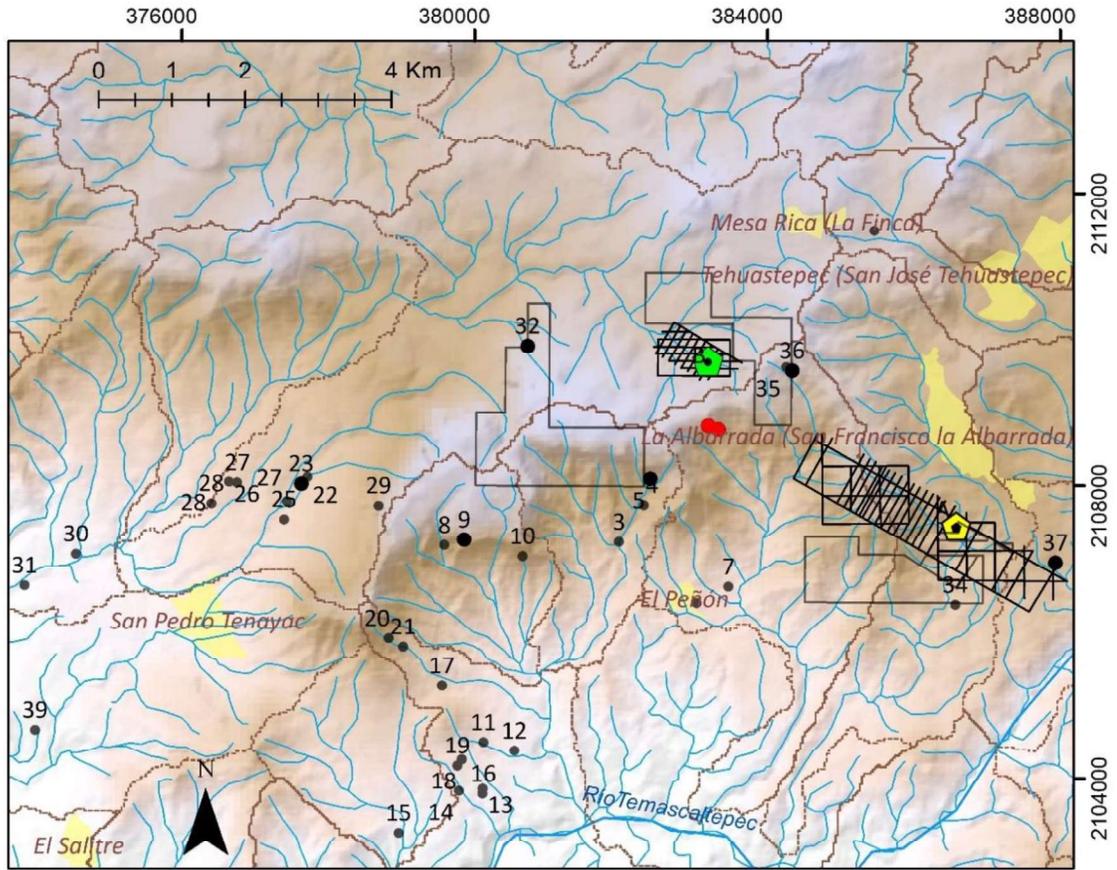
Etapa 2

Para la selección de las fuentes a estudiar se consideró su ubicación así como su dependencia aguas arriba de los fundos y desarrollos mineros, tal y como se estableció en el proceso metodológico, en este sentido, 6 manantiales cumplieron con dichos criterios para ser parte del análisis. Asimismo, se consideró relevante el estudio de las antiguas perforaciones mineras de las que actualmente emana cierto caudal, como en el caso del Socavón de Guadalupe cuyo volumen se utiliza para su uso en la agricultura, mientras que el Barreno de exploración se incluyó en el análisis para conocer el uso potencial que la población podría darle a su caudal (Tabla y Figura 4.2).

Con base en la delimitación de las microcuencas y la red hidrográfica se observa que en algunos manantiales como en El Bosque y La Laja, su área de alimentación se encuentra alejada de las concesiones y desarrollos mineros (Figura 4.2), sin embargo, se seleccionaron para su protección debido a que algunos pobladores los consideraron afectados ya sea por contaminación o pérdida de caudal a causa de la minería.

Tabla 4.2. Fuentes de agua subterránea seleccionadas

No	ID	Comunidad	Nombre	Tipo de fuente	Coordenadas		Z
					X	Y	
1	1	El Peñón	Socavón Guadalupe	Antiguo socavón	383192	2108820	2082
2	2	El Peñón	Barreno de Exploración	Barreno	383328	2108771	2118
3	5	El Peñón	La Ciénega 1 y 2	Manantial	382400	2108096	2095
4	9	Cerro Pelón	La Laja	Manantial	379856	2107265	2044
5	23	San Pedro Tenayac	El Bosque (depósito grande)	Manantial	377634	2108027	1751
6	32	Las Trancas	Las Trancas	Manantial	380724	2109913	2297
7	36	San Francisco la Albarrada	La Peña	Manantial	384338	2109576	2363
8	37	San Francisco la Albarrada	La Palma	Manantial	387933	2106948	1863



SIMBOLOGÍA

- | | | | |
|---|---------------------|---|---------------------------|
|  | Mina Coloso |  | Secciones longitudinales |
|  | Mina Guitarra |  | Microcuencas |
|  | Localidades |  | Manantiales seleccionados |
|  | Concesiones mineras |  | Fuentes alternas |

Figura 4.2. Mapa de ubicación de los fondos mineros y fuentes seleccionadas de agua.

4.3. Caracterización hidrogeológica y fisicoquímica

Se realizó la caracterización hidrogeológica y fisicoquímica del agua de las fuentes de abastecimiento a través de dos etapas, la primera consistió en realizar trabajo de gabinete para recopilar toda la información disponible del área de estudio, y durante la segunda etapa se realizó trabajo de campo para corroborar la información de las características de las fuentes de abastecimiento, y establecer una relación de similitudes o de contrastes con la información obtenida en un principio con sus diferentes escalas de trabajo.

4.3.1. Trabajo de gabinete

La Figura 4.3 muestra que las fuentes de abastecimiento se ubican en dos tipos de rocas, primordialmente basalto (QptB) e ignimbrita-riolita (ToIg-R); asimismo, el ambiente geológico se caracteriza por ser de tipo fracturado donde existe la presencia de algunas fallas. Las características de las rocas volcánicas usualmente presentan una alta permeabilidad que se genera por su grado de fracturamiento.

4.3.2. Trabajo de campo

Durante las visitas a campo se inspeccionaron las características del entorno de las fuentes de abastecimiento como lo son: la geología, la vegetación y el clima, no obstante, se analizaron con mayor detalle los parámetros fisicoquímicos del agua de las fuentes, donde se contó con la participación de algunos compañeros alumnos de la Maestría en Ciencias del Agua quienes auxiliaron para la toma in situ de dichos parámetros, además, algunos representantes tanto de las comunidades como de la mina La Guitarra fueron de gran ayuda para localizar las fuentes seleccionadas del área de estudio.

Las etapas de muestreo consistieron en lo siguiente:

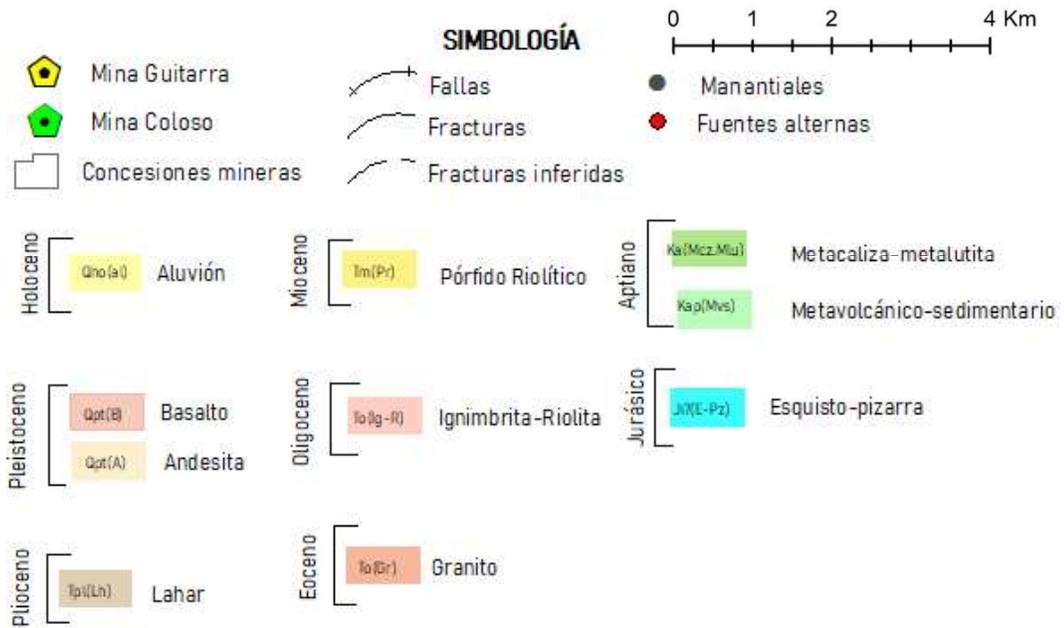
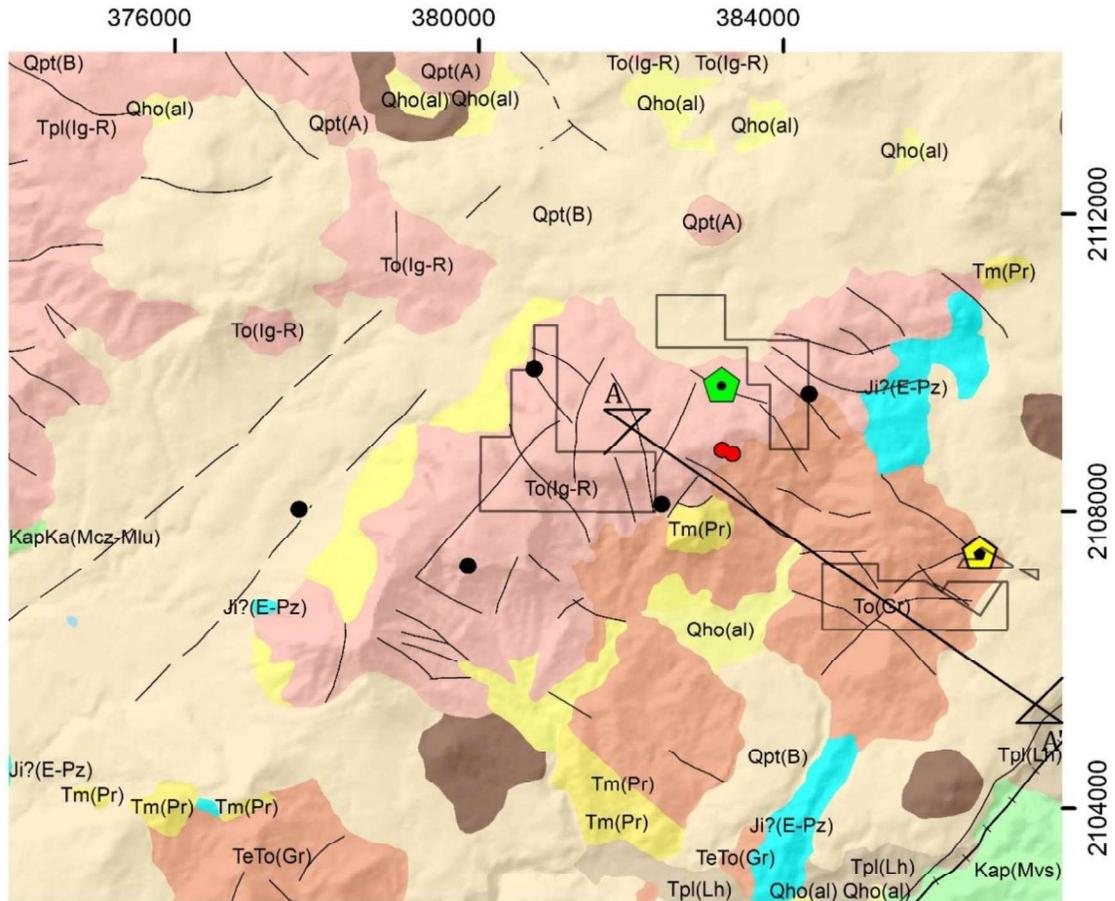


Figura 4.3. Entorno geológico y ubicación de fuentes de abastecimiento y actividades mineras.

a) Corroboración de la información recabada en gabinete con la obtenida en campo

Se verificó la ubicación exacta y características de las fuentes con los datos obtenidos en gabinete, donde logró detectarse que evidentemente las fuentes se encuentran en rocas volcánicas con alto grado de fracturamiento, además existe una densa vegetación de tipo boscosa como en el caso del manantial “Las Trancas” (Figura 4.4).

b) Determinación de los parámetros fisicoquímicos

La información recabada en las fuentes de abastecimiento fue la siguiente: fecha, hora, temperatura ambiente y del agua, pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD) (Tabla 4.3). Esta información se registró en las fichas de muestreo como en el ejemplo de la Figura 4.5.

Por otra parte, se muestreó el agua de extracción de las minas La Guitarra (A) y El Coloso (B) debido a la importancia que representa el análisis fisicoquímico de sus aguas para comparar los resultados obtenidos con los de las demás fuentes (Tabla 4.4).



Figura 4.4. Manantial Las Trancas.

Tabla 4.3. Parámetros fisicoquímicos in situ del agua de las fuentes para las campañas de muestreo

ID	Nombre de la Fuente	Etapas	Fecha	Hora	T agua °C	T amb °C	pH	CE (µs/cm)	STD (ppm)	Uso
1	Socavón Guadalupe	1	23/04/19	13:16	18	21	5.65	72.7	37.28	Agricultura
		2	30/10/19	10:30	18	18	5.38	52.1	26.71	
2	Barreno de Exploración	1	23/04/19	11:20	19	26	5.74	134.1	68.76	
		2	28/11/19	11:07	20	27	6.11	133.1	68.25	
5	La Ciénega 1 y 2	1	23/04/19	03:50	20	20	4.95	30.7	15.74	Doméstico
		2	30/10/19	13:30	18	20	5.2	28.4	14.57	
9	La Laja	1	24/05/19	12:15	19	20	7.38	26.5	13.61	Doméstico
		2	29/10/19	13:00	19	18	6.99	23.7	12.13	
23	El Bosque	1	30/04/19	13:00	18	29	5.60	26.6	13.66	Doméstico
		2	28/10/19	11:25	20	21	5.08	25.8	13.22	
32	Las Trancas	1	30/04/19	11:00	14	19	5.58	16.9	8.50	Doméstico
		2	21/11/19	09:46	14	15	6.4	16.0	8.20	
36	La Peña	1	22/04/19	13:50	18	22	6.55	29.2	14.95	Doméstico
		2	31/10/19	10:28	16	18	5.37	28.1	14.39	
37	La Palma	1	30/04/19	15:00	19	29	5.81	123.9	63.53	Doméstico

Tabla 4.4. Parámetros fisicoquímicos in situ del agua de las minas para las campañas de muestreo

ID	Nombre de la Fuente	Etapas	Fecha	Hora	T agua °C	T amb °C	pH	CE (µs/cm)	STD (mg/L)	Uso
A	Guitarra	1	22/04/19	10:45	17	23	2.82	1026	526.15	
		2	29/10/19	14:52	18	17	2.45	2362	1211.2	
B	Coloso	1	22/04/19	12:18	18	22	2.92	827	424.10	
		2	31/10/19	10:15	18	19	2.71	953	488.70	

Ficha de identificación de fuentes de agua					
1. Identificación					
Nombre:	Socavón de Guadalupe				
Tipo de fuente:	Antigua perforación minera				
No. Título de concesión					
Fecha:	04/01/2019				
Hora:	09:15				
Flujo LPS:					
	1.95				
2. Localización					
Comunidad	Municipio	Ejido			
El Peñón	Temascaltepec	San José Potrerillos			
Cuenca	Región Hidrológica	Afluente			
8	Balsas	Rio la planta			
Coordenadas (UTM)		X	Y	Altitud	
		383192	2108820	2082	
3. Uso del agua:		Doméstico			
4. Descripción					
Esta fuente es un escurrimiento en una antigua obra minera, la comunidad hace uso del agua desde hace 8 años. Existe mucho arrastre de sedimento principalmente arena y arcilla.					
5. Información adicional					

Figura 4.5. Ficha de identificación del Socavón de Guadalupe.

A partir de los datos obtenidos se efectuó una caracterización de dichas fuentes de abastecimiento:

a. Temperatura

La temperatura del agua de las fuentes en estudio osciló entre los 14°C y 20°C con un promedio general de 18°C, esto puede indicar que son aguas provenientes de sistemas de flujo someros con temperaturas parecidas a la temperatura ambiente.

El manantial Las Trancas presentó la temperatura más baja (14°C) en contraste con La Ciénega 1 y 2 y El Bosque que registraron las temperaturas más altas (20°C). Dichos manantiales llegan a la captación a través de tuberías, lo que significa que tienen menor riesgo de contaminación en comparación con Las Trancas que se encuentra a la intemperie.

b. pH

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (2017) establece un rango de pH de 6.5 a 8.5 para el uso y consumo de agua. Este parámetro indica la acidez o alcalinidad de cualquier líquido. El rango establecido permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua.

El pH osciló entre 4.9 y 7.3. En general, la mayoría de las fuentes presentaron un pH por debajo y cercanos a 7, siendo los más ácidos los pertenecientes a La Ciénega 1 y 2. Las fuentes con resultados ligeramente alcalinos corresponden a La Laja y La Palma cuyos valores se encuentran dentro de los rangos permisibles de la Norma Mexicana NOM-127.

c. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica proporciona una evaluación de la concentración total de iones disueltos en el agua y es la capacidad del agua para transmitir corriente eléctrica. La conductividad eléctrica del presente presentó un promedio de 54.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que en relación con la cantidad de STD es indicador de agua de buena calidad fisicoquímica.

Los valores más elevados se presentaron en las descargas de las minas (A y B) que se relacionan con una mayor cantidad de sólidos o sales disueltas sus aguas.

d. Sólidos totales disueltos (STD)

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2017 establece el límite máximo permisible de STD en de 1000 mg/L (equivalentes a 1000 ppm); sin embargo, para la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1993) es de 500 mg/L.

Los resultados de las fuentes mostraron valores de STD que varían desde los 8.20 mg/L hasta los 68.76 mg/L, reflejando que los valores no sobrepasan los límites establecidos por ambas normas. El análisis hidrogeológico de la región en relación con la génesis de las fuentes, confirma que se está en presencia de manantiales cuyas aguas son de reciente infiltración dado los valores bajos de STD, a excepción de las aguas de extracción de las minas cuyos valores de STD sobrepasan los límites máximos que establecen las normas.

Los resultados de los análisis de iones mayoritarios y elementos traza minoritarios que se realizaron en el laboratorio de Juriquilla de la UNAM, se muestran en el apartado de Anexos 1. Estos sirvieron para realizar el Análisis Multicriterio ya que indicarían la presencia o no de metales pesados en las fuentes de abastecimiento estudiadas.

A continuación, se realiza una descripción de las fuentes con la información recabada en campo.

1. Antigua perforación minera: Socavón de Guadalupe

El Socavón de Guadalupe se localiza al sur de la mina El Coloso y pertenece a la comunidad de El Peñón, ejido de San José Potrerillos. Esta fuente abastece a una población de 533 habitantes (INEGI, 2020). De igual manera, representa una antigua perforación minera y actualmente se encuentra protegida por una obra de captación, donde la población utiliza su caudal para la agricultura. No obstante, presenta mucho arrastre de sedimentos principalmente de arena y arcilla (Figura 4.6). Su cercanía con la mina representa un riesgo latente para sus aguas sobre todo por el uso que de la población.



Figura 4.6. Antigua perforación minera Socavón de Guadalupe, El Peñón, Temascaltepec.

2. Antigua perforación minera: Barreno de exploración

El Barreno de exploración representa un antiguo barreno minero que se encuentra abierto desde el 2017 y está próximo al Socavón de Guadalupe, se localiza en la comunidad de El Peñón, ejido de San José Potrerillos. Actualmente, no es una fuente de abastecimiento ya que se desconocen las características de sus aguas, durante las visitas a campo se observó que la fuente se encuentra bastante expuesta al arrastre de sedimentos y probablemente de contaminantes.

El propósito de su estudio fue conocer la calidad de sus aguas, ya que la población pretende aprovechar su caudal para unirlo a la red de agua potable de la primera sección de la comunidad El Peñón (Figura 4.7).



Figura 4.7. Antigua perforación minera Barreno de exploración, El Peñón, Temascaltepec.

3. Manantial La Ciénega 1 y 2

El manantial La Ciénega 1 y 2 se localiza al suroeste de la mina El Coloso y al igual que las fuentes anteriores pertenece a la comunidad de El Peñón, ejido privado. El punto de muestreo recibe caudal de La Ciénega 1 y La Ciénega 2, localizadas a dos metros de distancia una de la otra que llegan a un solo depósito junto con el manantial de La Peña para abastecer a una sección de El Peñón (Figura 4.8).

El agua del manantial abastece una población de 533 habitantes (INEGI, 2020), asimismo, con base en la información obtenida por los pobladores de la zona se sabe que la fuente es aprovechada desde hace 30 años, sin embargo, es notable que existe una falta de mantenimiento en el área de captación.



Figura 4.8. Manantial La Ciénega 1 y 2, El Peñón, Temascaltepec.

4. Manantial La Laja

El Manantial La Laja se localiza en la comunidad de Cerro Pelón, ejido de San Francisco La Albarrada, hacia la porción suroeste de las concesiones mineras. El agua del manantial brota de una peña que presenta diferentes puntos de escurrimiento, además, junto con el manantial Brinco de León abastece a la comunidad de Cerro Pelón de aproximadamente 700 habitantes (INEGI, 2020), quienes improvisaron un filtro de piedras antes de captar sus aguas en una caja (Figura 4.9).

Los escurrimientos no presentan algún tipo de protección, lo que indica que se encuentran bastantes expuestos a cualquier tipo de contaminantes y daños por las lluvias.



Figura 4.9. Manantial La Laja, Cerro Pelón, Temascaltepec.

5. Manantial El Bosque

El Bosque es un manantial que se localiza en la porción occidental del área de estudio, pertenece a la comunidad de San Pedro Tenayac, ejido de San Pedro Tenayac. Su caudal abastece a la comunidad de San Pedro Tenayac que tiene una población de 1802 habitantes (INEGI, 2020). Actualmente, sus aguas se utilizan para consumo potable, la toma se ubica a 80 metros de su nacimiento. En el entorno se encuentra parcelas agrícolas que representan un riesgo de contaminación del agua del manantial (Figura 4.10).



Figura 4.10. Manantial El Bosque, San Pedro Tenayac, Temascaltepec.

6. Manantial Las Trancas

El manantial Las Trancas pertenece a la comunidad de Las Trancas y se localiza al noroeste de los fundos y desarrollos mineros, abastece a 34 habitantes (INEGI, 2020). Este manantial se compone de varios brotes de una peña y como se muestra en la Figura 4.11, no cuenta con una zona de captación de sus aguas por lo que se encuentra bastante expuesto a cualquier tipo de contaminación.



Figura 4.11. Manantial Las Trancas, Las Trancas, Temascaltepec.

7. Manantial La Peña

El manantial de La Peña pertenece a la comunidad de San Francisco la Albarrada, ejido de Godínez Tehuastepec, abastece una población de 200 habitantes (INEGI, 2020). El agua del manantial escurre en una peña y es captada en una caja de mampostería para conducirla hasta el depósito de distribución de agua potable (Figura 4.12).



Figura 4.12. Manantial La Peña, San Francisco la Albarrada, Temascaltepec.

8. Manantial La Palma

El manantial de La Palma se localiza cercano a la mina La Guitarra y pertenece a la comunidad de San Francisco La Albarrada, Bienes Comunes San Francisco la Albarrada. El manantial La Palma y El Pino abastecen a la sección de La Desviación de San Francisco La Albarrada. El agua del manantial brota a ras de suelo y es captada en una caja de mampostería. En campo se observó que el mantenimiento en el manantial es muy escaso y la vegetación demasiado densa, por lo que dificulta la ubicación visual (Figura 4.13).



Figura 4.13. Manantial La Palma, San Francisco la Albarrada, Temascaltepec

c) Caudales promedio de las fuentes de abastecimiento

Durante ambas campañas de muestreo se realizaron aforos de caudal con el método volumétrico. En los casos donde no se logró recabar información ya sea porque las condiciones del entorno de la fuente o del propio caudal no lo permitieron, fue necesario consultar con la mina La Guitarra los datos recabados de los caudales con anterioridad.

De igual manera, se incluyeron en el análisis los datos volumétricos de los manantiales registrados en el REPDA (2019). Gracias a esta información se obtuvieron los caudales promedio de las fuentes y el Barreno de exploración que se detallan en la Tabla 4.5. La Laja es la fuente cuyo caudal es mayor (3 L/s), su uso es doméstico y abastece a una población de 700 habitantes.

4.3.3. Clasificación de las fuentes de abastecimiento y delimitación de zonas de protección

Los manantiales (números 3-8) se clasificaron de tipo hipodérmico de contacto y de gravedad (descendientes o de ladera), debido a que nacen en las serranías donde emerge una vegetación boscosa densa.

Tabla 4.5. Caudal de las fuentes de agua subterránea.

No	ID	Comunidad	Fuente	Caudal (L/s)
1	1	El Peñón	Socavón Guadalupe	2.5
2	2	El Peñón	Barreno de Exploración	0.5
3	5	El Peñón	La Ciénega 1 y 2	1.4
4	9	Cerro Pelón	La Laja	3
5	23	San Pedro Tenayac	El Bosque (depósito grande)	1
6	32	Las Trancas	Las Trancas	2
7	36	San Francisco la Albarrada	La Peña	0.5
8	37	San Francisco la Albarrada	La Palma	0.5

Estos manantiales de tipo hipodérmicos de zonas montañosas tienen una estrecha relación con los patrones de precipitación, ya que tales flujos circulan de modo somero y rápido por las formaciones permeables de escasa profundidad. En resumen, se trata de una rápida infiltración, con 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.

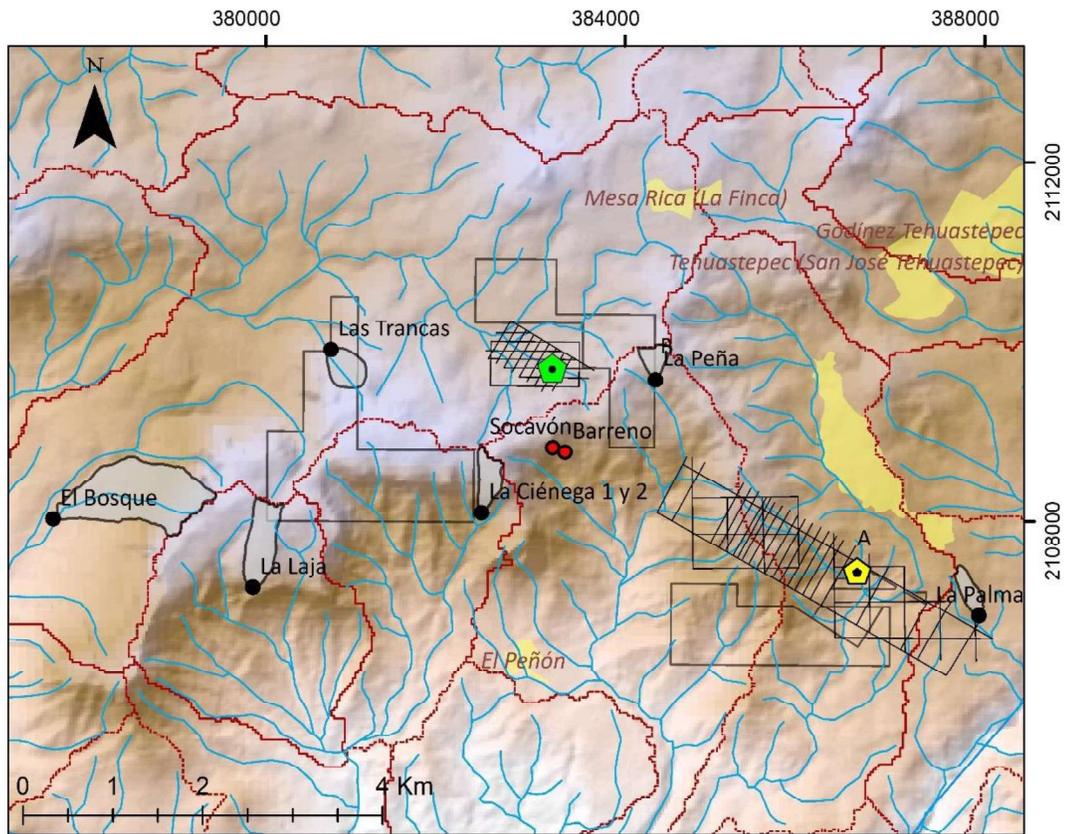
Por la constancia de su caudal se consideran de tipo permanente; sin embargo, al responder a las condiciones climáticas de lluvias locales estacionales, el caudal de los manantiales varía durante el año al igual que en el caso de las antiguas perforaciones mineras, siendo más elevado durante la época de lluvias. Desde el punto de vista de la descarga, los manantiales surgen en condiciones no confinadas en un medio volcánico fracturado, donde predominan rocas de ignimbrita-riolita y basalto.

Los resultados de los análisis fisicoquímico permitieron considerar que el flujo de las fuentes, en general, proviene de la infiltración reciente de las precipitaciones locales o del agua de la superficie, además de que la zona de origen es muy local debido a que los valores fueron relativamente bajos en cuanto a los STD y CE, además, estos valores se encuentran por debajo de los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2017 y la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1993), para el agua destinada al consumo humano.

4.4. Delimitación de las zonas de protección

4.4.1. Delimitación de las zonas de captura potencial

Las zonas de captura potencial de las fuentes seleccionadas se observan en la Figura 4.14 así como de las Figuras 4.15 a la 4.20, indicándose la superficie que ocupa dicha zona.



SIMBOLOGÍA

- | | | | |
|---|---------------------|---|--------------------------|
|  | Mina Guitarra |  | Secciones longitudinales |
|  | Mina Coloso |  | Zonas de captura |
|  | Localidades |  | Fuentes
alternas |
|  | Corrientes |  | Manantiales |
|  | Concesiones mineras | | |

Figura 4.14. Zonas de captura potencial de las fuentes seleccionadas.

3. Zona de captura del manantial La Ciénega 1 y 2 (Área: 135,128 m²)

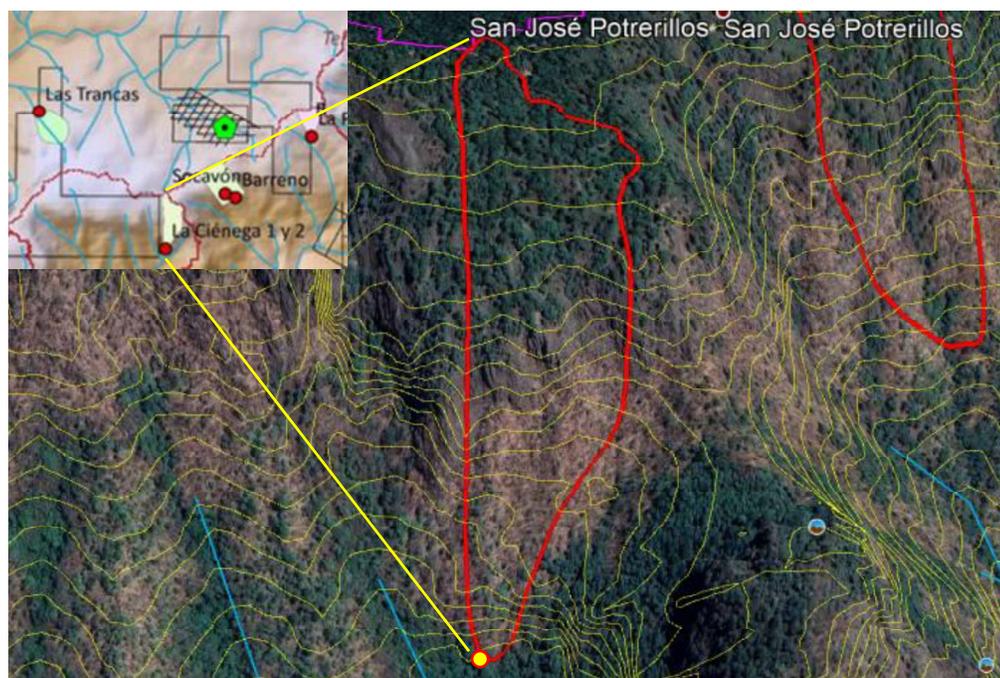


Figura 4.15. Zona de captura potencial del manantial La Ciénega 1 y 2.

4. Zona de captura del manantial La Laja (Área: 113,336 m²)

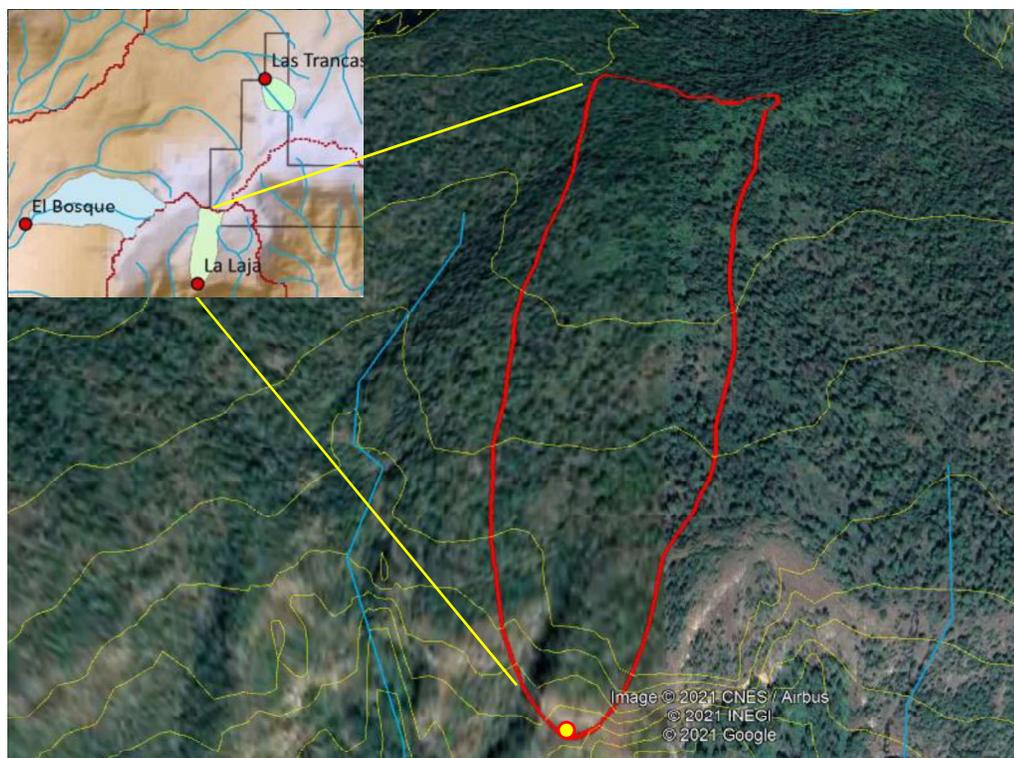


Figura 4.16. Zona de captura potencial del manantial La Laja.

5. Zona de captura del manantial El Bosque (Área: 905,492.29 m²)

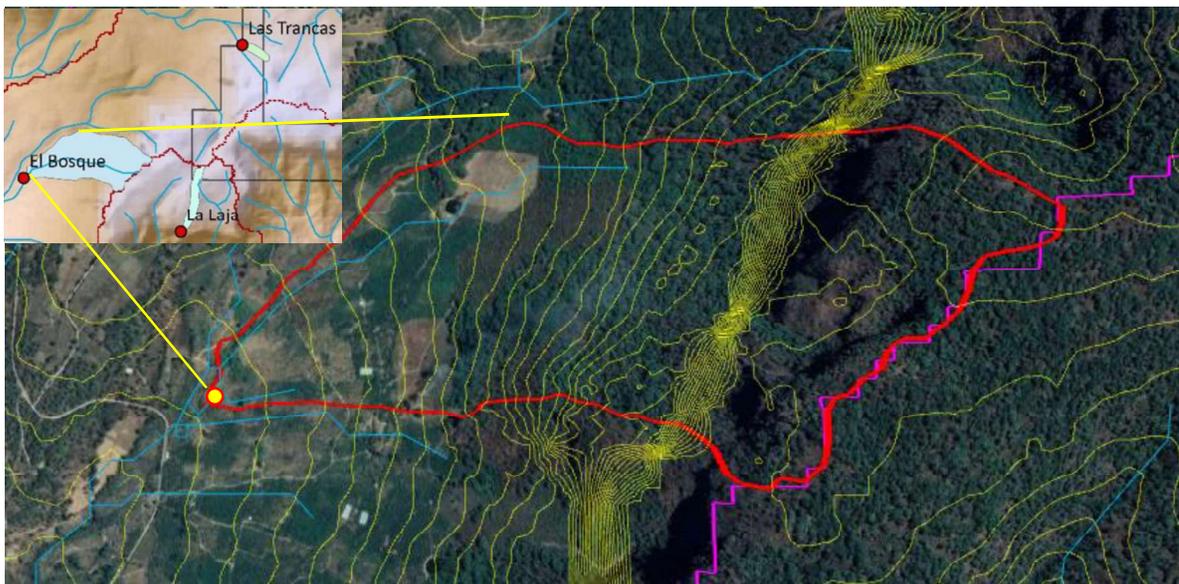


Figura 4.17. Zona de captura potencial del manantial El Bosque.

6. Zona de captura del manantial Las Trancas (Área: 45,281 m²)

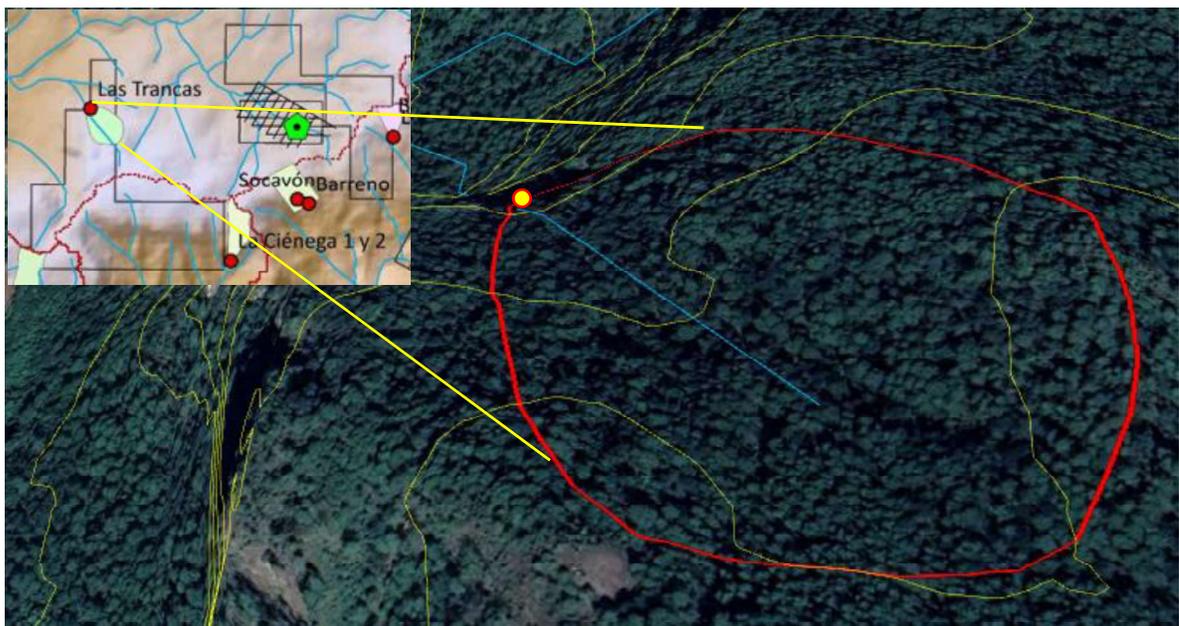


Figura 4.18. Zona de captura potencial del manantial Las Trancas.

7. Zona de captura del manantial La Peña (Área: 85,003 m²)

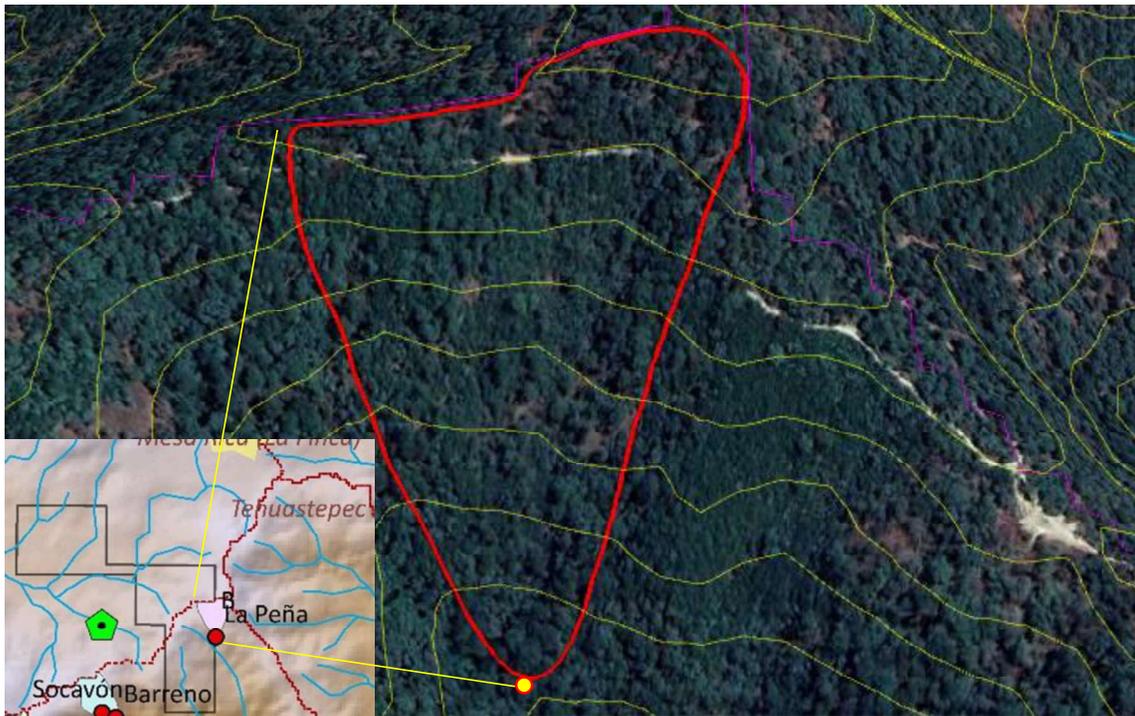


Figura 4.19. Zona de captura potencial del manantial La Peña.

8. Zona de captura del manantial La Palma (Área: 91,065 m²)

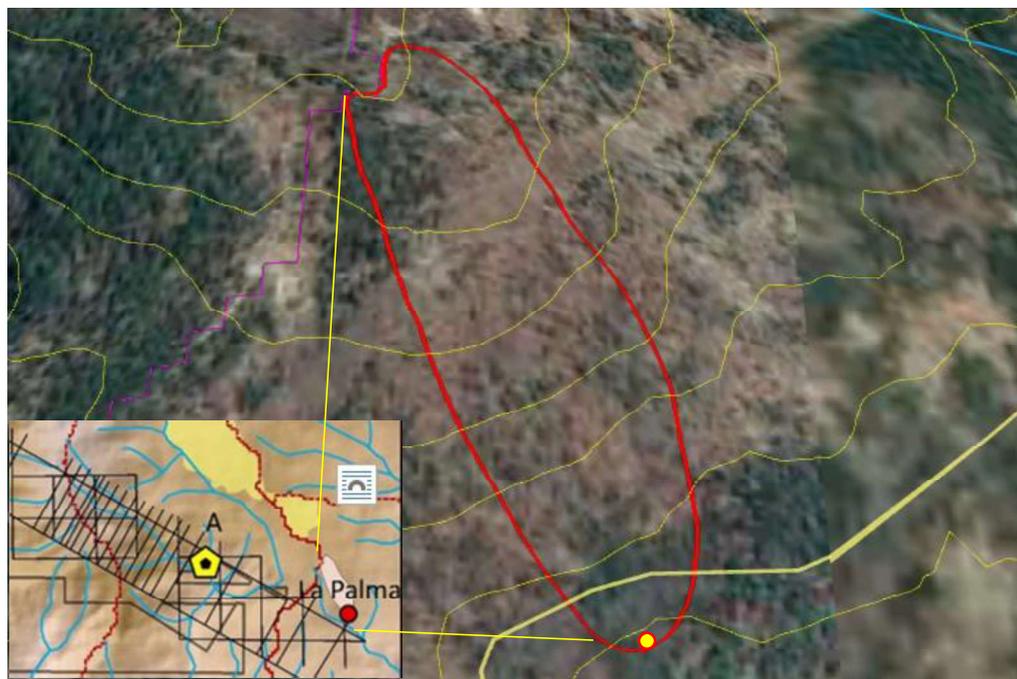


Figura 4.20. Zona de captura potencial del manantial La Palma.

4.4.2. Estimación de las zonas de recarga de las fuentes

4.4.2.1. Justificación de la escala y el periodo del balance hídrico

Se eligió un periodo mínimo de 15 años para el cálculo del balance hídrico debido a que la zona de estudio es relativamente pequeña (escala 1:86.000), lo que deriva en una falta de información meteorológica e hidrométrica para considerar más años en el estudio. La escala y el periodo de estudio fue determinante para la ejecución de los cálculos de balance hídrico.

4.4.2.2. Precipitación

El histograma de precipitación media mensual (Figura 4.21) muestra que en el mes de mayo inician las lluvias de mayor frecuencia, sin embargo, de junio a octubre se muestra un cambio drástico en los patrones de precipitación y se registran los picos más altos de lluvias. Por tal motivo, se establece que los “meses de lluvias” se presentan de mayo a octubre mientras que los meses de estiaje se presentan de noviembre a abril.

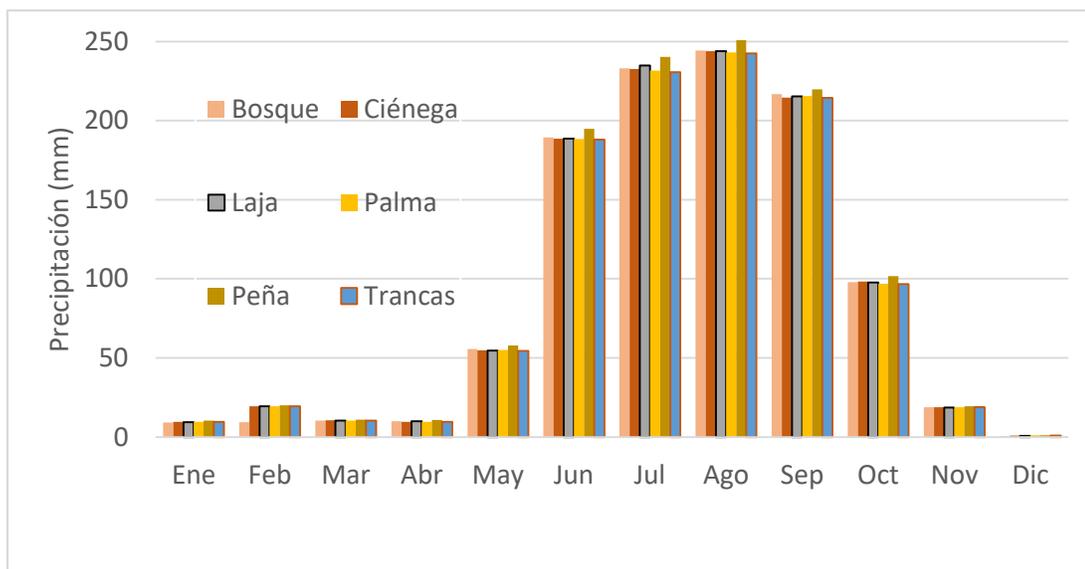
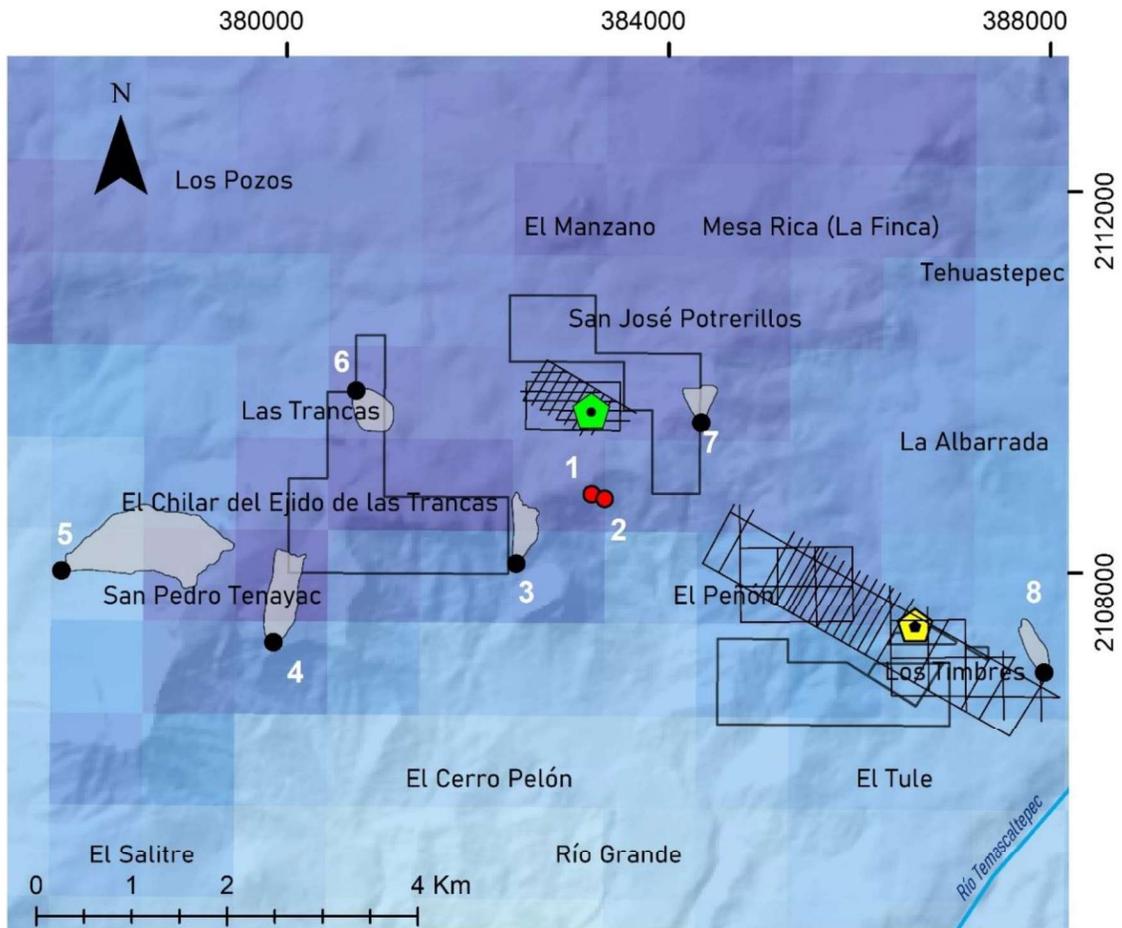


Figura 4.21. Histograma de precipitación media mensual de las zonas de captura potencial de las fuentes.

En las zonas de captura potencial de las fuentes, la precipitación media mensual osciló entre los 1095.2 mm para el manantial El Bosque y 1139.4 mm anuales en La Peña. Debido a la cercanía entre manantiales se observa que el comportamiento en cuanto a lo que precipita no difiere significativamente, además, es notable que por la ubicación geográfica de los manantiales (en la serranía), las precipitaciones representan las más elevadas de toda la zona (Tabla 4.6 y Figura 4.22).

Tabla 4.6. Precipitación media mensual y anual en las zonas de captura potencial de las fuentes (mm).

No	Mn	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
3	Ciénega	9.5	19.5	10.6	9.6	54.8	188.6	232.6	243.9	214.4	98.2	18.8	0.8	1101.8
4	Laja	9.1	19.3	10.3	10.5	56	190.8	234.9	245.7	219.1	98.9	18.5	0.5	1114.1
5	Bosque	9.2	9.4	10.4	10	55.5	189.3	233.1	244.2	216.7	97.8	18.7	0.5	1095.2
6	Trancas	10.3	19.9	10.9	10.2	57	193.3	237.9	249.6	219.7	100.2	19.2	1.3	1130
7	Peña	10.3	20	11.0	10.7	57.7	194.7	240.3	252.1	219.7	101.6	19.3	1.1	1139
8	Palma	9.6	19.5	10.5	9.6	54.9	188.4	231.5	243	215.6	96.8	18.7	1	1099.6



SIMBOLOGÍA

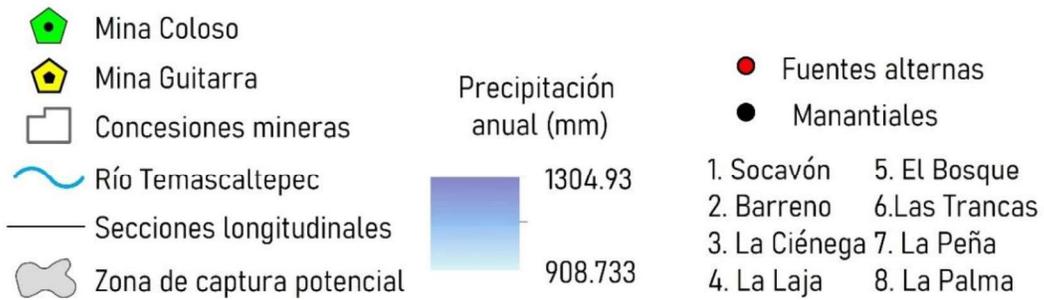


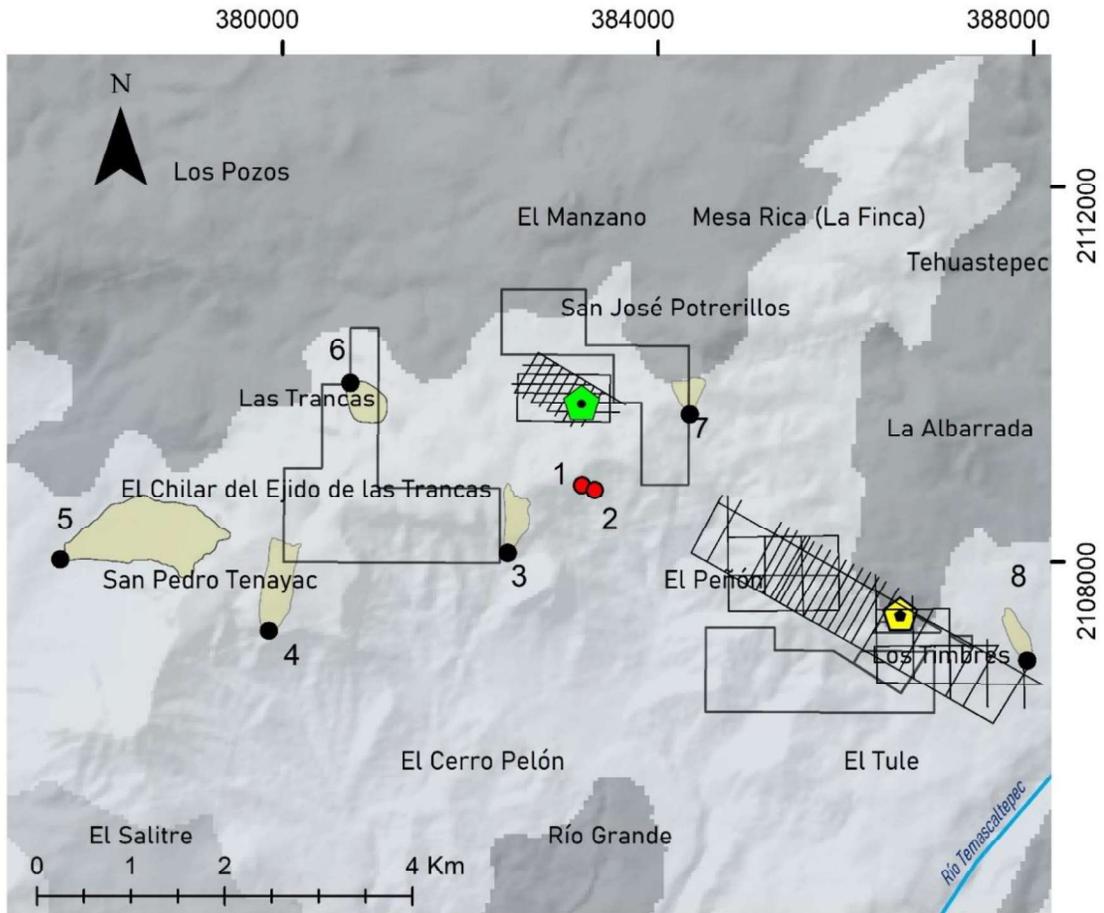
Figura 4.22. Mapa de precipitación media anual de las zonas de captura de las fuentes (periodo 2003-2018).

4.4.2.3. Escurrimiento superficial

Los resultados preliminares para obtener el escurrimiento superficial fueron a continuación, se describen:

a) Tipo de suelo (Textura y permeabilidad)

El mapa en la clase A presenta a los suelos permeables y de textura gruesa, la clase B indica los suelos que son medianamente permeables y de textura media y la clase C representa los suelos casi impermeables debido a su textura fina (Figura 4.23). En el área de estudio predomina el tipo de suelo de textura media y todas las fuentes se encuentran en esta clase de textura. A su vez, esta clase podría favorecer el proceso de percolación que impactaría en el caudal de las fuentes. Por otra parte, la textura gruesa se encuentra en la zona norte, mientras que la textura fina no representa datos significativos al encontrarse como una pequeña mancha en la comunidad de El Salitre hacia el suroeste.



SIMBOLOGÍA

- | | | | | |
|---|---------------------------|---|---|------------------|
|  | Mina Coloso | |  | Fuentes alternas |
|  | Mina Guitarra | |  | Manantiales |
|  | Concesiones mineras | Tipo de suelo (Textura) | | |
|  | Río Temascaltepec |  | Gruesa | 1. Socavón |
|  | Secciones longitudinales |  | Media | 5. El Bosque |
|  | Zona de captura potencial |  | Fina | 6. Las Trancas |
| | | | | 7. La Peña |
| | | | | 8. La Palma |

Figura 4.23. Tipo de suelo según su textura y zonas de captura potencial de las fuentes (con base en IFOMEGEM, 2014).

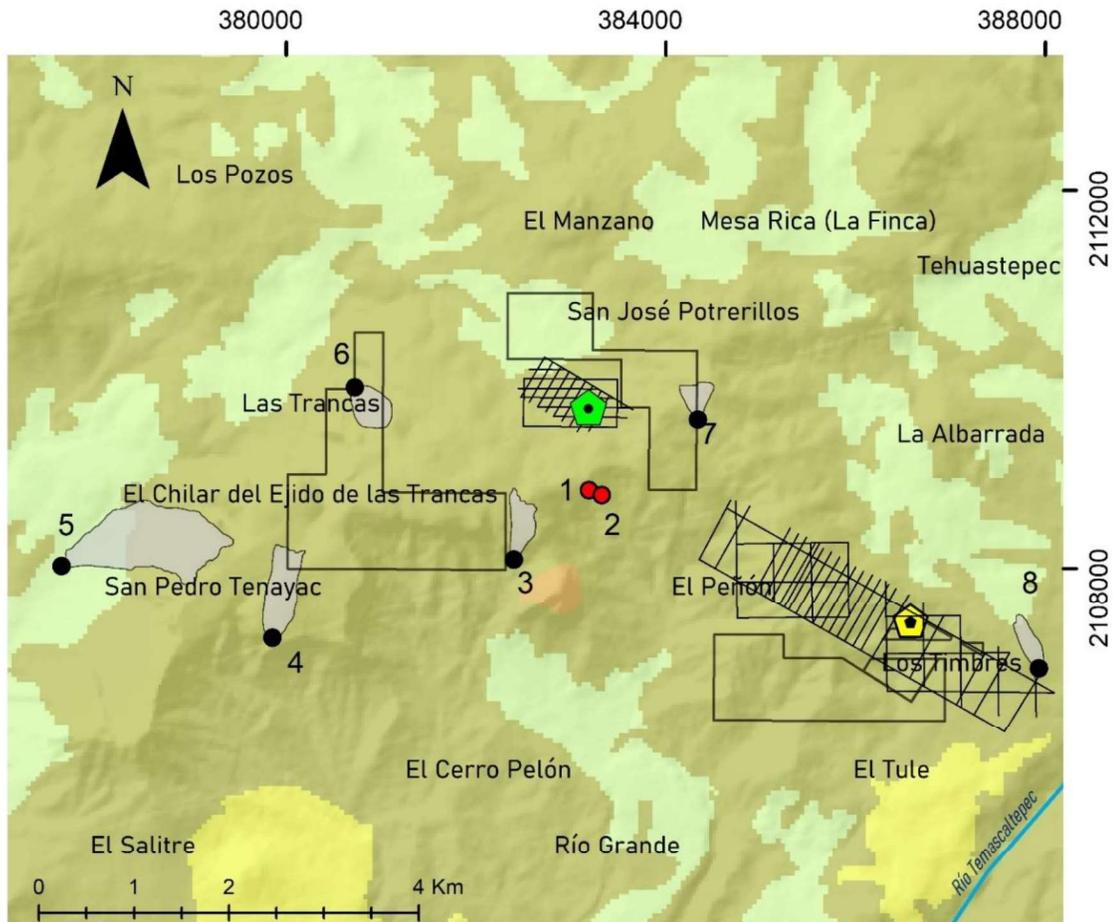
b) Uso de suelo

En el área de estudio se lograron definir 5 clases: suelo desnudo, agrícola, pastizal, urbano y bosque denso, de forma que la cubierta vegetal superaba el 75% (Figura 4.24). En el área se observa que predomina el bosque denso principalmente donde se localizan todas las fuentes en estudio, a excepción de la zona de captura potencial del manantial El Bosque donde se incluye también uso de suelo agrícola.

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

Fueron 5 las categorías que se generaron para determinar los valores de K las cuales partieron del tipo y uso de suelo y que sirvieron a su vez para obtener el Ce (Figura 4.25 y Tabla 4.7).

Los valores de K se encuentran entre 0.17 y 0.32, los valores más bajos se localizan hacia el norte del área de estudio y representan un menor escurrimiento y mayor infiltración. En las zonas de captura de las fuentes se determinaron valores altos de escurrimiento que implican una menor infiltración.



SIMBOLOGÍA

	Mina Coloso		
	Mina Guitarra		
	Concesiones mineras		Suelo desnudo
	Río Temascaltepec		Agrícola
	Secciones longitudinales		Pastizal
	Zona de captura potencial		Bosque denso
			Fuentes alternas
			Manantiales
		1. Socavón	5. El Bosque
		2. Barreno	6. Las Trancas
		3. La Ciénega	7. La Peña
		4. La Laja	8. La Palma

Figura 4.24. Mapa de uso de suelo para el 2014 y zonas de captura potencial de las fuentes (con base en IFOMEGEM, 2014).

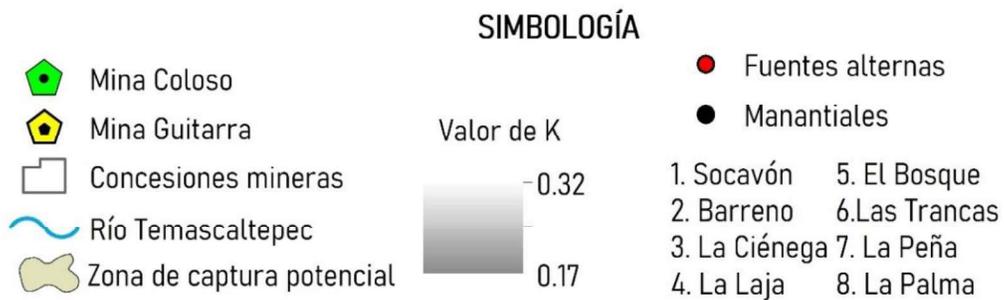
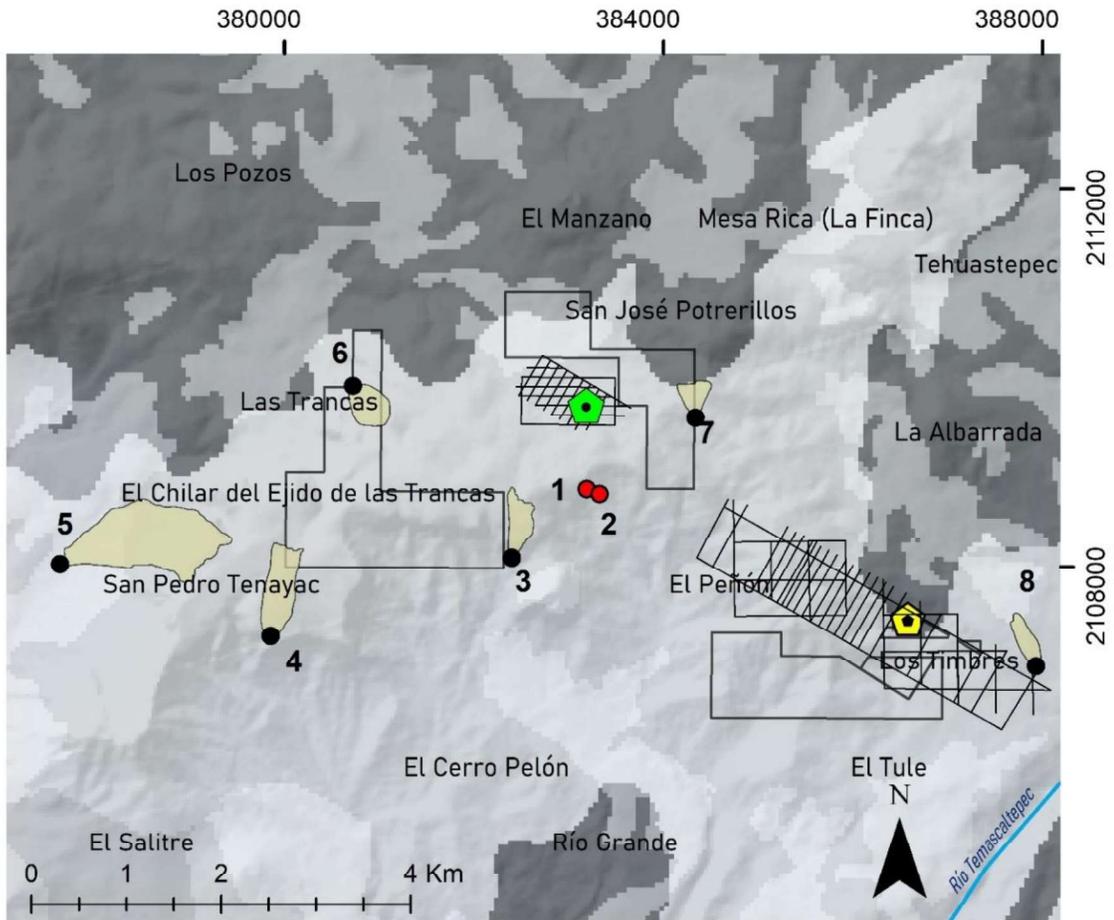


Figura 4.25. Mapa de valores de K y zonas de captura potencial de las fuentes.

Tabla 4.7. Valores de K en función del tipo y uso de suelo (DOF, 2002).

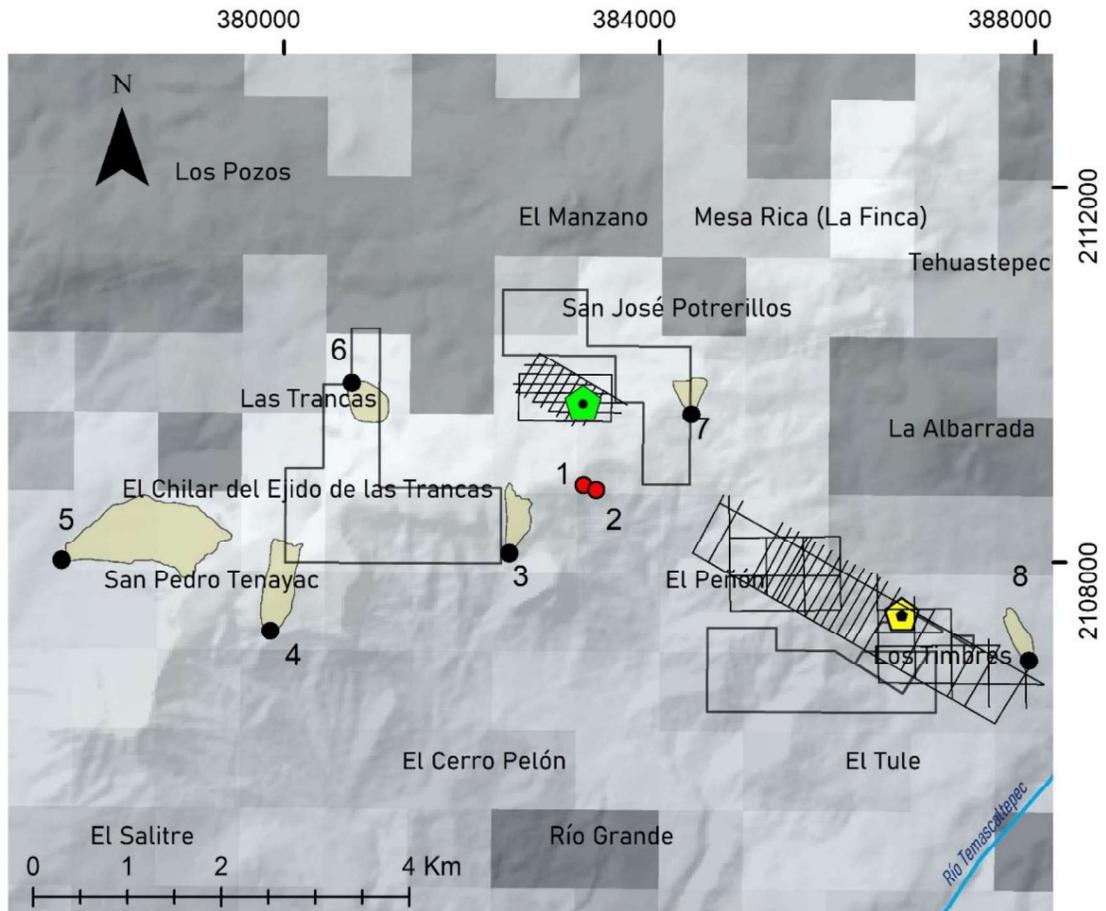
No.	Uso de suelo	Tipo de suelo		
		A	B	C
1	Barbecho, áreas no cultivadas y desnudas	0.26	0.28	0.30
2	Cultivos	0.24	0.27	0.30
3	Pastizal con más del 75%	0.14	0.24	0.30
4	Bosque cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
5	Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32

d) Coeficiente de escurrimiento anual

Al resultar los valores de K mayores de 0.15 se utilizó la ecuación 3.5 descrita en el apartado de métodos para el cálculo del Ce. En la Figura 4.26 se observa que los valores de Ce varían de 0.06 a 0.17 donde los valores más altos se localizan en la serranía y el área de las fuentes, mientras que los valores más bajos y medios se localizan en la parte norte del área de estudio. Los valores medios son buenos indicadores por favorecer el proceso de infiltración total.

e) Escurrimiento superficial anual y mensual

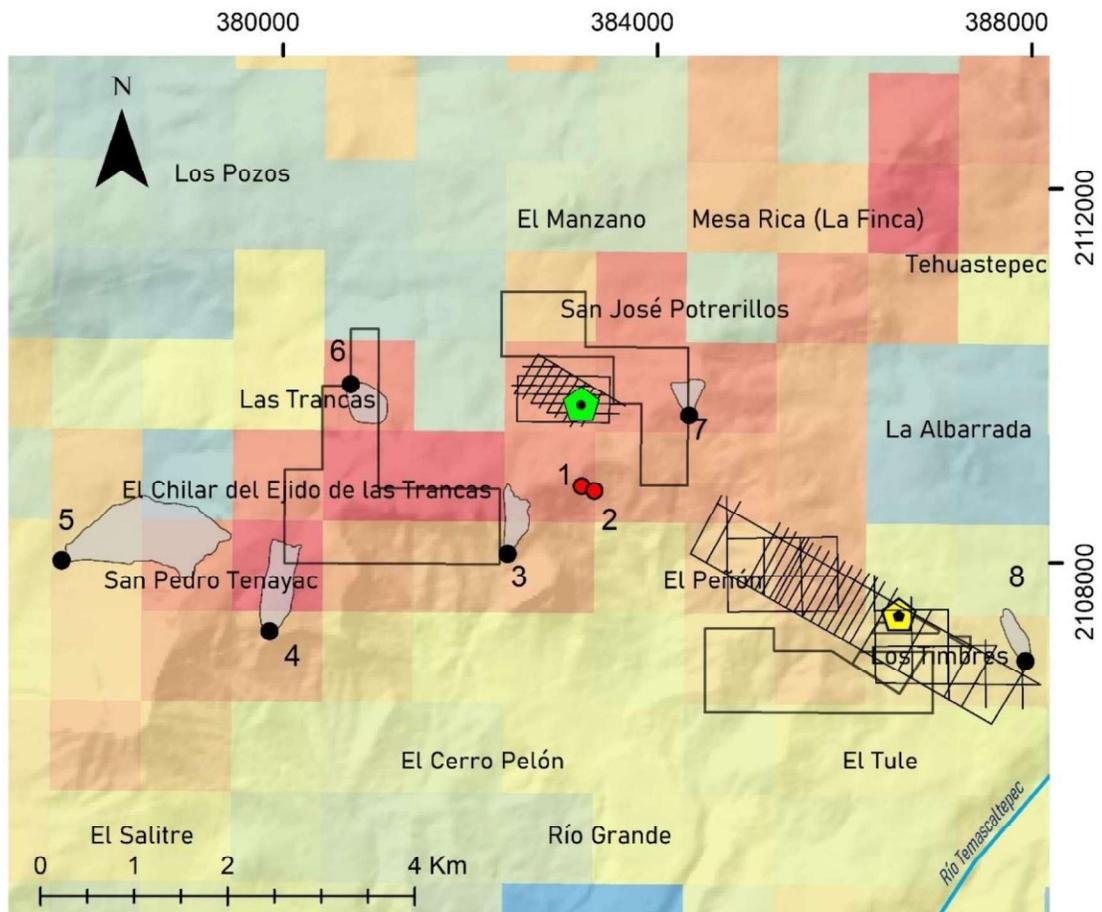
Finalmente, se aplicó la ecuación 3.3 descrita en el apartado de metodología donde interviene la precipitación anual promedio que es multiplicada por el Ce. Esto da como resultado los valores de escurrimiento superficial anual en el área de estudio. En la Figura 4.27 se muestran los resultados obtenidos y se percibe que los valores bajos de escurrimiento superficial se encuentran en las zonas bajas, mientras que los valores más elevados se presentan en la serranía (Tabla 4.8).



SIMBOLOGÍA



Figura 4.26. Mapa de coeficiente de escurrimiento anual y zonas de captura potencial de las fuentes.



SIMBOLOGÍA

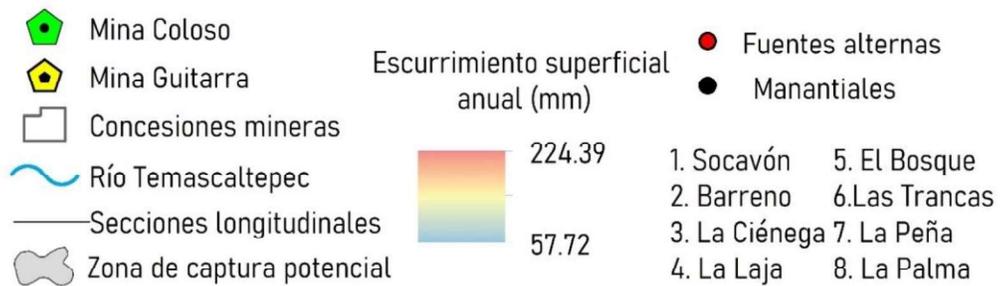


Figura 4.27. Mapa de escurrimiento superficial anual y zonas de captura de las fuentes.

Tabla 4.8. Valores de K, Ce, y escurrimiento promedio anual (Q) de las fuentes.

No.	Manantial	K	Ce	Q (mm)
3	La Ciénega 1 y 1	0.2514	0.1242	136.39
4	La Laja	0.2545	0.126	138.44
5	El Bosque	0.2532	0.1259	138.74
6	Las Trancas	0.2471	0.1208	131.87
7	La Peña	0.237	0.1196	135.92
8	La Palma	0.2491	0.1226	134.24

El comportamiento del escurrimiento superficial mensual y anual por cada fuente se muestra en la Tabla 4.9 y Figura 4.28. Se logra observar que las curvas del histograma se comportan similares y los escurrimientos más elevados responden a los meses donde precipita más (de mayo a octubre).

Tabla 4.9. Escurrimiento superficial mensual y anual en las zonas de captura potencial (mm).

No	Mn	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
3	Ciénega	1.15	2.41	1.3	1.19	6.79	23.34	28.8	30.15	26.64	12.16	2.32	0.08	136.33
4	Laja	1.16	2.44	1.29	1.24	6.89	23.71	29.19	30.63	23.12	12.29	2.35	0.07	134.38
5	Bosque	1.15	2.43	1.3	1.24	6.97	23.75	29.27	30.62	27.25	12.29	2.35	0.06	138.68
6	Trancas	1.12	2.33	1.24	1.15	6.56	22.61	27.77	29.15	25.9	11.63	2.25	0.1	131.81
7	Peña	1.2	2.38	1.3	1.28	6.9	23.23	28.69	30.04	26.3	12.3	2.3	0.12	136.04
8	Palma	1.14	2.37	1.27	1.17	6.72	23	28.28	29.61	26.44	11.81	2.28	0.11	134.2

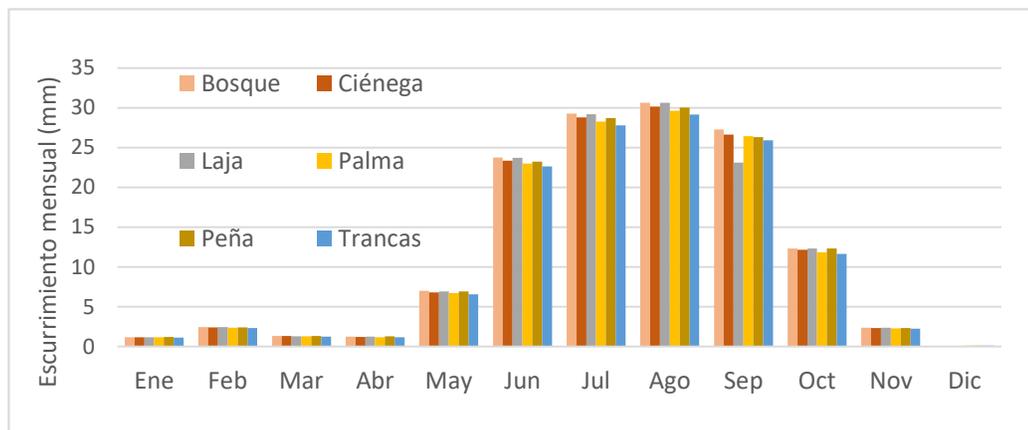


Figura 4.28. Histograma de escurrimiento superficial mensual en cada una de las zonas de captación de las fuentes de agua.

4.4.2.4. Evapotranspiración real

Con la finalidad de verificar los resultados de la ETr, se realizó una comparación con los métodos de Turc (Evapotranspiración real anual) y de Thornthwaite (Evapotranspiración potencial mensual, ETP). En la Figura 4.29 se comparan el método potencial y el real donde se observa una constancia en los valores de evapotranspiración a través de los meses y habiendo un incremento sustancial en la temporada de lluvias, sin embargo, la ETr anual resulta más elevada que la ETP a diferencia de lo esperado. Por otro lado, el valor anual de evapotranspiración por el método de Turc (789.78 mm) es muy cercano al valor de la ETP (844.78 mm) (Tabla 4.10).

Documentos como el informe de “Disponibilidad media anual de agua en el acuífero de Temascaltepec (1509)” (CONAGUA, 2018b), determinaron la ETr anual por el método de Turc con un valor de 864.9 mm. Asimismo, Manzano et al. (1997), realizaron un análisis del funcionamiento geocositémico de la cuenca del Río Temascaltepec, con base en la altitud determinan una ETP que rondaba entre los 700 a 800 mm anuales. Los mismos autores explican que al ser una región húmeda, la capacidad del suelo es tal que retiene el agua en época de lluvias, lo que permite realizar los procesos de evapotranspiración y escurrimiento en la temporada de secas; es decir, se asume que existe una retención del agua en la parte superficial provocada por la densa vegetación, donde cierto remanente de humedad en el suelo genera que la ETr sea constante a través del año.

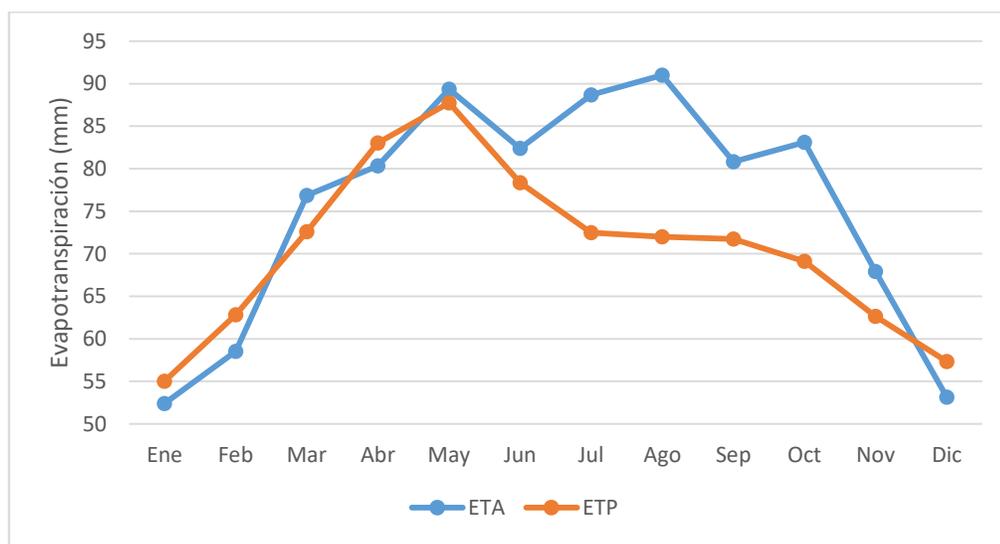
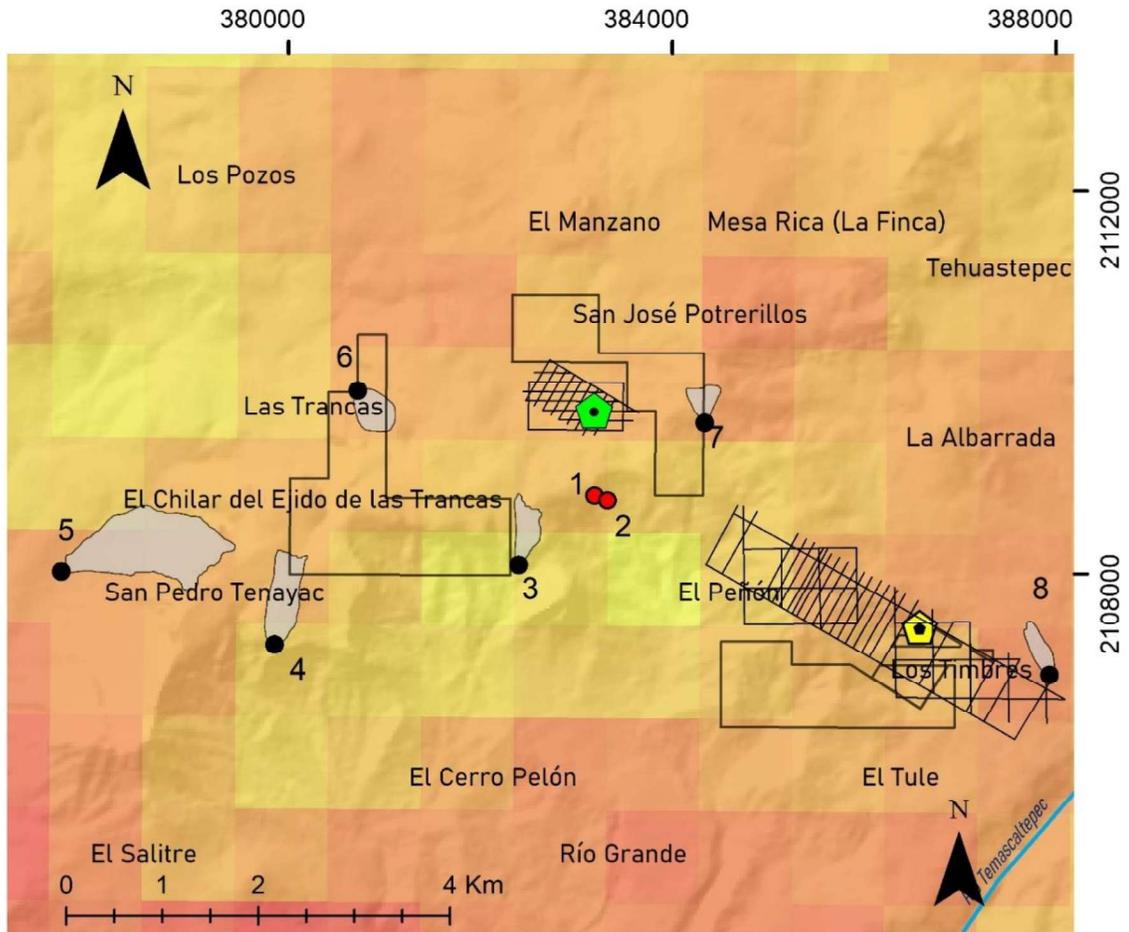


Figura 4.29. Evapotranspiración real (ETr) y potencial (ETP) anual del área de estudio.

Tabla 4.10. Valores anuales de Evapotranspiración en la zona de estudio por diferentes métodos

Mes	ETr	ETP	ETR Turc
E	52.38	55.01	
F	58.53	62.81	
.M	76.84	72.58	
A	80.33	83.02	
M	89.37	87.73	
J	82.41	78.36	
J	88.69	72.49	
A	91	71.98	
S	80.81	71.73	
O	83.11	69.12	
N	67.93	62.64	
D	53.14	57.31	
Anual (mm)	904.54	844.78	789.78

Los resultados por el método seleccionado (ETr), muestran que en el área de estudio la evapotranspiración real anual oscila entre los 501.4 mm a los 1269.8 mm (Figura 4.30), mientras que, en las zonas de captura potencial, los valores rondaron de 889.5 mm a 967.7 mm anuales (Tabla 4.11), reflejando así los valores máximos para los manantiales La Peña y La Palma. Asimismo, en la Figura 4.31 se observa que el comportamiento de la ETr a través de los meses es constante, sin embargo, en mayo, julio y agosto se reflejan los valores más altos.



SIMBOLOGÍA



Figura 4.30. Mapa de evapotranspiración real anual en las zonas de captura potencial de las fuentes (periodo 2003-2018).

Tabla 4.11. Evapotranspiración real mensual y anual en las zonas de captura potencial de las fuentes (mm).

No	Mn	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
3	Ciénega	51.9	57.8	75.9	79.8	89.3	82.8	88.9	91.4	81.2	83.5	67.8	52.7	903.8
4	Laja	50.5	56.1	74.4	78.1	87.0	81	88.7	91.4	80.7	82.7	66.7	51.5	889.5
5	Bosque	52.2	58.3	76.5	80.4	88.9	82	88.4	90.7	80.7	82.8	67.9	53.4	902.5
6	Trancas	53.9	60.3	78.7	82.1	91.2	83.7	89.3	91.3	81.1	83.8	68.6	54.3	918.7
7	Peña	57.2	64.8	85.4	88.4	96.0	85.7	90.6	92.9	82.4	84.3	70.0	56.8	955.1
8	Palma	58.7	66.5	86.1	89.6	97.8	87.6	90.7	92.7	82.6	85.7	71.1	58.0	967.7

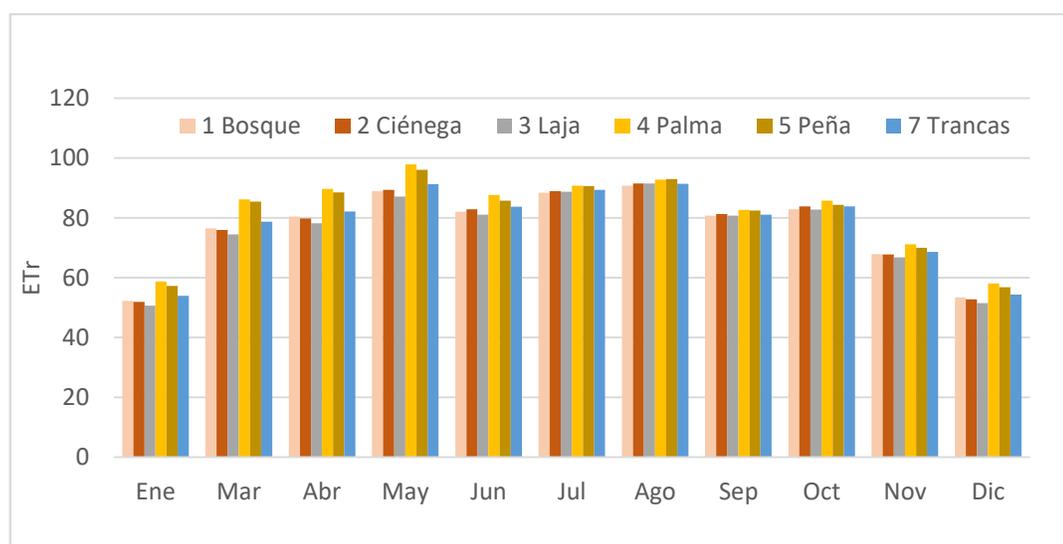
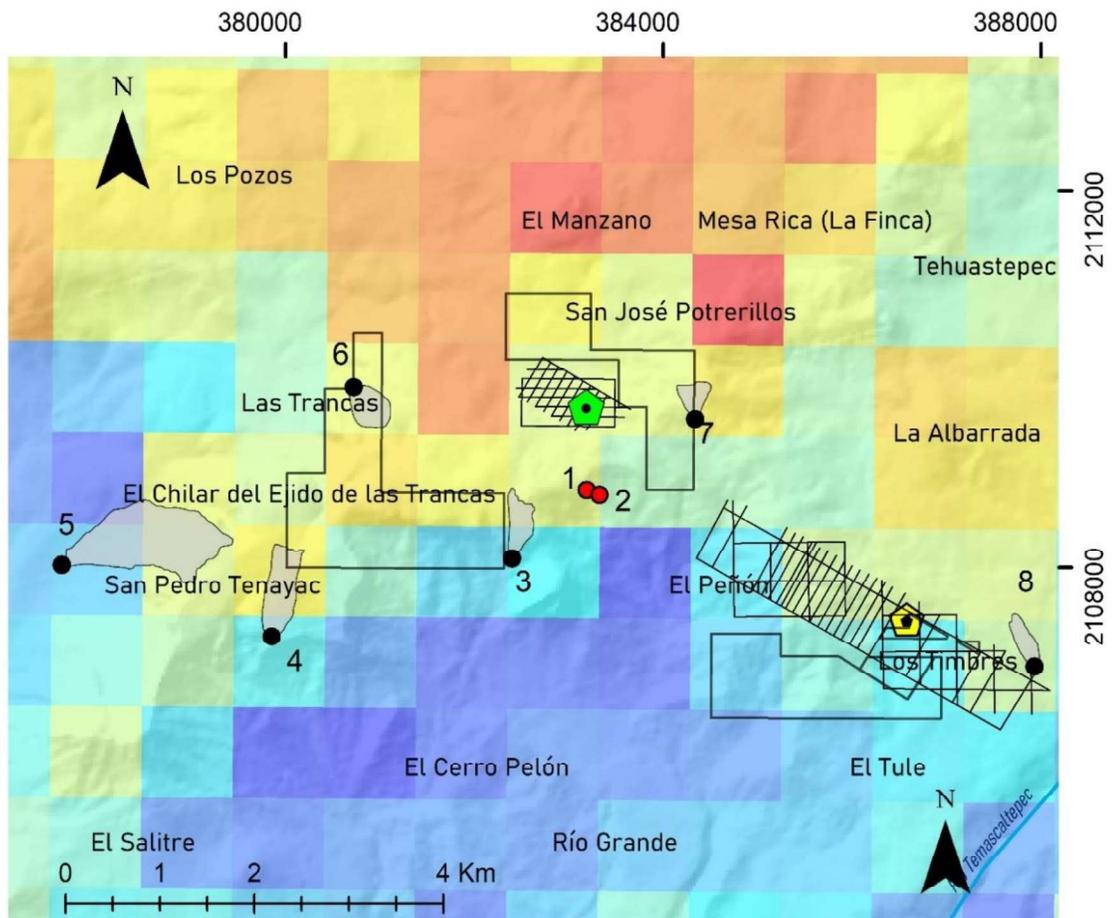


Figura 4.31. Histograma de evapotranspiración real mensual en las zonas de captura potencial de las fuentes.

4.4.2.5. Infiltración

Es muy notable que los valores más altos de infiltración en el área de estudio ocurren hacia la parte norte, donde los valores van de los 310.8 a los 582.2 mm anuales (Figura 4.32). De igual manera, los resultados muestran que en las zonas de captura de las fuentes de abastecimiento los valores varían de 417.4 a 451.9 mm anuales, muy similares en todos los casos, sin embargo, para el manantial La Palma (que se encuentra a una menor altitud), su valor de infiltración es menor en comparación con el resto de las fuentes.



SIMBOLOGÍA

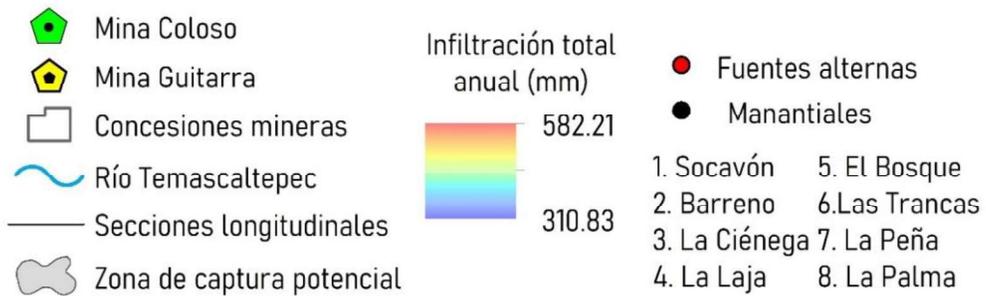


Figura 4.32. Mapa de infiltración anual en las zonas de captura potencial de las fuentes (periodo 2003-2018).

El comportamiento de la infiltración a lo largo del año claramente responde a los meses donde existe mayor precipitación, donde el escurrimiento superficial es mayor y la evapotranspiración real aumenta ligeramente durante el resto del año (Tabla 4.12 y Figura 4.33), siendo de junio a octubre los únicos meses donde se produce la infiltración.

Tabla 4.12. Infiltración anual y mensual de las zonas de captura potencial de las fuentes

No	Mn	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
3	Ciénega	0	0	0	0	0	82.44	114.84	122.31	106.54	2.32	0	0	428.45
4	Laja	0	0	0	0	0	83.82	114.02	121.71	107.4	2.62	0	0	429.57
5	Bosque	0	0	0	0	0	83.61	115.38	122.84	108.72	2.71	0	0	433.26
6	Trancas	0	0	0	0	0	81.54	113.53	121.94	107.35	1.17	0	0	425.53
7	Peña	0	0	0	0	0	85.79	120.94	129.12	110.96	5.18	0	0	451.99
8	Palma	0	0	0	0	0	77.79	112.54	120.65	106.47	0	0	0	417.45

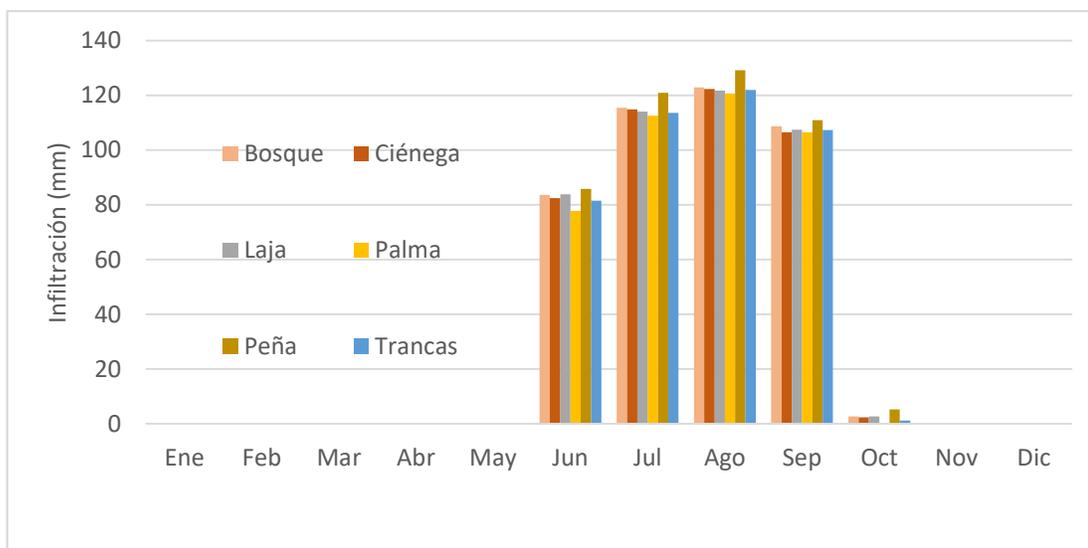


Figura 4.33. Histograma de infiltración mensual en las zonas de captura potencial de las fuentes.

4.4.3 Delimitación de las zonas de protección

Las Figuras 4.34 a la 4.40 muestran los resultados obtenidos para las zonas de protección de las fuentes, donde se consideró el caudal y el área de alimentación para la recarga anual, así como los elementos necesarios para su delimitación.

4.4.3.1. Zonas de protección del Barreno y Socavón de Guadalupe

Las antiguas perforaciones mineras de El Barreno y Socavón de Guadalupe no cuentan con zona de protección interna (ZPI), por lo que resulta necesario algún tipo de cercado o límite perimetral para proteger su captación en el caso del Socavón.

Para la zona de protección externa (ZP II) del Socavón de Guadalupe se calculó un área total de 185,820.6 m² el cual soporta el caudal anual de las fuentes (Figura 4.34), y para la ZP II de Barreno de exploración de 37164.13 m².

4.4.3.2. Zonas de protección del manantial La Ciénega 1 y 2

El manantial La Ciénega 1 y 2 tampoco existe ZP I y, al igual que en el caso anterior, el manantial requiere de algún tipo de cercado o límite perimetral para su protección, debido a que las condiciones lo vuelven susceptible a cualquier tipo de contaminante externo.

Por su parte, la ZP II ocupa más de la mitad de la zona de captura potencial con 76.2 % y un área de 103,046.7 m². El caudal medido de 1.4 L/s que aporta a esta zona de protección abastece casi en su totalidad a la población de El Peñón.

Finalmente, en la Figura 4.35 se muestra que la ZP III ocupa un área muy pequeña dentro de la zona de captura potencial. De igual manera, se observa la cercanía del manantial con las concesiones mineras hacia al costado izquierdo, no obstante, estas no llegan a introducirse en las zonas de protección del manantial.

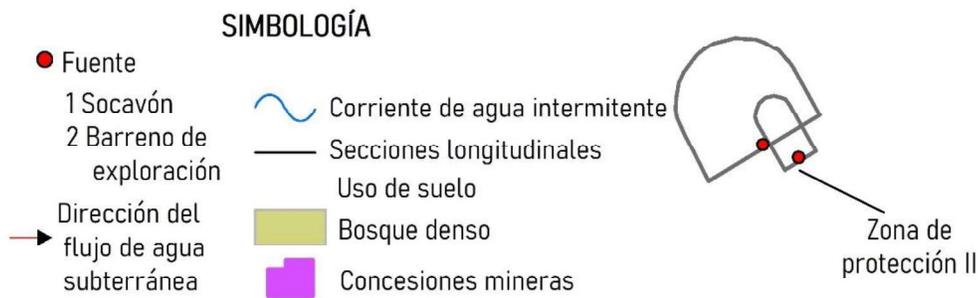
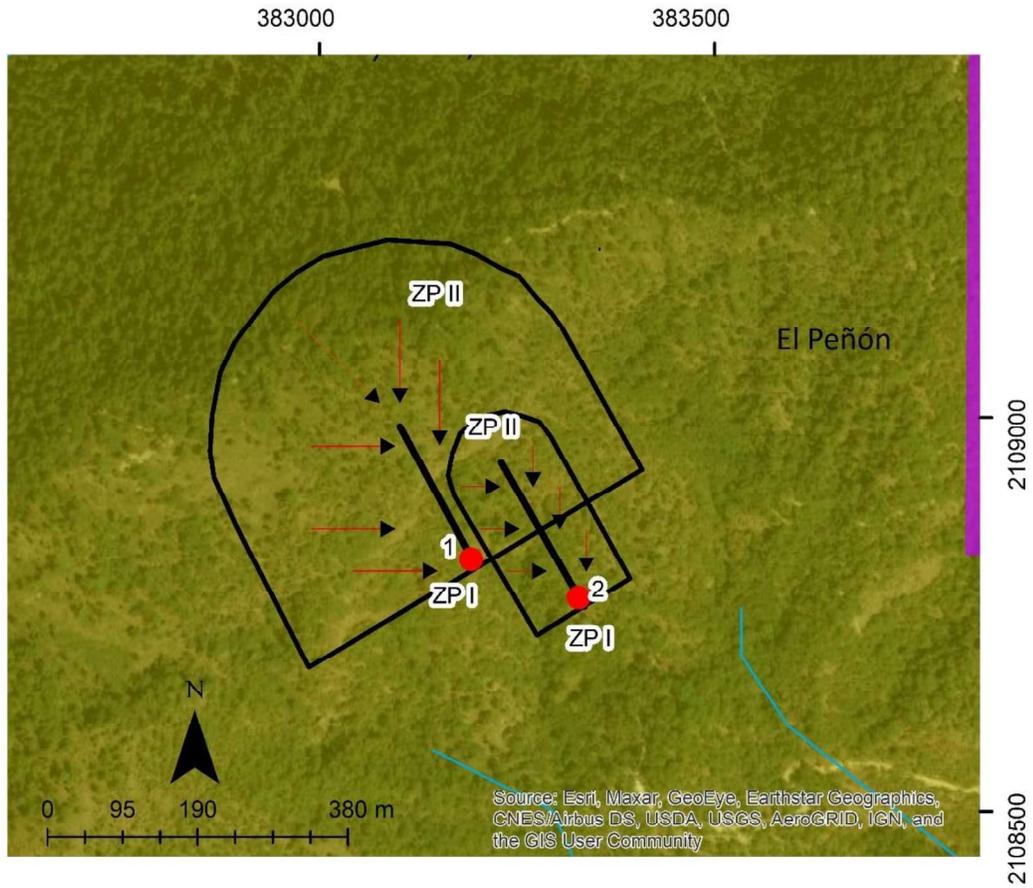
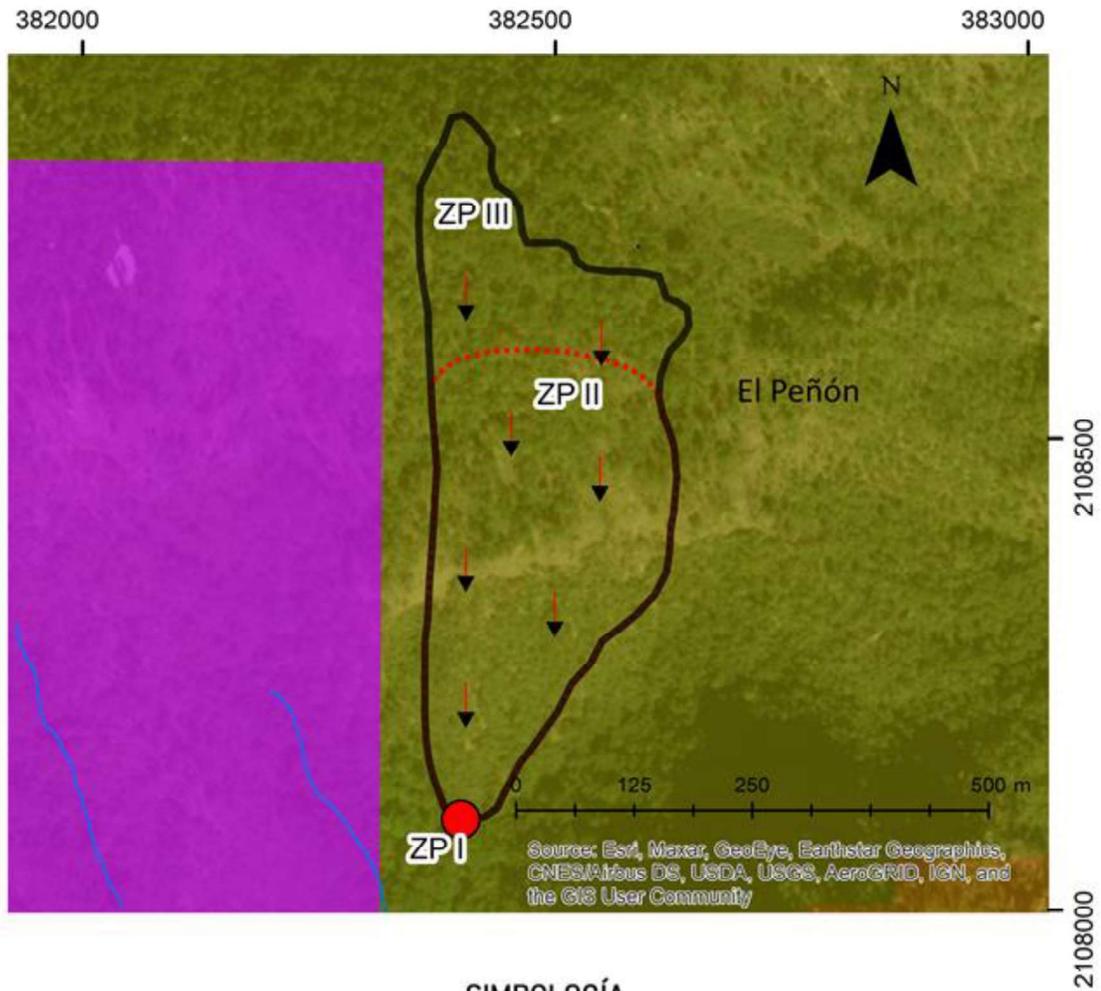


Figura 4.34. Zona de protección de las fuentes Socavón-Barreno.



SIMBOLOGÍA

- Manantial
- La Ciénega 1 y 2
- Concesiones mineras
- ~ Corriente de agua intermitente
- Uso de suelo
- Bosque denso
- Dirección del flujo de agua subterránea
- Zona de captura potencial
- Zona de protección II Externa

Figura 4.35. Zona de protección del manantial La Ciénega

4.4.3.3. Zonas de protección del manantial La Laja

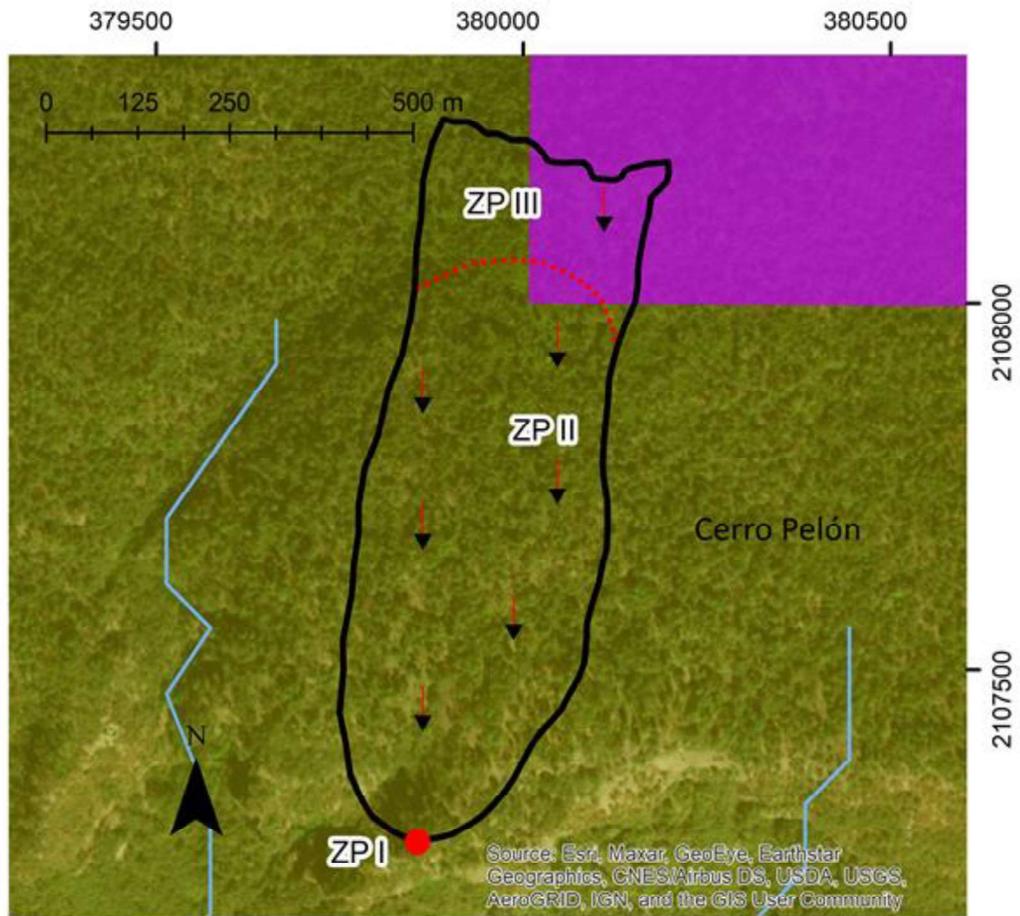
El manantial La Laja brota de una peña que presenta diferentes puntos de escurrimiento, además, cuenta únicamente con una caja de captación y ningún límite perimetral para la ZP I. Los habitantes improvisaron un filtro de rocas antes de captar sus aguas en la caja y al no haber algún tipo de protección, el manantial se encuentra expuesto a daños por lluvias y a cualquier tipo de contaminación.

La ZP II tiene un área de 220,238.8 m² que representan el 79 % de la zona de captura potencial, el 21 % restante del área le pertenece a la ZP III (Figura 4.36). En la cartografía se muestra que en la zona de protección II y III del manantial La Laja, converge una esquina de las concesiones mineras hacia la parte derecha norte, esto implicaría problemas a futuro si la mina decidiera comenzar a operar en el área, por lo tanto, es necesario tomar tempranas medidas de protección con el manantial.

4.4.3.4. Zonas de protección del manantial El Bosque

En el manantial El Bosque predominan dos tipos de uso de suelo, agrícola y bosque denso, esto implica que la zona se encuentra susceptible a contaminantes como agroquímicos utilizados en la agricultura, ya que como en los casos anteriores tampoco existe una ZP I en el manantial.

La ZP II ocupa un área de 72,787.7 m² (8.03 % del área de captación) en un uso de suelo agrícola, esta zona aporta el agua suficiente para que en un año el flujo de agua subterránea llegue al manantial, donde el caudal fue de 1 L/s. A pesar de ello, El Bosque es uno de los que abastece a una mayor población. Por su parte, la ZP III ocupa la mayor cantidad de superficie del área de captura potencial (Figura 4.37).



SIMBOLOGÍA

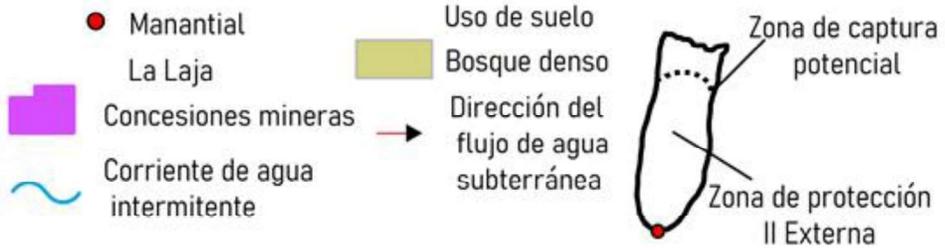
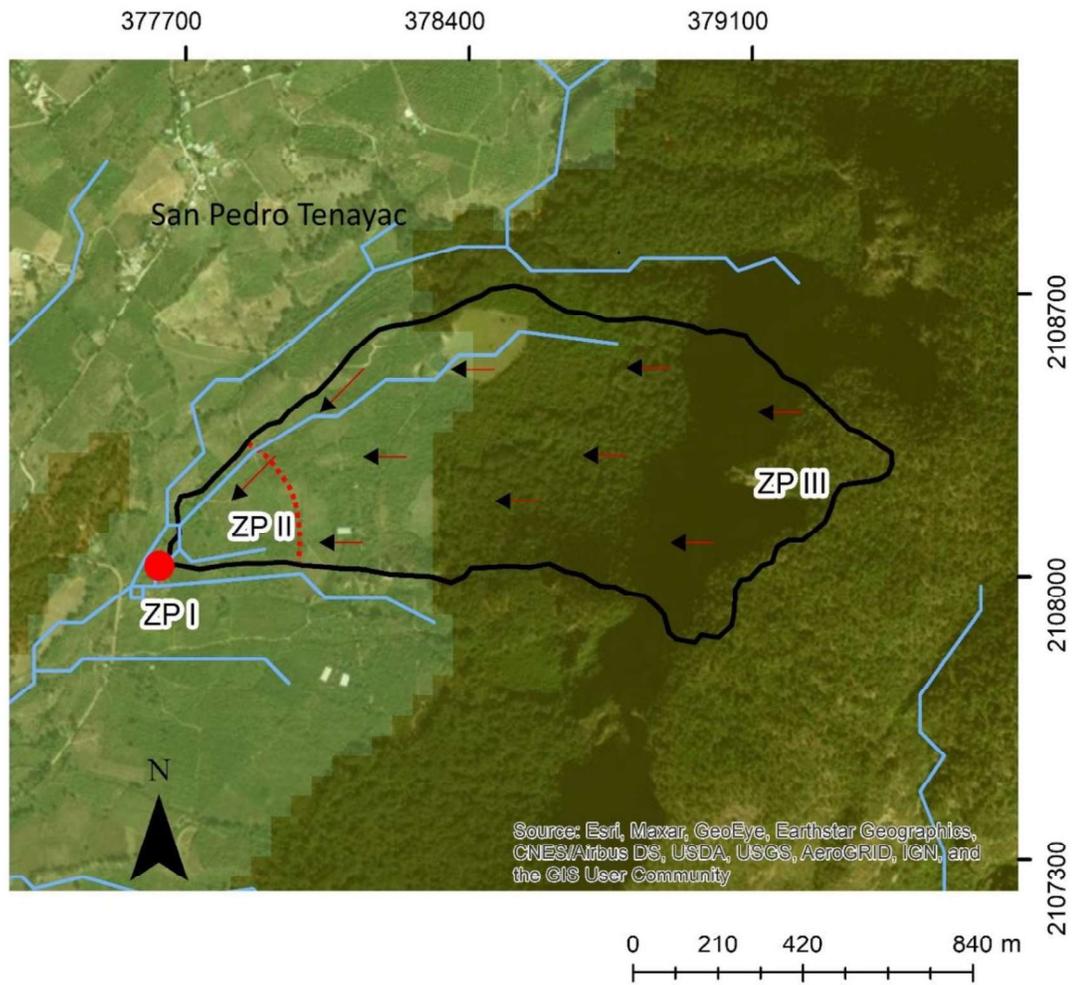


Figura 4.36. Zona de protección del manantial La Laja.



SIMBOLOGÍA



Figura 4.37. Zona de protección del manantial El Bosque.

4.4.3.5. Zonas de protección del manantial Las Trancas

En el caso del manantial Las Trancas su área de alimentación permite que varios escurrimientos superficiales aporten a su caudal, esto lo vuelve un manantial de los de mayor volumen; sin embargo, al no contar con caja de captación ni con ZP I, es uno de los manantiales más vulnerables a cualquier agente externo contaminante.

La ZP II abarca casi en su totalidad la zona de captura potencial del manantial, tiene un área de 148,282.5 m² (95.5 %) mientras que el 5 % restante le pertenece a la ZP III (Figura 4.38). En este manantial es atravesado por completo por un fundo minero, lo que implica que se deba prestar especial interés para su protección y prevenir problemas a futuro.

4.4.3.6. Zonas de protección del manantial La Peña

La Peña es un manantial que cuenta con caja de captación pero tampoco existe una ZP I. La ZP II abarca el 41 % del área de captura potencial con 34,885 m², siendo la ZP III la que abarca una mayor extensión con el 59 % de la zona de captura restante (Figura 4.39). Es importante mencionar que el manantial es atravesado por una concesión minera al costado izquierdo, esto indica que este manantial resulte prioritario para su protección a futuro debido a las actividades mineras.

4.4.3.7. Zonas de protección del manantial La Palma

Es necesario implementar algún límite perimetral para la ZP I del manantial La Palma debido a que en campo se observó el poco mantenimiento que se da al manantial. Por su parte, la ZP II tiene un área de 37,772 m² (41.4 %), y la ZP III de 58.6 % de extensión dentro de la zona de captura potencial (Figura 4.40).

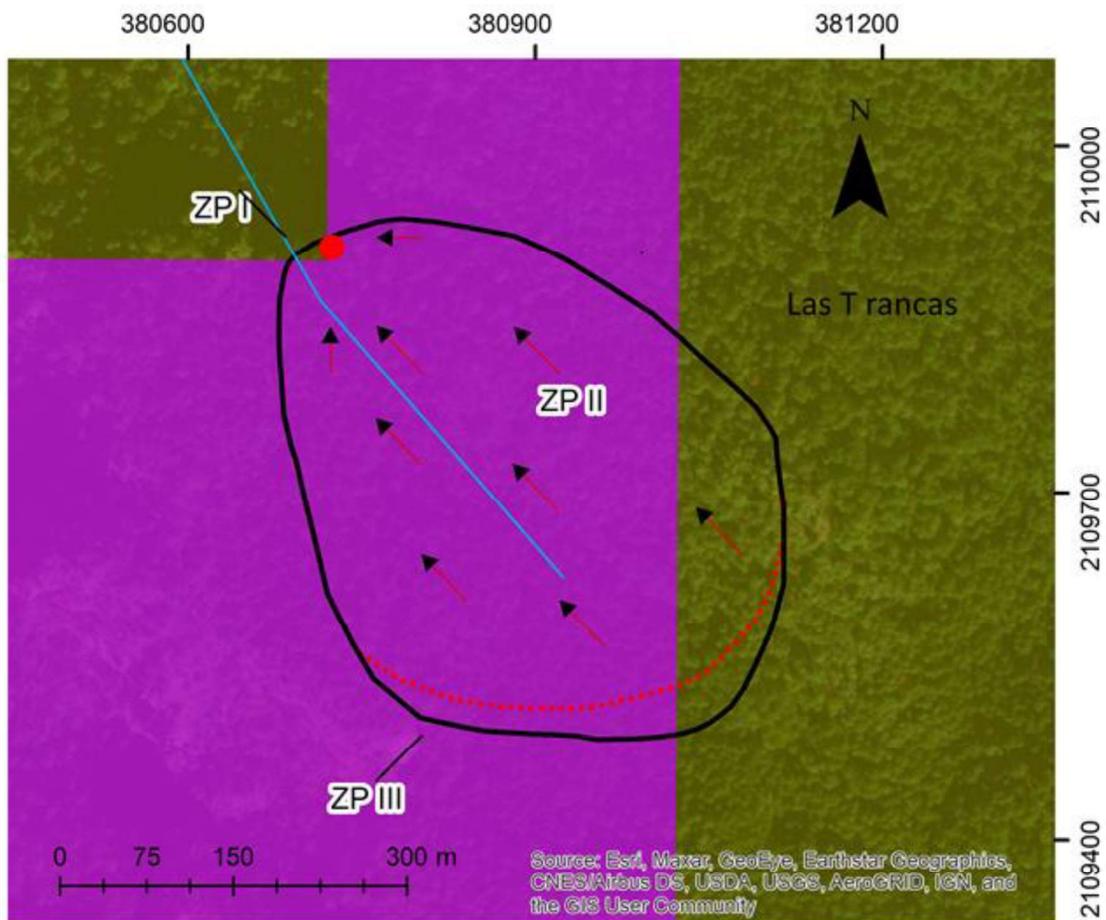


Figura 4.38. Zona de protección del manantial Las Trancas.

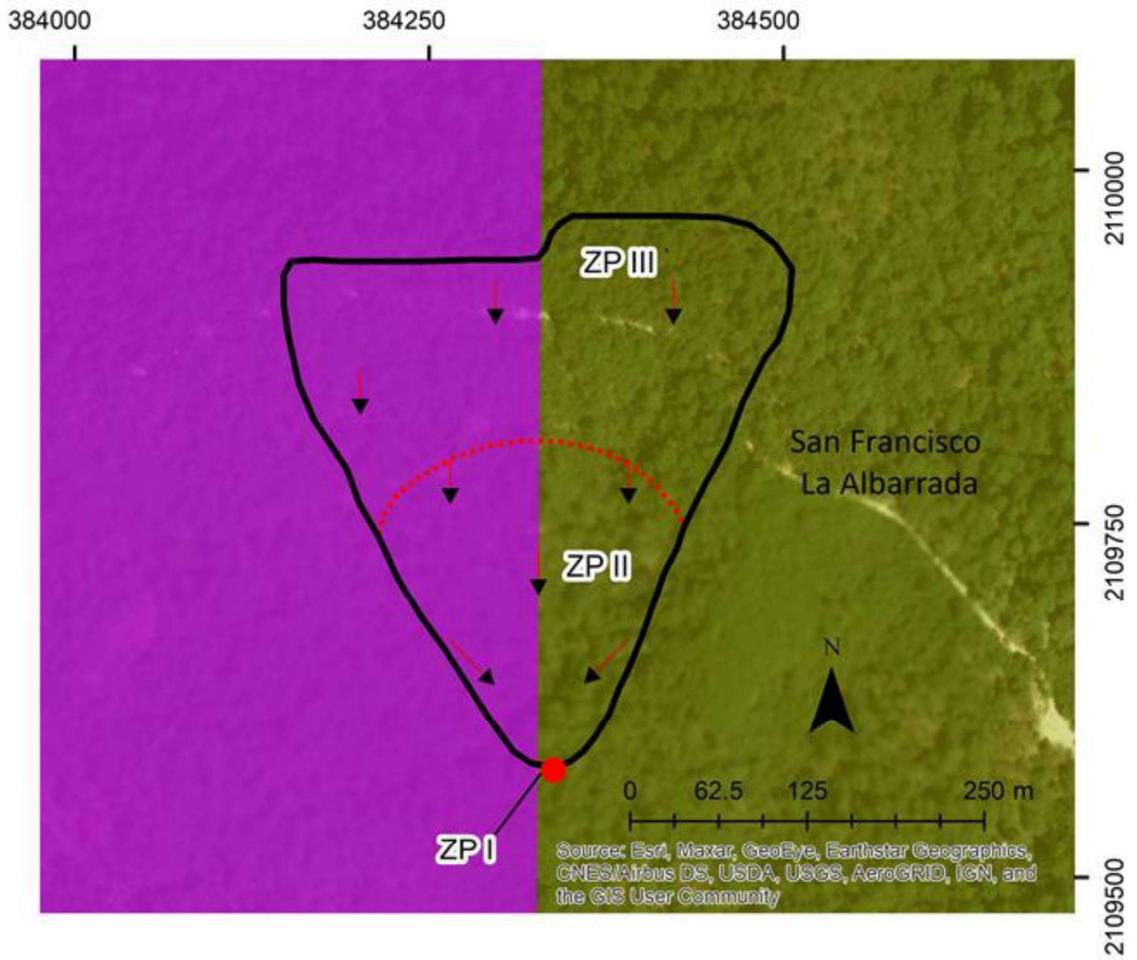
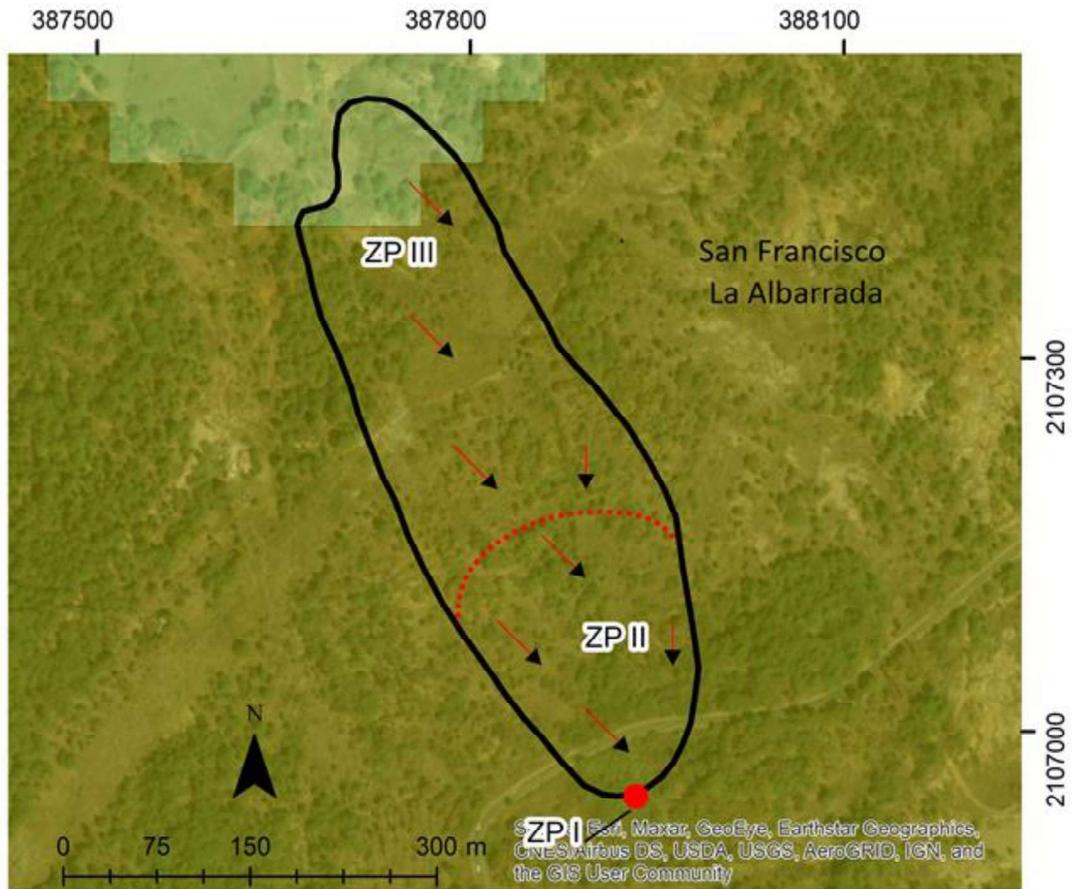


Figura 4.39. Zona de protección del manantial La Peña.



SIMBOLOGÍA



Figura 4.40. Zona de protección del manantial La Palma.

4.5. Priorización de las fuentes de abastecimiento mediante el Análisis Multicriterio

4.5.1. Definición del objetivo

Priorizar las fuentes de abastecimiento de agua subterránea localizadas en la región minera de Temascaltepec, considerando las potenciales afectaciones en cantidad y calidad por la actividad minera.

4.5.2. Identificación de los factores

Los factores seleccionados fueron cuatro y se les asignó una categoría con valores numéricos para poder trabajarlos en el SIG, los cuales fueron:

1. Evidencias reales de contaminación del agua de las fuentes por metales pesados.
2. Inclusión de los fundos mineros en las zonas de protección de las fuentes.
3. Número de habitantes abastecidos por cada fuente.
4. Fuente única de abastecimiento.

1. Evidencias reales de contaminación

En el Anexo 1 se muestran las tablas de los resultados de los análisis químicos, donde se observa que el arsénico fue el único elemento que mostró superar los límites máximos permisibles para agua de consumo humano en relación con la NOM-127-SSA1-2017, esto en las fuentes El Socavón y Barreno de exploración.

La norma establece que para localidades con menos de 50,000 habitantes el límite máximo permisible para este metaloide es de 0.025 mg/L, mientras que los datos obtenidos para el estudio arrojaron valores de 0.03 mg/L en el Barreno para la primera campaña de muestreo, y de 0.04 mg/L en el Socavón durante la segunda campaña, así como valores que superan por mucho estos límites en las minas La Guitarra y El Coloso.

Con base en los resultados mencionados en la Tabla 4.13, se muestran la categoría otorgada que refleja si existen evidencias reales de contaminación por metales o no en la fuente. Los valores van de 0 a 1 donde 0 significa que no hay contaminación por metales y 1 donde si hay evidencias. Para las fuentes el Barreno y Socavón que muestran valores de arsénico su valor fue de 1.

Tabla 4.13. Evidencias de contaminación por metales las fuentes de abastecimiento.

No.	Fuente	Evidencias reales de contaminación del agua de las fuentes	Categoría
1	Socavón	Si	1
2	Barreno	Si	1
3	La Ciénega	No	0
4	La Laja	No	0
5	El Bosque	No	0
6	Las Trancas	No	0
7	La Peña	No	0
8	La Palma	No	0

2. Inclusión de los fundos mineros en las zonas de protección de las fuentes

Es una variable de carácter cualitativo que contempla la confluencia de los fundos mineros dentro de las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento, donde también se emplean las categorías sí o no. En aquellas fuentes donde los fundos mineros atraviesan completamente las tres zonas de protección (siendo el episodio más crítico a futuro), tuvieron el valor máximo dentro de la categoría (2), mientras que donde solo existe una menor confluencia de los fundos con las zonas de protección, como el caso de La Laja, el valor intermedio fue de 1 (Tabla 4.14), por último, las fuentes donde no intercede ningún fondo minero se les asignó el valor de 0.

3. Número de habitantes abastecidos por cada fuente

Esta variable es de carácter cuantitativo y expresa la importancia de darle una mayor prioridad de protección a las fuentes que abastezcan a una mayor población ya que, por ende, la demanda del recurso por fuente será mayor donde existan más habitantes (Tabla 4.15).

Tabla 4.14. Inclusión de los fundos mineros en las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento.

No.	Fuente	Inclusión de los fundos mineros en las zonas de protección de las fuentes	Categoría
1	Socavón	No	0
2	Barreno	No	0
3	La Ciénega	No	0
4	La Laja	Si	1
5	El Bosque	No	0
6	Las Trancas	Si	2
7	La Peña	Si	2
8	La Palma	No	0

Tabla 4.15. Número de habitantes abastecidos por cada fuente.

No.	Fuente	Número de habitantes abastecidos por cada fuente
1	Socavón	500
2	Barreno	
3	La Ciénega	533
4	La Laja	700
5	El Bosque	1802
6	Las Trancas	34
7	La Peña	200
8	La Palma	1100

4. Fuente única de abastecimiento

Se emplearon las categorías sí o no donde las fuentes de abastecimiento fungen como único recurso para los habitantes (Tabla 4.16). Las fuentes que son el único recurso se les dio la categoría con el valor máximo de 2, como por ejemplo en El Bosque y Las Trancas mientras que para el resto de las fuentes la categoría fue de 1.

Tabla 4.16. Fuente única de abastecimiento.

No.	Fuente	Fuente única de abastecimiento	Categoría
1	Socavón	No	1
2	Barreno	No	1
3	La Ciénega	No	1
4	La Laja	No	1
5	El Bosque	Si	2
6	Las Trancas	Si	2
7	La Peña	No	1
8	La Palma	No	1

4.5.3. Reescalamiento de los factores

Los factores fueron reescalados para facilitar su comparación en el SIG, y debido a que la información se obtuvo de manera puntual se tuvo que convertir a formato ráster. Se utilizó la escala byte de 0 a 255 y mediante el módulo FUZZY del SIG IDRISI, para ello es necesario conocer los valores mínimo y máximo de la escala original de las imágenes ingresadas. Posteriormente, se utilizó la función sigmoideal monótonicamente creciente para asignar los valores de ajuste a la nueva escala. Los valores mínimos que refieren a los de menor importancia se asignaron al punto “a” y los valores máximos de una mayor importancia al punto “b”.

A continuación, se muestran los valores ingresados en los puntos de control para cada factor

1. Evidencias reales de contaminación: solo existen evidencias en el Barreno y Socavón, por lo que el punto de control máximo en la categoría fue 1, por consiguiente: $a = 0$, $b = 1$ (Figura 4.41 a).
2. Inclusión de los fondos mineros en las zonas de protección de las fuentes: intervienen tres categorías donde 0 es sin importancia al no haber inclusión en las fuentes, 1 es un valor intermedio y 2 significa que existe inclusión en las tres zonas de protección, por tanto: $a = 0$, $b = 2$ (Figura 4.41 b).
3. Número de habitantes abastecidos por cada fuente: los datos se ingresaron tal cual, para su reescalamiento, de esta manera los puntos de control fueron: $a = 34$, $b = 1802$ (Figura 4.41 c).

4. Fuente única de abastecimiento: existen dos categorías, donde 1 significa que se cuenta con una fuente alterna mientras que 2 expresa que es la única fuente de abastecimiento para la población. La categoría 1 es menor importancia y la categoría 2 tiene una importancia mayor, por ende: $a = 1$, $b = 2$ (Figura 4.41 d).

4.5.4. Ponderación de los factores

Los pesos fueron asignados con base en lo propuesto por el grupo de expertos, quienes determinaron la importancia de cada factor sobre el otro, posteriormente, se realizó un promedio de los pesos en los factores y se eliminaron los extremos para evitar inconsistencias. Para aplicar el método AHP se ejecutó el módulo WEIGHT de IDRISI, donde se generaron de manera automatizada los pesos relativos para cada factor, con una tasa de consistencia aceptable que fue de 0.08. El orden de importancia de los factores fue la siguiente: 1) evidencias reales de contaminación, 2) fuente única de abastecimiento, 3) número de habitantes abastecidos por cada fuente y 4) inclusión de los fundos mineros en las zonas de protección de las fuentes (Tabla 4.17).

El factor que mayor peso tuvo fue el de evidencias reales de contaminación ya que es un componente que afecta directamente a la salud de la población, resaltando así su importancia para priorizar las fuentes de abastecimiento. Por otro lado, se muestra a la inclusión de los fundos mineros en las zonas de protección, como el factor con menos peso debido a que su importancia se contempla a futuro.

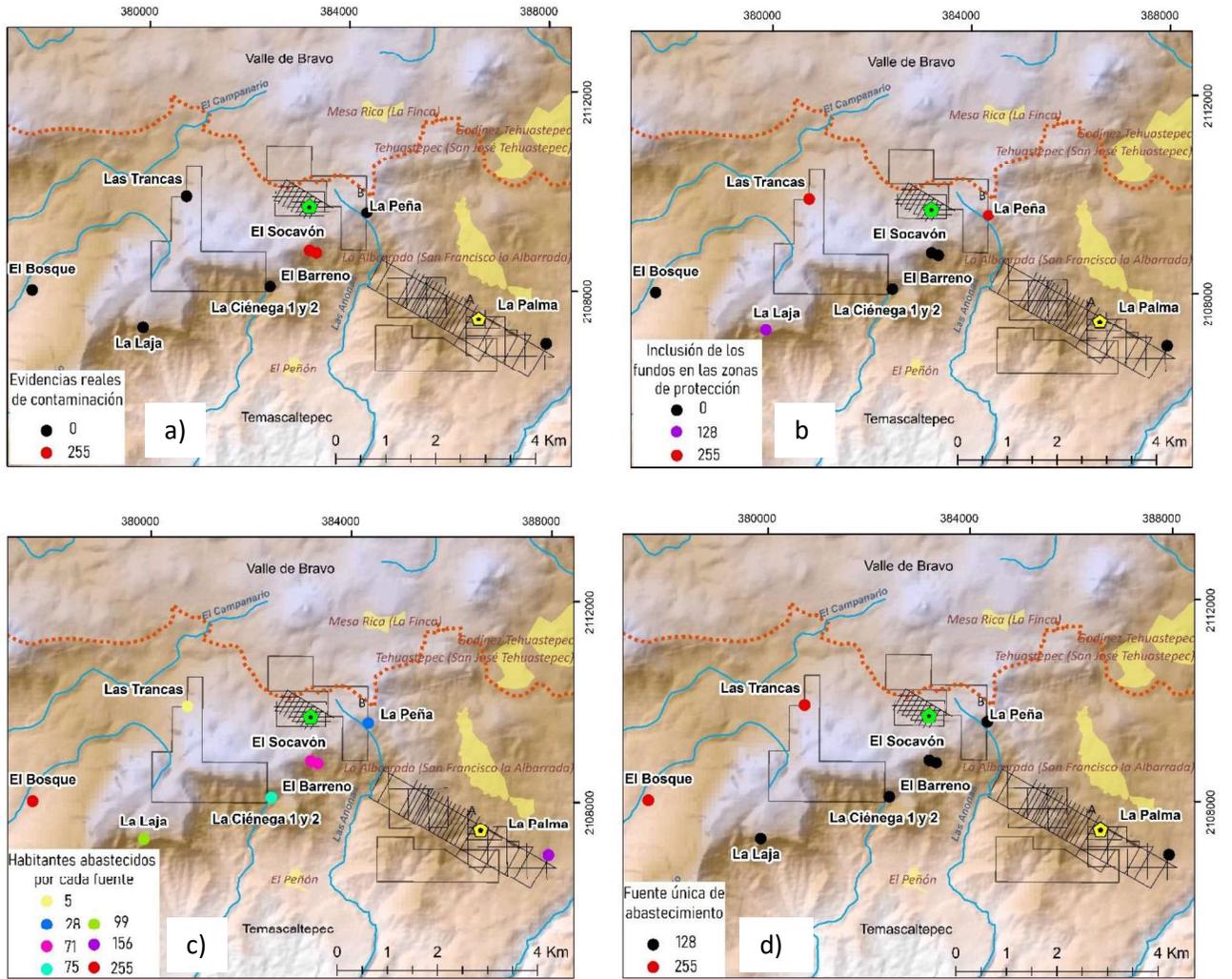


Figura 4.41. Mapas reescalados: a) evidencias reales de contaminación, b) inclusión de fondos mineros en las zonas de protección, c) habitantes abastecidos por fuentes y d) fuente única de abastecimiento.

Tabla 4.17. Coeficientes de ponderación de los factores y sus pesos.

Factores	Fuente única de abastecimiento	Inclusión de los fondos mineros en las zonas de protección	Evidencias reales de contaminación	Número de habitantes abastecidos	Pesos
Fuente única de abastecimiento	1				0.2265
Inclusión de los fondos mineros en las zonas de protección	1/7	1			0.0424
Evidencias reales de contaminación	5	9	1		0.6291
Número de habitantes abastecidos	1/3	3	1/5	1	0.1021

Tasa de consistencia: 0.08

4.5.5. Agregación de los factores

Se agregaron los factores ya reescalados y los pesos asignados por factor, posteriormente se seleccionó una decisión de riesgo medio (WLC) y de este modo se obtuvieron las fuentes prioritarias.

4.5.6. Priorización de las fuentes de abastecimiento a proteger

Finalmente, el resultado del Análisis Multicriterio fue un mapa de idoneidad, el cual fue clasificado en tres categorías de prioridad (alta, media y baja) y se ve reflejado en la Figura 4.42.

1. Fuentes con prioridad alta

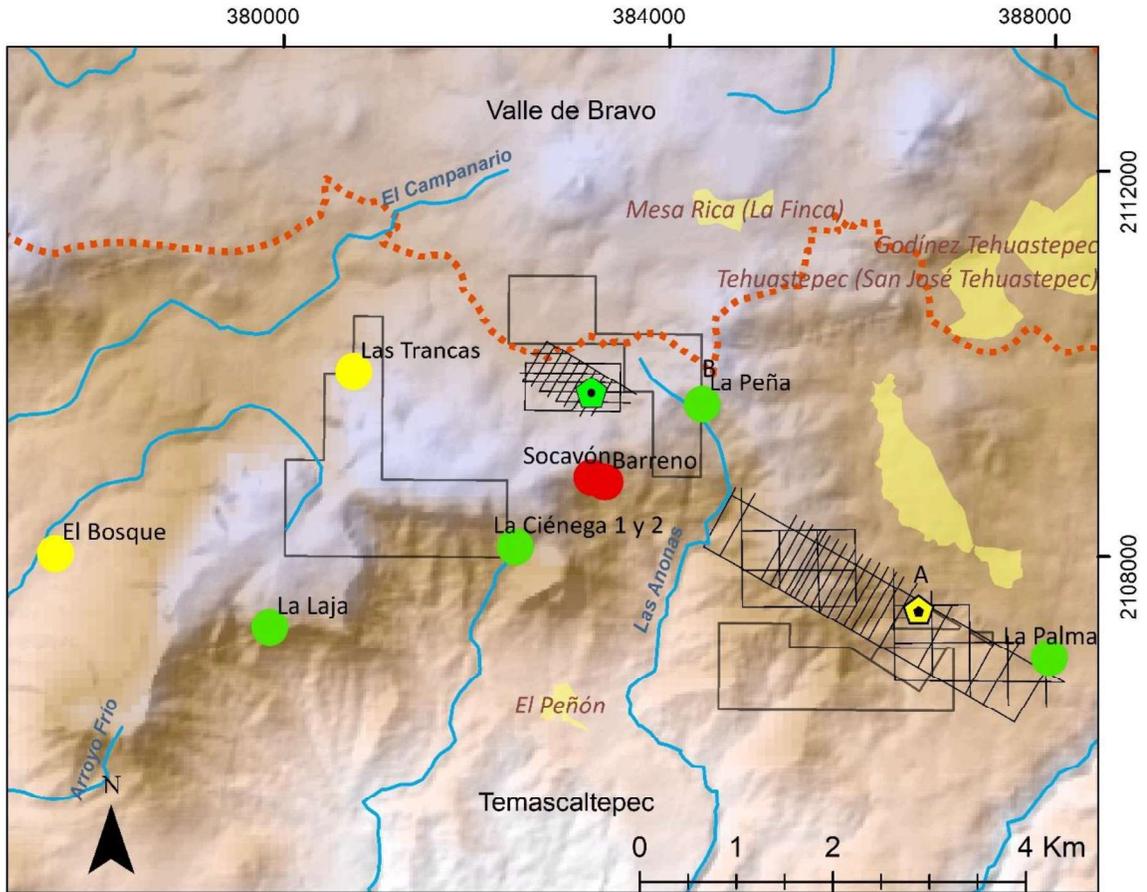
Las fuentes con prioridad alta son El Barreno y Socavón de Guadalupe, estas se localizan en la comunidad de El Peñón hacia el sur de la mina El Coloso a una altitud de 2,082 msnm. Emergen de una vegetación densa y boscosa de rocas fracturadas compuestas por ignimbritas-riolitas. Ambas fuentes son antiguas perforaciones mineras, sin embargo, el Socavón de Guadalupe, en la actualidad, representa un medio de subsistencia que permite a los pobladores hacer uso de su caudal en actividades agrícolas, abasteciendo alrededor de 533 habitantes; por el contrario, el Barreno pretendía ser una fuente alterna para su aprovechamiento.

La cercanía de las fuentes con los desarrollos mineros, los altos índices de arsénico en sus aguas, y la falta de mantenimiento en la obra de captación que presenta mucho arrastre de sedimentos, entre otros factores, fueron determinantes para que ambas fuentes presentaran la prioridad más alta para su protección en el estudio.

2. Fuentes con prioridad media

El Bosque es un manantial que pertenece a la comunidad de San Pedro Tenayac, abasteciendo de agua potable al máximo número de habitantes del estudio (1,802 personas) con un caudal de 1 L/s, muy bajo en comparación con el caudal de otras fuentes. Es importante mencionar que es la única fuente en donde parte de su zona de protección tiene un uso de suelo agrícola, lo que implica potencial contaminación de sus aguas por agroquímicos.

Las Trancas pertenece a la comunidad que recibe el mismo nombre del manantial, siendo la fuente que abastece a la menor población y cuyo caudal es de 2 L/s. La problemática radica en la ausencia de la caja de captación para la recolección de sus aguas que deja bastante expuesto al manantial ante cualquier agente contaminante.



SIMBOLOGÍA



Figura 4.42. Mapa de prioridad de las fuentes de abastecimiento.

3. Fuentes con prioridad baja

En las fuentes con prioridad baja se encuentran los manantiales La Laja, La Ciénega 1 y 2, La Peña y La Palma, cuyas características en común son la densa vegetación y la falta de mantenimiento en sus obras de captación, además de la falta de protección con límites perimetrales.

El manantial La Laja se localiza en la comunidad de Cerro Pelón, su caudal es el más elevado con 3 L/s que brotan de una peña con diferentes puntos de escurrimiento. Por su parte, la Ciénega 1 y 2 abastece de agua potable a la comunidad de El Peñón de aproximadamente 533 habitantes y un caudal de 1.4 L/s.

El agua del manantial La Peña escurre y es captada en una caja de mampostería para posteriormente conducirla hasta el depósito de distribución de agua potable, que abastece a 1,129 habitantes de la zona, con un caudal de 0.5 L/s. La Palma se encuentra en San Francisco La Albarrada también tiene un caudal de 0.5 L/s pero su población abastecida es de 1,100 habitantes.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se logró conformar una base de datos que permitió establecer el panorama físico y social del entorno de las fuentes de agua del área de estudio, así como la importancia que estas representan para el abastecimiento de agua de uso potable y agrícola en Temascaltepec, ya que, al ser fuentes subterráneas proveen una mejor calidad del recurso hídrico para ser aprovechados por las comunidades.

Se consideraron 8 fuentes prioritarias para su estudio de un total de 39 localizadas en la región minera, debido a la importancia que tienen para algunas comunidades que hacen uso de sus aguas en diversas actividades. Entre las fuentes donde la población demandaba su estudio por considerarlas en riesgo ante la problemática minera, se encuentra El Bosque cuyo análisis determinó que su zona de captura potencial se encuentra alejada de los fundos y desarrollos mineros.

Se realizó la caracterización hidrogeológica del entorno de las fuentes, y fisicoquímica de sus aguas, lo que permitió clasificar a los manantiales de tipo hipodérmicos, descendentes o de ladera, que corresponden a un ambiente de rocas volcánicas fracturas. Asimismo, su descarga se considera como aguas de reciente infiltración debido a los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica.

Se eligió el método propuesto por López (2018) para definir las zonas de protección de las fuentes. Este método contempla la delimitación de las zonas de la captura potencial como primer paso seguido de la estimación de la recarga anual, cuyo fin es calcular el agua que potencialmente llegaría al manantial en un año y que además representa la zona de protección II de la fuente.

Para la delimitación de las zonas de protección de las fuentes se observó que, en el caso de las antiguas perforaciones mineras, funcionan como fuentes de agua artificiales, cuya delimitación consideró su comportamiento como drenes de agua subterráneos.

Los resultados permitieron priorizar las fuentes de abastecimiento a través del Análisis Multicriterio empleando AHP, el cual determinó la importancia y el peso de los factores involucrados, quedando de la siguiente manera: 1) evidencias reales de contaminación, 2)

fuelle única de abastecimiento, 3) número de habitantes abastecidos, y 4) inclusión de los fondos mineros en las zonas de protección de las fuentes.

La priorización de las fuentes está representada en tres categorías. Con prioridad alta están el Socavón y Barreno (fuentes más críticas debido a sus altos índices de arsénico en sus aguas), con prioridad media los manantiales Trancas y Bosque y con prioridad baja Laja, Ciénega 1 y 2, Palma y Peña.

Finalmente, se concluye que el método utilizado para la delimitación de las zonas de protección de los manantiales propuesto por López (2018), es apto para regiones en las que se cuenta con poca información hidrogeológica. Además, ha sido comprobada su factibilidad de aplicación en fuentes de abastecimiento de agua localizadas en zonas volcánicas montañosas de rocas fracturadas que emanan de flujos locales.

Recomendaciones

Como primera observación se sugiere construir límites perimetrales en las zonas de captación de las fuentes de abastecimiento (ZP I), ya que se observó que ninguna fuente cuenta con algún tipo de malla para proteger directamente la captación de cualquier agente contaminante, aunado a que en algunos casos tampoco existe caja de captación para la propia fuente.

Resulta necesario también la limpieza y mantenimiento de las captaciones en las fuentes de abastecimiento, debido a que durante el trabajo de campo se logró observar una densa vegetación que en ocasiones impedía la visibilidad de la propia fuente, además de que algunas cuentan con mucho arrastre de sedimentos, ramas, heces fecales de animales en sus alrededores aparte de que cualquier persona tiene libre acceso a ellas.

Se recomienda realizar constantes monitores fisicoquímicos y mediciones de caudal en dichas fuentes, con la finalidad de detectar a tiempo las problemáticas involucradas en relación con la minería sobre todo en cuestiones de contaminación de sus aguas por metales pesados, ya que ello afecta directamente la salud de la población debido a que la gran mayoría de los manantiales son de uso doméstico.

Con base en los resultados del Análisis Multicriterio se debe prestar especial atención a las fuentes de prioridad alta (El Barreno y Socavón) aunque sus aguas no son utilizadas directamente para consumo humano.

Es necesario trabajar de manera conjunta con la población, las autoridades gubernamentales y/o instancias académicas, para seguir monitoreando las fuentes prioritarias además de destinar proyectos y fondos a la infraestructura y mantenimiento de estas. Finalmente, se recomienda implementar planes y programas de gestión de recursos hídricos, para concientizar a la población sobre el adecuado cuidado, mantenimiento y preservación de sus fuentes de abastecimiento de agua, así como lograr que se involucren en todas ellas actividades que conlleven mejoras para sus captaciones.

7. REFERENCIAS

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C. y Barberis, R. (2002). Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. *Environmental Pollution*, 119(177).
- AECID. (2017). La importancia de las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos. En R. Guzmán (Curso llevado a por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y el Instituto Geológico Minero de España (IGME)), Guatemala.
- Agua para todos. (2014). Agenda Nacional. Fin a la destrucción y sobreexplotación de cuencas y aguas subterráneas. Agua para todos, agua para la vida. México.
- Agüero, R. (2004). Guía para el diseño y construcción de captación de manantiales Organización Panamericana de la Salud, Lima.
- Alarcón, F. (2006). Inventario físico de los recursos minerales del municipio de Temascaltepec, Estado de México. Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- Alvarado, A. (2009). Análisis multicriterio para identificar y jerarquizar fuentes de agua. Toluca. Tesis de Maestría, UAEMex-CIRA. Estado de México, México.
- Armendáriz, E. (2016). Áreas naturales protegidas y minería en México: perspectivas y recomendaciones. Tesis Doctoral. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S.C., La Paz, Baja California, México.
- Aparicio, J., Lafragua, J., Gutierrez, A., Mejía, R., y Aguilar, E. (2006). Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas: PHI-LAC. Montevideo.
- Banzato, c., Butera, I., Revelli, R. y Vigna, B. (2017). Reliability of the VESPA Index in Identifying Spring Vulnerability Level. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(6), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001498](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001498)

- Behzadian, M., Kazemzadeh, R., Albadvi, A., y Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: a comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198–215.
- Benítez, C., Arias y W., Quiroz, J. (1980). *Manual de conservación de suelos y aguas*. Ministerio de Agricultura y Alimentación. Perú.
- Biava, F., Consonni, M., Francani, V., Gattinoni, P., y Scesi, L. (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*, 6(19), 1816-1832.
- Blanco, S. (2018). *Estudio hidrogeoquímico del sistema de manantiales al poniente y sur de la Ciudad de México*. Tesis de Maestría. UNAM, México.
- Cadena Política. (2018). Exigen detener ecocidio en mina la Guitarra, Temascaltepec. Cadena Política. p.1. <http://cadenapolitica.com/2018/02/16/exigen-detener-ecocidio-en-mina-la-guitarra-en-temascaltepec/>
- Cámara Minera de México. (2018). *La exploración, vital para el futuro del sector*. México: LXXXI Asamblea General Ordinaria. Reporte.
- Camprubí, C. A. (1998). *Los depósitos epitermales de Ag-Au de Temascaltepec (Estado de México)*. Universidad de Barcelona, 1-274.
- Camprubí, A., Canals, A., Cardellach, E., Prol, L., y Rivera, R. (2001). The La Guitarra Ag-Au low-sulfidation epithermal deposit, Temascaltepec district, México; vein structure, mineralogy, and sulfosalt chemistry. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 8, 133-158. <https://www.researchgate.net/publication/259530890>
- Camprubí, A., Chomiak, B., Villanueva, R., Canals, A., Norman, D., Cardellach, E., y Stute, M. (2006). Fluid sources for the La Guitarra epithermal deposit (Temascaltepec district, Mexico): Volatile and helium isotope analyses in fluid inclusions. *Chemical Geology*, 231, 252-284. doi:10.1016/j.chemgeo.2006.02.002

- Castillo, A. (2008). Causas de la desaparición de manantiales: el silencio de la ausencia, en Castillo Martín, Antonio (coord.): Manantiales de Andalucía, Agencia Andaluza del Agua, Consejería del Medio Ambiente. Junta de Andalucía Sevilla, 380-395.
- Castro, S. G. (2013). La minería y consecuencias en México. Obtenido de Observatorio de conflictos mineros de América Latina. <https://www.ocmal.org/la-mineria-y-consecuencias-en-mexico/>
- Cayetano, P. (2019). Tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico. Instituto Nacional de Salud. Boletín técnico. Lima.
- Clark, K.F., Foster, C.T., y Damon, P.E. (1982). Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in México. Geological Society of America Bulletin, 93, 533-544.
- CEPAL (2018). Proceso regional de las Américas. Foro mundial del agua 2018. Recuperado de: <https://www.cepal.org/es/notas/8o-foro-mundial-agua>
- CONABIO. (2010). Portal de Geoinformación. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Delimitación de las zonas de protección de pozos para agua. México.
- CONAGUA-SEMARNAT. (2015). Estadísticas del agua en México. Edición 2015.
- CONAGUA-SEMARNAT. (2017). Estadísticas del Agua en México. Edición 2017.
- CONAGUA-SEMARNAT. (2018a). Estadísticas del Agua en México. Edición 2018.
- CONAGUA. (2018b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero de Temascaltepec (1509) Estado de México, México.
- CONAGUA. (2019). Registro Público de Derechos del Agua. Obtenido de Consulta a la base de datos del REPDA. <https://app.conagua.gob.mx/Repda.aspx>
- Conant, J. y Fadem, P. (2011). Guía comunitaria para la salud ambiental. E.U, Hesperian.
- CONEVAL. (2015). Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social. Temascaltepec, México.

Cruz Lujan, L. (2013). Propuesta de Plan de Desarrollo turístico municipal de Temascaltepec Estado de México. Toluca, México. Reporte.

Custodio, E. (2019). Recarga natural de los acuíferos, metodología y soporte de la isotopía del agua. CETAQUA. Barcelona.

Daly, D. Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S. (2002). Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10(2), 340-345.

Damon, P.E., Shafiqullah, M., y Clark, K.F. (1981). Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis. *Revista del Instituto de Geología UNAM*, 5, 131-139.

DAYMET. (2020). Daily surface weather and climatological summaries. <https://daymet.ornl.gov/getdata>.

Delgadillo L. H. (2009). Elementos de derecho administrativo. Primer curso. Limusa. México

Domínguez, C. R. (2020). Prevención Integral. Estudio de sustancias químicas utilizadas en procesos de mina subterránea/concentrador y su relación con la ropa de trabajo. <https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2011/estudio-sustancias-quimicas-utilizadas-en-procesos-mina-subterranea-concentrador-su-relacion-con-ropa>.

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.

Doveri, M., Menichini, M., y Scozzari, A. (2015). Protection of Groundwater Resources: Worldwide Regulations and Scientific Approaches. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 40, 13-30. doi: 10.1007/698-2015-421

Drobne, S., y Lisec, A. (2009). Multi-attribute decision analysis in GIS: Weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica*, 33(4), 459-474.

Eastman, J. (2012). Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University. Canada.

Eastman, J. (2016). TerrSet Geospatial and modeling system IDRISI Selva. Clark Labs.

Elhatip, H. y Afşin, M. (2001). Roles of hydrogeochemical evaluations in estimating protection zones of Koçpınar springs in Aksaray, central Anatolia, Turkey. *Environmental Geology*, 40, 1010-1016. doi:10.1007/s002540100291

Eliás, M., Sánchez, J., Macias, C. (1996). Geochronology of the Guerrero terrane in the Tejupilco area, southern México, and its regional implications. *Instituto de Geología, UNAM*, 1-59.

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

Esquivel, J. M., (2015). *Diseño óptimo de redes dinámicas de monitoreo de agua subterránea mediante el uso de SIG y escenarios hidrogeológicos*. Tesis Doctoral. CIRA-UAEMex. Estado de México, México.

Fan, L., Li, T., Maoxi Xiang, Weizhong He, Boyun Wu, Jie Peng, Yonghong Li, Cheng Li, Miao-miao Zheng, Jianping Chen, Shuai Gao, Jiangli Du, Yiwei Ji. (2018). "Effect of Coal Mining on Springs in the Yushenfu Mining Area of China", *Geofluids*. <https://doi.org/10.1155/2018/3564360>

FAO. (2014). *World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, 106, 203. Reporte.

Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology*. 4th ed. Wisconsin: Upper Saddle River, N.J. Prentice Hall.

Foster, S., Chilton, J., Moench, M., Cardy, F., y Schiffler, M. (2000). Excerpted from *Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability*. World Bank. Washington, D.C.

Foster, S. e Hirata, R., (2003). *Protección de la calidad del agua subterránea: Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Mundi-prensa. Banco Mundial.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., y Paris, M. (2015). Groundwater quality Protection. A guide for water utilities, municipal authorities and environmental agencies. The World Bank. Washington, D.C.

First Majestic. (2020). La Guitarra. <https://www.firstmajestic.com/projects/exploration-development/la-guitarra/>.

FUNDAR. (2002). Minería, comunidades y medio ambiente. Investigaciones sobre el impacto de la inversión canadiense en México. Centro de Análisis e Investigación. México.

FUNDAR. (2018). Las actividades extractivas en México. México. Centro de Análisis e Investigación, A. C. México.

Gajowiec, B. y Witkowski, A. (1993). Impact of lead/zinc ore mining on groundwater quality in Trzebionka mine (southern Poland). *Mine water and the environment*, 12, 1-10. doi:10.1007/BF02914793

Glazier, D. S. (2014). Springs. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 1-78. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09322-2>

Gleeson, T., Alley, WM, Allen, DM, Sophocleous, MA, Zhou, y Taniguchi, M. (2012). Hacia el uso sostenible de las aguas subterráneas: establecimiento de objetivos a largo plazo, retroceso y gestión adaptativa. *Groundwater*, 50(1), 19-26. doi: 10.1111 / j.1745-6584.2011.00825.x

Goldscheider, N. (2010). Delineation of spring protection zones. *Hydrology of Springs*, 305-338. doi:10.1016/B978-1-85617-502-9.00008-6

Gusyev, M., Morgenstern, U., Zemansky, G., Cameron, S., Toews, M., y Tschritter, C. (2012). Delineation of protection (capture) zones for the Putaruru well field and the Blue Spring on the Waihou River. Nueva Zelanda. GNS Science. https://www.researchgate.net/publication/292815988_Delineation_of_protection_capture_zones_for_the_Putaruru_well_field_and_the_Blue_Spring_on_the_Waihou_River

H. Ayuntamiento de Temascaltepec. (2004). Plan municipal de desarrollo urbano de Temascaltepec, Estado de México. México.

- H. Ayuntamiento de Temascaltepec. (2016). Plan de desarrollo municipal 2016-2018.
- H. Ayuntamiento de Temascaltepec. (2019). Plan de desarrollo municipal 2019-2021
- Hanich, L. (2008). A multicriteria approach for well drilling in productive zones of fissured systems. *Hydrogeology Sciences Journal*, 53(1), 192-203.
- He, X., Wu, J., y Guo, W. (2019). Karst Spring Protection for the Sustainable and Healthy Living: The Examples of Niangziguan Spring and Shuishentang Spring in Shanxi, China. *Exposure and Health*, 11, 153-165. doi.org/10.1007/s12403-018-00295-4
- Huerta, V. (2017). Niega mina La Guitarra contaminación en Temascaltepec. *El Sol de Toluca*. <https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/niega-mina-la-guitarra-contaminacion-en-temascaltepec-299715.html>.
- IAH. (2018). Minin enterptises y groundwater. International Association of Hydrogeologists (IAH).
- IFOMEGEM. (2014). Base de datos. Toluca, Estado de México. Secretaría del Desarrollo Económico.
- ICMM. (2012). Water management in mining: a selection of case studies. International Council on Mining y Metals.
- INEGI. (2015). Panorama sociodemográfico del Estado de México. México
- INEGI. (2020). México en cifras. México. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=15#tabMCcollapse-Indicadores>
- Jhariya, Khan y Thakur. (2016). Impact of mining activity on water resource: An overview study. *Journal of the Geological Society of India*, 88(4), 481-492. https://www.researchgate.net/publication/301522857_Impact_of_Mining_Activity_on_Water_Resource_An_Overview_study
- Karki, D. y Verma. (2020). Pollution assessment of heavy metals in groundwater and agricultural soil in tailing of Zawar mines, Udaipur, Rajasthan. *International Journal of Environmental Quality*, 38, 37-47.

Kinzelbach, W. y Kuntsmann, H. (1998). Sustainable Management of Groundwater Resources Water the Key to Socioeconomic Development and Quality of Life Proceedings of the 8th Stockholm Water Symposium. Stockholm International Water Institute.

Kresic, N. (2010). Types and classifications of springs. En: N. Kresic & Z. Stevanovic, edits. Groundwater Hydrology of Springs. Oxford, Reino Unido: Butterworth Heinemann, 31-86.

Kreye, R., Wei, M., y Reksten, D. (1996). Informe: Defining the source area of water supply springs. Columbia: Gobierno de Columbia Británica. <https://doi.org/10.1155/2015/861805>

Londoño, L., Londoño, P., y Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustria, 14(2), 145-153. doi:10.18684/BSAA(14)145-153

López, S. (2018). Estrategias para la protección de manantiales: propuesta metodológica de acuerdo al entorno físico-social y proyección de escenarios. Tesis Doctoral. CIRA-UAEMex, Estado de México, México.

López, S., Expósito, J., Esteller, M. V., Gómez, M., Paredes, J., y Martínez, J. (2021). Delineation of protection zones for springs in fractured volcanic media considering land use and climate change scenarios in central Mexico región. Environmental Earth Sciences, 80(366), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09662-y>

Lerner, D.N., Issar, A.S., y Simmers, I. (1990). Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, 8, 1-345.

Luo, Q., Yang, Y., Quian, J., Wang, X., Chang, X., Ma, L., Li, F., y Wu, F. (2020). Spring protection and sustainable management of groundwater resources in a spring field. Journal of Hydrology, 582, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124498>

Manzano, L., y López, J. (1997). Análisis ecosistémico de la cuenca del Río Temascaltepec, Estado de México. Instituto de Geografía, UNAM (34).

Madrigal, J., Garcia, L., Sánchez, S., y Domínguez, C. (2004). Comparativa de la Norma oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 con el Modelo TÉMEZ. Conferencia: XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú.

- Marinoni, O. (2004). Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. *Computers and Geosciences*, 30(6), 637-646. doi:10.1016/j.cageo.2004.03.010
- Marsh, W.M. (1978): *Environmental analysis for land use and site planning*. McGraw-Hill, New York.
- Martínez, C., y 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).
- Martínez, J. (2007). *Evaluación del Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta en el Marco de la Planeación Urbana del D.F. n Urbana del D.F."*. Tesis de Licenciatura. UNAM, México.
- Martínez, P. y Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(1), 5-20.
- Moll, M. (2013). Aplicaciones cartográficas para la valoración de superficies de escorrentía. *Riu Girona (Alicante). Investigaciones Geográficas (60)*, 101-116. doi:10.14198/INGEO2013.60.06
- Monge. C., Patzi, F., y Viale, C. (2013). *Minería, Energía, Agua y Cambio Climático en América Latina*. Red Latinoamericana sobre Industrias Extractivas (RLIE).
- Moreau, M. Cameron, S., Daughney, C., Gusyev, M., y Tschritter, C. (2014). *Envirolink tool project-capture zone delineation*. GNS Science. Reporte técnico
- Morell, I. (2018). *Los manantiales de Andalucía*. Sevilla, España: Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, 28-35.
- NOM-127-SSA1-1994. (2017). *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Nova Scotia Environment. (2009). *Developing a Municipal Source Water Protection Plan: A Guide for Water Utilities and Municipalities*. <https://novascotia.ca/nse/water/sourcewater.asp>

Olgúin, F. (2008). Buenas Prácticas y uso eficiente de agua en la industria minera. Santiago de Chile. COCHILCO.

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

OMS. (2004). Guía para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición. 1(300). https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf

OMS. (2019). Organización Mundial de la Salud. Obtenido de Agua. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

OMS. (2020). Water-related diseases. Obtenido de Water sanitation higiene. Recuperado de: https://www.who.int/water_sanitation_health/diseasesrisks/diseases/arsenicosis/en/

ONU. (2020). Objetivos de desarrollo sostenible. Agua limpia y saneamiento. Recuperado de: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

Osorio, M. T. (2018). Evaluación de la calidad de agua de la subcuenca del Río Temascaltepec mediante el uso de indicadores biológicos. Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México.

Pabón S., Benítez R., Sarria R y Gallo J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.

Peña, L., Alatorre, L., y Sánchez, E. (2015). Cambios de uso de suelo e impactos en la escorrentía de una cuenca en Chihuahua, México. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 1-53.

Pérez, M. F. (2002). Criterios para una explotación sustentable del agua subterránea. *Ingeniería hidráulica en México*, 17, 57-77.

Pochon, A., Pierre, j., Kozel, R., Meylan, B., Sinreich, M., y Zwahlen, F. (2008). Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland. *Hydrogeology Journal*, 16, 1267–1281.

Poudel, D. y Duex. (2017). Vanishing springs in Nepalese Mountains assessment of water sources, farmers' perceptions, and climate change adaptation. *Mountain Research and Development*, 37(1), 35-46. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00039.1>

REPDA (2019). Registro Público de Derechos del Agua. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/registro-publico-de-derechos-de-agua-repda-2019>

Reygadas, P. y Sariago, J. (2009). Un mundo subterráneo de la significación: Los mineros mexicanos. *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, 30(118), 21-55. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-39292009000200002

Rojas, C., Orozco, M., Romero, S., y Montoya, R. (2016). Vegetación y flora del municipio de Temascaltepec, Estado de México. *Polibotánica* (42), 43-89. doi: 10.18387/polibotanica.42.3

Ron, Z. (1996). Importancia de los manantiales en la agricultura tradicional. 2do Coloquio Historia y Medio Físico. Agricultura y regadío en al-Andalus. Almería, Israel.

Samper, J. (2014). Manantiales y relaciones río-acuífero. (Curso). España.

Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6), 19-43. doi:10.1287/inte.24.6.19 121

Saaty, T. L. (2006). Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. *European Journal of Operational Research*, 168(2), 557-570. doi:10.1016/j.ejor.2004.04.032

Segundo, R. (2020). Delimitación de áreas de gestión en manantiales ubicados en la cuenca presa Guadalupe. Tesis de Maestría. UAEMex, México

SEMARNAT (2005) Proyecto de Norma Oficial Mexicana Proy-Nom140-Semarnat-2005. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México

SGM (2002). Carta Geológica Valle de Bravo E14-A46. Servicio Geológico Mexicano.

Savoca, M., Senay, G., Maupin, M., Kenny, J., y Perry, C. (2013). Actual evapotranspiration modeling using the operational simplified surface energy balance (SSEBop approach). U.S.

Geological Survey Scientific. Reporte de investigación 2013-5126., 1-14. <http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5126>.

Soria, F. (2016). Balance hídrico superficial integral para la cuenca del río Ravelo, en el marco de los planes directores de cuenca. La Paz. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 39-44.

Tuesca, R., Ávila, H., Sisa, A., y Pardo D. (2015). Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano. Barranquilla. Universidad del Norte.

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

UE. (2015). Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD. Luxembourg.

UN-Water. (2017). Las aguas residuales. El recurso desaprovechado. Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. Resumen ejecutivo. UN-Water.

UN-Water. (2019). Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el cambio climático y agua. UN-Water.

UNAM. (2018). Estudio sobre protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos. Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH).

UNESCO. (1982). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Montevideo. ROSLAC.

UNESCO. (2019a) ¿Quiénes están excluidos del agua? Obtenido de Presentación del Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos. <https://es.unesco.org/news/quienes-estan-excluidos-del-agua>

UNESCO. (2019b). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: no dejar a nadie atrás. Francia.

UNESCO. (2020). International Initiative on Water Quality. Building peace in the minds of men and women. <https://en.unesco.org/waterquality-iiwq/wq-challenge>

USDA. (1999). Natural Resource Conservation Service Soil taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture Handbook, vol. 436. Washington DC7 U.S.

USGS. (2021). AppEEARS.<https://lpdaac.usgs.gov/tools/appeears/>

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

Wiecek, M. M., Ehrgott, M., Fadel, G., y Figueira, J. R. (2008). Multiple criteria decision making for engineering, 36(3), 337-339.

Xolalpa, R. (2020). Evaluación de la accesibilidad de los servicios públicos en la CDMX usando Análisis Multicriterio y SIG. Tesis de Maestría. UNAM, México.

Zektser, I. y Everett. (2004). Groundwater resources of the world and their use. Francia: UNESCO.

8. ANEXOS

Análisis de cationes y elementos traza (Periodo 2019 A)

ID	Muestras	Na mg/L	Mg mg/L	K mg/L	Ca mg/L	S mg/L	Bi mg/L	Li mg/L	Be mg/L	Al mg/L	As mg/L
1	El Socavón	1.0561	1.0428	5.7115	6.0511	2.9631	<l.c.	0.0037	<l.c.	<l.c.	<l.c.
2	El Barreno	8.3626	1.8833	3.2156	6.7622	3.3328	<l.c.	0.0117	<l.c.	<l.c.	0.0334
5	La Ciénega	0.5979	0.2680	3.9231	1.1681	0.8355	<l.c.	0.0020	<l.c.	<l.c.	<l.c.
9	La Laja	1.2143	0.3513	3.5798	1.2572	0.0736	<l.c.	0.0015	<l.c.	<l.c.	<l.c.
23	El Bosque	2.4135	0.5697	3.6420	1.4064	0.2533	<l.c.	0.0024	<l.c.	<l.c.	<l.c.
32	Las Trancas	0.5146	0.2069	2.9836	0.4704	0.2793	<l.c.	0.0004	<l.c.	<l.c.	<l.c.
36	La Peña	0.7109	0.4620	2.5845	2.1499	0.6822	<l.c.	0.0007	<l.c.	<l.c.	<l.c.
37	La Palma	3.6731	7.8342	1.2534	7.5067	0.3184	<l.c.	0.0002	<l.c.	<l.c.	<l.c.
A	La Guitarra	4.5090	8.8272	2.7880	32.4743	111.6136	<l.c.	0.0317	0.0194	4.8700	0.2190
B	El Coloso	0.9030	3.2772	4.8503	24.9074	81.2347	<l.c.	0.0112	0.0165	3.0939	0.1827

ID	Muestras	B mg/L	Ba mg/L	Cd mg/L	Co mg/L	Cr mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
1	El Socavón	<l.c.	0.0263	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0062	0.0256	0.0748	<l.c.	<l.c.
2	El Barreno	<l.c.	0.0103	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0056	5.8231	0.3691	<l.c.	<l.c.
5	La Ciénega	<l.c.	0.0167	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0101	0.0091	0.0012	<l.c.	<l.c.
9	La Laja	<l.c.	0.0424	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0071	0.0058	<l.c.	<l.c.	<l.c.
23	El Bosque	<l.c.	0.0215	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0123	0.0061	0.0013	<l.c.	<l.c.
32	Las Trancas	<l.c.	0.0198	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0060	0.0225	0.0009	<l.c.	<l.c.
36	La Peña	<l.c.	0.0211	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0067	0.0383	0.0067	<l.c.	<l.c.
37	La Palma	<l.c.	0.0177	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0069	0.0583	0.0011	<l.c.	<l.c.
A	La Guitarra	<l.c.	0.0238	0.1664	0.0685	<l.c.	0.1357	26.3570	5.8365	<l.c.	0.0559
B	El Coloso	<l.c.	0.0148	0.0693	0.0986	<l.c.	0.1258	29.1193	2.1076	<l.c.	0.1591

ID	Muestras	P	Pb	Sb	Se	Si	Sn	Sr	Tl	V	Zn
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	El Socavón	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	9.5317	<l.c.	0.0209	<l.c.	0.0155	0.0192
2	El Barreno	0.2063	<l.c.	0.0525	<l.c.	16.5318	<l.c.	0.0273	<l.c.	0.0165	0.0412
5	La Ciénega	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	10.3666	<l.c.	0.0071	<l.c.	0.0182	0.0143
9	La Laja	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	10.8808	<l.c.	0.0202	<l.c.	0.0171	<l.c.
23	El Bosque	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	13.9069	<l.c.	0.0143	<l.c.	0.0287	0.0090
32	Las Trancas	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	8.6012	<l.c.	0.0066	<l.c.	0.0165	<l.c.
36	La Peña	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	7.8108	<l.c.	0.0100	<l.c.	0.0167	0.0506
37	La Palma	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	19.5880	<l.c.	0.1204	<l.c.	0.0210	<l.c.
A	La Guitarra	<l.c.	0.0200	<l.c.	<l.c.	16.2613	<l.c.	0.0889	<l.c.	0.0096	10.9741
B	El Coloso	0.0698	0.0323	<l.c.	<l.c.	9.6657	<l.c.	0.0455	<l.c.	0.0082	2.3468

Análisis de cationes y elementos traza (Periodo 2019 B)

ID	Muestras	Na	Mg	K	Ca	S	Bi	Li	Be	Al	As
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	El Socavón	10.063	2.4483	4.6587	8.1295	3.6806	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0116	0.0425
2	El Barreno	<l.c.	0.8984	7.2109	4.6803	3.9155	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0113	<l.c.
5	La Ciénega	2.8806	7.0771	2.1849	6.5656	1.0834	<l.c.	<l.c.	<l.c.	13.9595	<l.c.
9	La Laja	0.1140	0.5001	5.3592	1.9931	0.9278	<l.c.	0.0207	<l.c.	0.0059	<l.c.
23	El Bosque	0.1880	5.7873	13.4329	41.7198	131.5431	<l.c.	<l.c.	<l.c.	12.3220	0.4713
32	Las Trancas	<l.c.	0.4496	3.2649	3.0845	1.7035	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0181	<l.c.
36	La Peña	0.8634	0.2831	5.0392	1.0174	0.7161	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.1489	<l.c.
37	La Palma	<l.c.	0.3412	4.2973	0.7351	0.4274	<l.c.	0.0524	<l.c.	0.0269	<l.c.
A	La Guitarra	1.3411	0.7014	5.0634	1.7916	0.2614	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0128	<l.c.
B	El Coloso	1.3471	23.0448	9.6782	67.6783	415.2948	<l.c.	<l.c.	<l.c.	50.4789	4.8549

ID	Muestras	B	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	El Socavón	<l.c.	0.0119	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	5.8236	0.3950	<l.c.	<l.c.
2	El Barreno	<l.c.	0.0307	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.1478	0.0600	<l.c.	<l.c.
5	La Ciénega	<l.c.	0.0415	<l.c.	<l.c.	0.0197	<l.c.	4.0988	<l.c.	<l.c.	0.0176
9	La Laja	<l.c.	0.0159	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0107	<l.c.	<l.c.	<l.c.
23	El Bosque	<l.c.	<l.c.	0.1114	0.1615	<l.c.	0.2464	51.2479	3.7871	<l.c.	0.2875
32	Las Trancas	<l.c.	0.0231	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0294	0.0039	<l.c.	<l.c.
36	La Peña	<l.c.	0.0315	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0367	<l.c.	<l.c.	<l.c.
37	La Palma	<l.c.	0.0264	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0853	0.0678	<l.c.	<l.c.
A	La Guitarra	<l.c.	0.0212	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0328	<l.c.	<l.c.	<l.c.
B	El Coloso	<l.c.	<l.c.	0.8494	0.3367	<l.c.	1.1360	217.1254	20.2276	<l.c.	0.2756

ID	Muestras	P mg/L	Pb mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Sn mg/L	Sr mg/L	Tl mg/L	V mg/L	Zn mg/L
1	El Socavón	0.1818	<l.c.	0.0541	<l.c.	18.6577	<l.c.	0.0306	<l.c.	<l.c.	0.0566
2	El Barreno	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	10.8139	<l.c.	0.0158	<l.c.	<l.c.	0.0331
5	La Ciénega	0.0688	0.0273	<l.c.	<l.c.	40.3795	<l.c.	0.1245	<l.c.	0.0133	0.1894
9	La Laja	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	10.1559	<l.c.	0.0091	<l.c.	<l.c.	0.0135
23	El Bosque	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	15.3654	<l.c.	0.0756	<l.c.	<l.c.	3.9218
32	Las Trancas	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	7.9924	<l.c.	0.0138	<l.c.	<l.c.	0.0141
36	La Peña	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	11.5607	<l.c.	0.0132	<l.c.	<l.c.	0.0071
37	La Palma	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	9.0435	<l.c.	0.0096	<l.c.	<l.c.	0.0101
A	La Guitarra	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	12.4789	<l.c.	0.0148	<l.c.	<l.c.	0.0553
B	El Coloso	2.8701	<l.c.	<l.c.	<l.c.	26.4145	<l.c.	0.1247	<l.c.	<l.c.	53.3721