



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio de factibilidad hidrogeológica
para la recarga de acuíferos en la Zona
Sur de la Cuenca de México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Adriana Alonso García

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rodrigo Montufar Chaveznava



Ciudad Universitaria, Cd.Mx., 2020

“Per aspera ad astra”

L. Séneca

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional dentro de sus aulas y a desarrollarme como persona fuera de ellas. En el trascurso de mi preparación desde la Escuela Nacional Preparatoria, me ha permitido conocer a personas maravillosas y admirables que me han transmitido la importancia y el compromiso de ser universitarios. Bajo su tutela, he vivido innumerables momentos de felicidad y crecimiento en todos los aspectos de mi vida, por lo cual le estaré eternamente agradecida.

A mis profesores, que con dedicación y esmero, todos los días contribuyen al mejoramiento de esta sociedad; aplaudo su noble labor de compartir sus conocimientos con el fin de preservarlos más tiempo de lo que cada uno estaremos en este mundo y espero que sean capaces de ver retribuido su esfuerzo en la superación del país y el mundo.

A mi familia, por siempre apoyarme para cumplir mis metas, motivarme ante mis fracasos y animarme a ser una mejor persona. De manera muy especial quiero agradecer a mi padre, Cristóbal Raúl Alonso Sánchez, por el esfuerzo y dedicación que ha entregado en mi formación; por transmitirme y ser el vivo ejemplo del triunfo a través del trabajo duro y la perseverancia.

A Jesús Coronel Montiel, por el apoyo incondicional en cada proyecto que he emprendido, por motivarme todos los días a ser una mejor persona, por compartir conmigo todos los momentos, dulces y amargos de este camino.

A mi hermana Liliana, por sugerir la carrera de ingeniería geofísica y ser un referente y apoyo en todos los aspectos de mi vida.

A mis amigos, que cada día me enseñan a disfrutar de la vida y también han contribuido enormemente en mi formación a través de consejos, experiencias y risas.

A mi asesor de tesis, el Dr. Rodrigo Montufar Chaveznava, por su apoyo, guía y paciencia con la elaboración de este trabajo.

A mis sinodales, Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco, Dr. Sergio Chávez Pérez, Dr. José Antonio Hernández Espriú, Ing. Alberto Arias Paz (QEPD) e Ing. Fernando Rosique Naranjo, a los cuales agradezco sus comentarios, consejos y apoyo en la elaboración de este proyecto y su guía a través de mi carrera.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM en el proyecto “Realidad Virtual en la visualización de información geográfica y geofísica”, clave IT 101917.

Resumen

El abastecimiento del recurso hídrico en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) implica una labor extremadamente compleja; la morfología de la cuenca, el uso irracional del recurso, así como los problemas derivados del incesante crecimiento de la población, hacen que sea cada vez más evidente la necesidad de generar planes de desarrollo a futuro para asegurar la sustentabilidad del servicio de agua potable en la zona.

En este proyecto se evalúa la factibilidad hidrogeológica para la recarga de acuíferos al sur de la Cuenca de México a través de la creación de un indicador (IPHRAS), el cual sintetiza las características geológicas, morfológicas y antropogénicas de la región y delimita el área de estudio de acuerdo con su potencial para sostener un proyecto de esta naturaleza.

Esta metodología hace uso de sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota para la integración y ponderación de los criterios evaluados. Se creó un índice para cada tipo de acuífero presente en la zona de estudio, considerando las diferencias en su proceso de recarga. El resultado son dos mapas, el primero de ellos muestra un alto potencial para la recarga en acuíferos libres al noroeste del municipio de Huitzilac y en sus colindancias con los municipios de Xalatlaco y Ocuilan; mientras que, para los acuíferos confinados, destaca el poniente de Tlalpan en las inmediaciones del Pico del Águila y el sur de La Magdalena Contreras así como sitios puntuales en Milpa Alta y Xochimilco.

Abstract

The supply of water resources in the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico implies an extremely complex task; the morphology of the basin, the irrational use of the resource and the problems derived from the incessant growth of the population, make increasingly evident the need of generate future development plans to ensure the sustainability of the drinking water service in the area.

In this project, the hydrogeological feasibility for aquifer recharge at the south of the Basin of Mexico is evaluated through the creation of an indicator (IPHRAS) which synthesizes the geological, morphological and anthropogenic characteristics of the region and delimits the area of study according to its potential to sustain a project of this nature. This methodology makes use of GIS and RS techniques for the integration and weighting of the evaluated criteria. An index was created for each type of aquifer present in the study area, considering the differences in its recharge process. The results are two maps, the first shows a high potential zone for the recharge of unconfined aquifers at the northwest of Huitzilac and in its frontiers with Xalatlaco and Ocuilan; while for confined aquifers, the west of Tlalpan near Pico Del Águila and the south of La Magdalena Contreras and some focal points in Milpa Alta and Xochimilco.

Contenido

1	Introducción	10
1.1	Objetivo general	11
1.2	Objetivos particulares	11
2	Problemática del agua en el Valle de México	11
2.1	La megalópolis y sus acuíferos	11
2.2	Proyectos de recarga artificial	12
2.3	Situación a futuro	14
3	Recarga artificial de acuíferos.....	15
3.1	Generalidades.....	15
3.2	Métodos para la recarga de acuíferos	17
3.3	Marco jurídico.....	20
4	Zona de estudio	22
4.1	Localización.....	22
4.2	Vías de acceso.....	24
4.3	Fisiografía y geomorfología.....	24
4.4	Geología.....	26
4.5	Regiones Hidrogeológicas	28
5	Metodología	31
5.1	Sistemas de información geográfica y percepción remota en el estudio de la factibilidad para la recarga de agua subterránea	32
5.2	Factibilidad hidrogeológica para la recarga de acuíferos.....	33
5.3	Indicador IPHRAS para acuíferos libres	37
5.4	Indicador IPHRAS para acuíferos confinados	69
5.5	Superposición ponderada.....	83
6	Resultados	83
7	Conclusiones.....	91
	Referencias	93

Índice de ilustraciones

Ilustración 2.1	Disponibilidad media anual de agua subterránea para los acuíferos que subyacen la zona de estudio. (CONAGUA, 2018 -A, -B, -C, -D Y -E)	14
Ilustración 2.2	Comparación en el déficit presentado en los acuíferos que subyacen a la zona de estudio entre 2015 y 2021 (CONAGUA, 2018 -A, -B, -C, -D y -E)	15
Ilustración 3.1	Elementos que conforman un proyecto de recarga artificial de acuíferos	16
Ilustración 4.1	Localización de la zona de estudio	22
Ilustración 4.2	Alcaldías y municipios dentro de la zona de estudio	23
Ilustración 4.3	Vías de acceso a la zona de estudio	24
Ilustración 4.4	Cuenca de México: Valle de México y Sierra Ajusco-Chichinautzin.....	25
Ilustración 4.5	Acuíferos que subyacen en la zona de estudio.....	29
Ilustración 5.1	Diagrama de flujo que muestra la metodología empleada para delimitar la factibilidad hidrogeológica para la recarga de agua subterránea en la zona de estudio	33
Ilustración 5.2	Distribución de los acuíferos en la zona de estudio según su tipo de confinamiento.....	37
Ilustración 5.3	Esquema que ilustra el tipo de tecnologías MAR empleadas en los acuíferos libres, las cuales se basan principalmente en el proceso de infiltración a través de las capas permeables del suelo. En esta ilustración, técnica SAT (Soil Aquifer Treatment), en la cual se infiltra agua residual tratada de manera intermitente en estanques de percolación con el objetivo de remover nutrientes y patógenos al atravesar la zona no saturada y ser recuperada posteriormente. Modificada de Dillon et al., 2009	38
Ilustración 5.4	Interacciones entre los factores involucrados en el proceso de recarga de agua subterránea en acuíferos libres. Modificado de Yeh et al., 2016	38
Ilustración 5.5	Distribución de la litología en la zona de estudio	41
Ilustración 5.6	Distribución de la litología en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS	43
Ilustración 5.7	Distribución de las curvas de nivel en la zona de estudio	44
Ilustración 5.8	Procesamiento realizado en ArcMap 10.3 para la obtención del mapa de pendientes de la zona de estudio a partir del archivo tipo vectorial contenido en el conjunto de datos de la carta E14A49 de INEGI para Villa Milpa Alta	44
Ilustración 5.9	Distribución de los cambios de pendiente en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS	45
Ilustración 5.10	Distribución de la precipitación media anual en la zona de estudio	47
Ilustración 5.11	Distribución de la precipitación media anual en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS	48
Ilustración 5.12	Procesamiento en QGIS para la obtención del mapa de uso de suelo.....	49
Ilustración 5.13	Diagrama de flujo que muestra el procesamiento de imágenes Landsat Level-1 para Vis-SWIR. Modificado de Young et al. (2017)	50
Ilustración 5.14	Composición virtual de bandas para la aplicación del método RGB	53
Ilustración 5.15	Método RGB, en el cual la asociación de bandas a un color permite la identificación de elementos específicos dentro del uso de suelo del terreno	53
Ilustración 5.16	Combinación RGB 4-6-1 que permite la detección de los distintos tipos de uso de suelo en la zona de estudio	54
Ilustración 5.17	Distribución de los tipos de cubierta superficial en la zona de estudio	55
Ilustración 5.18	Distribución de los principales tipos de uso de suelo en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS.....	56
Ilustración 5.19	Distribución de las corrientes superficiales en la zona de estudio.....	59

Ilustración 5.20	Diagrama de flujo que muestra los pasos seguidos en el software ArcMap 10.3 para la creación del mapa de densidad de drenaje.....	59
Ilustración 5.21	Distribución de la densidad de drenaje en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS	60
Ilustración 5.22	Distribución de los elementos estructurales en la zona de estudio	63
Ilustración 5.23	Diagrama del procedimiento realizado para la obtención del mapa de densidad de elementos estructurales en ArcMap 10.3	63
Ilustración 5.24	Distribución de la densidad de elementos estructurales en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS.....	65
Ilustración 5.25	Ubicación de los sitios de donde fueron obtenidos los valores de profundidad del agua subterránea	67
Ilustración 5.26	Diagrama de flujo que muestra los pasos seguidos dentro del software ArcMap 10.3 para la elaboración del mapa de profundidad de agua subterránea	67
Ilustración 5.27	Distribución de la profundidad de agua subterránea en la zona de estudio	68
Ilustración 5.28	Distribución de la profundidad del agua subterránea en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS.....	69
Ilustración 5.29	Esquema que ilustra el tipo de tecnologías MAR empleadas en los acuíferos confinados, las cuales se basan en la introducción directa del recurso a las capas permeables a través de pozos. En esta ilustración, técnica ASR (Acuifer Storage and Recovery), en la cual se inyecta agua por un pozo para su almacenamiento (objetivo principal) y de manera posterior se recupera por el mismo pozo. Modificada de Dillon et al., 2009	70
Ilustración 5.30	Interacciones entre los factores involucrados en el proceso de recarga de agua subterránea en acuíferos confinados. Modificado de Yeh et al., 2016.....	71
Ilustración 5.31	Diagrama de flujo que muestra los pasos seguidos dentro del software ArcMap 10.3 para la elaboración del mapa de profundidad de agua subterránea	72
Ilustración 5.32	Distribución de la profundidad de agua subterránea en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS.....	73
Ilustración 5.33	Procesamiento realizado en QGIS a través del complemento SCP para la creación del mapa temático de uso de suelo	74
Ilustración 5.34	Distribución de los principales tipos de uso de suelo en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS.....	75
Ilustración 5.35	Distribución de pozos activos en el acuífero de la ZMCM	76
Ilustración 5.36	Diagrama que muestra el procedimiento seguido para la obtención del mapa de pozos en activo en el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	77
Ilustración 5.37	Distribución de la densidad de pozos activos en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS	77
Ilustración 5.38	Ubicación de las PTAR próximas a la zona de estudio.....	78
Ilustración 5.39	Diagrama que muestra el procedimiento seguido para la obtención del mapa de densidad de PTAR en activo en el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	79
Ilustración 5.40	Distribución de la densidad de PTAR en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS	79
Ilustración 5.41	Distribución de los elementos estructurales en la zona de estudio	80
Ilustración 5.42	Diagrama que muestra el procedimiento seguido en ArcMap 10.3 para la creación del mapa de distribución de la densidad de elementos estructurales en la zona de estudio	81
Ilustración 5.43	Distribución de la densidad de elementos estructurales en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS.....	82
Ilustración 6.1	Clasificación de la zona de estudio de acuerdo con el índice IPHRAS en acuíferos libres.....	84
Ilustración 6.2	Clasificación de la zona de estudio de acuerdo con el índice IPHRAS en acuíferos confinados	85

Índice de tablas

Tabla 2.1 Cronología de algunos proyectos para recargar artificialmente el acuífero de la ZMCM (Escolero, O., Gutiérrez C., Mendoza, E.Y. (Eds.), 2017).....	12
Tabla 4.1 Coordenadas de referencia para la zona de estudio	22
Tabla 4.2 Acuíferos presentes en la zona de estudio (CONAGUA, 2018-F).....	28
Tabla 5.1 Criterios considerados en la construcción del indicador IPHRAS según el tipo de acuífero objetivo	36
Tabla 5.2 Asignación de pesos para cada uno de los criterios que influyen en la recarga de agua subterránea en acuíferos libres. Modificado de Yeh et al. 2016	39
Tabla 5.3 Valores asignados a los intervalos de conductividad hidráulica en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea	43
Tabla 5.4 Valores asignados a los intervalos de cambio de pendiente en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea	45
Tabla 5.5 Valores asignados a los intervalos de precipitación en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea	47
Tabla 5.6 Valores asignados a los tipos de uso de suelo en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea	56
Tabla 5.7 Valores asignados a los intervalos de densidad de drenaje en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea	61
Tabla 5.8 Valores asignados a los intervalos de densidad de elementos estructurales en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea....	64
Tabla 5.9 Localización y profundidad del agua subterránea de acuerdo con las últimas actualizaciones publicadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018 –A, -B, -C, -D y -E).....	66
Tabla 5.10 Localización y profundidad del nivel estático registrado en el censo de aprovechamientos de agua subterránea del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (CONAGUA, 2019-A).....	66
Tabla 5.11 Valores asignados a los intervalos de profundidad del nivel estático en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea.....	68
Tabla 5.12 Asignación de pesos para cada uno de los criterios que influyen en la recarga de agua subterránea en acuíferos confinados. Modificado de Yeh et al., 2016	71
Tabla 5.13 Valores asignados a los intervalos de profundidad del agua subterránea en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga a través de pozos	72
Tabla 5.14 Valores asignados a los tipos de uso de suelo en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga a través de pozos	75
Tabla 5.15 Valores asignados a los intervalos de densidad de elementos estructurales en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga a través de pozos	81

1 Introducción

La Zona Metropolitana del Valle de México es el hogar de poco más de 22 millones de personas, es la zona más poblada y el centro económico del país, abastecer del recurso hídrico a esta megalópolis representa un reto sin precedentes; su ubicación, así como el aumento desmedido en la demanda y uso irracional del recurso, hacen de esta labor una misión compleja que compromete el desarrollo y la sustentabilidad de la región.

Poco más del 50% del total de agua que se consume en la Ciudad de México proviene del acuífero que la subyace, esta condición aunada a la disminución de zonas de recarga natural debido a asentamientos irregulares ha ocasionado que este sistema se encuentre en estado de sobreexplotación; actualmente se extrae el doble del volumen de agua que se infiltra en el acuífero ocasionando subsidencia diferencial del terreno, activación de fallas y fracturas y una disminución en la calidad del recurso.

La situación no es muy diferente en los sistemas acuíferos vecinos al de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En la búsqueda por suplir las demandas de la región, en los años cincuenta se inició la importación de agua de Sistemas colindantes como Cutzamala y Lerma; sin embargo, su incorrecta administración ha desencadenado que otros acuíferos como Valle de Toluca y Tenancingo también se encuentren en condición de déficit. De seguir este camino, pronto nos veremos en la necesidad de buscar fuentes cada vez más lejanas y costosas, así como enfrentar los problemas en superficie producto de este desequilibrio.

En este trabajo se evalúa el sur de la Cuenca de México, el objetivo es clasificar la zona de acuerdo con su potencial para sostener un proyecto de recarga artificial de los acuíferos que subyacen este territorio; la metodología utiliza un indicador propuesto (IPHRAS), el cual analiza y sintetiza la participación de diversos criterios que intervienen en el proceso. A través de la asignación de pesos y valores entrega una calificación del área.

Los criterios considerados varían según el tipo de confinamiento al que se encuentra sujeto el sistema, para acuíferos libres son: litología, pendiente, precipitación, uso de suelo, drenaje, elementos estructurales y profundidad del agua subterránea; mientras que, para acuíferos confinados se considera: plantas de tratamiento de aguas residuales, pozos en operación, profundidad del agua subterránea, elementos estructurales y uso de uso. El resultado son dos mapas que delimitan la región de acuerdo con sus condiciones hidrogeológicas para la recarga de acuíferos según su proceso de recarga; estos pueden usarse como un primer acercamiento a las características de la zona o bien, como una herramienta para la concientización sobre la importancia de conservar las áreas de infiltración natural.

Con el inminente crecimiento de la población resulta imperativo la creación de proyectos multidisciplinarios para el manejo sustentable de nuestros recursos naturales y de esta manera asegurar las necesidades de las generaciones presentes y futuras, la delimitación de las áreas de recarga a acuíferos es una parte importante de esta planeación.

1.1 Objetivo general

- Evaluar la factibilidad hidrogeológica para la recarga de acuíferos al sur de la Cuenca de México a través de la propuesta e implementación de un índice que cumpla este objetivo.

1.2 Objetivos particulares

- Delimitar el área de estudio de acuerdo con su potencial hidrogeológico para la recarga artificial de agua subterránea y asignar el método más adecuado para este propósito considerando las características de la zona.
- Proponer una estrategia para mejorar la situación hídrica en la Cuenca del Valle de México a través de la metodología propuesta.

2 Problemática del agua en el Valle de México

2.1 La megalópolis y sus acuíferos

La Cuenca de México se localiza en la parte central del Eje Neovolcánico Mexicano, tiene una altitud promedio de 2400 m.s.n.m. y un área de aproximadamente 11 000 km², dentro de esta, se extiende el Valle de México, una zona de alta montaña que alberga parte de una de las concentraciones urbanas más grandes del mundo, la Zona Metropolitana del Valle de México, conformada por la Ciudad de México y 60 municipios conurbados de los estados de México e Hidalgo. Tan solo para 2015, esta zona tenía una población cercana a los 21 millones de personas (INEGI, 2018) y la cifra sigue aumentando de manera alarmante.

La geomorfología del lugar y la demanda excesiva de la megalópolis, convierten al suministro del recurso hídrico en un reto monumental; solo la capital del país recibe alrededor de 32 m³/s de agua, de los cuales cerca del 50% se extrae de los pozos y manantiales del acuífero que la subyace (SACMEX, 2012).

Desde hace varias décadas, el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se encuentra en condición de sobreexplotación. Según la última actualización de disponibilidad media anual de agua subterránea publicada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 2018, este acuífero alcanzó un déficit de 561.06 Mm³/año. La situación se agrava al comprobar que no es el único acuífero en esta condición, los acuíferos vecinos Valle de Toluca y Tenancingo también presentan este problema; las principales causas son el exceso en la extracción del recurso y la disminución de zonas de recarga natural, ocasionada por los asentamientos irregulares en los pies de montaña y otras zonas que cumplían con este propósito (Comité de Academias para el Suministro de Agua de la Ciudad de México, 1995). Algunas consecuencias de la sobreexplotación a nuestros sistemas acuíferos son: hundimiento diferencial del terreno, generación de grietas en el pavimento y construcciones, disminución del volumen y calidad en el suministro del recurso.

2.2 Proyectos de recarga artificial

La preocupación por la sobreexplotación de los mantos acuíferos en la Ciudad de México tiene una historia larga que puede remontarse hasta inicios del siglo pasado. En 1940 tiene lugar la primera veda para la extracción de agua subterránea en la zona lacustre de la ciudad; lo anterior, como resultado del estudio conducido por el ingeniero José A. Cuevas, el cual intentó comprobar la relación entre la extracción y el hundimiento de la ciudad. Para 1947, el Dr. Nabor Carrillo demostró que el hundimiento en algunas zonas de la ciudad se debe a la consolidación de las arcillas lacustres del acuífero superior por la pérdida de presión hídrica que produce la extracción de agua (SACMEX, 2012). Desde entonces, los esfuerzos para restablecer el equilibrio del sistema acuífero a través de la recarga artificial han sido una parte importante en el proyecto hídrico de la metrópolis, en la tabla 2.1 se observan algunos de ellos.

Año	Localidad	Método de recarga	Volumen infiltrado
1940	Volcán Xitle	Interceptación de agua/sumidero	Sin dato
1943-1950	Cuenca del río Magdalena (canal alto)	Interceptación de agua/ filtración natural	34.5 hm ³
1944-1960	Cuenca del río Magdalena (canal bajo)	Interceptación de agua/ filtración natural	73.5 hm ³
1953	Jardín San Fernando	Pozo de infiltración	Sin dato
1956	Cuenca del río Mixcoac	Pozos de infiltración	15.2 hm ³
1970	Pedregal	Pozos de absorción	35 m ³
1990-2000	Ciudad de México	Pozos de absorción/ Infiltración de agua de lluvia.	140-261 m ³
2001-2009	Cerro de la Estrella, Peñón de los Baños y Santa Catarina.	Pozos de absorción (126)/ infiltración de agua de lluvia.	Sin dato
2001-2009	Santiago Tulyehualco, Santiago Tepelcatlalpan y San Cruz Acalpixca.	Pozos de absorción / infiltración de agua de lluvia.	Sin dato
2017	Cuenca del río Magdalena	Represas de gavión	382,060.72 m ³ /año

Tabla 2.1 Cronología de algunos proyectos para recargar artificialmente el acuífero de la ZMCM (Escolero, O., Gutiérrez C., Mendoza, E.Y. (Eds.), 2017)

Como se mencionó, el acuífero de la ZMCM no es el único que presenta problemas de sobreexplotación en esta región del país; el acuífero Valle de Toluca, presenta un déficit de 142.30 Mm³/año (CONAGUA, 2018-D). En 1970 la Oficina de Estudios Especiales de la Secretaría de Recursos Hidráulicos del Estado de México (OEE-SRH, 1970), publicó un estudio de la zona en el cual señala los efectos negativos que ha tenido el exceso en la extracción del recurso en este acuífero como son la desaparición de manantiales y norias por el descenso en el nivel freático, un mayor costo en el bombeo, la aparición de grietas y hundimientos regionales.

Con el paso de los años, se han realizado más estudios para medir la evolución de los niveles de abatimiento, así como la presencia de grietas y fallas en la zona; sin embargo, el último trabajo que se propuso para la recuperación piezométrica en el área urbana de Toluca y la zona industrial estuvo a cargo de la empresa Lesser y Asociados S.A. de C.V. en 1992.

En fechas más recientes, el Gobierno del Estado de México construyó una planta piloto de tratamiento de aguas residuales para su posterior inyección al acuífero, denominada "Macroplanta Toluca-Norte" ubicada en el municipio de Toluca de Lerdo, esta planta de tratamiento avanzado de agua residual tiene la tarea de recargar 20 l/s, esto es 630,720 m³/año; cuenta con diferentes procesos para asegurar que el agua de recarga cumpla con las normas NOM-014-CONAGUA 2003 Y NOM-015-CONAGUA 2007 (Korenfeld, 2011).

Por su parte, el acuífero Tenancingo presenta un déficit de 4.99 Mm³/año (CONAGUA, 2018-C) y no fue posible encontrar información sobre proyectos de recarga artificial para este acuífero. A pesar de no formar parte de este estudio, los acuíferos de Cuautitlán-Pachuca, Texcoco y Chalco-Amecameca presentan los valores de déficit más alarmantes entre un grupo más grande de acuíferos en esta situación, de manera anual se extraen 106.04, 111.86 y 22.92 millones de metros cúbicos respectivamente.

Algunas propuestas y artículos relacionados con la puesta en marcha de metodologías para recargar acuíferos en México pueden encontrarse en "*Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica*" de Escolero et al. (Eds.) como lo son el caso de estudio en la zona del Caracol, municipio de Ecatepec presentado por S. González y M. A. Juárez, donde se evalúa la factibilidad de recargar el acuífero profundo Cuautitlán-Pachuca, mediante la construcción de dos pozos de recarga a una profundidad de 250 m y 300 m, cuatro pozos de monitoreo: uno a 200 m, dos a 250 m y el último a 300 m de profundidad. Otro ejemplo es la infiltración e inyección directa de agua residual tratada proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Cerro de la Estrella en el oriente de la Ciudad de México, presentado por Ávila F.A. et al. y en el cual se narra la metodología seguida, así como una descripción de la hidrogeología del Cerro de la Estrella: configuración de niveles piezométricos, características hidrogeoquímicas y del acuífero receptor.

2.3 Situación a futuro

Sin lugar a duda, la situación hídrica en la parte central de México es motivo de preocupación, por lo cual resulta imperativo poner en marcha proyectos cuyo objetivo sea aminorar las condiciones de sobreexplotación en los acuíferos que rodean y subyacen a la ZMCM; de no implementar medidas concretas y eficaces para restablecer el equilibrio en estos sistemas las consecuencias a futuro pueden ser devastadoras.

Como se mencionó, no solo el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra en condiciones de sobreexplotación; los acuíferos Valle de Toluca y Tenancingo también presentan números negativos en cuanto a la disponibilidad media anual de agua subterránea, esto de acuerdo con la última actualización publicada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018 -C y -D). Por su parte, los acuíferos de Cuernavaca y Cuautla-Yautepec siguen esta tendencia al presentar disminuciones importantes en sus niveles de almacenamiento (CONAGUA, 2018 -A y -B), véase ilustración 2.1.

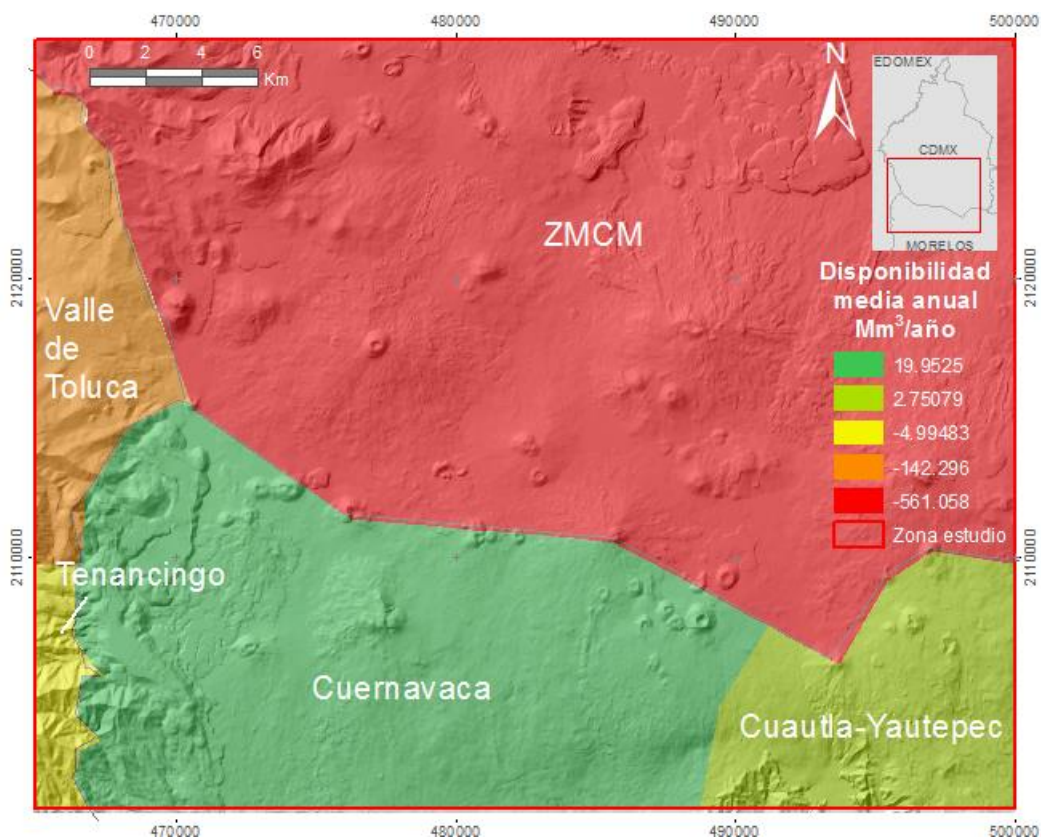


Ilustración 2.1 Disponibilidad media anual de agua subterránea para los acuíferos que subyacen la zona de estudio. (CONAGUA, 2018 -A, -B, -C, -D Y -E)

Si no se modifican las tasas de recarga y extracción que actualmente se mantienen en estos cuerpos acuíferos, a partir del 2020, todos los acuíferos que aquí se analizan se encontrarán en estado de sobreexplotación y la tendencia continuará para los años siguientes; la ilustración 2.2 presenta una comparación entre el déficit en 2015 (publicación más reciente) y el esperado para 2021 de mantener las condiciones actuales de explotación

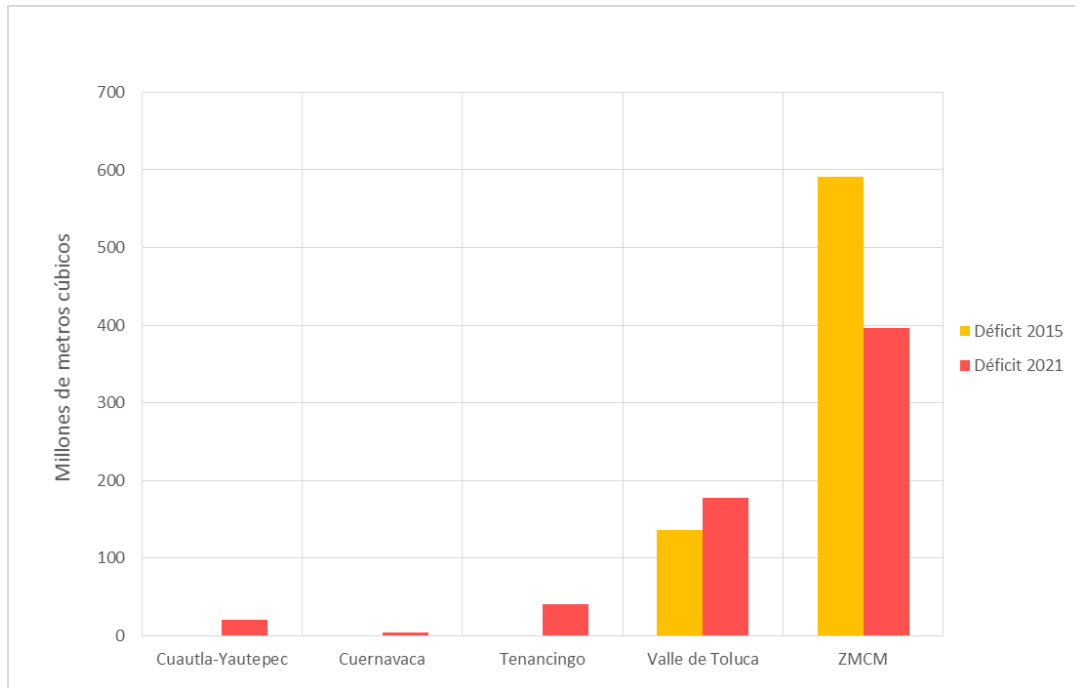


Ilustración 2.2 Comparación en el déficit presentado en los acuíferos que subyacen a la zona de estudio entre 2015 y 2021 (CONAGUA, 2018 -A, -B, -C, -D y -E)

Un aumento en el nivel y número de acuíferos sobreexplotados que subyacen y abastecen a una de las concentraciones urbanas más grandes del mundo no puede más que traducirse como problemas, por lo que este panorama debe cambiarse de manera inmediata.

3 Recarga artificial de acuíferos

3.1 Generalidades

Se conoce como recarga artificial de un acuífero a la introducción intencional de agua a la zona saturada de un sistema acuífero de manera directa o inducida y cuyo propósito es mejorar la disponibilidad y/o la calidad del agua en el mismo. Las metodologías usadas para llevar a cabo dicho proceso se conocen como tecnologías MAR (por sus siglas en inglés para *Managed Aquifer Recharge*), su elección depende de las condiciones particulares de la zona, así como el objetivo que se persigue con su aplicación.

Algunas de las metas que se buscan alcanzar con la implementación de estas tecnologías son:

- Aumentar las reservas de agua subterránea
- Mejorar la calidad del agua mediante técnicas de tratamiento de suelos y acuíferos

- Reducción de la erosión del suelo
- Disminución de la subsidencia
- Almacenar agua en el subsuelo
- Reducir la intrusión marina o salina continental
- Dilución de contenido de nitratos, cloruros u otros elementos químicos presentes en el agua de un acuífero

El proyecto de recarga artificial puede dividirse en siete etapas, véase ilustración 3.1, la primera de ellas se refiere a la recolección del recurso, seguida por un tratamiento previo a su introducción con el fin de evitar la contaminación del agua nativa; posteriormente, la implementación del método de recarga elegido de acuerdo con las características del acuífero y del terreno en superficie. La permanencia del agua recargada dentro del acuífero depende del objetivo que se persiga en el proyecto; una vez alcanzado este, el agua se recupera para ser transportada a su uso final no sin antes ser objeto de un nuevo tratamiento que asegure su calidad. (NRMCC, EPHC & AHMC, 2009)

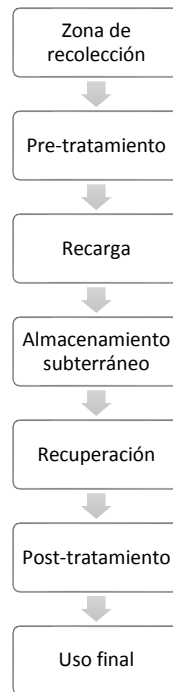


Ilustración 3.1 Elementos que conforman un proyecto de recarga artificial de acuíferos

Algunas de las fuentes de agua más comunes para la recarga de acuíferos son:

- Agua superficial continua (corriente permanente) o discontinua (escurrimientos extraordinarios generados por lluvias torrenciales), tomadas directamente o con un tratamiento.
- Aguas residuales de las zonas urbanas-industriales (tratadas)
- Aguas de otro acuífero
- Agua de lluvia

Sin olvidar que la implementación de estas tecnologías, son al final del día como cualquier otro proyecto de inversión; expertos sugieren incluir los siguientes elementos en la etapa de planeación de cualquier proyecto de recarga de acuíferos (González, Mendoza y Arriaga, 2017):

- Usos y demandas del agua, actuales y futuros
- Elementos de regulación actual y futura (agua superficial y subterránea)
- Características de calidad y variabilidad temporal
- Evaluación económica, aspectos legislativos y de gestión

3.2 Métodos para la recarga de acuíferos

La elección de la metodología MAR se realiza de acuerdo con las características y objetivos particulares de cada proyecto; dependen del tipo de acuífero, topografía, uso de suelo, propósitos del agua recuperada, normatividad vigente, entre otros. El entendimiento de la hidrogeología local es fundamental para determinar las opciones viables según la factibilidad técnica de la zona (Dillon, Pavelic, Page, Beringen & Ward, 2009).

A continuación, se muestran las técnicas más usadas en el mundo para recargar de manera artificial a un cuerpo acuífero, se hace una distinción según el tipo de metodología usada (Mendoza, 2017).

Distribución

Dirige el agua hacia zonas en donde el terreno permita su infiltración al subsuelo

- **Cuencas y estanques de infiltración:** El propósito es dirigir el agua hacia depresiones naturales o estanques en donde pueda llevarse a cabo la infiltración. Dentro de las consideraciones para este tipo de proyectos destacan las propiedades permeables con las que debe contar el subsuelo y la zona de influencia del domo de recarga con el fin de no afectar a terceros.
- **Tratamiento suelo-acuífero:** El suelo es usado como un filtro que mejora la calidad química del agua infiltrada, algunos de sus beneficios son la eliminación de organismos patógenos, estabilización de parámetros químicos, absorción de compuestos orgánicos y reducción de antibióticos. El agua recuperada de esta tecnología puede usarse para el uso agrícola y, si la legislación lo permite, inclusive para el uso urbano. Otro beneficio es que el método puede aplicarse a grandes volúmenes de agua, para lo cual hace uso de extensiones importantes de terreno.
- **Inundación controlada:** Utiliza una corriente superficial que es conducida hacia terrenos de inundación los cuales poseen un sistema de represas, diques, zanjas o una combinación de estos. Es una metodología económica en cuanto a su construcción y mantenimiento, ideal para zonas rurales con disponibilidad de

terrenos y cuya aplicación puede significar el abastecimiento de toda la comunidad. Debe considerarse algunos efectos adversos de esta tecnología como la sedimentación que disminuye la capacidad de infiltración, el aumento de los niveles de sales en el suelo, la presencia de agroquímicos y la necesidad de mantener el área de inundación libre de vegetación.

- **Recarga por riego:** Se encuentra delimitada por la existencia de agua en exceso que se aplica de forma deliberada sobre las áreas que usualmente se usan para la agricultura, pero que específicamente se encuentran libres de cultivo. Es un proceso muy variable de acuerdo con las características de la zona y para el cual es necesario llevar a cabo un balance hidrológico.

Pozos de absorción

Infiltran el agua a la zona saturada mediante perforaciones someras o profundas.

- **Pozos someros de recarga:** Son utilizados en acuíferos con un nivel freático somero o en lugares donde las capas superficiales presentan una baja permeabilidad dificultando la aplicación de los métodos de distribución. Esta técnica infiltra el agua a las capas de mayor permeabilidad y suelen construirse dentro de estanques o zanjas de infiltración, así como en el interior de un cauce natural.
- **Pozos secos:** Son pozos someros que penetran en la zona no saturada y su función es infiltrar agua de lluvia, su uso es popular en zonas áridas y semiáridas. A pesar de que la recolección de agua pluvial suele llevarse a cabo en áreas verdes que no presentan un alto grado de contaminación y que el agua pasa por un filtro desarenador, no se descarta la posibilidad de introducir al acuífero sólidos en suspensión, compuestos orgánicos y bacterias.
- **Almacenamiento de agua en el acuífero y recuperación:** Involucra un pozo cuyo primer objetivo es el de infiltrar agua al acuífero y posteriormente su recuperación a través del mismo pozo. Aplicable en zonas donde existen horizontes gruesos de baja permeabilidad que yacen sobre el acuífero por recargar. Dentro de las desventajas se encuentra la posibilidad de que el agua extraída se vea alterada por la química del agua originalmente ingresada.
- **Almacenamiento, transferencia y recuperación:** En esta técnica se involucran dos pozos, uno para la inyección de agua y otro para su extracción, este último debe localizarse a una distancia tal que permita una permanencia adecuada del recurso dentro del acuífero y de esta manera elevar la calidad del agua al ser depurada a medida que atraviesa los estratos permeables del acuífero.

Modificación de cauces de ríos

Estructuras que interceptan o detienen el flujo de corrientes de agua superficial facilitando la recarga natural de los acuíferos. Son adecuadas para regiones áridas, en arroyos y cauces que solo llevan agua en época de lluvias. Aportan una mayor humedad al suelo, incrementan el gasto en manantiales y reducen la erosión del suelo.

- **Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones:** Estas presas se construyen sobre el cauce del río actuando como un estanque de infiltración que facilita la recarga del acuífero. Otra variante es la adición de tuberías por la que el agua es conducida hasta el lecho del río.
- **Presas de arena para almacenamiento:** Son construidas en el cauce de los ríos y arroyos en donde se edifica una cortina con mampostería. El vaso de almacenamiento, generado por la presa, se rellena con arena, en su interior se acumula el agua reduciendo así el volumen de líquido que se pierde debido a la evaporación.
- **Presas subterráneas:** La función de estas estructuras es contener el flujo subterráneo de un acuífero mediante una barrera impermeable que provoca una elevación en el nivel freático, de esta manera se logra un almacenamiento subterráneo que puede ser aprovechado para la agricultura u otros usos. En zonas costeras impide la intrusión del frente salino.
- **Filtración ribereña:** Esta técnica consiste en inducir el flujo de un cuerpo de agua superficial (río, lagos, esteros) hacia un pozo de producción a través de los sedimentos permeables del subsuelo. Reduce o elimina la concentración de sólidos suspendidos, organismos patógenos y turbiedad, de la misma manera propicia la estabilización geoquímica del agua, y garantiza el suministro constante de agua de manera independiente a las variaciones del gasto de los ríos.
- **Filtración Inter-dunar:** Se implementa en zonas costeras donde el valle que se forma entre las dunas es inundado propiciando la infiltración del agua en los sedimentos, el agua subterránea surge en el valle aledaño donde se extrae para diversos usos. La fuente de agua de recarga son los ríos que tienden a desembocar en estas zonas.
- **Ampliación de cauces:** Son tecnologías que se ponen en marcha sobre los ríos y arroyos para modificar su cauce natural y de esta manera aumentar la infiltración al subsuelo. Dentro de las acciones que se pueden realizar para cumplir con este objetivo se encuentran ampliar el área mojada, disminuir la velocidad del agua o derivar un volumen de excedentes a zonas más permeables dentro del cauce del río. Algunas de estas tecnologías son la ampliación, nivelación, escarificación y el dragado de los cauces. Cada estructura se diseña de acuerdo con las características del terreno e hidrología.

Captación de agua pluvial

Interceptar el agua de lluvia, colectarla y almacenarla para su posterior uso

- **Recolección de agua de lluvia:** Se realiza en techos de casas, edificios y áreas urbanas libres de contaminantes (solventes, aceites y desperdicios industriales), posteriormente puede conducirse a un pozo e infiltrarse al acuífero o puede ser colectada en depósitos superficiales o subterráneos para su posterior utilización en fines domésticos. Es una forma de abastecimiento económica y sustentable.
- **Zanjas de infiltración y tinas ciegas:** Son excavaciones horizontales de 90 cm de largo por 30 cm de ancho y 25 cm de profundidad, hechas a mano. El material que se extrae se coloca en la cara frontal de la zanja, formando una zanja de infiltración, si este material no se apila entonces se conoce como tina ciega. Ambas siguen la cota topográfica y su función es captar sedimento y propiciar la infiltración de agua de lluvia. Cuando tiene lugar un evento de lluvia estas zanjas impiden el libre escurrimiento sobre la superficie del terreno almacenándolo y propiciando la infiltración. Se asocia esta técnica con proyectos de reforestación ya que parte del suelo que es removido para hacer la plantación sirve para almacenar agua y proporcionarle humedad por más tiempo.
- **Surcos:** Siguen la cota topográfica y tienen como objetivo retener el agua captada en la parte alta mejorando la infiltración asimismo conducen el agua hasta puntos de concentración donde pueda ser almacenada para su posterior utilización (jagüey, aguaje o tanque).
- **Jagüeyes, aljibes, ollas de agua o cajas de agua:** Son depresiones naturales o construidas que interceptan una corriente de agua con una cortina construida de material compacto o piedra. Antes de su construcción es necesario realizar una estimación del volumen a almacenar.

3.3 Marco jurídico

En México la recarga de acuíferos se encuentra regulada por diversas leyes y normas, a continuación, se precisan dichos ordenamientos jurídicos, (Escolero, 2017):

- I. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente, artículos 28, 31 (fracción I), 117 a 119 bis (relativas a la prevención de la contaminación del agua) y 121 (referente a la prohibición de la infiltración de agua al subsuelo sin un tratamiento previo y el permiso de la autoridad federal).

- II. Ley de Aguas Nacionales, artículos 1, 2 y 7. Este último se refiere a la protección, conservación y restauración de acuíferos, así como a la infiltración de aguas naturales o artificiales para reponer los acuíferos, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas. El artículo 86, fracción I, expresa términos de la entrega y operación de la infraestructura de los sistemas de revisión federales, y lo que es necesario para la preservación de la calidad del agua en cuencas y acuíferos.
- III. Normas Oficiales Mexicanas (NOM)
- **NOM-003-Conagua-1996**, dispone los requisitos mínimos de construcción que se deben cumplir durante la perforación de pozos para la extracción de aguas nacionales y trabajos asociados, con el objeto de evitar la contaminación de acuíferos.
 - **NOM-004-Conagua-1996**, establece los requisitos para la protección de la calidad del agua en los acuíferos durante los trabajos de mantenimiento, rehabilitación de pozos y el cierre de pozos, en forma temporal o definitiva.
 - **NOM-011-Conagua-2015**, prevé las especificaciones y el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y del subsuelo, para su explotación, uso o aprovechamiento.
 - **NOM-014-Conagua-2003**, regula los requisitos que deben cumplir la calidad del agua, la operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
 - **NOM-015-Conagua-2007**, establece los requisitos para la protección de la calidad del agua de los acuíferos y la metodología base para el aprovechamiento del agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial.
 - **NOM-127-SSA1-1994**, determina los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir con los sistemas de abastecimientos públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya en todo el territorio nacional.

4 Zona de estudio

4.1 Localización

La zona de estudio se ubica al sur de la Ciudad de México y en parte de los estados de México y Morelos, véase ilustración 4.1. El área se encuentra delimitada por la carta topográfica Villa Milpa Alta, E14A49 escala 1:50,000 (INEGI; 2014). Consiste en un rectángulo de 35 x 28 km², cuyas coordenadas en el sistema universal transversal de Mercator (UTM) se muestran en la tabla 4.1.

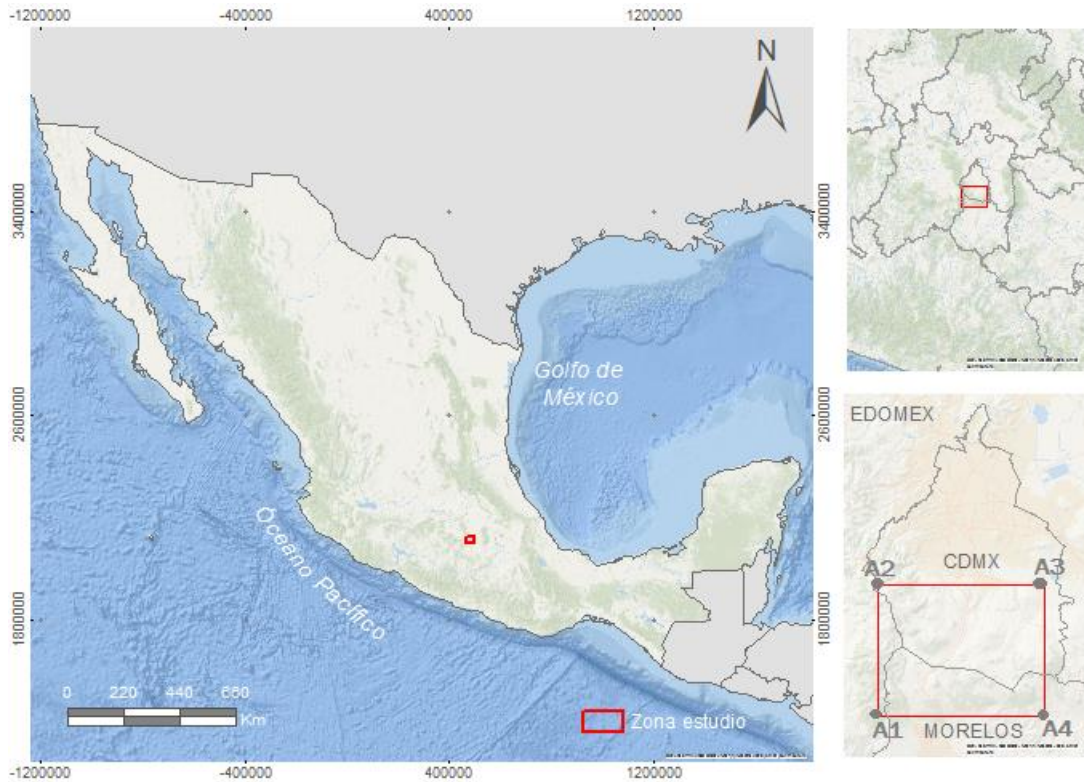


Ilustración 4.1 Localización de la zona de estudio

Referencia	Coordenada en x		Coordenada en y
A1	14 Q	465,000.00 mE	2, 101,000.00 mN
A2	14 Q	465,000.00 mE	2,128,500.00 mN
A3	14 Q	500,000.00 mE	2,128,500.00 mN
A4	14 Q	500,000.00 mE	2, 101,000.00 mN

Tabla 4.1 Coordenadas de referencia para la zona de estudio

Dentro del área definida como zona de estudio, se encuentran, respectivamente, las siguientes alcaldías y municipios:

En la Ciudad de México

- Álvaro Obregón
- Cuajimalpa de Morelos
- Magdalena Contreras
- Milpa Alta
- Tláhuac
- Tlalpan
- Xochimilco

En el Estado de México

- Ocoyoacac
- Ocuilan
- Tianguistenco
- Xatlalaco

En el estado de Morelos

- Cuernavaca
- Huitzilac
- Tepoztlán
- Tlalnepantla

En la ilustración 4.2 se aprecia un acercamiento a las alcaldías y municipios dentro de los cuales se encuentra circunscrita la zona de estudio.

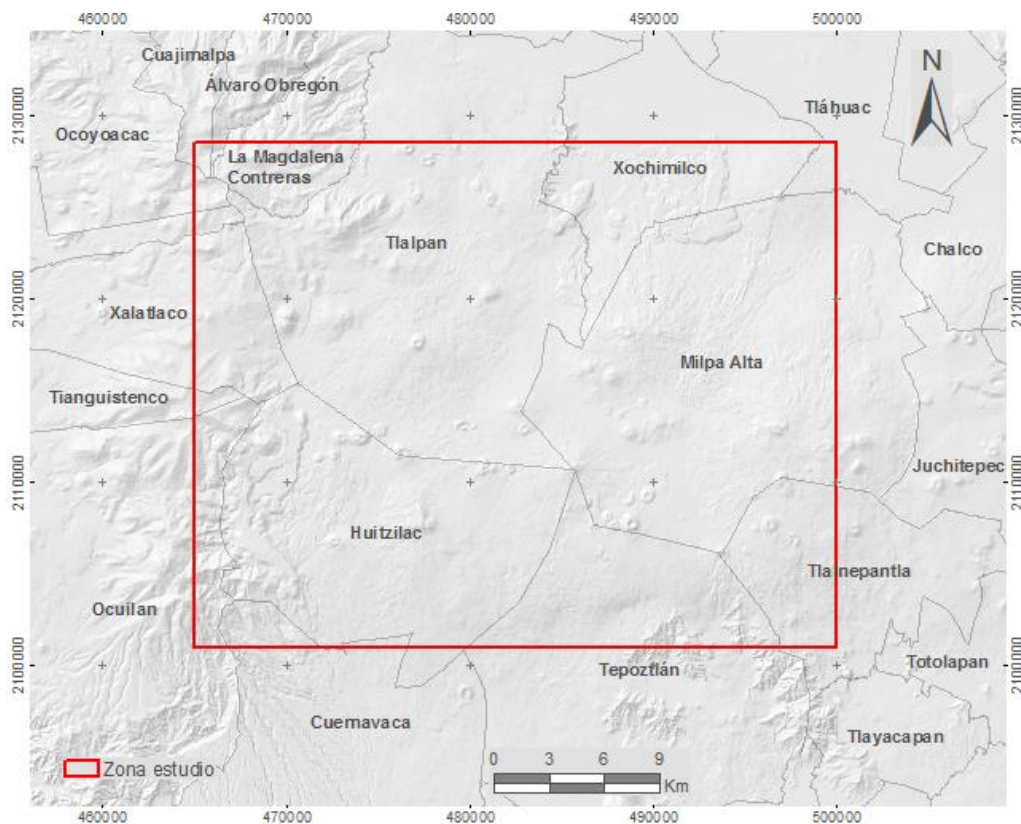


Ilustración 4.2 Alcaldías y municipios dentro de la zona de estudio

4.2 Vías de acceso

Las principales carreteras que conectan a la zona con el resto del país se muestran en la ilustración 4.3, estas son: autopista de cuota 95D que comunica al puerto de Acapulco en el estado de Guerrero con la Ciudad de México, específicamente el tramo Ciudad de México-Cuernavaca y carretera federal 113 que comunica a la alcaldía de Xochimilco en la Ciudad de México con la población de Oaxtepec en el municipio de Yautepec de Zaragoza, Morelos.



Ilustración 4.3 Vías de acceso a la zona de estudio

4.3 Fisiografía y geomorfología

El área de estudio se encuentra en la subprovincia de Lagos y volcanes del Anáhuac, una subdivisión del Eje Neovolcánico. Dentro de la zona de estudio se pueden diferenciar dos tipos de geomorfologías; la Cuenca de México, específicamente el Valle de México y las serranías que delimitan al Valle por el sur, conocidas como Sierra Ajusco – Chichinautzin, véase ilustración 4.4.

La Cuenca de México es una planicie lacustre de 1,431 km², tiene una altura promedio de 2,300 m.s.n.m. y está conformada casi en su totalidad por mantos de lava y materiales piroclásticos (Durazo, 1996); los volcanes presentes tienen diversas formas de acuerdo con su edad, los más antiguos poseen laderas suavizadas y redondeadas mientras que, los más recientes ostentan flancos con pendientes pronunciadas sin signos de erosión (White, 1990).

El piso de la cuenca se encuentra constituido por sedimentos lacustres de lagos primitivos, por su parte, las laderas superiores que rodean a dicha cuenca se encuentran cubiertas por depósitos aluviales provenientes de antiguas sierras adyacentes y que hoy se conocen como la Formación Tarango.



Ilustración 4.4 Cuenca de México: Valle de México y Sierra Ajusco-Chichinautzin

El valle de México era originalmente una cuenca cerrada constituida por cinco lagos: México- Texcoco, Xochimilco, Chalco, Zumpango y Xaltocan. La actividad humana en la zona ha desecado la mayoría de ellos, por lo que actualmente solo persisten los lagos de Texcoco y Zumpango (Jiménez, Mazari, Domínguez & Cifuentes, 2004). La geología del Valle se encuentra conformada por sedimentos lacustres de edad cuaternaria, loess, rellenos aluviales, rocas volcánicas del Terciario y calizas cretácicas (Mooser, Nairn & Negendank, 1974).

Por otro lado, la sierra del Chichinautzin está constituida principalmente por un extenso campo de volcanes monogenéticos que se encuentran distribuidos entre el sur de la Ciudad de México, el norte del estado de Morelos y el este del Estado de México. Este campo volcánico presenta depósitos piroclásticos y lávicos de composición preferentemente calcialcalina, sus principales exponentes son los basaltos y andesitas pertenecientes al periodo Cuaternario. (Vázquez-Sánchez & Jaimes-Palomera, 1989).

De acuerdo con Martin del Pozzo (1982) y Verma & Tapia (2001), predominan tres tipos de estructuras volcánicas dentro del Centro Volcánico del Chichinautzin.

- I. Conos de escoria con coladas de lava asociadas producidos por actividad estromboliana (Por ejemplo, Xitle y Chichinautzin)
- II. Volcanes escudo, formados por extensas coladas de lava y un cono de escoria en la cima (por ejemplo, Teuhtli y Pelado).
- III. Espesos flujos de lava asociados a fisuras.

Por último, la sierra del Ajusco, que suele generar controversia entre autores en cuanto a su denominación y clasificación conjunta o separada con la Sierra Chichinautzin; sin embargo, se sabe con seguridad que se trata de un conjunto de picos aislados cuya base describe una forma casi circular con un diámetro cercano a los 9 km y localizado a 1,700 m sobre el piso de la cuenca. Es comprensible entonces que debido a su magnitud el Ajusco presente diversos tipos de rocas (White, 1990).

A pesar de que los productos de ambos eventos llegan a confundirse debido a su cercanía, las cumbres del Ajusco sobresalen de los mantos de lava y sedimentos volcánicos de la Serie Basáltica Chichinautzin.

4.4 Geología

Las rocas que afloran en la zona de estudio en su mayoría son ígneas extrusivas, con edades que van desde el Cenozoico medio hasta el Holoceno. En menor proporción encontramos suelos aluviales y residuales, producto de los antiguos lagos que se asentaban en las cuencas circundantes.

La geología del subsuelo es de suma importancia al realizar un análisis de los cuerpos de agua que se encuentran a profundidad, ya que la litología delimita, en gran medida, el flujo de agua a través de los poros, así como su capacidad para almacenar este fluido dando lugar a acuitardos, acuifugos o acuíferos.

Más adelante, se analiza la hidrogeología de los acuíferos presentes en la zona de estudio, dentro de la descripción de estos se mencionan algunas formaciones y grupos importantes para su constitución y para la geología de la subprovincia de Lagos y volcanes del Anáhuac, por lo cual se describen a continuación.

Cretácico

Formación Morelos

Propuesta por Carl Fries en 1960, se encuentra definida por una secuencia de horizontes de calizas y dolomitas que afloran en gran parte del Estado de Morelos y zonas circundantes; en la zona de estudio aflora al sur de la Sierra Chichinautzin (Vázquez-Sánchez & Jaimes-Palomera, 1989). Esta formación está constituida por una sucesión de horizontes calcáreos y dolomíticos con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos y lentes; la

parte más antigua contiene estratos de anhidrita. Presenta estratos con espesores que varían entre los 20 y 60 cm con coloraciones que van desde el gris claro hasta el negro. El espesor de esta formación depende del lugar donde se lleve a cabo la medición, varía entre los 450 m (pozos Mixhuca- 1 y Tulyehualco-1) y los 900 m (pozo Ticúman) (CONAGUA, 2018-B).

Formación Cuautla

De igual manera, fue propuesta por Fries en 1960 para referirse a las calizas que afloran en las vecindades de Cuautla en el estado de Morelos pertenecientes al Cenomaniano-Turoniano. Consta de tres facies predominantes, la primera de ellas es una sucesión gruesa de capas de caliza de estratificación, una sucesión de calizas laminares de estratificación y una sucesión muy delgada de capas de caliza de estratificación delgada a mediana. Su espesor alcanza los 750 m y al igual que la Formación Morelos, sufrió una fuerte deformación producto de efectos orogénicos dando lugar a fracturas que en diversas localidades fueron selladas por calcitas (CONAGUA, 2018-B). En la zona de estudio se presenta al norte del municipio de Tepoztlán (Mexicano, S. G., 2019).

Formación Mexcala

Propuesta por Fries en 1960, describe una sucesión de capas interestratificadas de areniscas, limolita y lutita calcáreas con escasos lentes de caliza clástica; la parte basal de esta formación es de naturaleza calcárea y puede consistir en caliza arcillosa o limolita calcárea (Mexicano, S. G., 2019). En la zona de estudio comprende, junto con la formación Morelos, las calizas marinas plegadas que forman el basamento de la Cuenca de México (SACMEX, 2012). Es la formación más joven de la secuencia de rocas sedimentarias marinas del Cretácico. Presenta un alto grado de plegamiento por lo cual ha sido imposible conocer su espesor real; sin embargo, existe evidencia de que es mayor a los 1000 m (CONAGUA, 2018-B).

Formación Cuernavaca

Se encuentra constituida por materiales clásticos de granulometría muy variada, desde arenas finas y arcillas, hasta conglomerados con bloques de un metro de diámetro, su grado de compactación y cementación también es muy variable, desde altamente compactados hasta aquellos sin cementación alguna. Aflora ampliamente hacia las inmediaciones del volcán Popocatepetl; al oeste, se extiende hasta el Nevado de Toluca (Mexicano, S. G., 2019). Según cortes litológicos en el área de Jiutepec, su espesor es de aproximadamente 300 m. Su edad corresponde al Plioceno Tardío (CONAGUA, 2018-B).

Cuaternario

Grupo Chichinautzin

Este grupo fue propuesto por Fries en 1965, para identificar a las corrientes lávicas, brechas, tobas y materiales clásticos interestratificados y de composición andesítica y

basáltica que descansan en discordancia angular sobre la Formación Cuernavaca. Sus afloramientos se componen de extensas y potentes corrientes de lava interdigitadas con productos piroclásticos, brechas y conglomerados. Litológicamente el grupo se encuentra formado por basaltos de olivino. Corresponde al Pleistoceno-Holoceno y su espesor alcanza los 1500 m (CONAGUA, 2018-B).

Depósitos clásticos

Sobreyaciendo a todas las formaciones anteriores, se encuentran depósitos clásticos continentales formados por materiales poco consolidados con granulometrías que varían desde gravas hasta lilos y arcillas. Finalmente, la secuencia estratigráfica se completa con depósitos aluviales cuaternarios del periodo Holoceno, constituidos por depósitos sedimentarios clásticos continentales y en menor proporción material volcánico. Aflora en pequeñas áreas y su espesor es reducido (CONAGUA, 2018-B).

4.5 Regiones Hidrogeológicas

Con fines de administración y preservación de las aguas nacionales, desde 1997, el país se ha dividido en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA), estas son agrupaciones de cuencas que respetan los límites municipales. En la tabla 4.2, se presentan las RHA y los acuíferos que coinciden en la zona de estudio (CONAGUA, 2018-F).

Clave acuífero	Nombre acuífero	Región Hidrológico-administrativa
239	Cuautla-Yautepec	Balsas
238	Cuernavaca	Balsas
268	Tenancingo	Balsas
625	Valle de Toluca	Lerma Santiago- Pacífico
626	Zona Metropolitana de la Ciudad de México	Valle de México

Tabla 4.2 Acuíferos presentes en la zona de estudio (CONAGUA, 2018-F)

La mayor parte de la zona de estudio se encuentra sobre el acuífero ZMCM mientras que, su porción sur y sur occidental lo hacen sobre los acuíferos Valle de Toluca, Cuautla-Yautepec, Cuernavaca y Tenancingo; su distribución se muestra en la ilustración 4.5.

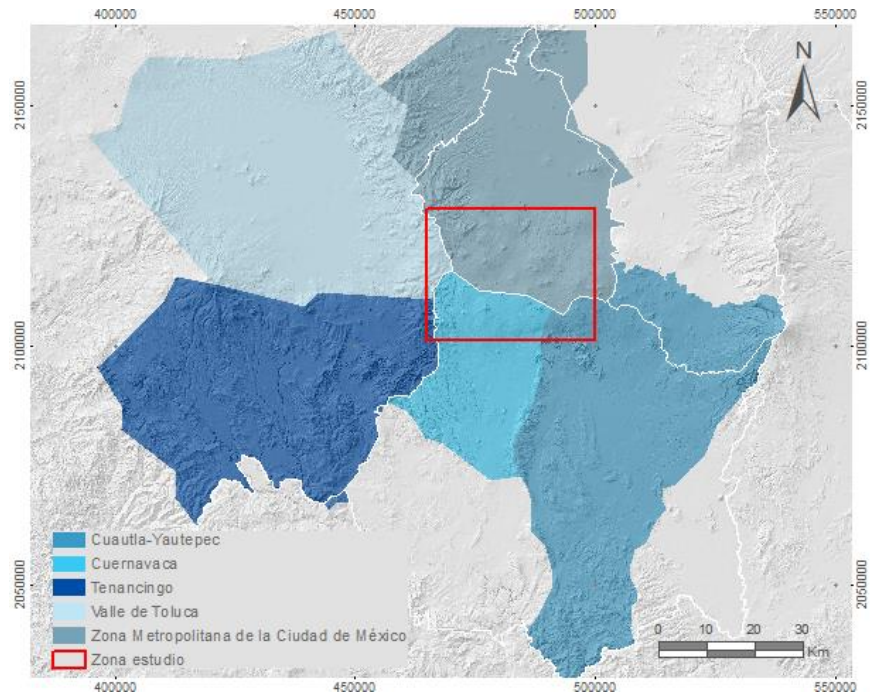


Ilustración 4.5 Acuíferos que subyacen en la zona de estudio

Acuífero Cuautla- Yautepec

Se localiza en la porción central del estado de Morelos, pertenece a la RHA IV: Balsas; limita al norte con los acuíferos de Chalco-Amecameca y el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, al noroeste con los acuíferos Valle de Puebla y Atlixco-Izúcar de Matamoros, al este con el acuífero Tepalcingo- Axochiapan, al sur con los acuíferos Ixcaquixtla y Huitzucó, finalmente limita al oeste con los acuíferos de Zacatepec y Cuernavaca. Cubre un área total aproximada de 2,558 km².

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que forman el lecho y llanura de inundación de los ríos y arroyos, así como las areniscas, conglomerados, basaltos y andesitas, que rellenan los valles con espesores de hasta 200 m. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, principalmente las calizas de las formaciones Morelos y Cuautla, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución. Esta unidad puede presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala (CONAGUA, 2018-A).

Acuífero Cuernavaca

Se ubica en el noroeste del estado de Morelos, pertenece a la RHA IV: Balsas; limita al norte con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, al noroeste con el acuífero Valle de Toluca, al oeste con Tenancingo, al este con Cuautla-Yautepec y al sur con Zacatepec. Cubre un área total de aproximadamente 820 km².

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, compuesto en su porción superior, por los sedimentos aluviales y fluviales que forman el lecho y llanura de inundación de los ríos Apatlaco y Tembembe y otros arroyos, así como areniscas, conglomerados, basaltos y andesitas. La porción inferior se encuentra en una secuencia de calizas marinas de las formaciones Morelos y Cuautla que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están representados por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad y por las rocas arcillosas de la Formación Mexcala. Esta unidad puede presentar condiciones de semiconfinamiento debido a que se encuentra sobreyacida por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala (CONAGUA, 2018-B).

Acuífero Tenancingo

Se sitúa al sur del Estado de México, en sus límites con los estados de Morelos y Guerrero, pertenece a la RHA IV: Balsas; limita al norte con el Valle de Toluca, al noroeste con Temascaltepec y Valle Victoria- Valle de Bravo, al suroeste con Altamirano-Cutzamala y Arcelia, al sur con Buenavista de Cuellar, al sur con Zacatepec y al noroeste con Cuernavaca. Cubre un área total de aproximadamente 2,000 km².

Derivado de las características geológicas, geofísicas e hidrogeológicas de la zona se pudo definir la presencia de un acuífero de tipo libre. Las secuencias volcánicas del plio-cuaternario, consistentes en andesitas y basaltos conforman las principales unidades hidrogeológicas con capacidad para almacenar y transmitir importantes volúmenes de agua subterránea, mientras que, las calizas del Cretácico de la Formación Morelos funcionan como zonas de transmisión de agua a otros materiales. Los materiales granulares no consolidados no presentan espesores importantes, pero generan horizontes saturados dando lugar a manantiales. Se ha identificado una componente de flujo subterráneo regional caracterizado por aguas termales que afloran en la zona de Ixtapan de la Sal con temperaturas superiores a los 33°C (CONAGUA, 2018-C).

Acuífero Valle de Toluca

Se localiza en el Estado de México, dentro de la cuenca Alta del Río Lerma, al sur del Altiplano Mexicano; pertenece a la RHA VIII: Lerma Santiago Pacífico; limita al norte con el acuífero de Atlacomulco-Ixtlahuaca, al sur con el cerro de Tenango, al Sur-Poniente con el Volcán Nevado de Toluca y al Oriente con la Sierra de las Cruces. Cubre un área total de aproximadamente 2,738 km².

Este sistema acuífero se encuentra conformado por dos cuerpos; el primero de ellos pertenece al medio poroso y funciona como un acuífero libre, este suprayace una capa de tobas que a su vez funciona como un acuitardo y confina físicamente al acuífero inferior haciendo que funcione hidráulicamente como confinado o semiconfinado con fracturamiento (CONAGUA, 2018-D).

Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Se ubica en el sur poniente de la Cuenca del Valle de México, pertenece a la RHA XIII: Valle de México; limita al norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al sur con los acuíferos de Yautepec y Cuernavaca, al poniente con el acuífero Valle de Toluca y al oriente con los acuíferos de Chalco-Amecameca y Texcoco. Ocupa alrededor del 17% de la superficie de la Cuenca del Valle de México.

El sistema acuífero ZMCM está constituido por tres grandes cuerpos: en la parte superior un acuitardo de espesor variable, formado por un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y una gran heterogeneidad y que funciona como semiconfinante en el centro de la cuenta. Le subyace el acuífero que actualmente se encuentra en explotación, compuesto por material granular más grueso como son piroclastos y conglomerados de origen volcánico, su espesor es variable, generalmente es mayor a 200 m. Por debajo de esta unidad, se encuentra el contenedor impermeable del acuífero constituido por rocas volcánicas fracturadas (CONAGUA. 2018-E).

5 Metodología

La elección del sitio adecuado para la implementación de cualquier tecnología MAR representa un proceso complejo debido a la gran cantidad de factores que intervienen en este proceso, así como a la amplia heterogeneidad que puede existir dentro de estos elementos. Deben considerarse no solo las características regionales tanto en superficie como por debajo de esta, sino además, otro gran número de elementos que van desde lo social y económico hasta las políticas regulatorias y ambientales.

Debido a lo anterior, las herramientas que facilitan un análisis de decisión de criterios múltiples como los Sistemas de Información Geográfica son ampliamente usadas en la delimitación de zonas con un alto potencial para la recarga de agua subterránea en todo el mundo.

5.1 Sistemas de información geográfica y percepción remota en el estudio de la factibilidad para la recarga de agua subterránea

Los Sistemas de Información Geográfica (*GIS* por sus siglas en inglés para *Geographic Information System*) facilitan el análisis integrado de un gran volumen de datos multidisciplinarios, tanto espaciales como no espaciales, dentro de un mismo esquema de georreferencia (Saraf & Choudhury, 1998). Por su parte, la percepción remota se describe como la identificación o reconocimiento de objetos a través de métodos indirectos usando campos de fuerzas que existen de manera natural o son creados de manera artificial para este propósito (Chuvienco, 2009).

La integración de estas tecnologías para el estudio del agua subterránea se ha implementado por décadas y persiste debido a su capacidad para desarrollar información espacio-temporal de manera casi inmediata, así como su efectividad en el análisis y predicción de este tipo de datos (Senanayake, Dissanayake, Mayadunna & Weerasekera, 2016); aunado a lo anterior, representan una opción más rápida y económica en comparación con los estudios en sitio para evaluaciones preliminares (Yeh, Lee, Hsu & Chang, 2009).

Existe una cantidad importante de trabajos que han estudiado diversas partes del planeta con el objetivo de evaluar su potencial para sostener un proyecto de recarga de agua subterránea a través de la integración de herramientas computacionales como los Sistemas de Información Geográfica y técnicas de investigación geoespacial como la percepción remota (krishnamurthy, Mani, Jayaraman & Manivel, 2000; Senanayake et al., 2016; Shaban, Khawlie & Abdallah, 2006; Kallali, Anane, Jellali & Tarhouni, 2007; Yeh et al., 2009; Yeh, Cheng, Lin & Lee, 2016).

Estos estudios se basan en el análisis y evaluación de los factores que intervienen en el proceso de recarga de agua subterránea; toda la información geoespacial del elemento en cuestión se representa en forma de una capa temática, la cual es comparada con el resto del conjunto a través de un proceso de jerarquización y asignación de pesos; finalmente, la factibilidad hidrogeológica de la zona se obtiene a partir de un proceso de superposición ponderada de todas las capas temáticas, véase ilustración 5.1.

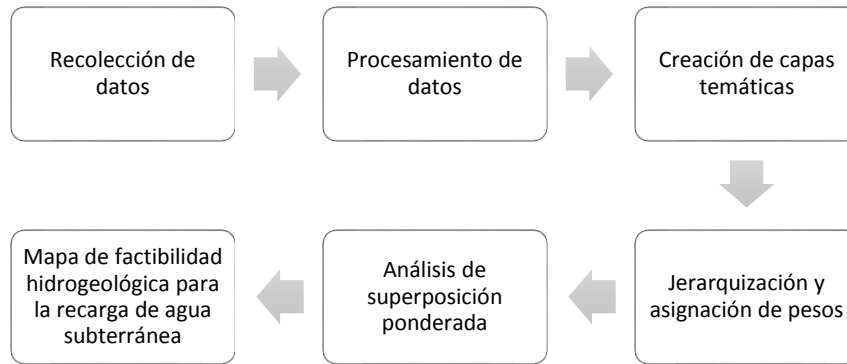


Ilustración 5.1 Diagrama de flujo que muestra la metodología empleada para delimitar la factibilidad hidrogeológica para la recarga de agua subterránea en la zona de estudio

5.2 Factibilidad hidrogeológica para la recarga de acuíferos

Como parte del esfuerzo para aminorar la condición de sobreexplotación en los acuíferos que subyacen y rodean a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México a través de proyectos de recarga artificial, este trabajo evalúa un área al sur de la Cuenca de México; el objetivo es clasificar la zona de acuerdo con su factibilidad hidrogeológica para sostener un proyecto de recarga de agua subterránea.

Para el cumplimiento de este objetivo, proponemos la creación de un índice que refleje dicha factibilidad hidrogeológica; una síntesis del análisis y valoración de los elementos más importantes del entorno que se involucran en la implementación de tecnologías MAR.

El Índice del Potencial Hidrogeológico para la Recarga de Agua Subterránea (IPHRAS) es un indicador que nos permite delimitar áreas según su potencial para la recarga de agua subterránea; para su construcción se evalúan diversos factores, los cuales dependen estrictamente de las condiciones invariables de los acuíferos y por lo tanto del tipo de tecnología MAR a emplear.

La importancia intrínseca de cada uno de estos factores, la trascendencia de su variabilidad y la relevancia de su interacción, también se incluyen en este índice gracias a un proceso ponderación en el cual se asignan *pesos* y *valores*, permitiendo una caracterización más precisa del área.

Los *pesos* jerarquizan a los factores de acuerdo con el número e importancia de las relaciones que existen entre ellos durante un proceso de recarga. Por su parte, los *valores* permiten reflejar la variación existente dentro de estos elementos.

La ponderación de los criterios evaluados a través de la asignación de *pesos* se basa en el número y relevancia de las conexiones que existen entre ellos. Se diferencia entre relaciones consideradas como *mayores* y aquellas con menor trascendencia, *menores*.

Los *valores* en un criterio manifiestan la heterogeneidad de su composición y reflejan la fluctuación que esta variabilidad genera en el proceso de recarga; pueden tomar un valor comprendido entre el uno (1) y el diez (10) siendo el primero asignado a aquellos elementos que, dentro de su grupo y debido a sus características particulares, contribuyen poco al proceso de recarga; de manera contraria, aquellas variaciones que, en comparación con el resto de los elementos de su grupo, favorecen la recarga les fue asignado el número diez (10).

La elección de los criterios evaluados responde a la necesidad de un análisis elemental de los factores que intervienen en el proceso de recarga; a continuación, se presentan estos y la justificación de su presencia en el estudio:

- Litología

Es quizá, el elemento más evidente a incluir dentro de este tipo de análisis, lo anterior responde al hecho de que es precisamente esta característica la que delimita la existencia y distribución del agua subterránea, así como su recarga a través de propiedades intrínsecas de la roca como su permeabilidad.

- Pendiente

Los cambios en la pendiente del terreno influyen en muchos fenómenos que tienen lugar en la zona como: dirección de flujo y velocidad de las corrientes superficiales y subterráneas, nivel de erosión en el terreno, características del sistema local de vientos y, el elemento más significativo para este estudio, el tiempo de permanencia de las escorrentías sobre la superficie del suelo. Pendientes pronunciadas no favorecen la recarga ya que el agua transita a mayor velocidad sobre ellas, se reduce el tiempo de contacto entre las superficies haciendo más difícil la infiltración.

- Uso de suelo

El uso de suelo es una característica importante que afecta los procesos de recarga de los acuíferos; incluye el tipo de depósitos que lo cubren, actividades que se desarrollan en este y su densidad de vegetación. Algunos de los elementos que se modifican ante la variación en el uso de suelo son: escurrimientos superficiales, evapotranspiración y balance de aguas. Leduc et al. (Como se cita en Yeh et al., 2016) comprobó la existencia de una diferencia en la cantidad de agua que se recarga cuando existen variaciones en el uso y vegetación del suelo en superficie.

- Drenaje

Se considera la densidad del drenaje como la longitud total de todos los ríos en una cuenca dividida entre el área total de la misma. De acuerdo con Yeh et al. (2016), el análisis estructural de la red de drenaje en cuenca ayuda al estudio de la caracterización de las zonas de recarga; así mismo, la calidad de esta red depende de la litología lo que provee un indicador de la tasa de percolación en el sitio.

- Elementos estructurales

Se refiere a rasgos lineales o ligeramente curvados que son apreciables en el paisaje (*lineaments*), estos pueden ser la expresión de un elemento estructural bajo la superficie como fallas, fracturas o discontinuidades (O'Leary et al. citado por Yeh et al., 2016). Contribuyen en este análisis al permitir la inferencia del movimiento y la capacidad de almacenamiento del agua subterránea en los cuerpos acuíferos.

- Precipitación

El agua de lluvia posee una gran importancia en la recarga de agua subterránea tanto de manera natural como artificial. De manera general, este recurso posee una calidad relativamente buena si no entra en contacto con elementos antropogénicos contaminados (Serrano, 2014). En la naturaleza, solo un porcentaje del volumen que se precipita logra infiltrarse hasta la zona saturada y recargar el acuífero, no obstante, es la principal fuente del recurso para este fin en regiones tropicales y subtropicales (Yeh et al., 2016). En proyectos de recarga artificial, puede infiltrarse de manera directa si su calidad y el tipo de acuífero lo permiten o puede almacenarse y ser infiltrada en otras condiciones.

- Profundidad del agua subterránea

La recarga de agua subterránea contempla que el agua debe ingresar a la zona saturada del acuífero para que esta pueda considerarse como tal; la introducción de agua en regiones más superficiales del sistema acuífero también produce beneficios en este, sin embargo, no es el objetivo principal que se persigue en este proyecto. Derivado de lo anterior, la profundidad a la que debe introducirse el agua delimitará el tipo de tecnología MAR, así como la viabilidad económica del proyecto.

- Plantas de tratamiento de aguas residuales

El agua de recarga a través de pozos es liberada de manera directa en el acuífero, por lo que no se encuentra sujeta al proceso natural de atenuación de la zona vadosa, en el cual el agua se filtra y mejora su calidad antes de alcanzar la zona saturada (Rahman et al., 2012). Según lo anterior, la ubicación de este tipo de instalaciones resulta importante pues son fuentes de un recurso de alta calidad que puede ser aprovechado en la implementación de este tipo de técnicas.

- Pozos en funcionamiento

La mayor parte de los pozos que se encuentran en la zona de estudio corresponden a dispositivos que actualmente se utilizan para la extracción del recurso; sin embargo, una gestión de las aguas subterráneas más responsable podría permitir utilizar algunas de estas instalaciones, de manera permanente o temporal, para la introducción de agua a la zona saturada, lo cual significaría una ventaja económica para el proyecto al aprovechar los recursos existentes.

Como se mencionó, el indicador IPHRAS considera distintos elementos de acuerdo con el tipo de confinamiento que presenta el acuífero que se pretende recargar; sin embargo, el proceso de construcción del índice es el mismo para ambos casos. La tabla 5.1 muestra los elementos evaluados para cada tipo de acuífero presente en la zona de estudio.

Factores analizados para la construcción del indicador IPHRAS	
Acuíferos libres	Acuíferos confinados
Litología	Uso suelo
Pendiente	Elementos estructurales
Uso de suelo	Profundidad del agua subterránea
Elementos estructurales	Plantas de Tratamiento de aguas residuales
Profundidad del agua subterránea	Pozos en funcionamiento
Precipitación	
Drenaje	

Tabla 5.1 Criterios considerados en la construcción del indicador IPHRAS según el tipo de acuífero objetivo

La necesidad de considerar distintos criterios en la evaluación según el tipo de acuífero, se debe a que para su recarga se implementan diferentes tecnologías que responden a las condiciones particulares de estos; en los acuíferos libres puede evaluarse la posibilidad de recargar agua subterránea a través de técnicas que involucran un proceso de infiltración desde la superficie o la introducción del recurso de manera directa a través de pozos; en el caso de los acuíferos confinados, la presencia de una capa impermeable limita completamente su recarga a técnicas que ingresen el recurso hasta las capas permeables de este.

La mayoría de los acuíferos en el área de estudio se encuentran dentro de un régimen libre con excepción del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el cual funciona como un acuífero en confinamiento. La ilustración 5.2 muestra las dos regiones en las que se ha dividido la zona de interés de acuerdo con el tipo de confinamiento que presentan los acuíferos en explotación.

En los siguientes apartados se describirá el proceso de creación del indicador IPHRAS para los distintos tipos de acuíferos que se presentan en la zona de estudio.

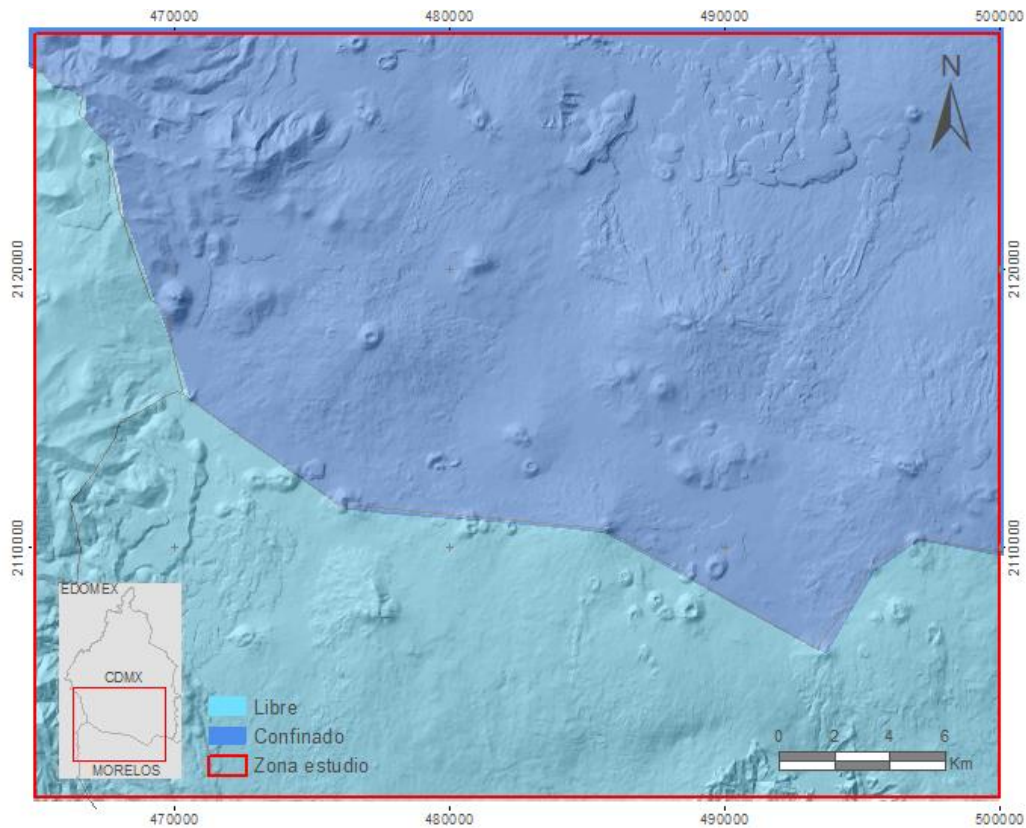


Ilustración 5.2 Distribución de los acuíferos en la zona de estudio según su tipo de confinamiento

5.3 Indicador IPHRAS para acuíferos libres

Los métodos de recarga de agua subterránea en acuíferos libres se concentran, principalmente, en la implementación de técnicas que optimicen el proceso natural de infiltración, véase ilustración 5.3; no obstante, dicha recarga también puede realizarse mediante la introducción del recurso a través de perforaciones hasta la zona saturada o la zona vadosa del acuífero.

En esta sección del proyecto, nos enfocamos en evaluar la factibilidad de aquellas tecnologías que usan a la infiltración como su método fundamental de recarga; la introducción del recurso a las capas permeables de un acuífero a través de pozos y su factibilidad hidrogeológica se estudian más adelante en el apartado de acuíferos confinados.

Se eligieron siete elementos fundamentales en el proceso de infiltración, su evaluación en la zona de estudio nos permitirá delimitar las regiones con mejores condiciones para sostener la implementación de una metodología MAR, estos son: litología, pendiente, elementos estructurales, drenaje, uso de suelo, profundidad del agua subterránea y precipitación.

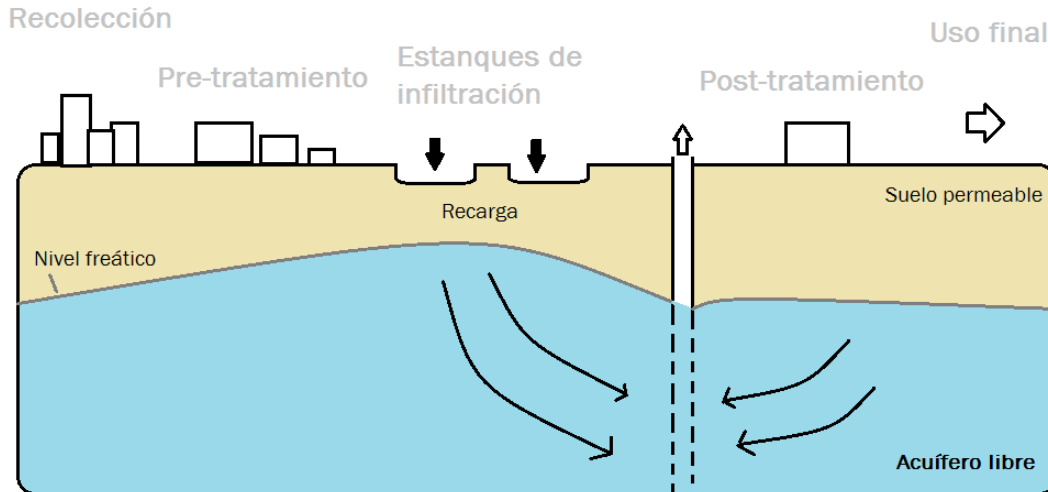


Ilustración 5.3 Esquema que ilustra el tipo de tecnologías MAR empleadas en los acuíferos libres, las cuales se basan principalmente en el proceso de infiltración a través de las capas permeables del suelo. En esta ilustración, técnica SAT (Soil Aquifer Treatment), en la cual se infiltra agua residual tratada de manera intermitente en estanques de percolación con el objetivo de remover nutrientes y patógenos al atravesar la zona no saturada y ser recuperada posteriormente. Modificada de Dillon et al., 2009

La jerarquización de estos criterios se lleva a cabo a través de la asignación de pesos a cada uno de ellos; esta ponderación considera el número y la trascendencia de las conexiones entre los factores. La ilustración 5.4 ejemplifica este proceso, en ella se muestran en línea continua las interacciones más importantes o *mayores* mientras que, la línea discontinua representa un tipo de relación más débil o *menor*.

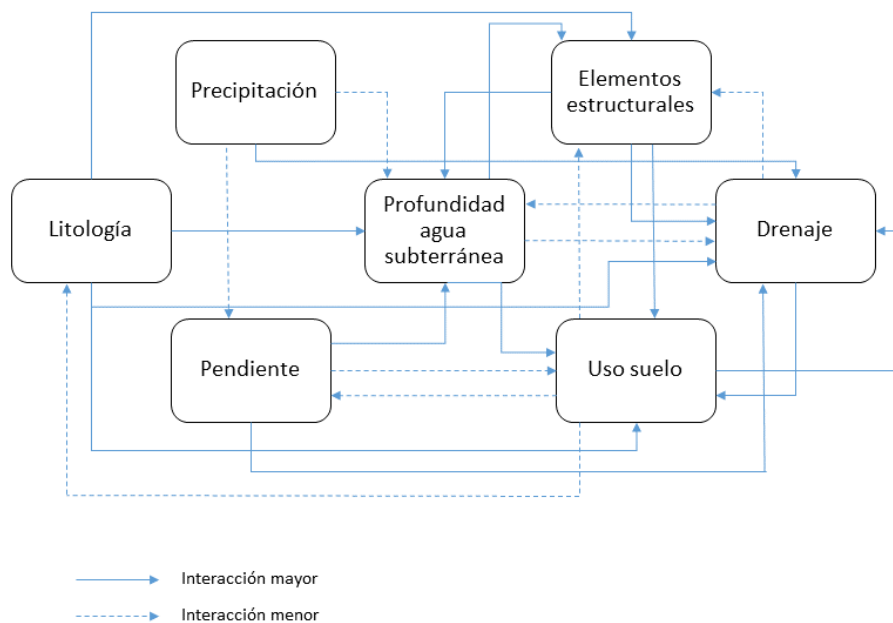


Ilustración 5.4 Interacciones entre los factores involucrados en el proceso de recarga de agua subterránea en acuíferos libres. Modificado de Yeh et al., 2016

El *peso* de cada criterio se calculó como una suma de puntos de acuerdo con la cantidad y relevancia de interacciones que ese elemento ejerce sobre otros. A las interacciones mayores se les asignó el valor de uno (1.0) y a las menores medio punto (0.5); en la tabla 5.2 se exhiben los cálculos y el *peso* asignado para cada factor considerado.

Criterio	Interacciones	Peso asignado
Litología	4 x 1.0	4
Pendiente	2 x 1.0 + 1 x 0.5	2.5
Precipitación	1 x 1.0 + 2 x 0.5	2
Uso de suelo	1 x 1.0 + 3 x 0.5	2.5
Drenaje	1 x 1.0 + 2 x 0.5	2
Elementos estructurales	3 x 1.0	3
Profundidad del agua subterránea	2 x 1.0 + 1 x 0.5	2.5

Tabla 5.2 Asignación de pesos para cada uno de los criterios que influyen en la recarga de agua subterránea en acuíferos libres. Modificado de Yeh et al. 2016

A continuación, se profundiza sobre las relaciones entre los criterios y su distinción entre mayores y menores.

La litología, a través de la porosidad y permeabilidad, influye de manera importante en el tránsito y acumulación del agua, tanto en superficie (drenaje) como a profundidad (agua subterránea); de igual manera su constitución delimita factores importantes como el uso que el hombre le da en superficie (uso de suelo) o su competitividad mecánica ante los esfuerzos (elementos estructurales).

Por su parte, la precipitación tiene una participación significativa en el desarrollo y la permanencia de escorrentías superficiales (drenaje); puede modificar el paisaje lentamente gracias a su acción erosiva o de manera intempestiva ante un excedente de su volumen en poco tiempo (pendiente). Contribuye en la profundidad del agua subterránea en aquellos acuíferos libres que se recargan con ella.

Es bien conocido que el nivel freático de un acuífero no se mantiene constante a través de los cambios morfológicos que presenta el terreno (pendiente), de manera general debe esperarse que en zonas de montaña se encuentre a grandes profundidades mientras que, en planicies se esperan profundidades someras (Price, 2007). Los cambios en la pendiente del terreno resultan un elemento básico en la creación de drenajes, el agua simplemente no puede resistirse a la acción de la gravedad. Finalmente, la geomorfología es un elemento que considerar, más no es determinativo en cuanto al uso de suelo, claro que los asentamientos humanos prefieren la comodidad de las planicies, pero los pueblos de montaña se encuentran alrededor de todo el mundo.

En cuanto al uso de suelo tenemos relaciones importantes, aquellas que intervienen en su determinación como la disponibilidad del agua, tanto en superficie (drenaje) como de manera subterránea (profundidad del agua subterránea) o sus cualidades estructurales, características importantes en la planeación de un proyecto. A su vez, existe la posibilidad de que la relación entre estos factores sea de manera contraria; es decir, que el uso que se le da al suelo modifique, sin importar la disposición natural de las cosas, todas las características superficiales, e incluso a profundidad, de la región. El relieve puede modificarse, los ríos entubarse y la litología puede cambiarse o extraerse casi a voluntad.

Finalmente, los elementos estructurales interactúan con el resto de los criterios analizados a través de su ocurrencia de manera previa o contemporánea debido a un cambio en el sistema de esfuerzos de la región que puede ser o no consecuencia directa de actividades humanas o de las variaciones realizadas a otros factores. Dentro del primer grupo podemos identificar como ejemplo, a los elementos estructurales que intervienen de manera significativa en la distribución del agua en el planeta tanto en superficie (drenaje) como a profundidad (nivel estático). Mientras que, en el segundo grupo podemos mencionar la presencia de fracturas y grietas en la superficie de la Ciudad de México debido a la compactación de las arcillas lacustres consecuencia de una pérdida en su volumen a causa de la sobre extracción de agua.

La integración de los *pesos* y *valores* se logra a través de una combinación lineal ponderada de estos elementos según la siguiente ecuación:

$$IPHRAS = L_p L_v + P_p P_v + Pr_p Pr_v + Us_p Us_v + Dd_p Dd_v + Ee_p Ee_v + Pas_p Pas_v$$

Donde

$L_p =$ *litología*

$P =$ *pendiente*

$Pr =$ *precipitación*

$Us =$ *uso de suelo*

$Dd =$ *densidad de drenaje*

$Ee =$ *elementos estructurales*

$Pas =$ *Profundidad del agua subterránea*

Los subíndices *p* y *v* corresponden a los *pesos* y *valores* respectivamente

La asignación de valores representa un proceso más complejo y particular para cada uno de los elementos evaluados por lo que se detallará su evaluación en los siguientes apartados.

Análisis litología

La distribución de la litología en la zona de estudio se obtuvo de la carta geológica E14A49 Villa Milpa Alta, Escala 1:50,000 (INEGI, 1984). El primer paso en este análisis consistió en la georreferenciación y digitalización de dicha carta en el *software ArcMap 10.3*; en este se crearon capas de tipo vectorial para cada una de las litologías que afloran siguiéndose la distribución presentada por INEGI, véase ilustración 5.5.

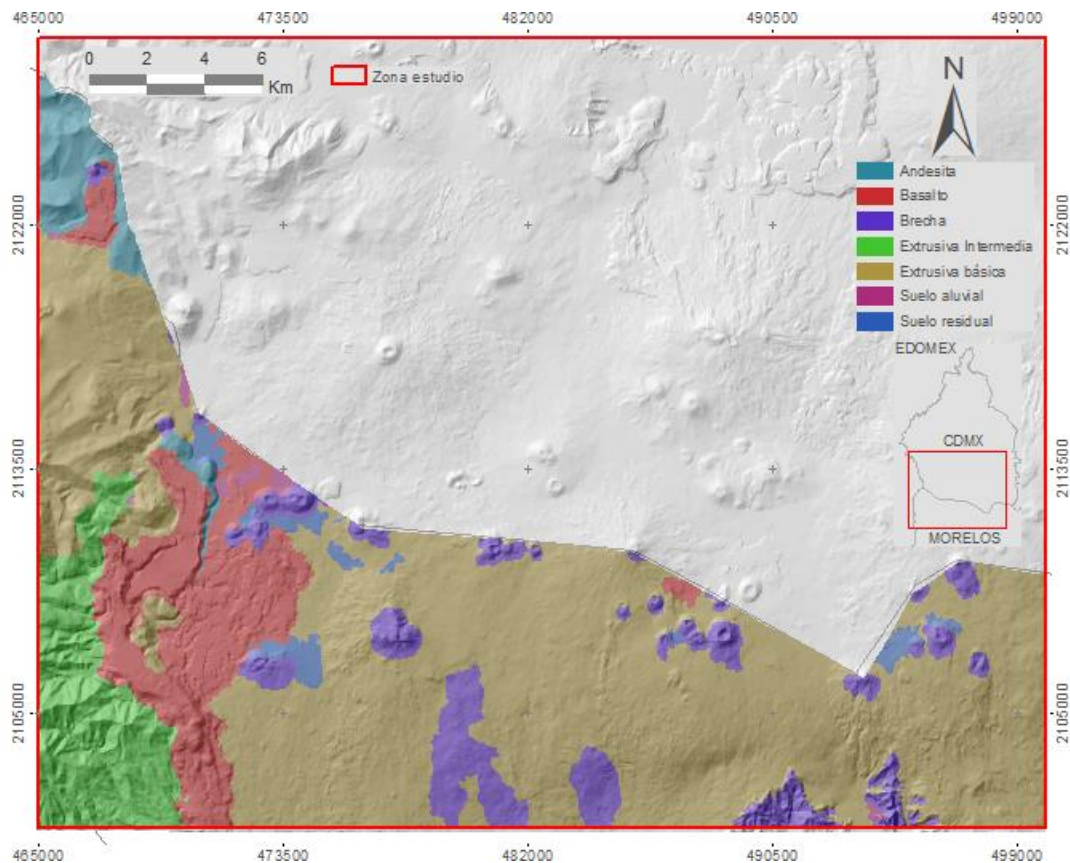


Ilustración 5.5 Distribución de la litología en la zona de estudio

En el área afloran principalmente rocas de origen volcánico y en menor proporción, suelos residuales y aluviales.

Posteriormente, se asignó un *valor* para cada una de las litologías que comprenden esta capa; como se mencionó, la escala de evaluación se encuentra comprendida del uno (1) al diez (10), pero antes de proceder con este paso del análisis, fue necesario proponer una cualidad inherente del elemento que pudiese ser evaluada y comparada con otros miembros del grupo y que a su vez reflejara la participación que esta característica mantiene en el proceso de recarga de agua subterránea.

La propiedad de la litología que se eligió para evaluar la factibilidad hidrogeológica fue la **conductividad hidráulica** (K); como se sabe, esta propiedad describe el volumen de agua por unidad de tiempo que atraviesa una sección de área equivalente a una unidad bajo el efecto de un gradiente hidráulico (Fetter, 2001), o en palabras más sencillas, la capacidad de un material geológico para dejar fluir agua a través de sí, esta se encuentra descrita por la siguiente ecuación:

$$K = -\frac{Q}{Ai}$$

Donde

$$K = \text{conductividad hidráulica} \left(\frac{m}{d}\right)$$

$$Q = \text{descarga} \left(\frac{m^3}{d}\right)$$

$$A = \text{unidad de área} (m^2)$$

$$i = \text{gradiente hidráulico (adimensional)}$$

Esta propiedad es ampliamente utilizada en el análisis de la zona saturada de los acuíferos, por lo que resultaría más pertinente para este proyecto utilizar la **permeabilidad intrínseca** (κ_i) de una roca, la cual se utiliza en el estudio de la zona no saturada y se define como la capacidad de este elemento geológico para transmitir un fluido, su unidad es el *Darcy* y de manera formal se describe como:

$$\kappa_i = \frac{K\mu}{\rho g}$$

Donde

$$K = \text{conductividad hidráulica} \left(\frac{m}{d}\right)$$

$$\mu = \text{viscosidad dinámica} \left(\frac{m}{d}\right)$$

$$\rho = \text{densidad del fluido} \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$$

$$g = \text{aceleración de la gravedad} \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

A pesar de lo anterior, se utilizó la conductividad hidráulica debido a que existe una base de datos más amplia sobre esta propiedad y porque, como puede verse en las ecuaciones anteriores, existe una amplia relación entre ambos términos. Se consideró que al tratarse de un proyecto de recarga de agua subterránea el líquido en cuestión es agua por lo que se suponen los mismos valores para la viscosidad dinámica, la densidad del fluido y la aceleración de la gravedad, ya que no se consideran fluctuaciones importantes en el contenido mineral o la temperatura de esta.

La tabla 5.3 muestra los valores encontrados en la literatura para cada tipo de litología (Şen, 2015; Hiscock & Bense, 2014; Keith & W., 2005; Schwartz & Zhang, 2004); siguiendo esta información se asignó un valor a cada uno de los tipos de roca, a valores más grandes de conductividad hidráulica, mayor su participación positiva en el proceso de recarga y por lo tanto un valor asignado más alto y viceversa.

Tipo de Roca	Conductividad hidráulica (m/d)	Valor asignado	Tipo de Roca	Conductividad hidráulica (m/d)	Valor asignado
Extrusiva intermedia	0.01	4	Brecha volcánica	0.0864	6
Extrusiva básica	0.01	4	Andesita	0.01	4
Toba	0.2	8	Suelo residual	8.64×10^{-7}	2
Basalto	0.01	4	Suelo aluvial	8.64	10

Tabla 5.3 Valores asignados a los intervalos de conductividad hidráulica en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea

La distribución de la litología de acuerdo con la evaluación de su conductividad hidráulica se observa en la ilustración 5.6. Las rocas con mayor factibilidad para la recarga se encuentran principalmente en una pequeña porción al norte del municipio de Huitzilac, casi en la frontera con la Ciudad de México; valores más bajos pero también atractivos, se localizan de manera dispersa al sur de la zona de estudio entre los municipios de Huitzilac y Tepoztlán.

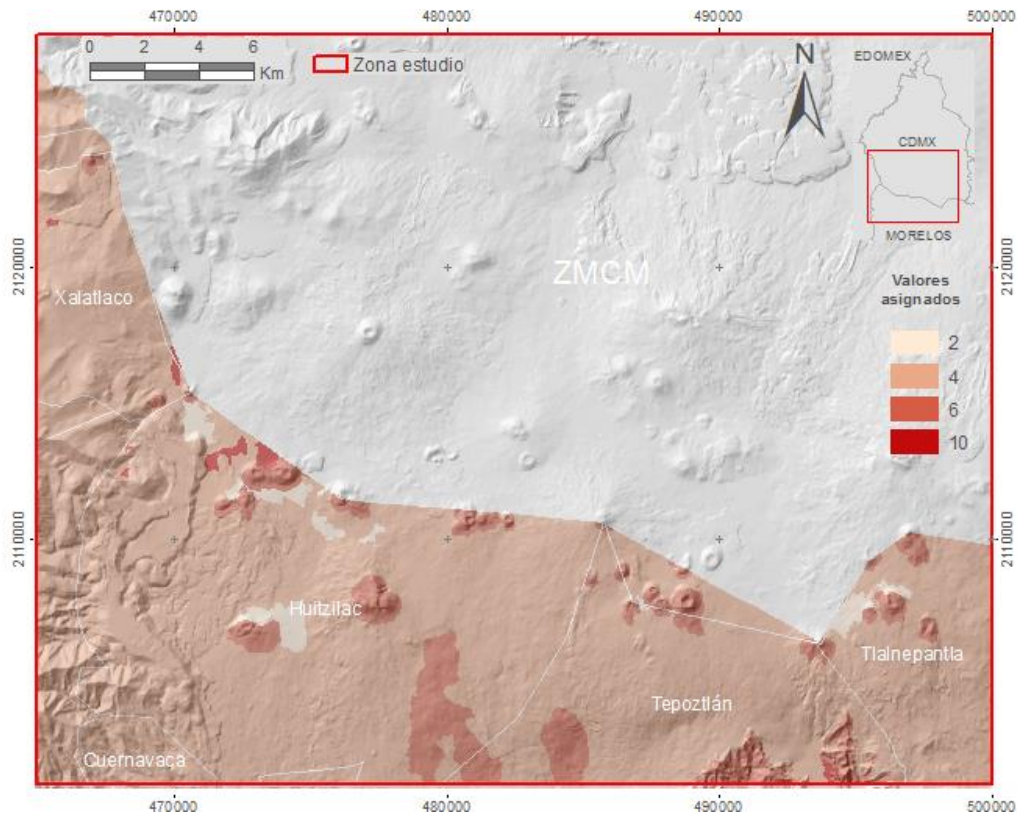


Ilustración 5.6 Distribución de la litología en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Análisis pendiente

La variación en la morfología en la zona de estudio y su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea se analizó a través de los cambios en la pendiente del terreno; para cumplir con este objetivo se hizo uso del archivo vectorial *curva_nivel50_1.shp* contenido en el conjunto de datos vectoriales de información topográfica, serie III, Milpa Alta (INEGI, 2015), con el cual se elaboró un mapa temático de este elemento, véase ilustración 5.7, en el *software ArcMap 10.3*.

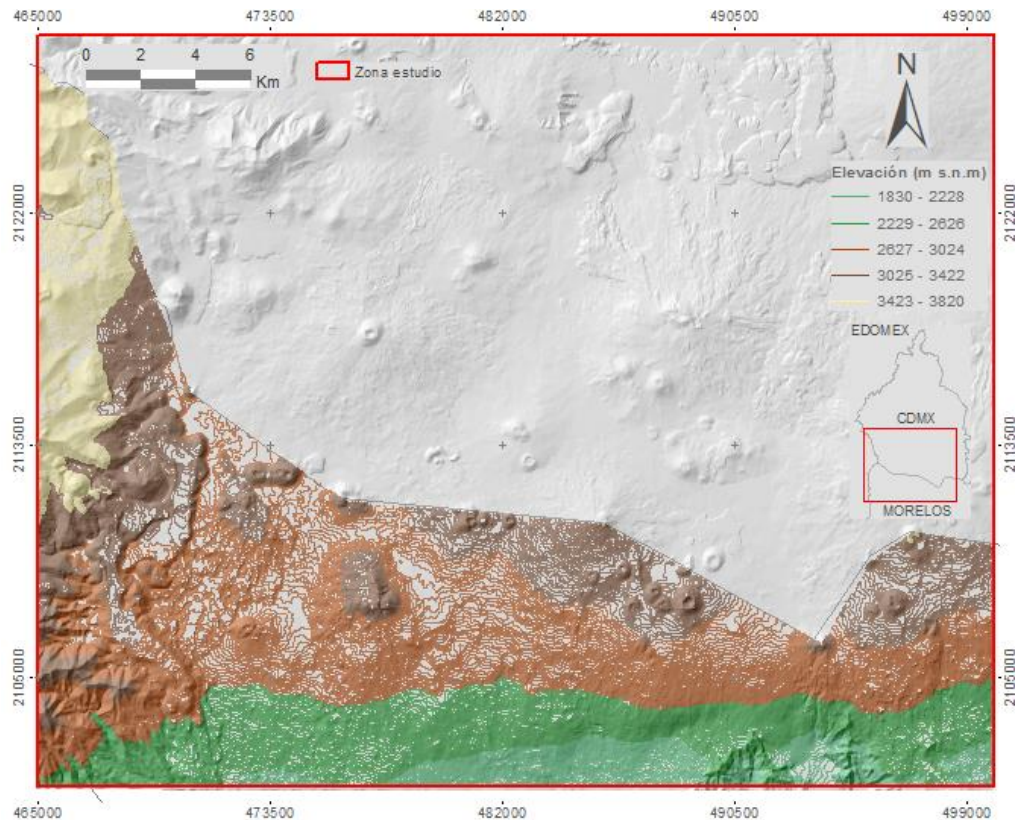


Ilustración 5.7 Distribución de las curvas de nivel en la zona de estudio

Para el análisis de la variación de pendientes en la zona de estudio, una vez más se hizo uso del *software ArcMap 10.3*; en la ilustración 5.8 se muestran los pasos que se siguieron dentro del programa para la obtención de este.



Ilustración 5.8 Procesamiento realizado en ArcMap 10.3 para la obtención del mapa de pendientes de la zona de estudio a partir del archivo tipo vectorial contenido en el conjunto de datos de la carta E14A49 de INEGI para Villa Milpa Alta

La variación de pendiente en la zona de estudio se basó en la clasificación propuesta por Lugo Hubp (1988), la cual se muestra en la tabla 5.4 junto con los valores asignados para cada intervalo; se asignó un valor elevado a las pendientes suaves o planicies las cuales contribuyen al proceso de recarga al favorecer la permanencia del líquido sobre la superficie aumentando las posibilidades de su percolación; caso completamente contrario en pendientes abruptas.

Pendiente (Grados)	Clasificación	Valor asignado
0 - 3	Planicie	10
3 - 12	Ligeramente inclinado	8
12 - 30	Deslizamiento	6
30 - 45	Deslizamiento	4
> 45	Caída libre	2

Tabla 5.4 Valores asignados a los intervalos de cambio de pendiente en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea

Como se puede apreciar en la ilustración 5.9, la mayor parte del área tiene variaciones en su pendiente de entre 3 y 12 grados, un escenario favorecedor para el proyecto. Solo la zona poniente de Huitzilac y los sistemas montañosos de Tepoztlán presentan cambios importantes en su pendiente condición característica de los sistemas montañosos.

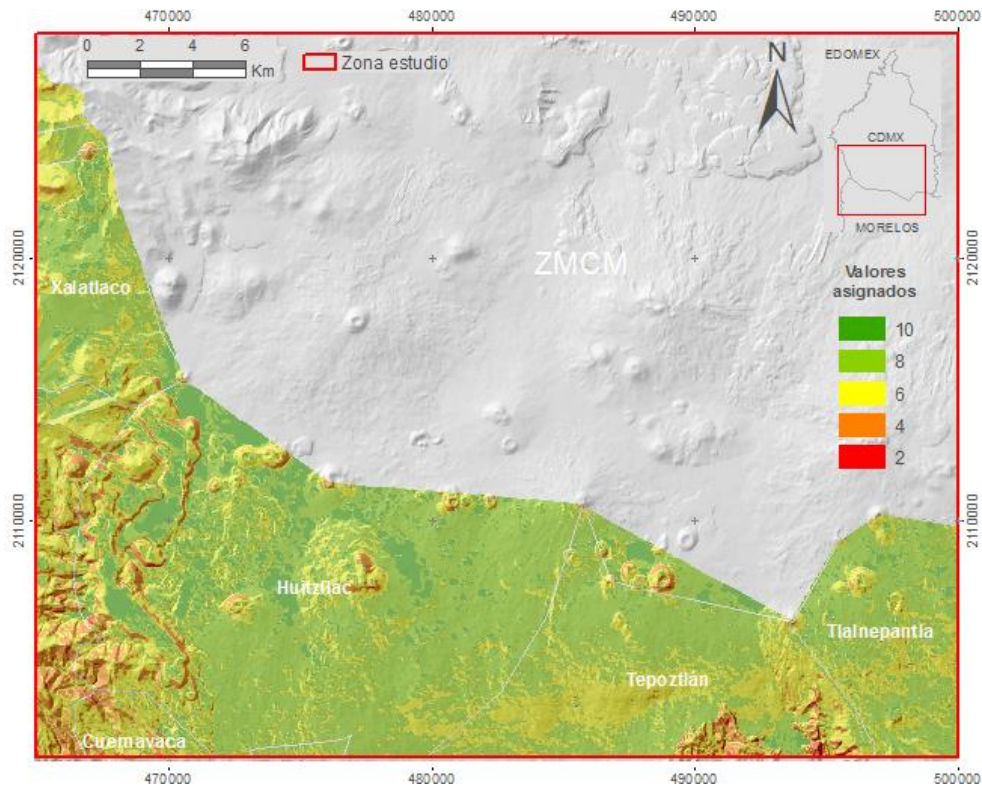


Ilustración 5.9 Distribución de los cambios de pendiente en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Análisis precipitación

La intensidad y duración de un evento de precipitación son elementos que resultan muy importantes para la capacidad de infiltración del suelo; al inicio de uno de estos eventos, el suelo seco absorbe el agua debido a que las succiones poro-agua colaboran con la gravedad para introducirla en el suelo, en este momento la capacidad de infiltración es elevada; sin embargo, si la lluvia sigue cayendo, esta capacidad decrece debido a la saturación u oclusión de los poros, lo cual puede deberse a distintas causas: la compactación del suelo después de recibir directamente el impacto de las gotas de lluvia, la introducción de agregados de partículas que penetran en poros y grietas impidiendo o dificultando la infiltración (Custodio & Llamas, 1976) pero sobre todo, se debe a la disminución de las succiones poro-agua una vez que los poros comienzan a llenarse de agua (Price, 2007). Cuando la intensidad de la lluvia es mayor a la capacidad de infiltración del suelo se presenta un flujo superficial hortoniano, incluso si existe un elevado déficit de humedad en el suelo (Price, 2007).

De manera adicional, estos elementos determinan una parte del volumen de agua que alcanza el suelo; la vegetación, como parte de sus procesos biológicos, intercepta una cantidad de este recurso, esta tasa de intercepción es mayor al inicio del evento y decrece de manera exponencial con el tiempo, por lo que existe una probabilidad muy baja de que una gran cantidad de esta agua que precipita sea absorbida por la vegetación, aumentando el volumen de agua que alcanza el suelo y que tiene la posibilidad de infiltrarse. Según lo anterior, las lluvias densas y prolongadas resultan muy favorables para la infiltración natural del agua en el subsuelo (Horton, 1941).

En este apartado se utilizó el metadato "Precipitación media anual", contenido en el Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4, 000,000 publicado por el Instituto de Geografía de la UNAM y disponible en el portal de internet de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2019). Para su procesamiento se utilizó nuevamente el *software ArcMap 10.3*, en el cual se generó un mapa que muestra la distribución de la precipitación media anual en la zona de estudio; véase ilustración 5.10.

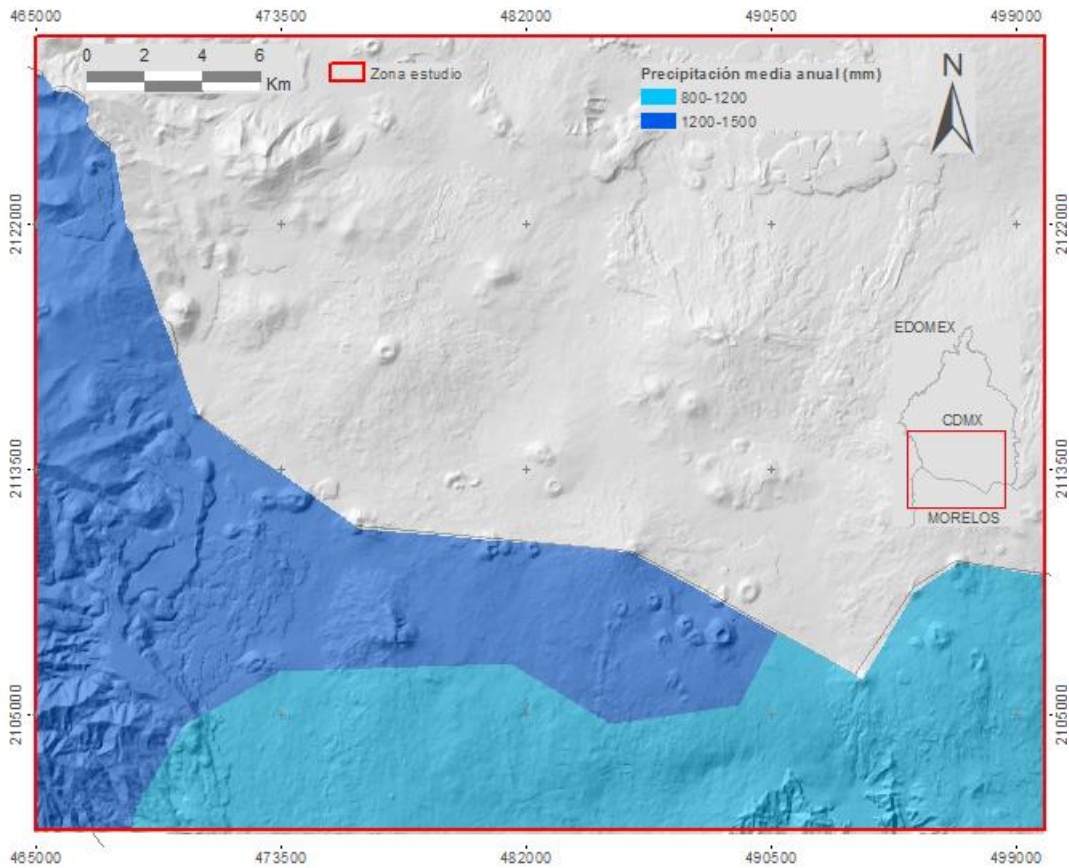


Ilustración 5.10 Distribución de la precipitación media anual en la zona de estudio

Este mapa muestra que no existe una variación muy compleja de la precipitación media anual dentro de la zona de estudio, se diferencian dos regiones con intervalos de precipitación semejantes que se mantienen relativamente constantes en el tiempo.

Para evaluar la participación de este criterio en el proceso de recarga artificial se hizo una asignación de valores como en los apartados anteriores, en esta ocasión se utilizó la propia distribución de este fenómeno dentro de la zona de estudio, véase tabla 5.5.

Precipitación media anual (mm)	Valor asignado
800 - 1200	8
1200 - 1500	10

Tabla 5.5 Valores asignados a los intervalos de precipitación en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea

Como puede inferirse, el valor más grande (diez) se asignó a la zona con el intervalo más elevado de precipitación de acuerdo con lo mencionado en párrafos anteriores, esto corresponde al norte del municipio de Huitzilac y las porciones dentro de la zona de estudio de los municipios de Xalatlaco, Ocuilan, Tianguistenco y Ocoyoacac, véase ilustración 5.11. Por su parte, se asignó un valor de ocho (8) a las zonas con el intervalo de precipitaciones más bajo, es decir el sur de Huitzilac, Tepoztlán y la porción de Tlalnepantla que pertenece al área de estudio.

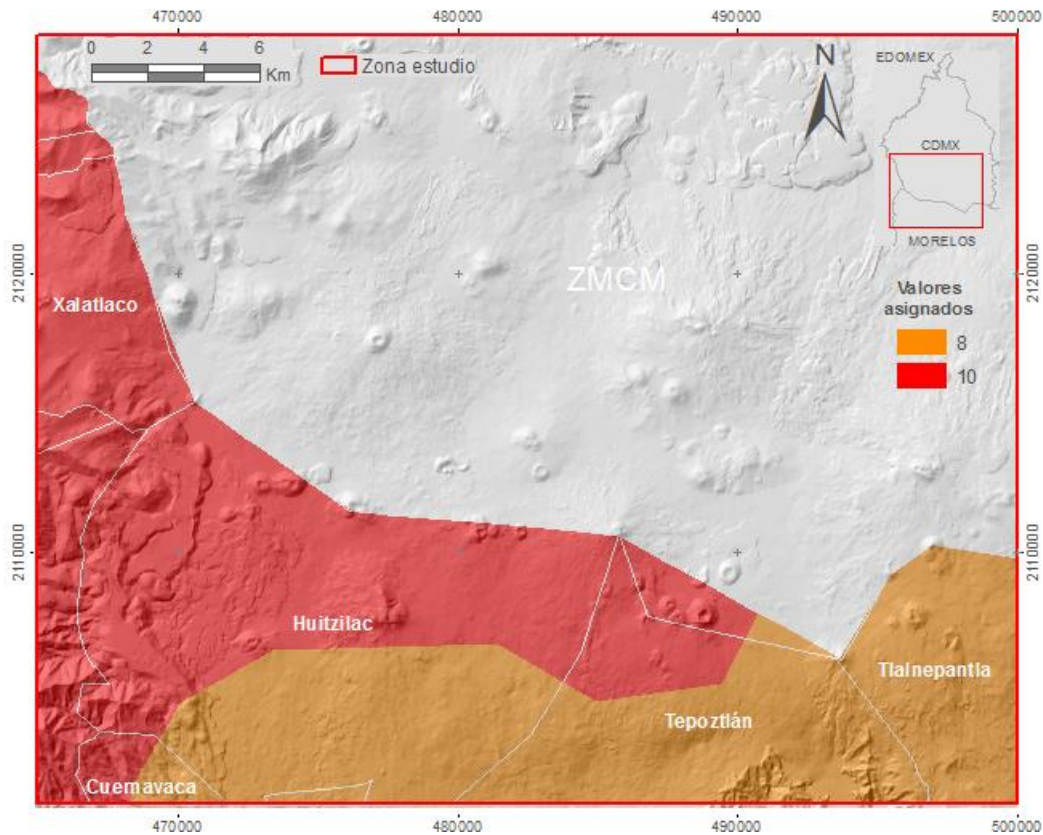


Ilustración 5.11 Distribución de la precipitación media anual en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Análisis uso de suelo

En este apartado se analiza la cubierta superficial de la zona de estudio de acuerdo con el tipo de uso de suelo y su capacidad de infiltración, esto como un elemento indispensable en el estudio del potencial hidrogeológico para la recarga. Se hicieron cinco clasificaciones de esta cubierta: urbana, vegetación (pastizales), vegetación densa, cultivos y suelo desnudo o roca expuesta.

Para el estudio de este criterio se emplearon imágenes del satélite Landsat 8, específicamente del sensor OLI (*Operational Land Imager*), con ellas se creó una composición de bandas que incluía desde el azul hasta el infrarrojo de onda corta o SWIR (por sus siglas en inglés para *shortwave infrared*) (bandas 2-7); la resolución espacial de las imágenes es de 30 metros con excepción de la banda 8 (pancromática) la cual tiene una resolución de 15 metros. Los archivos se descargaron de la página de internet *Earth Explorer* del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) y fueron capturados el 29 de enero del año 2019. Se escogió esta fecha por considerarse que refleja las características actuales de la zona de estudio, además, de que las condiciones meteorológicas del momento permitieron que el área de interés se encontrara libre de nubosidad facilitando el proceso de teledetección.

El objetivo de este apartado es crear un mapa del uso de suelo en la zona de estudio, se eligió la percepción remota como el método más adecuado para este propósito ya que representa una forma efectiva y de alta confiabilidad para reflejar esta característica que cambia de manera constante y a un ritmo considerablemente rápido a través del tiempo. El Sistema de Información Geográfica utilizado en esta ocasión fue *QGIS*, lo anterior se debe a que este posee una potente herramienta que permite realizar el pre-procesamiento y la clasificación de la cubierta terrestre de una manera sencilla.

Existe una herramienta adicional al *software* que permite realizar el procesamiento de las imágenes satelitales de manera sencilla y efectiva, se trata del complemento SCP (por sus siglas en inglés para *Semi-Automatic Classification Plugin*) disponible de manera gratuita para *QGIS*, en este se realizaron el pre-procesamiento, el conjunto de bandas y la clasificación de la cubierta del terreno; la ilustración 5.12 muestra un diagrama del proceso que se siguió para generar el mapa de uso de suelo.

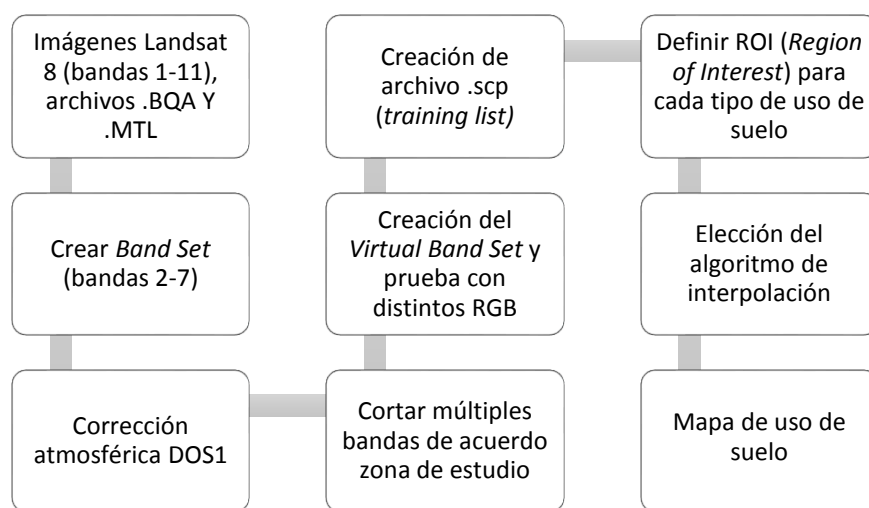


Ilustración 5.12 Procesamiento en QGIS para la obtención del mapa de uso de suelo

El pre-procesamiento de las imágenes satelitales puede resultar un poco complicado si no se conoce con claridad el tipo y nivel de correcciones que es necesario aplicarles, es por eso que a continuación, se profundiza un poco más sobre este tema y se describe el procedimiento seguido.

Pre-procesamiento de imágenes Landsat 8

Las imágenes descargadas pertenecen a una colección de los productos ofrecidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos conocida como *Landsat Level-1*, esta serie de imágenes cuenta ya con un pre-procesamiento estandarizado realizado por la dependencia para asegurar la óptima visualización del material.

Young et al. (2017) profundizan sobre las correcciones a las que debe ser sometida una imagen Landsat de manera previa a su procesamiento para asegurar que el resultado del proceso de recepción remota, cualquiera que sea su objetivo, se asemeje en lo más posible a las características reales de la zona.

La ilustración 5.13 exhibe el diagrama de flujo propuesto por los autores, el cual busca esclarecer los pasos que deben seguirse para el procesamiento de las imágenes Landsat, de manera específica aquellas bandas que pertenecen al sensor OLI (bandas 1-9). Cabe señalar, que no todas las correcciones deben aplicarse a las imágenes de manera indistinta, la elección de estas últimas dependerá completamente del objetivo y las limitaciones del proyecto en el que se esté trabajando.

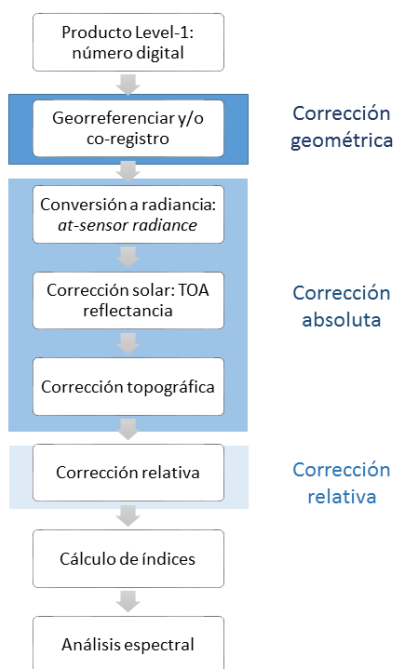


Ilustración 5.13. Diagrama de flujo que muestra el procesamiento de imágenes Landsat Level-1 para Vis-SWIR. Modificado de Young et al. (2017)

Corrección geométrica

- Georreferenciación: alineación de la imagen con su correcta localización geográfica.
- Ortorectificación: Corrección por los efectos del relieve y la dirección de vista en la localización de los píxeles.

Corrección absoluta

Se refiere de esta manera a un solo paso del pre-procesamiento o a un conjunto de estos, los cuales incluyen las correcciones debido a los efectos del sensor, solares, atmosféricos y topográficos.

- Conversión a radiancia (*at- sensor radiance*)

Es un cambio de unidades cuyo objetivo es poder contar con un monitoreo consistente de la Tierra y aprovechar los datos recolectados a lo largo de todo el tiempo que han durado las misiones Landsat. Los productos Landsat se entregan en unidades de números digitales, los cuales no pueden ser usados para comparar valores espectrales a través del tiempo debido a una degradación en el sensor; estos números digitales que originalmente eran valores de radiancia calibrados para generar los números digitales son restituidos, usando factores de re-escalamiento, en valores de radiancia.

Es el primer paso que debe llevarse a cabo dentro de la corrección absoluta. Muchos de los programas que actualmente se usan en percepción remota realizan este procedimiento de manera automática.

- Corrección solar (*TOA reflectance: top-of-atmospheric reflectance*)

Su función es corregir la influencia del sol sobre los valores de los píxeles; es una medida de la proporción en la que la radiación entrante es reflejada desde una superficie que se encuentra por arriba de la atmósfera. Parte de la corrección a radiancia y entrega valores de reflectancia al incorporar la irradiancia solar exo-atmosférica, la distancia entre el Sol y la Tierra y el ángulo de elevación del sol; como es de suponerse estos factores varían con el tiempo por lo que debe prestarse especial atención a ellos cuando se trabaja con múltiples- imágenes, aunque sean de la misma escena.

- Corrección atmosférica

La energía capturada por los sensores Landsat se encuentra influenciada por la atmósfera terrestre, estos efectos incluyen su dispersión y absorción debido a interacciones entre la radiación electromagnética y las partículas de la atmósfera (gases,

vapor de agua, aerosoles, etc.) la corrección atmosférica se encarga de corregir estos efectos; sin embargo, algunos fenómenos en la atmósfera son altamente variables dificultando este proceso.

- Corrección topográfica

Corrige los efectos de iluminación que tienen lugar en pendientes debido al aspecto o elevación de la escena y que pueden causar variaciones en la reflectancia medida para elementos similares, pero ubicados en diferentes posiciones dentro del terreno. No es indispensable para todos los proyectos, sin embargo, se sugiere su uso en zonas montañosas o de relieve accidentado.

Es importante realizar una distinción entre las correcciones topográficas y la del terreno; la primera de ellas es un proceso radiométrico mientras que, la segunda es de naturaleza geométrica. Los productos *Landsat Level-1* se encuentran corregidos a nivel terreno, esto significa que cada pixel es representado como si fuese visto directamente desde arriba de este sin importar la topografía o el ángulo de vista, esta corrección no cuenta ni sustituye a la topográfica.

Corrección relativa

Es aplicada cuando se requiere un análisis de múltiples imágenes que tengan valores espectrales consistentes a través del tiempo y el espacio. Esta corrección brinda a cada banda de la imagen la misma escala radiométrica que a la correspondiente banda de la imagen referencia.

Las imágenes descargadas del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos cuentan con un procesamiento de clasificación L1TP (*Terrain Precision Correction*), lo cual significa que poseen el máximo nivel de exactitud disponible a la fecha para los productos *Landsat Level-1*. Las correcciones a las que fueron sometidas las imágenes incluyen su calibración radiométrica, así como la ortorectificación a través del uso de datos provenientes de puntos de control y modelos digitales de elevación.

De lo anterior puede concluirse que las imágenes descargadas del portal de la USGS cuentan ya con las correcciones geométrica y topográfica, razón por la cual, únicamente se aplicó de manera automática la corrección absoluta en *ArcMap 10.3*; la corrección relativa no es necesaria puesto que en este proyecto solo se analizan distintas bandas de una imagen más no una serie de ellas.

Procesamiento en SCP

Para llevar a cabo la clasificación de los tipos de cobertura del terreno es necesario crear una composición de bandas, véase ilustración 5.14, en la cual se unen las características individuales de estas para generar una capa virtual de mayor calidad conocida como *Virtual Band Set*.

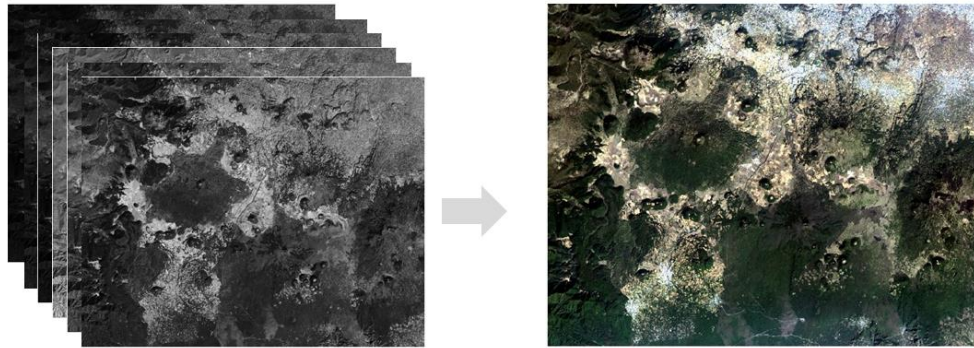
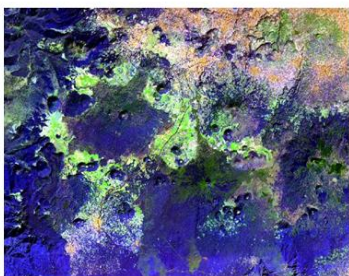


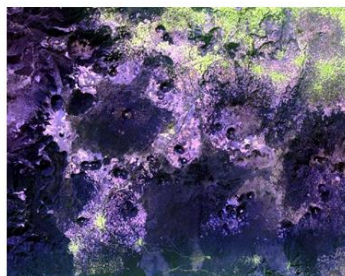
Ilustración 5.14 Composición virtual de bandas para la aplicación del método RGB

Con la creación de esta capa virtual es posible probar distintas *composiciones de color*, una combinación de tres capas monocromáticas, en la cual cada una es asignada a un color y en su conjunto permite remarcar diversas características de la imagen como vegetación, elementos antropogénicos y zonas de cultivos; esta técnica se conoce como método RGB debido a que las bandas se asocian a los colores rojo (Red), verde (Green) y azul (Blue).

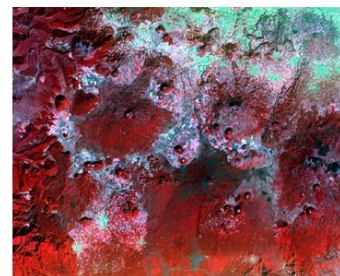
Existen combinaciones preestablecidas que han mostrado buena eficacia en la identificación de determinados elementos facilitando la clasificación del uso del suelo, véase ilustración 5.15.



RGB: 2-6-4 Áreas de cultivo (verde)



RGB: 3-1-5 Áreas urbanas (amarillo)



RGB: 4-5-1 Áreas de vegetación densa (rojo)

Ilustración 5.15 Método RGB, en el cual la asociación de bandas a un color permite la identificación de elementos específicos dentro del uso de suelo del terreno

En este trabajo se eligió la combinación 4-6-1 pues se considera que ésta resalta de manera acertada los principales usos que se le dan al terreno en la zona de estudio; la ilustración 5.16 muestra en color carmín la vegetación densa (bosques), mientras que, la vegetación de tipo pastizal se encuentra en un tono más claro, en azul las zonas urbanas, el color verde esmeralda representa roca expuesta (derrames basálticos) y finalmente las regiones de color verde claro representan zonas de cultivo.

Esta clasificación de la cobertura terrestre se basa en la firma espectral de los elementos que lo componen, es decir, cada uno de los materiales en la superficie terrestre responde de manera distinta a la energía que incide sobre ellos, reflejan o absorben en distintos grados diversas longitudes de onda permitiendo su identificación a través de este comportamiento o dicho de otra manera, como una relación entre la radiación reflejada en función de la longitud de onda (Lavender & Lavender, 2015).

Cuando se usan más de dos longitudes de onda para medir la respuesta de los materiales, el resultado suele ser que existe una mayor separación entre los objetos facilitando su identificación; el método RGB es un ejemplo de este análisis multiespectral.

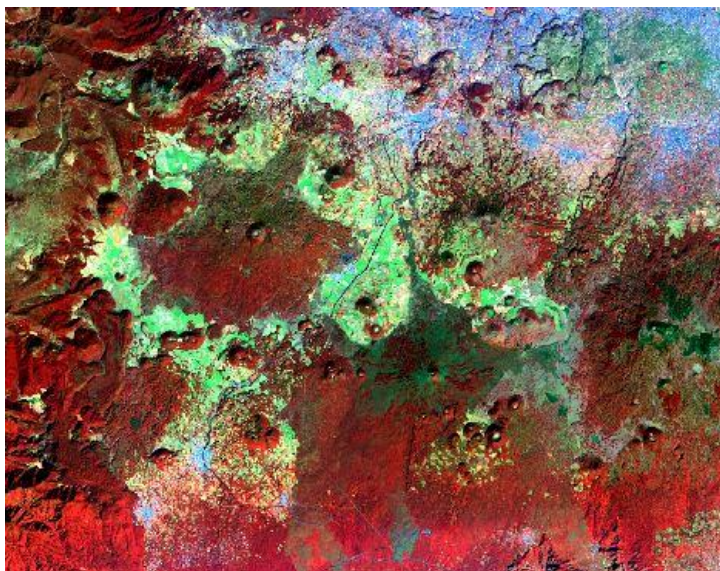


Ilustración 5.16 Combinación RGB 4-6-1 que permite la detección de los distintos tipos de uso de suelo en la zona de estudio

En la ilustración 5.17 se presenta la clasificación de cobertura del terreno realizada en *QGIS*, como puede observarse, se asignó más de un elemento para el mismo tipo de clasificación (roca, vegetación, etc), debido a variaciones dentro del grupo, lo que se traduce como distintas firmas espectrales; sin embargo, esta diferenciación permite una identificación más precisa de los materiales que conforman la zona de estudio.

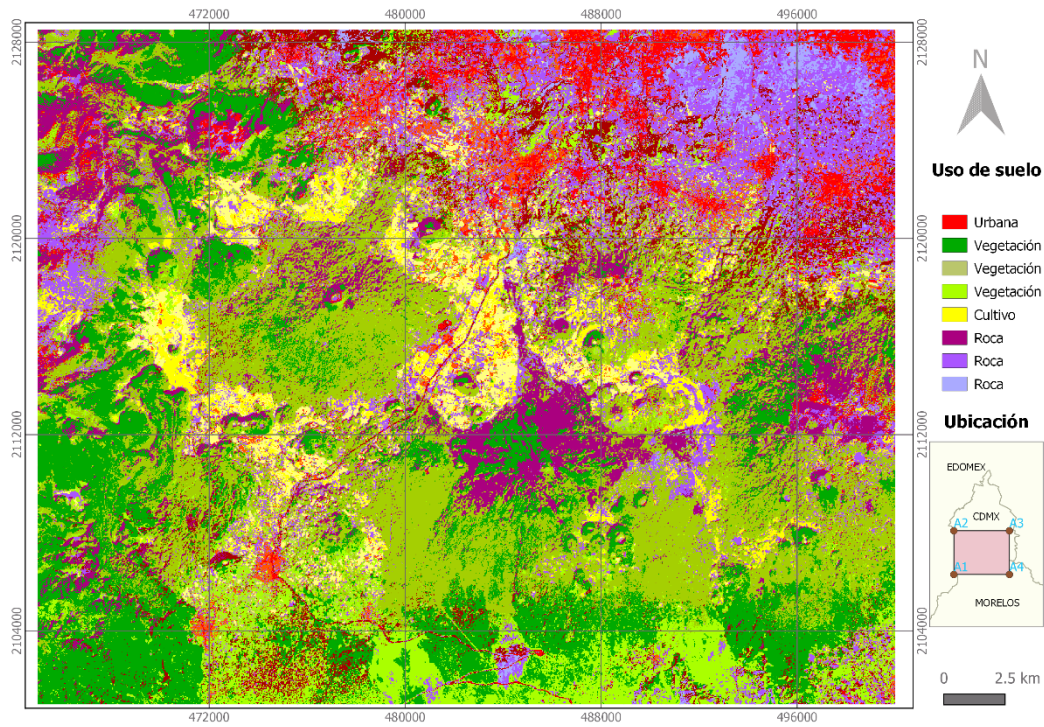


Ilustración 5.17 Distribución de los tipos de cubierta superficial en la zona de estudio

El mapa temático de la ilustración anterior comprueba la exactitud de la clasificación de los distintos materiales presentes en la zona de estudio; sin embargo, durante la evaluación del índice IPHRAS se usó el que se presenta en la ilustración 5.18, en el cual únicamente se representan las clasificaciones mayores o grupos de estos elementos.

El último paso en la construcción del mapa de uso de suelo de acuerdo con su participación en el proceso de recarga es la asignación de valores para las diferentes clases de cobertura que se presentan en la zona de estudio.

En la evaluación de firmas espectrales se diferenciaron las cinco clasificaciones que se mencionaron al inicio de este apartado: urbana, cultivo, vegetación densa, pastizales y roca o suelo desnudo. La asignación de valores para cada una de estas categorías se sintetiza en la tabla 5.6, a continuación se justifica esta decisión.

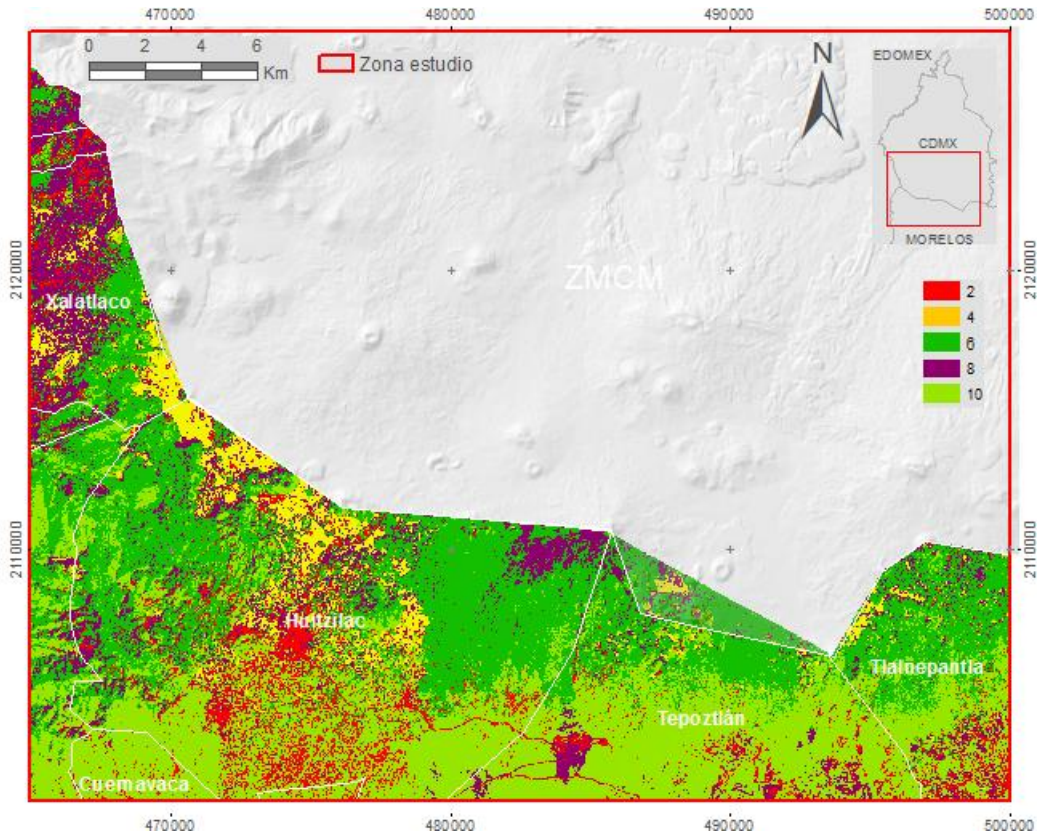


Ilustración 5.18 Distribución de los principales tipos de uso de suelo en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Área	Valor asignado
Urbana	2
Roca	4
Cultivo	6
Vegetación densa	8
Vegetación	10

Tabla 5.6 Valores asignados a los tipos de uso de suelo en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea

El estudio de la capacidad de infiltración de una superficie, nos refiere de manera inmediata a la consideración del tipo de material que la cubre. Como se mencionó en el análisis de la precipitación, en un evento de este tipo la cubierta superficial determina no solo la compactación del suelo sino también el volumen de agua que puede alcanzarlo.

Una cubierta con vegetación, no solo protege al suelo de la compactación causada por el impacto de las gotas de lluvia, también frena el recorrido superficial del agua aumentando

las posibilidades de su infiltración y facilita la penetración del agua a través de los sistemas de raíces de plantas y árboles.

Sin embargo, también disminuye una porción del volumen de agua liberado durante una precipitación comprometiendo su infiltración. Las hojas de los árboles captan el agua necesaria para sus procesos biológicos, una vez alcanzada la saturación de su capacidad de almacenamiento, permiten el escurrimiento del agua hasta el suelo. De acuerdo con Dunne & Leopold (como se cita en Schwartz & Zhang, 2004), la cantidad de agua interceptada por las zonas de alta densidad boscosa es de entre el 8% y 35% del volumen total de precipitación anual. Por estas razones se asignaron los valores más altos a zonas cubiertas por vegetación, dándole una mayor importancia a aquellas de vegetación con poca altura.

A las zonas dedicadas a la agricultura se les asignó un valor de seis (6), ya que Custodio & Llamas (1976) indican que estas pueden favorecer la infiltración dependiendo del tipo de cultivo, la densidad de la cobertura vegetal y sobre todo del tratamiento agrícola utilizado.

Por su parte, a las regiones con uso de suelo residencial les fue asignado el valor dos (2), ya que presentan bajas tasas de precipitación y evapotranspiración (evaporación y transpiración de las plantas) debido a que la mayor parte de su área se encuentra cubierta por materiales impermeables y poca vegetación, esto genera la pérdida de un volumen importante de agua en forma de escorrentía por lo que no se consideran como lugares apropiados para la recarga de agua subterránea a través de un proceso de infiltración.

A pesar de lo anterior, es importante mencionar que en cuanto a recargar total, las áreas urbanas pueden reportar cifras más altas a las de zonas rurales, esto se debe a que los sistemas de alcantarillado y tuberías muchas veces sufren de rupturas o fugas las cuales contribuyen de manera significativa a la recarga indirecta de los acuíferos (Younger, 2007). Tan solo el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México recibe un volumen de 359.8 mm³/año como recarga incidental que ocurre por fugas en las redes de distribución de agua potable y de recolección de aguas residuales y pluviales (SACMEX, 2012). Sin embargo, en este estudio no se consideró a las zonas urbanas como áreas con un potencial alto para la recarga a través de la infiltración ya que esta recarga que se menciona es incidental producto de una falta de mantenimiento en las redes y no es el objetivo de la implementación de una técnica MAR.

Finalmente, al suelo desnudo o roca expuesta; es decir, terrenos que no tienen formación de suelo o donde este comienza a formarse, se les asignó el valor cuatro (4), ya que a diferencia de las zonas urbanas, no presenta de manera intencional una capa impermeable, lo que origina un panorama más viable para presentar una capacidad de infiltración atractiva para el proyecto. La presencia de fracturas en este tipo de uso de suelo resulta indispensable, deben considerarse su orientación y clasificación. No se considera que pueda asignársele un valor más alto ya que sin la presencia de algún tipo de vegetación no hay sistemas de grietas que puedan favorecer la infiltración o disminuir la compactación del suelo debido a las gotas de lluvia.

Análisis densidad de drenaje

La densidad de drenaje (Dd), se define como la longitud total de todos los escurrimientos que tienen lugar dentro de una cuenca, dividida entre el área total de esta. Su consideración dentro de este estudio de factibilidad se debe a que la existencia y características de una red de drenaje se encuentran estrechamente relacionadas con las propiedades litológicas de la cuenca y por consiguiente, con las tasas de percolación de la misma (Yeh et al., 2016). Greenbaum (como se cita en Yeh et al., 2016) determina la densidad de drenaje de la siguiente manera:

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Si}{A}$$

Donde

$$\sum_{i=1}^{i=n} Si = \text{longitud total del drenaje}$$

$$A = \text{Área de la cuenca}$$

Puede intuirse con asertividad que, entre mayor es la densidad de drenaje en un área, menor es la capacidad de infiltración del terreno y por lo tanto la factibilidad para la recarga; lo anterior se debe a que, la presencia de un sistema natural de drenaje, es una señal indirecta de la baja permeabilidad y porosidad del suelo y su relación con los escurrimientos superficiales.

Algunos autores en estudios similares, consideran a las zonas con una alta densidad de drenaje como sitios potenciales para la recarga (Yeh et al., 2016; Yeh et al., 2009; Senanayake et al., 2016 y Krishnamurthy et al., 2000), esto se debe a que los asocian como zonas favorables para la captura de agua para la recarga. Sin embargo, en este apartado se evalúa la factibilidad en acuíferos libres a través de la infiltración, por lo que esta aproximación no resulta viable y solo podría usarse en el estudio de recarga de acuíferos a través de pozos.

Cabe mencionar que Shaban (2006) también considera la densidad de drenaje como un elemento que favorece la recarga de agua subterránea, pero por motivos diferentes. Al conducir un estudio particular en Líbano Occidental, encontró que, específicamente en esta zona, una mayor densidad de drenaje favorecía la recarga de agua subterránea, lo cual es completamente opuesto al comportamiento general de estos sitios.

Ahora bien, en la construcción del mapa temático para este criterio se tomó como información de entrada el archivo vectorial *corriente_ag50_1.shp* del conjunto de datos vectoriales de información topográfica, serie III Milpa Alta (INEGI, 2015), véase ilustración 5.19, la cual muestra la distribución de las corrientes superficiales que tienen lugar en la zona.

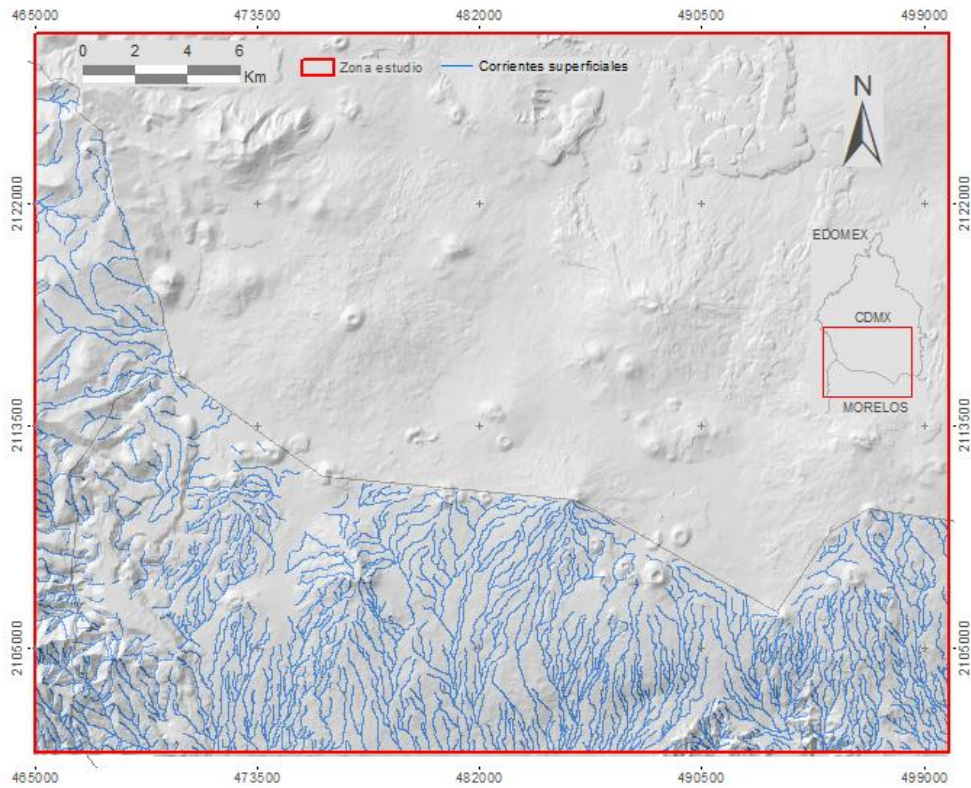


Ilustración 5.19 Distribución de las corrientes superficiales en la zona de estudio

Este archivo se procesó en el *software ArcMap 10.3* para obtener la densidad de drenaje en la cuenca; la ilustración 5.20 presenta un diagrama de flujo con los pasos realizados para dicho propósito.

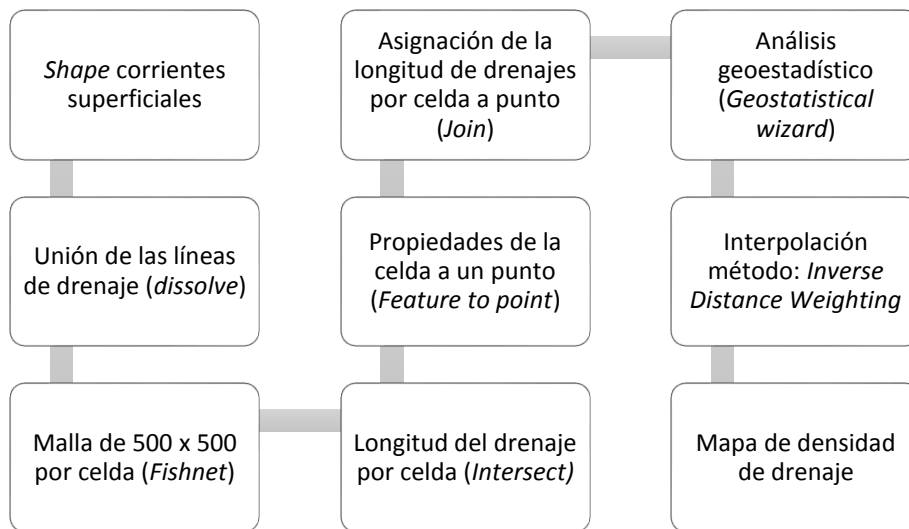


Ilustración 5.20 Diagrama de flujo que muestra los pasos seguidos en el *software ArcMap 10.3* para la creación del mapa de densidad de drenaje

Uno de los pasos más importantes en el análisis de la densidad de drenaje, fue la creación de una cuadrícula que nos permitió evaluar la cantidad y longitud de los drenajes presentes en un área controlada, según lo cual, se delimitó una malla con celdas de 500 m por 500 m; posterior a este paso, se realizó el cálculo de la longitud y cantidad de drenajes por celda, este valor se asignó a un punto en el centro de la celda y finalmente, se hizo el análisis geo-estadístico a través de un método de interpolación conocido como *Inverse Distance Weight* para conocer la densidad del drenaje dentro de toda la zona de estudio.

El resultado de la interpolación es un mapa, véase ilustración 5.21, que presenta la distribución de la densidad de drenaje en el área de estudio. Con el fin de construir el indicador IPHRAS y asignar valores a las heterogeneidades de densidad de corriente entre cada celda se procedió a la clasificación de esta interpolación en intervalos. La herramienta utilizada fue *Equal Interval* en *ArcMap 10.3*, la cual nos permitió categorizar este criterio en 10 intervalos, véase tabla 5.7, aquí mismo se muestra el valor asignado obedeciendo al razonamiento que a mayor densidad de drenaje, menor es la factibilidad hidrogeológica para la recarga en la zona evaluada, por lo tanto menor su valor en el índice.

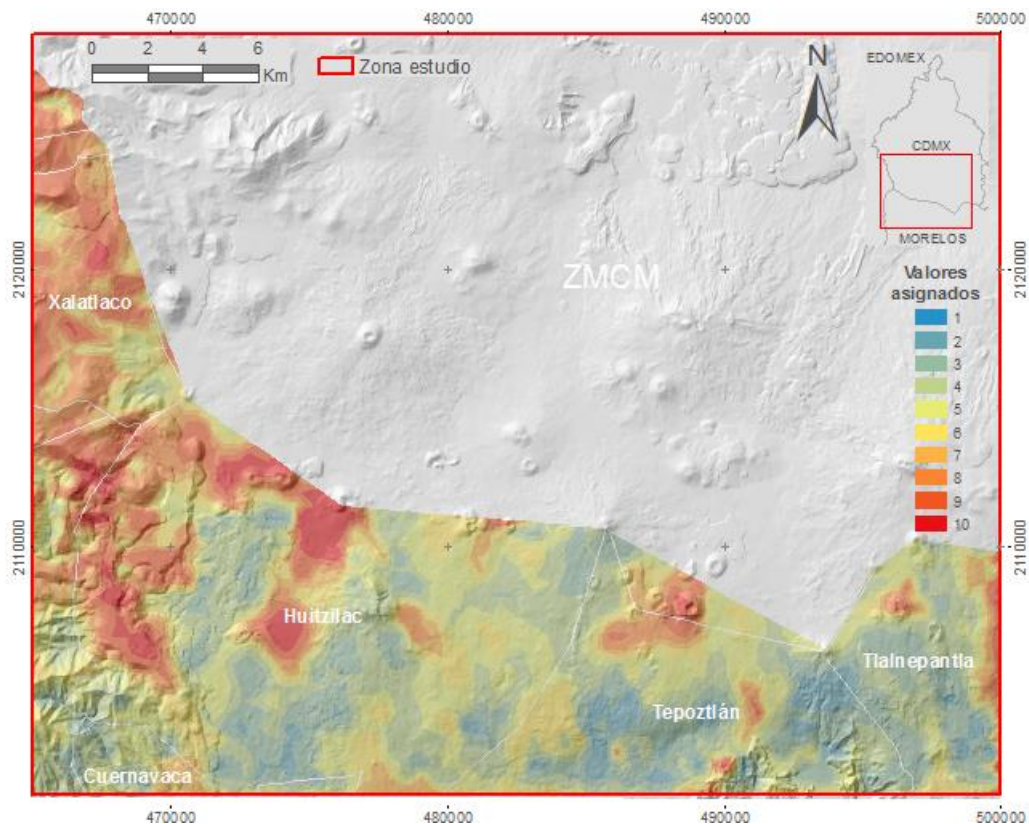


Ilustración 5.21 Distribución de la densidad de drenaje en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Densidad de drenaje (m/m ²)	Valor asignado	Densidad de drenaje (m/m ²)	Valor asignado
0 – 208.065422	10	658.404272 – 809.520471	5
208.065422 – 359.181622	9	809.520471 – 1,017.58589	4
359.181622 – 468.936071	8	1,017.58589 – 1,304.06226	3
468.936071 – 548.649822	7	1,304.06226 – 1,698.4993	2
548.649822 – 658.404272	6	1,698.4993 – 2,241.58276	1

Tabla 5.7 Valores asignados a los intervalos de densidad de drenaje en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea

Análisis elementos estructurales

Los sistemas de fallas y fracturas constituyen un factor indispensable en la evaluación de la ocurrencia, almacenamiento y movimiento del agua subterránea. En acuíferos de rocas duras, estos elementos son la causa principal de la existencia de estos sistemas.

En esta evaluación de la factibilidad hidrogeológica para la recarga de agua subterránea, se considera el estudio de la densidad de elementos estructurales en el área de interés, puesto que como se cita en Senanayake et al. (2016), la presencia de estos elementos son un indicador de la porosidad secundaria en la zona, lo cual se traduce como un aumento en las posibilidades para que el agua pueda encontrar un camino más accesible hacia el nivel saturado a través de estos elementos e incluso su almacenamiento o continuidad lateral (Younger, 2007).

Se consideran no solo las fracturas reconocidas y documentadas en la literatura, sino que además, se contemplan también los elementos conocidos como lineamientos (*lineaments* en inglés). De acuerdo con O' Leary et al. (como se cita en Yeh et al., 2009) se denomina de esta manera a las propiedades lineales, simples y complejas, de las estructuras geológicas como son fallas, fracturas, clivaje y discontinuidades de la superficie; las cuales poseen un arreglo en línea recta o ligeramente curvado y que son detectadas por técnicas de percepción remota. De acuerdo con Krishnamurthy et al. (2000), una zona de control de 300 m alrededor de cada *lineament* se considera como una zona favorable para la recarga de agua subterránea.

De manera similar al drenaje, se decidió cuantificar la densidad de ocurrencia de estos elementos en el área de estudio según la siguiente ecuación:

$$Ee = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Ee_i}{A}$$

Donde

$\sum_{i=1}^{i=n} Ee_i$ = longitud total de los elementos estructurales

A = Área de estudio

Se tomaron dos fuentes para crear la base de datos de este criterio, la primera de ellas fue la carta geológica E14A49 Villa Milpa Alta, Escala 1:50,000 (INEGI, 1984); mientras que, la segunda fue la extracción de los elementos conocidos como lineamientos a partir de una imagen satelital del Servicio Geológico de los Estados Unidos y procesada en el *software Geomatica*.

Primeramente, se digitalizó y georeferenció la carta geológica en el *software ArcMap 10.3* y se creó una capa vectorial de tipo *polyline* siguiendo la distribución de las fracturas localizadas por el INEGI en la zona de estudio.

A continuación, se procedió a la extracción de los lineamientos, para este objetivo se utilizó la misma imagen satelital del apartado de uso de suelo, la cual corresponde al área de estudio del día 29 de enero de 2019 y se descargó de manera gratuita en el portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Earth Explorer USGS 29/01/2019). Para su procesamiento, se eligió el *software Geomatica* desarrollado por *PCI Geomatics*, el cual se especializa en la automatización en el análisis de imágenes basado en objetos.

La extracción de estos elementos en el *software* es un procedimiento sencillo ya que forma parte de una herramienta dentro del panel del programa. El resultado es una capa de tipo vectorial que fue exportada a *ArcMap 10.3* en donde se unió a los elementos previamente extraídos de la carta geológica.

Se realizó una revisión detallada de los elementos agregados en el último proceso, ya que puede ocurrir que algunas estructuras no geológicas como caminos o canales sean erróneamente consideradas por el *software*; una vez eliminados estos errores se obtuvo el mapa temático que se muestra en la ilustración 5.22.

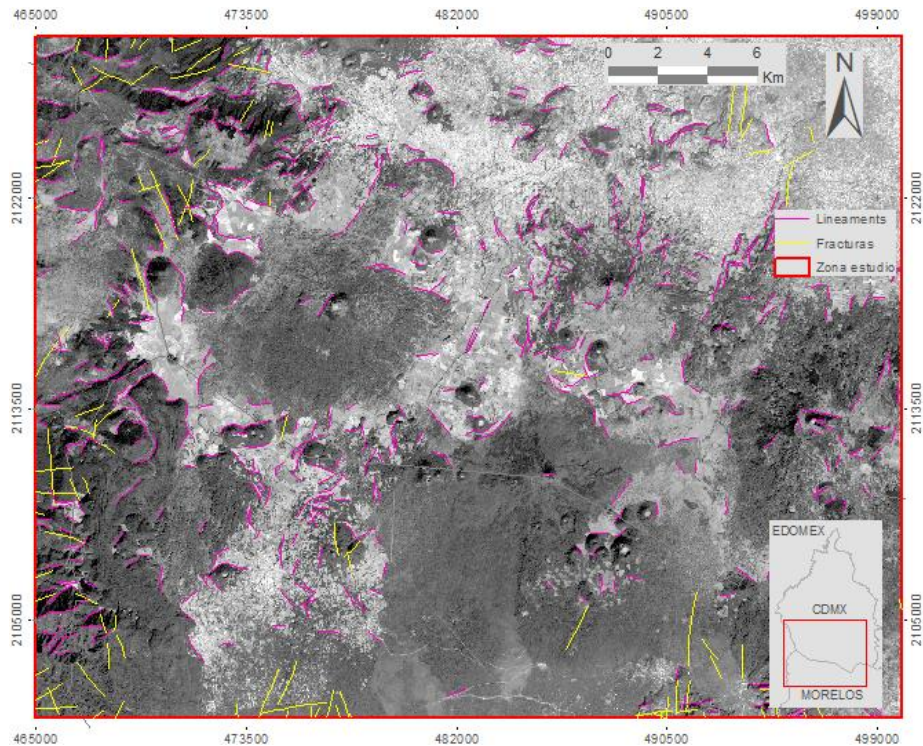


Ilustración 5.22 Distribución de los elementos estructurales en la zona de estudio

Finalmente, se procedió a la creación del mapa de densidad de elementos estructurales, la ilustración 5.23 muestra un diagrama con los pasos que se siguieron en *ArcMap 10.3*. Este proceso es el mismo que se utilizó en el apartado anterior para calcular la densidad de drenaje en el área, pero en esta ocasión es la densidad de elementos estructurales por celda la que se estudia.

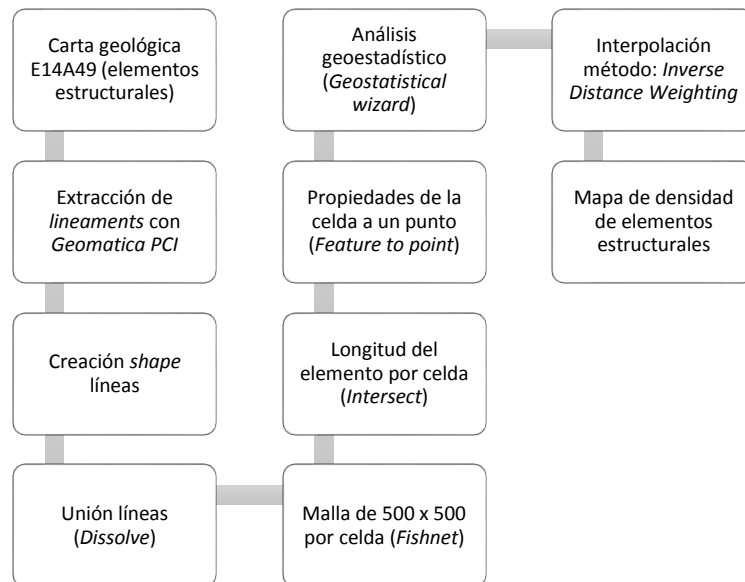


Ilustración 5.23 Diagrama del procedimiento realizado para la obtención del mapa de densidad de elementos estructurales en *ArcMap 10.3*

El procesamiento geo-estadístico de los elementos estructurales dio como resultado los intervalos que se muestran en la tabla 5.8, a estos les fue asignado un valor de acuerdo con el grado de participación positiva que podrían ejercer para favorecer la infiltración del recurso hasta la profundidad objetivo.

Intervalo (m)	Valor asignado	Intervalo (m)	Valor asignado
0 – 12.14	1	176.20 – 285.67	6
12.14 – 31.00	2	285.67 – 455.58	7
31.00 – 60.26	3	455.58 – 719.34	8
60.26 – 105.69	4	719.34 – 1128.76	9
105.69 – 176.20	5	1128.76 – 1764.31	10

Tabla 5.8 Valores asignados a los intervalos de densidad de elementos estructurales en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea

Al intervalo que presentó las longitudes más grandes por celda, se le asignó el valor más elevado, puesto que esta celda tiene una mayor probabilidad de transmitir el agua hasta el nivel saturado a través de grietas y resquicios, productos de estos elementos estructurales en comparación con aquellas celdas que no presentan elementos estructurales o que poseen una menor longitud.

La ilustración 5.24 muestra el resultado de la evaluación realizada para conocer la densidad de ocurrencia de elementos estructurales en el área de interés; los valores más altos se encuentran distribuidos por toda la zona de estudio, sin embargo, estas coinciden con los sistemas montañosos dentro de la zona, destaca la porción sur-poniente la cual pertenece al municipio de Ocuilan y el sur de Tepoztlán.

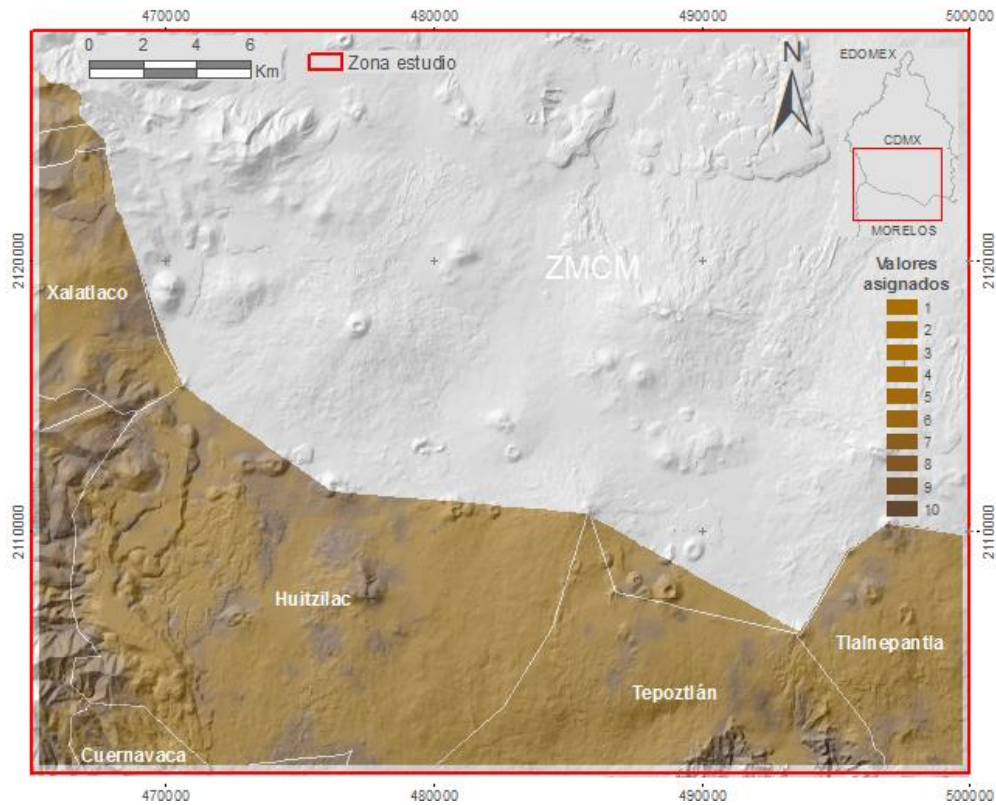


Ilustración 5.24 Distribución de la densidad de elementos estructurales en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Análisis profundidad del agua subterránea

El estudio de este criterio requirió la construcción de un mapa que mostrase la profundidad objetivo a la que debe ingresar el agua para poder cumplir de manera efectiva con el propósito de recargar los acuíferos al sur de la Cuenca de México; la información base se obtuvo de tres fuentes distintas: la primera de ellas fueron los niveles registrados en la *actualización de disponibilidad media de los acuíferos de México* publicado por CONAGUA en 2018 (véase tabla 5.9); la segunda es el nivel estático de catorce pozos ubicados en la Ciudad de México registrados en el censo de aprovechamientos de agua subterráneos del acuífero de la ZMCM (véase tabla 5.10) y, finalmente, la disposición de la profundidad del agua subterránea en el acuífero de la Ciudad de México presentado en Hernández-Espriú et al. (2014). La ilustración 5.25 presenta la distribución de los puntos de los que fue tomado el valor de la profundidad del agua subterránea.

Coordenada en x	Coordenada en y	Población	Profundidad al nivel estático (m)	Coordenada en x	Coordenada en y	Población	Profundidad al nivel estático (m)
516539.8	2077363.49	Los limones	200	477771.79	2097231.74	Ahuatepec	100
514626.75	2987363.49	Yecapixtla	200	475231.38	2078388.43	Real del puente	20
513600.50	2079250.66	Huexca	200	478617.77	2079135.85	Tezayuca	20
505423.63	2079771.13	Río Cuautla	5	476315.86	2085248.9	Mérida	20
503495.14	2087605.93	Río Yautepec	5	456022.38	2098980.42	Ocuilan de Arteaga	5
504419.47	2064952.47	Salitre	5	438799.69	2082940.24	Zumpahuacan	180
487275.4	2074404.28	Ticumán	5	429438.06	2079663.38	Tonalico	180
501514.55	2065855.48	San Vicente de Juárez	5	431994.71	2133023.46	Toluca	150
474268.49	2081424.03	Tetlama	100	410704.45	2173749.04	Valle de Toluca (centro)	40
479895.76	2047571.76	Pueblo Viejo	100	468421.2	2132749.48	Sierra de las Cruces	170
486653.44	2164541.35	Sierra de Guadalupe	20	-	-	-	-

Tabla 5.9 Localización y profundidad del agua subterránea de acuerdo con las últimas actualizaciones publicadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018 -A, -B, -C, -D y -E)

Coordenada en X	Coordenada en Y	Municipio	Profundidad al nivel estático (m)	Coordenada en X	Coordenada en Y	Municipio	Profundidad al nivel estático (m)
499912.399	2123506.42	Milpa Alta	90.00	499445.335	2128147.36	Tláhuac	48.99
498919.524	2122430.74	Milpa Alta	140.00	492818.419	2127841.42	Xochimilco	40.64
498744.341	2122861.04	Milpa Alta	116.00	499211.795	2128239.58	Xochimilco	48.29
499182.366	2122953.22	Milpa Alta	120.00	499007.431	2127962.97	Xochimilco	83.05
499240.781	2123260.56	Milpa Alta	85.00	498773.85	2127440.5	Xochimilco	81.00
494860.922	2124152.57	Milpa Alta	250.00	498044.061	2128024.52	Xochimilco	92.00
499766.451	2127686.34	Tláhuac	45.65	486304.805	2123204.2	Xochimilco	150.00

Tabla 5.10 Localización y profundidad del nivel estático registrado en el censo de aprovechamientos de agua subterránea del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (CONAGUA, 2019-A)

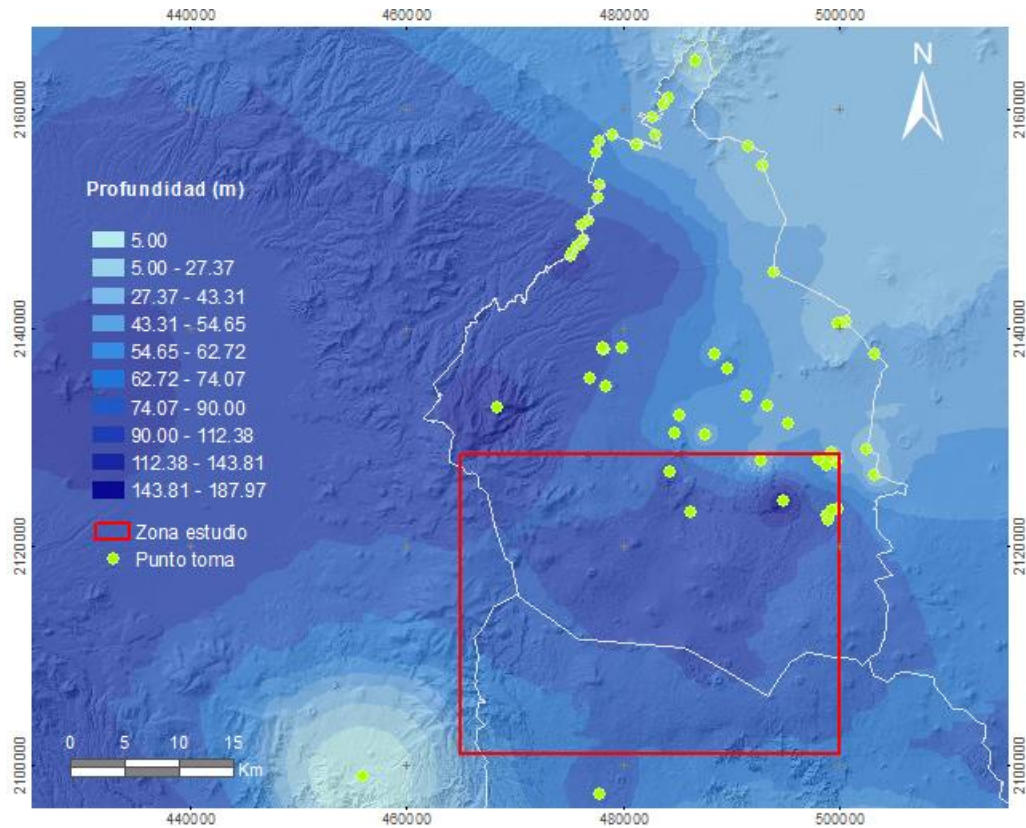


Ilustración 5.25 Ubicación de los sitios de donde fueron obtenidos los valores de profundidad del agua subterránea

La creación del mapa de profundidad de agua subterránea se llevó a cabo en el *software ArcMap 10.3* a través de la interpolación de los valores de profundidad mostrados en las tablas anteriores; los pasos particulares de su elaboración se encuentran descritos en la ilustración 5.26.

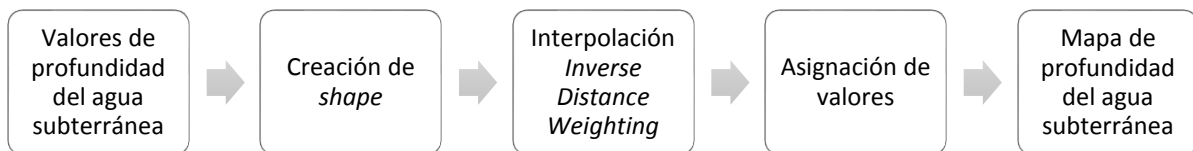


Ilustración 5.26 Diagrama de flujo que muestra los pasos seguidos dentro del *software ArcMap 10.3* para la elaboración del mapa de profundidad de agua subterránea

De manera inicial, se creó un archivo vectorial con la recopilación de las fuentes bibliográficas y se interpoló su contenido para crear la ilustración 5.27, la cual muestra la distribución de esta propiedad a nivel regional y en donde se puede comprobar que precisamente la zona que se encuentra por debajo del área de estudio presenta los valores más altos en profundidad del agua subterránea.

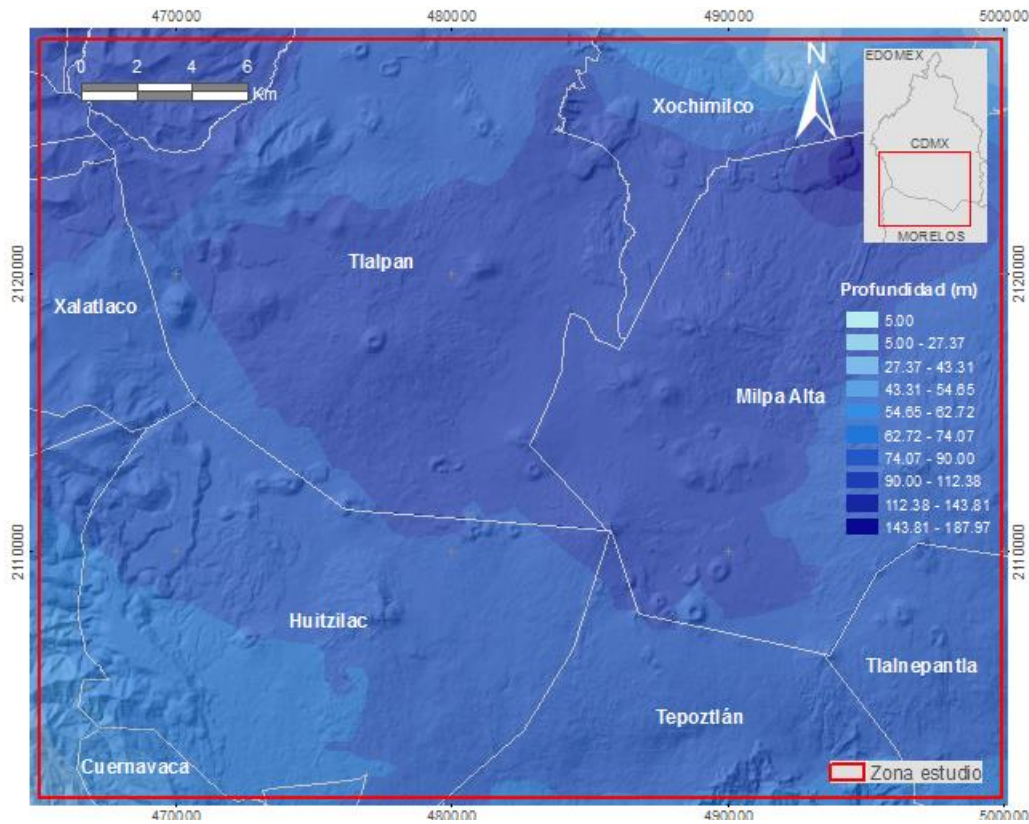


Ilustración 5.27 Distribución de la profundidad de agua subterránea en la zona de estudio

A partir del mapa temático, se hizo una clasificación de la interpolación generada usando la herramienta *Equal Interval* con la intención de reflejar en el índice IPHRAS las heterogeneidades de este elemento; se crearon diez intervalos los cuales se muestran en la tabla 5.11. El valor asignado a cada criterio responde a la justificación de que a mayor profundidad del nivel estático, más larga será la distancia que debe recorrer el agua para contribuir en la recarga; por lo tanto menor el valor asignado y viceversa.

Profundidad agua subterránea (m)	Valor asignado	Profundidad agua subterránea (m)	Valor asignado
54.65 – 60.43	10	83.52 – 89.29	5
60.43 – 66.20	9	89.29 – 95.07	4
66.20 – 71.97	8	95.07 – 100.84	3
71.97 – 77.75	7	100.84 – 106.61	2
77.75 – 83.52	6	106.61 – 112.38	1

Tabla 5.11 Valores asignados a los intervalos de profundidad del nivel estático en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga de agua subterránea

Finalmente, en la ilustración 5.28 se muestra la distribución de la profundidad del agua subterránea en la zona de estudio correspondiente a los acuíferos bajo un régimen libre de confinamiento. Las partes más someras se localizan en el extremo inferior izquierdo, cerca del municipio de Cuernavaca en el estado de Morelos. Por su parte, los valores más profundos se encuentran en los límites del estado de Morelos con las alcaldías de Tlalpan y Milpa Alta en la Ciudad de México.

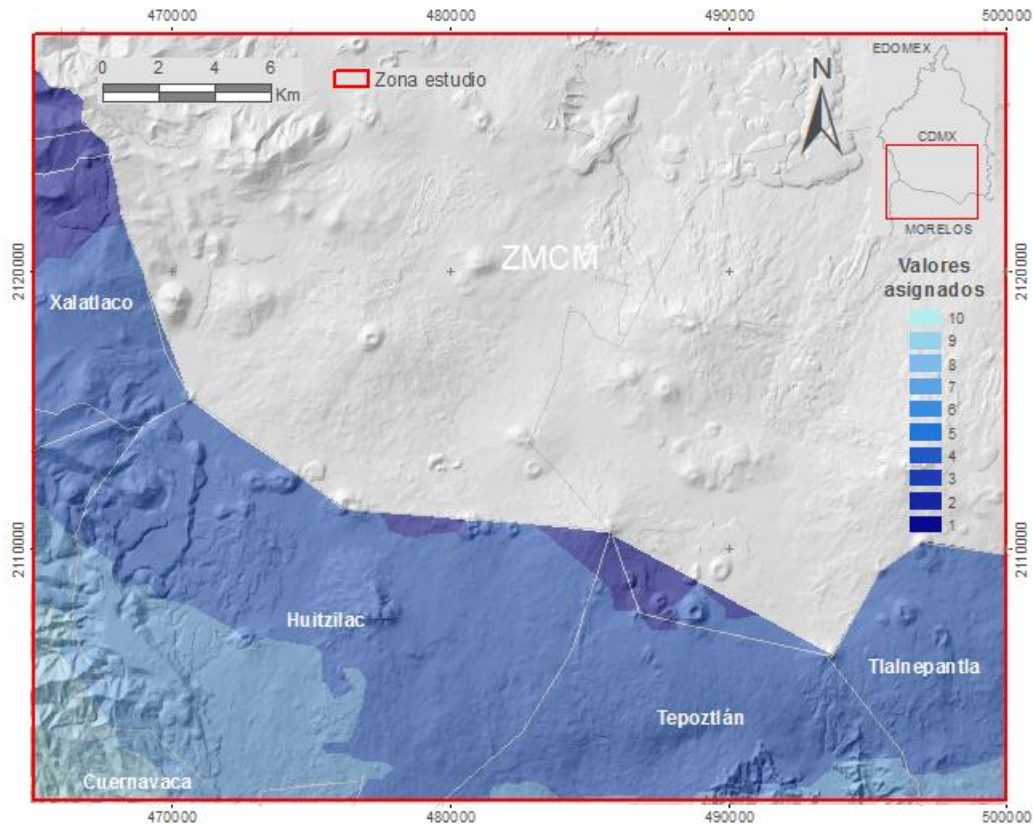


Ilustración 5.28 Distribución de la profundidad del agua subterránea en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

5.4 Indicador IPHRAS para acuíferos confinados

De manera similar al procedimiento realizado para los acuíferos libres; en este apartado se evalúa la factibilidad del terreno para la instalación de tecnologías MAR que usan la introducción directa del agua hasta las capas permeables en acuíferos confinados, véase ilustración 5.29.

Para cumplir con este objetivo, se eligieron cinco elementos que participan de manera destacada en la instalación y funcionamiento de pozos de infiltración: uso de suelo,

profundidad del agua subterránea, elementos estructurales, plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y pozos en funcionamiento.

El hecho de que el agua deba ser directamente inyectada en el subsuelo a través de pozos, modifica los criterios que deben considerarse para evaluar la factibilidad del terreno. La calidad del agua, por ejemplo, debe cumplir con altos estándares ya que esta entra en contacto de manera directa con el agua subterránea suponiendo una vulnerabilidad muy importante para esta última. Según lo anterior, la ubicación de plantas de tratamiento de aguas residuales resulta relevante al significar una fuente de agua de alta calidad y cuya proximidad puede derivarse en un beneficio económico para el proyecto.

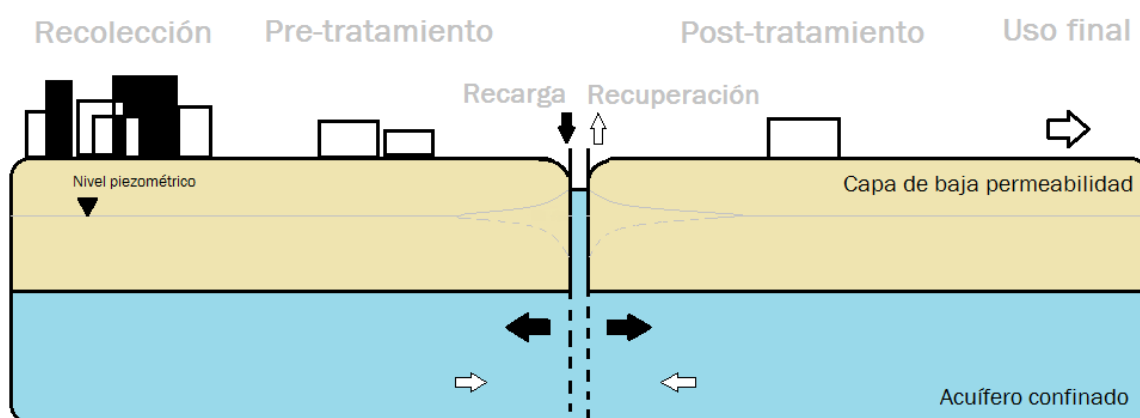


Ilustración 5.29 Esquema que ilustra el tipo de tecnologías MAR empleadas en los acuíferos confinados, las cuales se basan en la introducción directa del recurso a las capas permeables a través de pozos. En esta ilustración, técnica ASR (Aquifer Storage and Recovery), en la cual se inyecta agua por un pozo para su almacenamiento (objetivo principal) y de manera posterior se recupera por el mismo pozo. Modificada de Dillon et al., 2009

La profundidad del agua subterránea, representa la distancia objetivo para la recarga, por lo cual, resulta lógico pensar en este criterio como un factor determinante en el costo económico del proyecto; por supuesto, se prefieren perforaciones poco profundas en materiales de baja competencia mecánica y si existe un sistema de fracturas que favorezca la infiltración del agua a mayor profundidad, mejor.

El estudio en la ubicación de los pozos de extracción que actualmente se encuentran en funcionamiento tiene dos objetivos principales; el primero de ellos se refiere al conocimiento previo sobre la zona que este tipo de cortes litológicos ofrece y el segundo se basa en la propuesta de aprovechar estas instalaciones de manera intermitente entre la recarga y extracción de agua subterránea, lo cual podría significar una ventaja económica para el proyecto.

Finalmente, el uso de suelo se incluyó en el análisis porque refleja no solo la disponibilidad del área para sostener un proyecto de esta naturaleza sino que también

contribuye en el análisis de distintos fenómenos que pueden intervenir en las condiciones del agua subterránea, por ejemplo fuentes de contaminación, tasa de extracción, etcétera.

La jerarquización de estos elementos, de igual forma que en el apartado anterior, se basa en las relaciones entre criterios a través de la asignación de *pesos* y *valores*. Para mostrar la asignación de *pesos*, nuevamente se recurrió a un esquema, véase ilustración 5.30, en donde se distingue entre relaciones menores y mayores según la importancia y ocurrencia de estas.

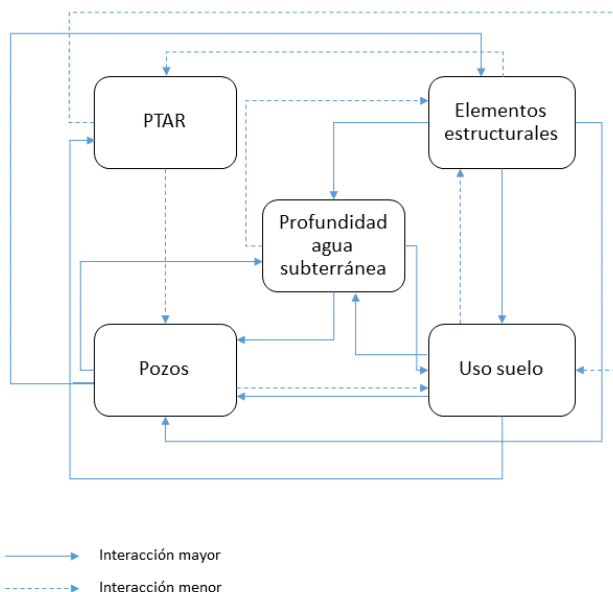


Ilustración 5.30 Interacciones entre los factores involucrados en el proceso de recarga de agua subterránea en acuíferos confinados. Modificado de Yeh et al., 2016

En la tabla 5.12 se muestran la obtención del peso asignado para cada uno de los criterios a partir de las interacciones descritas en la ilustración 5.30; a las mayores de estas se les dio el valor de uno (1) y medio punto (0.5) a las menores.

Criterio	Interacciones	Peso asignado
Elementos estructurales	$3 \times 1.0 + 1 \times 0.5$	3.5
Pozos	$2 \times 1.0 + 1 \times 0.5$	2.5
PTAR	2×0.5	1
Profundidad del agua subterránea	$2 \times 1.0 + 1 \times 0.5$	2.5
Uso de suelo	$3 \times 1.0 + 1 \times 0.5$	3.5

Tabla 5.12 Asignación de pesos para cada uno de los criterios que influyen en la recarga de agua subterránea en acuíferos confinados. Modificado de Yeh et al., 2016

La asignación de *valores* es un proceso más detallado y con un proceso particular para cada uno de los criterios evaluados. La metodología empleada en el análisis de la profundidad del agua subterránea, el uso de suelo y los elementos estructurales es la misma que se utilizó en el estudio de los acuíferos libres, por lo que en este apartado solo se mencionaran los pasos más importantes de esta.

Análisis profundidad del agua subterránea

Para el análisis de este criterio se creó un mapa con la distribución de la profundidad objetivo en la zona de estudio, la base de datos y la metodología empleada fueron las mismas que se utilizaron en el estudio de este elemento, pero para acuíferos libres, véase ilustración 5.31.

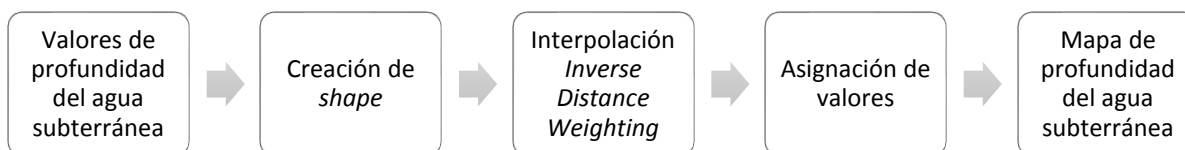


Ilustración 5.31 Diagrama de flujo que muestra los pasos seguidos dentro del software ArcMap 10.3 para la elaboración del mapa de profundidad de agua subterránea

Una vez generado el mapa temático de profundidad del agua subterránea, se procedió a su clasificación en diez intervalos usando la herramienta *Equal Interval* en *ArcMap 10.3* para la asignación de valores; estos intervalos se encuentran descritos en la tabla 5.13. El valor asignado a cada intervalo responde a la justificación de que al incrementar la distancia hasta la profundidad objetivo, disminuye la viabilidad del proyecto al implicar un costo más elevado y posiblemente una mayor complejidad técnica.

Profundidad agua subterránea (m)	Valor asignado	Profundidad agua subterránea (m)	Valor asignado
171.92 – 187.98	1	91.62 – 107.68	6
155.86 – 171.92	2	75.56 – 91.62	7
139.80 – 155.86	3	59.50 – 75.56	8
123.74 – 139.80	4	43.44 – 59.50	9
107.68 – 123.74	5	27.38 – 43.44	10

Tabla 5.13 Valores asignados a los intervalos de profundidad del agua subterránea en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga a través de pozos

Finalmente, la ilustración 5. 32 muestra la distribución de la profundidad objetivo en la región que pertenece al acuífero confinado de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en donde los valores más someros se encuentran al norte de la alcaldía Xochimilco y en el oriente de Milpa Alta.

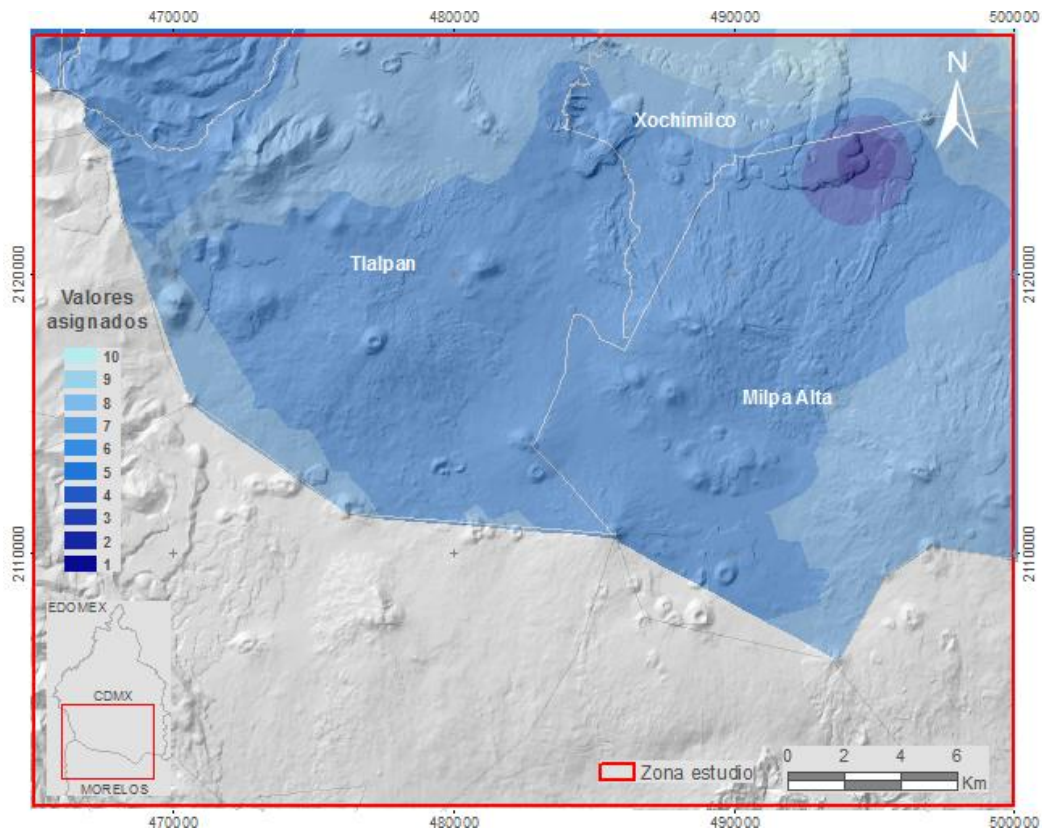


Ilustración 5.32 Distribución de la profundidad de agua subterránea en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Análisis uso de suelo

La caracterización de este criterio implicó el uso de técnicas de percepción remota y fotografías satelitales provenientes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). En este apartado se describe de manera breve el procedimiento empleado para el estudio de este elemento, pero en la sección 5.3 de este trabajo se exhibe una relación detallada de cada uno de los pasos que se siguieron en la elaboración del mapa temático del uso de suelo en la zona de estudio.

Un acercamiento general al procedimiento realizado se puede observar en la ilustración 5.33; este se llevó a cabo en el *software QGIS* debido a su complemento SCP (por sus siglas en inglés para *Semi-Automatic Classification Plugin*), el cual permite clasificar tipos de superficie de acuerdo con su firma espectral y con la creación de capas virtuales a través del método RGB.

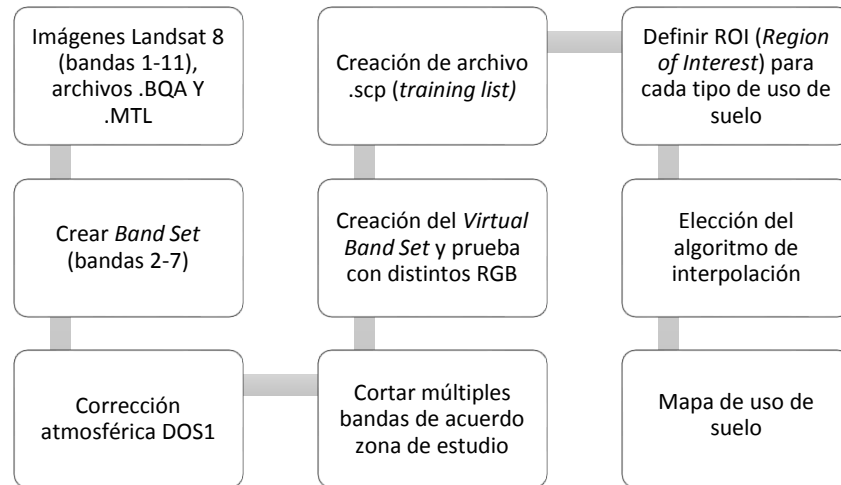


Ilustración 5.33 Procesamiento realizado en QGIS a través del complemento SCP para la creación del mapa temático de uso de suelo

Cabe señalar que las imágenes satelitales deben ser sometidas a distintos tipos de correcciones de acuerdo con la versión o satélite con el que estas hayan sido adquiridas, de manera específica en este proyecto se utilizaron las imágenes del 29 de enero del 2019 del sensor OLI (por sus siglas en inglés para *Operational Land Imager*). Estas imágenes ya cuentan con un procesamiento previo por lo que solo fue necesario realizar la corrección atmosférica DOS1.

La superficie se encuentra cubierta por un número muy grande de elementos, los cuales juegan un papel crucial ante la factibilidad de cualquier proyecto de ingeniería; para el estudio de la viabilidad de recarga de agua subterránea en el acuífero confinado de la ZMCM según el tipo de uso de suelo se clasificó el área en cinco grandes grupos: zona urbana, de cultivo, vegetación densa, pastizales y rocas o suelo desnudo.

La asignación de valores se encuentra resumida en la tabla 5.14, a diferencia del estudio de los acuíferos libres donde el principal objetivo es favorecer la infiltración, la recarga de los acuíferos confinados se centra en la inyección del agua hasta las capas permeables del mismo, por lo que la valoración de los elementos presentes en la superficie es diferente.

Uso de suelo	Valor asignado
Urbana	2
Cultivo	4
Vegetación densa	6
Vegetación (pastizales)	8
Roca o suelo desnudo	8

Tabla 5.14 Valores asignados a los tipos de uso de suelo en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga a través de pozos

En esta ocasión solo se evalúa la factibilidad del uso de suelo de acuerdo con la posibilidad de instalar en esta área un pozo de inyección; es decir, las zonas urbanas poseen poca factibilidad debido a que el área sin construcciones es muy limitada, por el contrario las regiones donde se identificó roca o vegetación, son más susceptibles a la instalación de este tipo de tecnología.

El mapa resultado de este análisis se presenta en la ilustración 5.34, en esta se puede observar que las alcaldías de Milpa Alta y Tlalpan así como el oriente de Xochimilco muestran las mejores condiciones para la instalación de pozos de recarga de acuerdo con el tipo de uso de suelo.

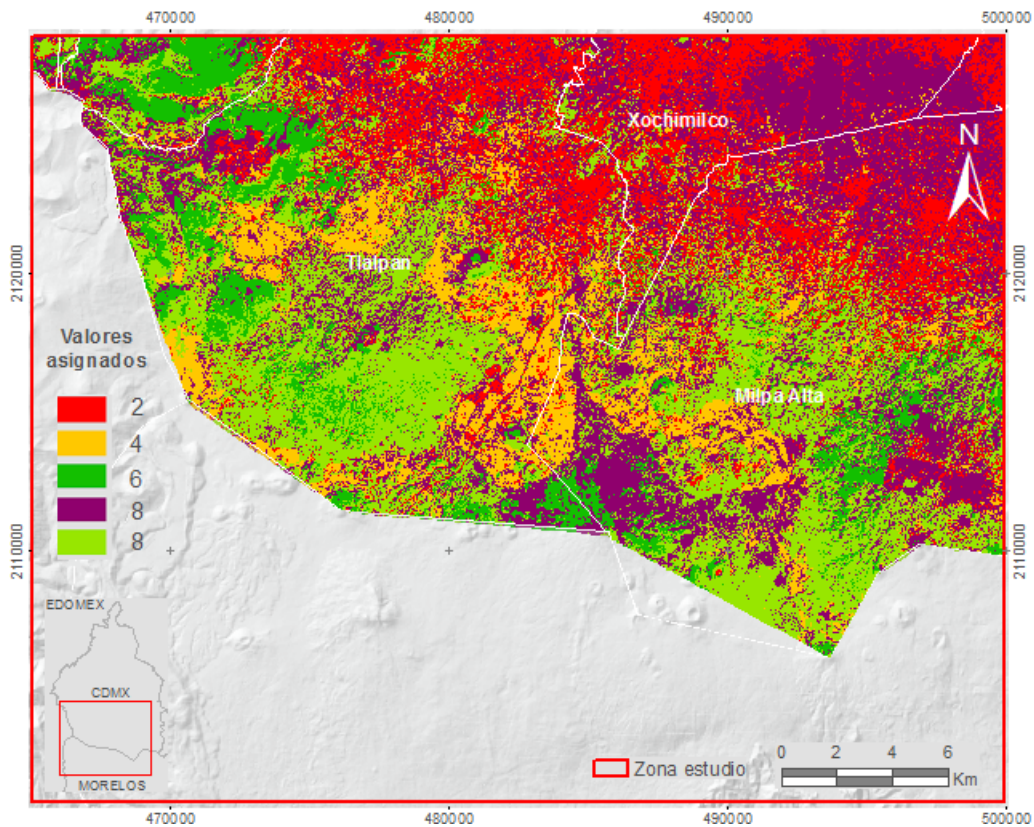


Ilustración 5.34 Distribución de los principales tipos de uso de suelo en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Análisis de pozos activos

De acuerdo con la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, en 2016 existían 976 pozos en el sistema de agua potable de la ciudad; una alternativa para contribuir en la recarga del acuífero en la Zona Metropolitana puede ser el uso intermitente de estas instalaciones en la introducción del recurso a la capas permeables del acuífero. (González, Mendoza & Arriaga, 2017).

En la ilustración 5.35 se muestra la distribución de los pozos activos que conforman la red de extracción de agua en la ZMCM, esta base de datos se obtuvo a través de la Subgerencia de Exploración y Monitoreo Geohidrológico de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019-A).

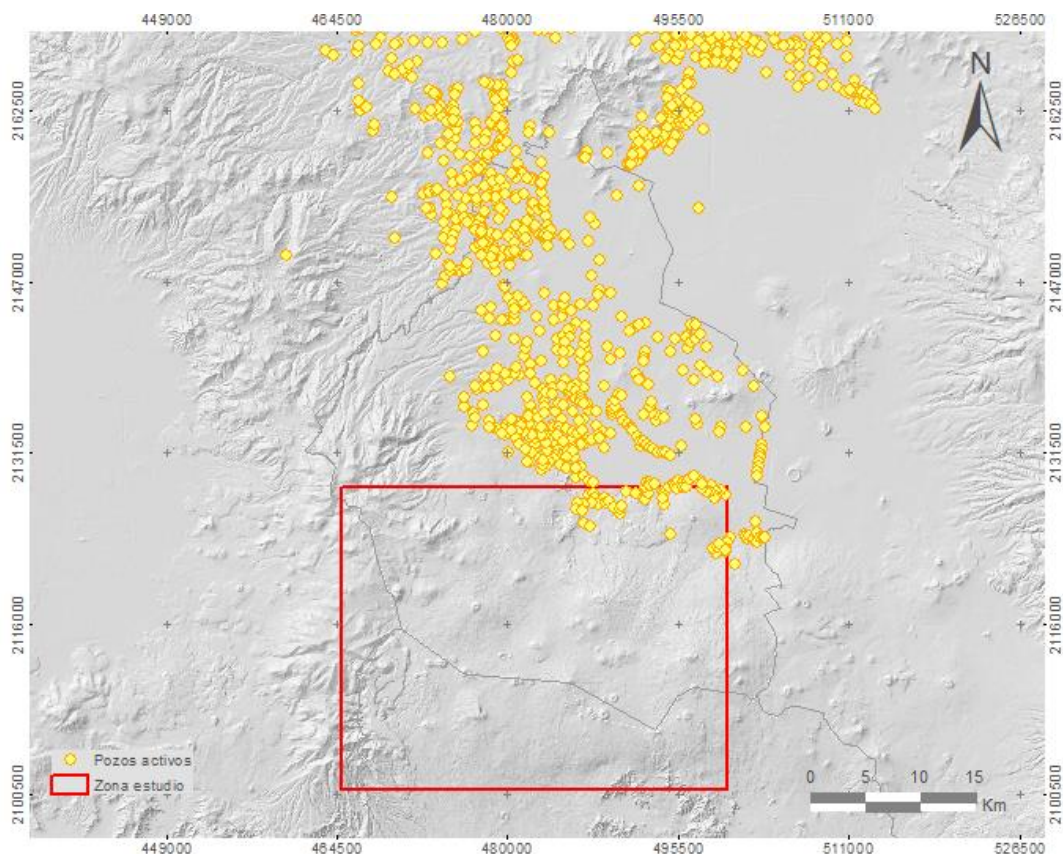


Ilustración 5.35 Distribución de pozos activos en el acuífero de la ZMCM

Una vez que se creó el mapa temático con la distribución de los pozos según el censo de aprovechamientos del acuífero de la ZMCM, se procedió a la creación del mapa de distribución del criterio en la zona de estudio, para la cual una vez más se hizo uso de la interpolación en *ArcMap 10.3* siguiendo el procesamiento mostrado en la ilustración 5.36.

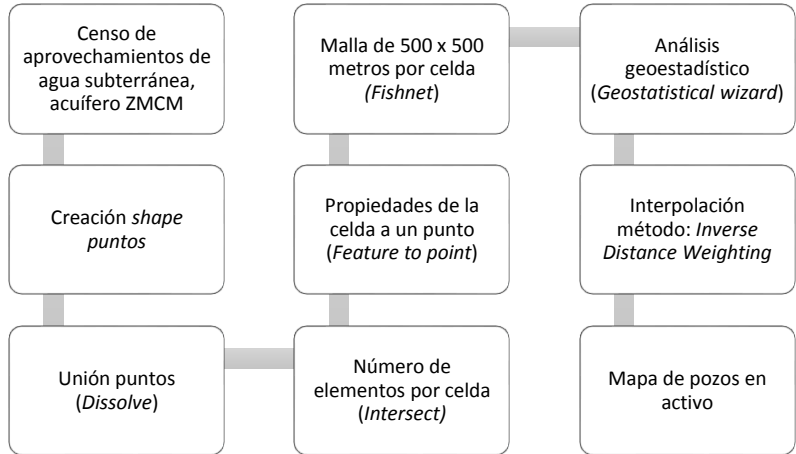


Ilustración 5.36 Diagrama que muestra el procedimiento seguido para la obtención del mapa de pozos en activo en el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

El siguiente paso fue la clasificación de la interpolación en diez categorías de igual intervalo con el objetivo de caracterizar la zona de estudio a partir de la asignación de valores; se asignó el número diez (10) a las celdas con la presencia de al menos un pozo y uno (1) ante la ausencia de estos. El resultado se puede observar en la ilustración 5.37 en donde claramente el nor-oriente de la zona de estudio se destaca del resto por la presencia de estos dispositivos principalmente en la alcaldía Xochimilco.

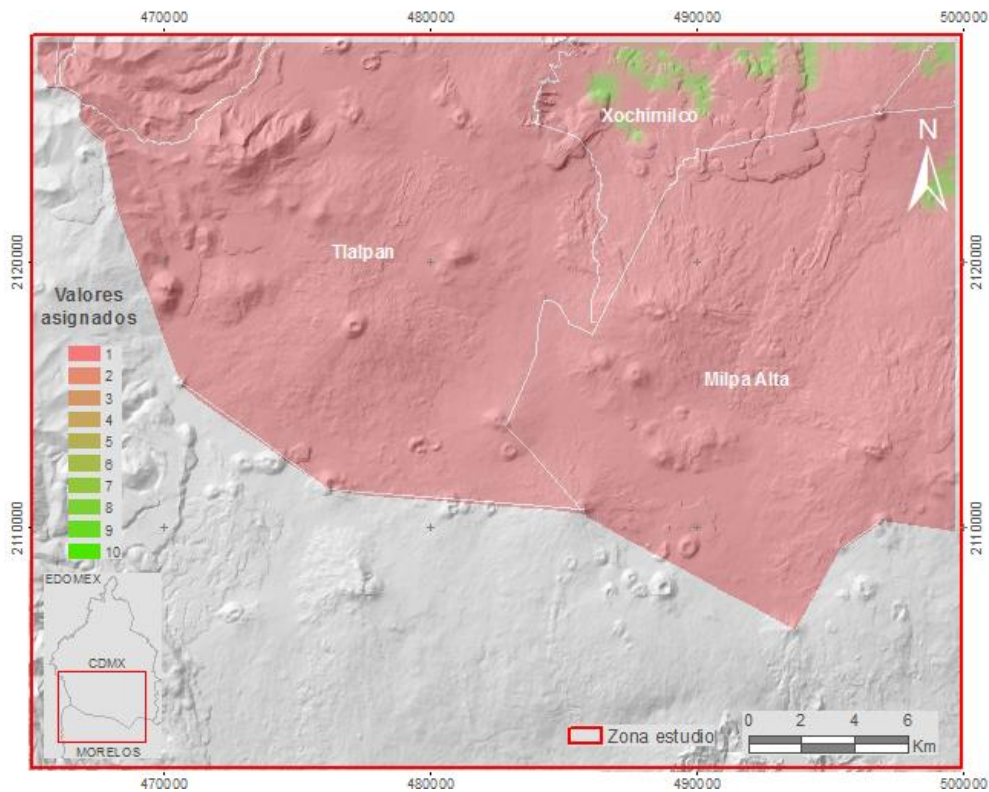


Ilustración 5.37 Distribución de la densidad de pozos activos en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Análisis de plantas de tratamiento de aguas residuales

La descarga de aguas residuales que se origina en los núcleos de población y es recolectada a través del sistema de alcantarillado urbano o rural se conoce como descarga municipal y puede ser sometida a una serie de procesos para mejorar su calidad y usarse nuevamente en la industria, para el riego de áreas verdes o para liberarse en barrancas y colectores (CONAGUA, 2018-F).

Los estados de Morelos y México en conjunto con la Ciudad de México, poseen un total de 199 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), véase ilustración 5.38, procesan un caudal de 10,060.74 l/s, del cual al menos un 7% (747.19 l/s) se libera en barrancas y colectores (CONAGUA, 2019-B). Este caudal puede ser aprovechado para la recarga de los acuíferos en la zona sur de la Cuenca de México.

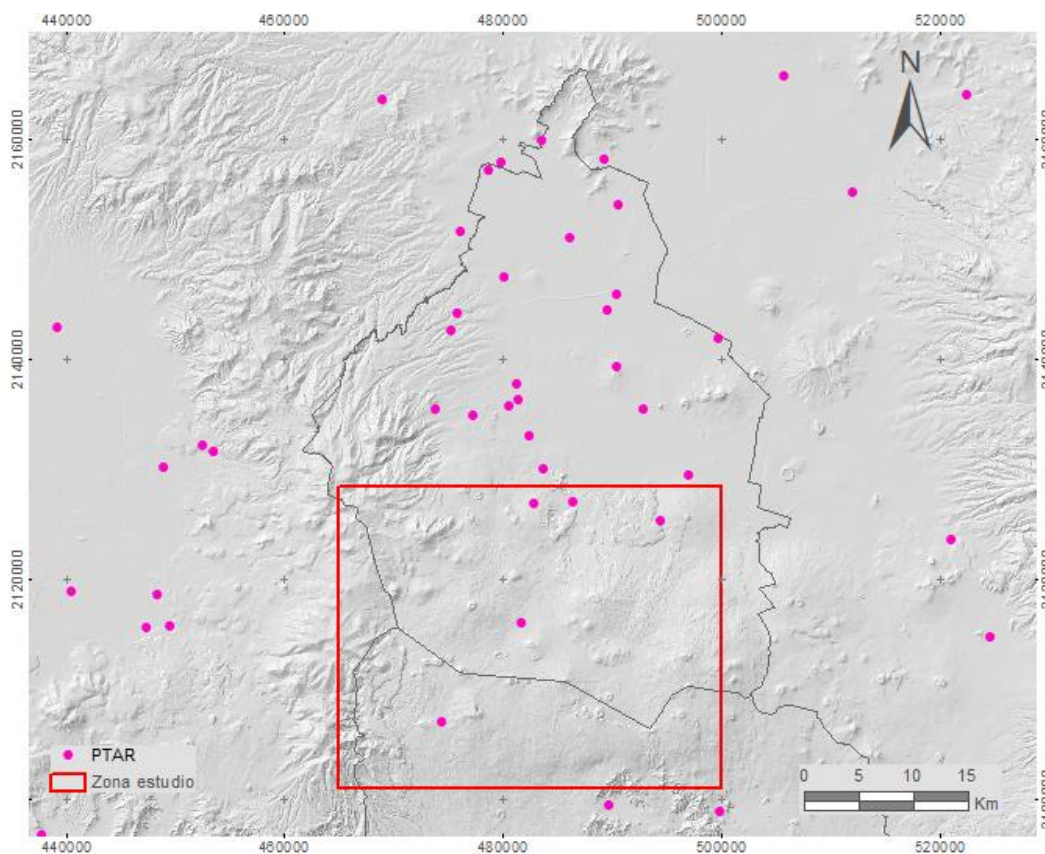


Ilustración 5.38 Ubicación de las PTAR próximas a la zona de estudio

Existe la posibilidad de que algunos procesos dentro de las plantas de tratamiento deban ser mejorados para cumplir con la NOM-014-CONAGUA-2003 que regula la calidad del agua para la recarga que procede de este tipo de instalaciones; sin embargo, el beneficio económico a largo plazo sería mucho mayor.

El proceso de interpolación que se siguió en *ArcMap 10.3* para crear el mapa de asignación de valores para la densidad de PTAR en la zona de estudio se muestra en la ilustración 5.39. Por su parte, la ilustración 5.40 muestra el resultado de procedimiento, el cual se clasificó en diez categorías para su integración en el indicador IPHRAS.

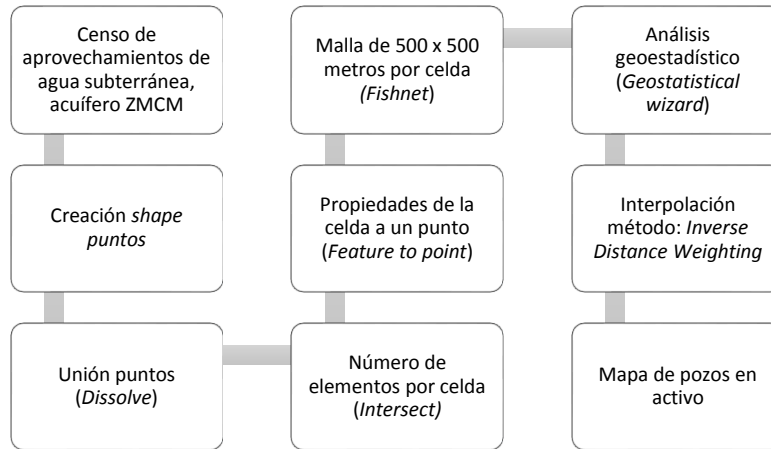


Ilustración 5.39 Diagrama que muestra el procedimiento seguido para la obtención del mapa de densidad de PTAR en activo en el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

La asignación de valores es muy sencilla ya que se adjuntó el valor de diez (10) a la presencia de una PTAR por celda y el valor de uno (1) en su ausencia.

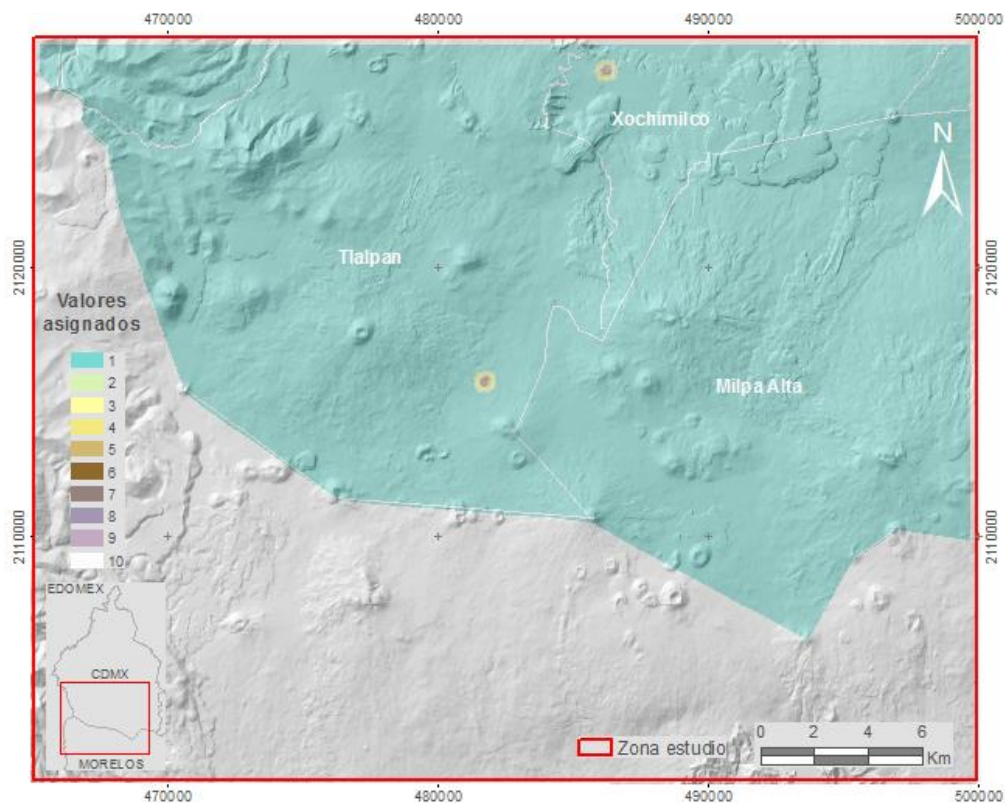


Ilustración 5.40 Distribución de la densidad de PTAR en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Análisis de elementos estructurales

Finalmente, el último elemento considerado para evaluar la factibilidad hidrogeológica para la recarga de acuífero confinados a través de pozos de inyección, es la presencia de elementos estructurales en la zona. La metodología empleada en este punto es la misma que se utilizó en el estudio de este criterio, pero para acuíferos libres.

En la creación del mapa temático se utilizaron dos fuentes de datos; la primera de ellas es la carta geológica E14A49 de Villa Milpa Alta, la cual representa las fracturas presentes en el área; esta imagen se digitalizó, georreferenció y se creó una capa de tipo vectorial con los elementos estructurales que señalaba. La segunda fuente proviene del procesamiento digital de la banda T1 del conjunto de imágenes obtenidas a través del Servicio Geológico de los Estados Unidos, realizado en el *software PCI Geomatica*; se hizo una extracción de los elementos conocidos como *lineaments* y esta información se exportó como una capa de tipo vectorial a *ArcMap 10.3* en donde se unió a los elementos previamente extraídos de la carta geológica Villa Milpa Alta; el mapa temático resultado se muestra en la ilustración 5.41.

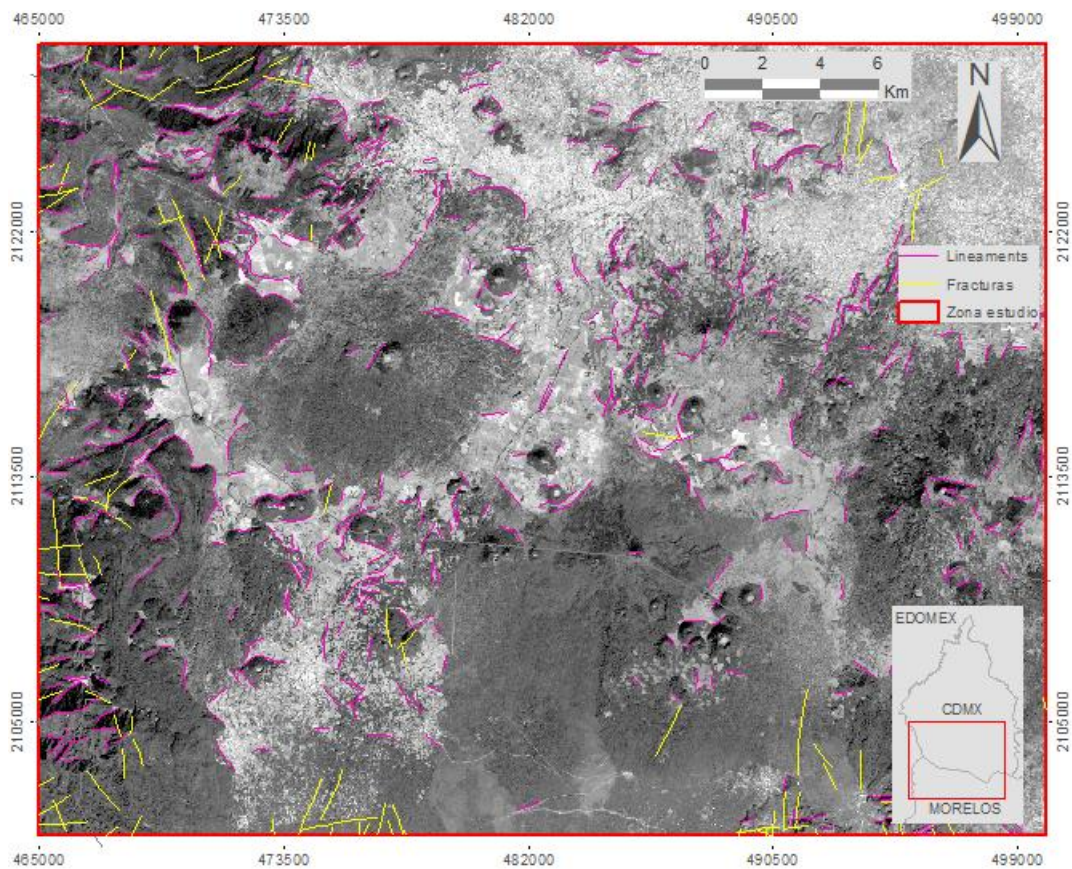


Ilustración 5.41 Distribución de los elementos estructurales en la zona de estudio

Una vez que se contó con este mapa de distribución de los elementos estructurales en la zona de estudio se procedió a la interpolación dentro de toda el área siguiendo el procedimiento que se muestra en la ilustración 5.42.

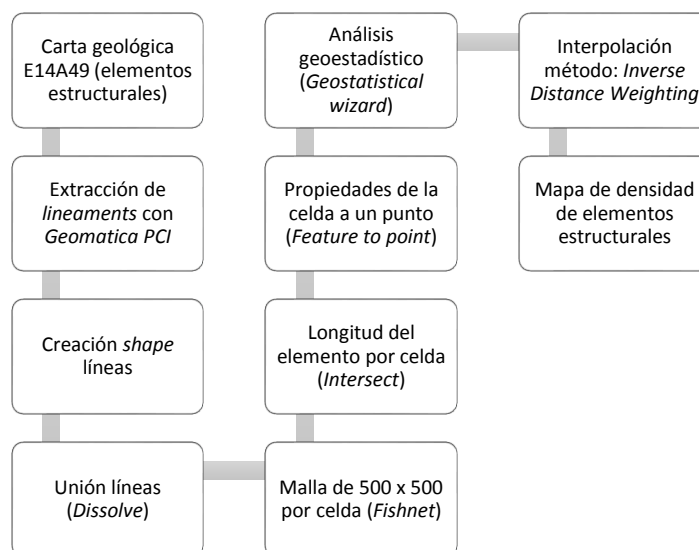


Ilustración 5.42 Diagrama que muestra el procedimiento seguido en ArcMap 10.3 para la creación del mapa de distribución de la densidad de elementos estructurales en la zona de estudio

A continuación, se hizo la asignación de valores a cada uno de los diez intervalos creados en el mapa de distribución de la densidad de elementos estructurales en la zona de estudio, para lo cual se usó la herramienta *Equal Interval classify* de ArcMap 10.3; una vez más, se designó el valor más alto (diez) a las celdas que presentaban la mayor longitud (m) de elementos estructurales (fallas y lineamientos), véase tabla 5.15.

Intervalo (m)	Valor asignado	Intervalo (m)	Valor asignado
0 – 12.14	1	176.20 – 285.67	6
12.14 – 31.00	2	285.67 – 455.58	7
31.00 – 60.26	3	455.58 – 719.34	8
60.26 – 105.69	4	719.34 – 1128.76	9
105.69 – 176.20	5	1128.76 – 1764.31	10

Tabla 5.15 Valores asignados a los intervalos de densidad de elementos estructurales en la zona de estudio de acuerdo con su contribución en el proceso de recarga a través de pozos

La distribución de la densidad de elementos estructurales en la zona de estudio sobre el acuífero confinado de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se observa en la ilustración 5.43, en esta imagen se puede advierte que de manera general estos elementos se distribuyen a los pies de montaña de las elevaciones importantes.

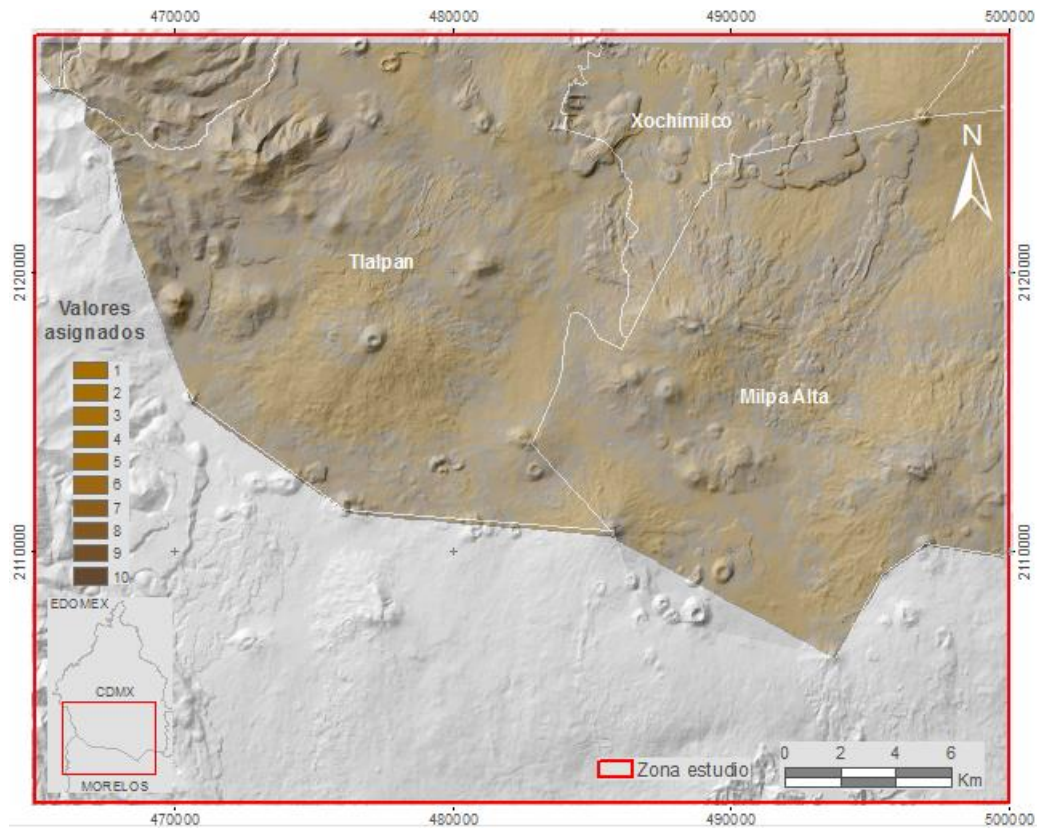


Ilustración 5.43 Distribución de la densidad de elementos estructurales en la zona de estudio de acuerdo con los valores asignados para su integración en el indicador IPHRAS

Finalmente, de igual manera que con los acuíferos libres, la construcción del índice de factibilidad para la recarga de agua subterránea en acuíferos confinados se encuentra dada por la combinación lineal y ponderada de los criterios evaluados.

$$IPHRAS_c = Pozos_p Pozos_v + Us_p Us_v + PTAR_p PTAR_v + Ee_p Ee_v + Pas_p Pas_v$$

Donde

Pozos = Pozos activos

Us = Uso de suelo

PTAR = Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Ee = Elementos estructurales

Pas = Profundidad del agua subterránea

Los subíndices *p* y *v* corresponden a los pesos y valores respectivamente

5.5 Superposición ponderada

Como último paso en la construcción del índice IPHRAS, se hizo uso de la herramienta superposición ponderada en *ArcMap 10.3*, la cual a partir de un análisis integrado, permite la resolución de problemas que involucran varios criterios al crear modelos de adecuación que identifican las mejores ubicaciones, o las preferidas, para un fenómeno en específico.

En esta evaluación, la metodología hace uso de una escala común lo que permite la valoración de diversas entradas incluso si estas son distintas entre sí.

Los mapas temáticos de asignación de valores generados en los apartados anteriores son las capas de entrada para este análisis de superposición; primeramente se convirtieron a formato *raster* y después se ingresaron en esta herramienta de acuerdo con los pesos asignados en las tablas 5.2 y 5.12.

Puede decirse que esta herramienta es el desarrollo computacional de la ecuación de construcción del índice IPHRAS para el caso de los acuíferos libres y confinados respectivamente.

6 Resultados

La ilustración 6.1 muestra la distribución del indicador IPHRAS para los acuíferos libres que se encuentran dentro de la zona de estudio; los intervalos generados por la herramienta superposición ponderada se clasificaron en cinco categorías para representar la factibilidad de acuerdo con las siguientes categorías: potencial muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

Como se muestra en esta imagen, la única zona que presenta un potencial muy alto se encuentra al norte del municipio de Huitzilac justo en la frontera territorial con la alcaldía de Tlalpan en la Ciudad de México. La mayor parte de la región presenta un potencial moderado con excepción de algunas regiones en la parte norte de Tepoztlán y Tlalnepantla, así como en la periferia del volcán El Muñeco, las cuales presentan valores de bajos a muy bajos.

En las regiones en las que se obtuvo un índice de moderado a muy alto puede ser factible la instalación de diversas técnicas MAR, desde pozos hasta estanques o cuencas de infiltración; aunque estas últimas requieren de un área considerable para su instalación, esta parte de la Cuenca de México aún conserva un uso de suelo favorable en ese sentido.

En las zonas con cambios de pendiente importantes, como el poniente del municipio de Huitzilac y el oriente de Ocuilan, pueden instalarse represas de geocostal y/o piedra para retener el flujo superficial generado por un evento de lluvia. Aunque los volúmenes infiltrados no llegan al almacenamiento de los grandes acuíferos, contribuyen al almacenamiento local, aumentan la humedad del suelo y el incremento del gasto en manantiales.

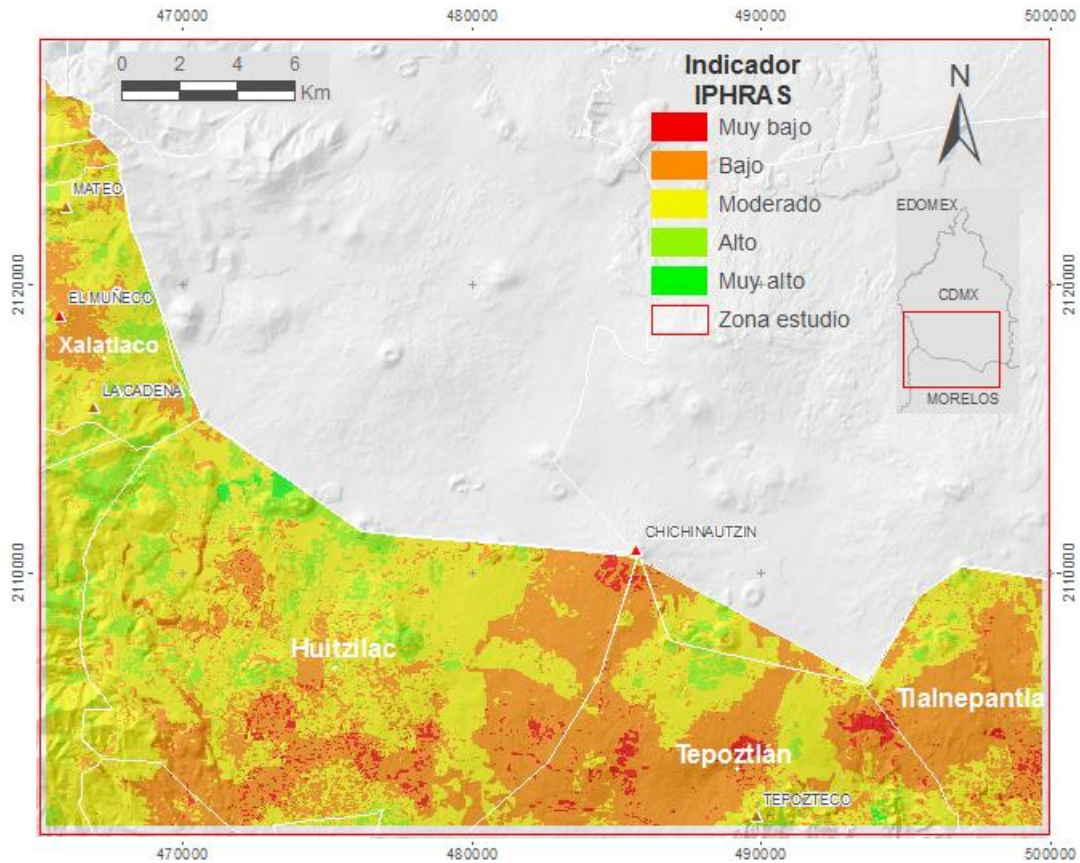


Ilustración 6.1 Clasificación de la zona de estudio de acuerdo con el índice IPHRAS en acuíferos libres

Las zonas que actualmente se destinan a la agricultura como el norte del municipio de Huitzilac, pueden sostener proyectos como la recarga por riego o la inundación controlada a cambio de algún tipo de beneficio económico o incentivo fiscal.

Finalmente, en las zonas que muestran un potencial bajo o muy bajo como el norponiente de Tepoztlán y Tlalnepantla pueden explorarse de manera más detallada la posibilidad de contribuir a la recarga de agua subterránea a través de pozos existentes y con el recurso proveniente de Plantas de Tratamiento de agua residual.

Por su parte, la ilustración 6.2 exhibe los resultados del estudio de factibilidad para la recarga de agua subterránea en acuíferos confinados; el indicador IPHRAS se dividió en las mismas cinco categorías que se usaron para los acuíferos libres.

Como puede observarse, solo una pequeña fracción en el centro de la alcaldía de Xochimilco y otro punto al poniente de Tlalpan muestran un potencial muy alto; sin embargo, la zona presenta un porcentaje atractivo de índice alto que se distribuye por toda el área estudiada.

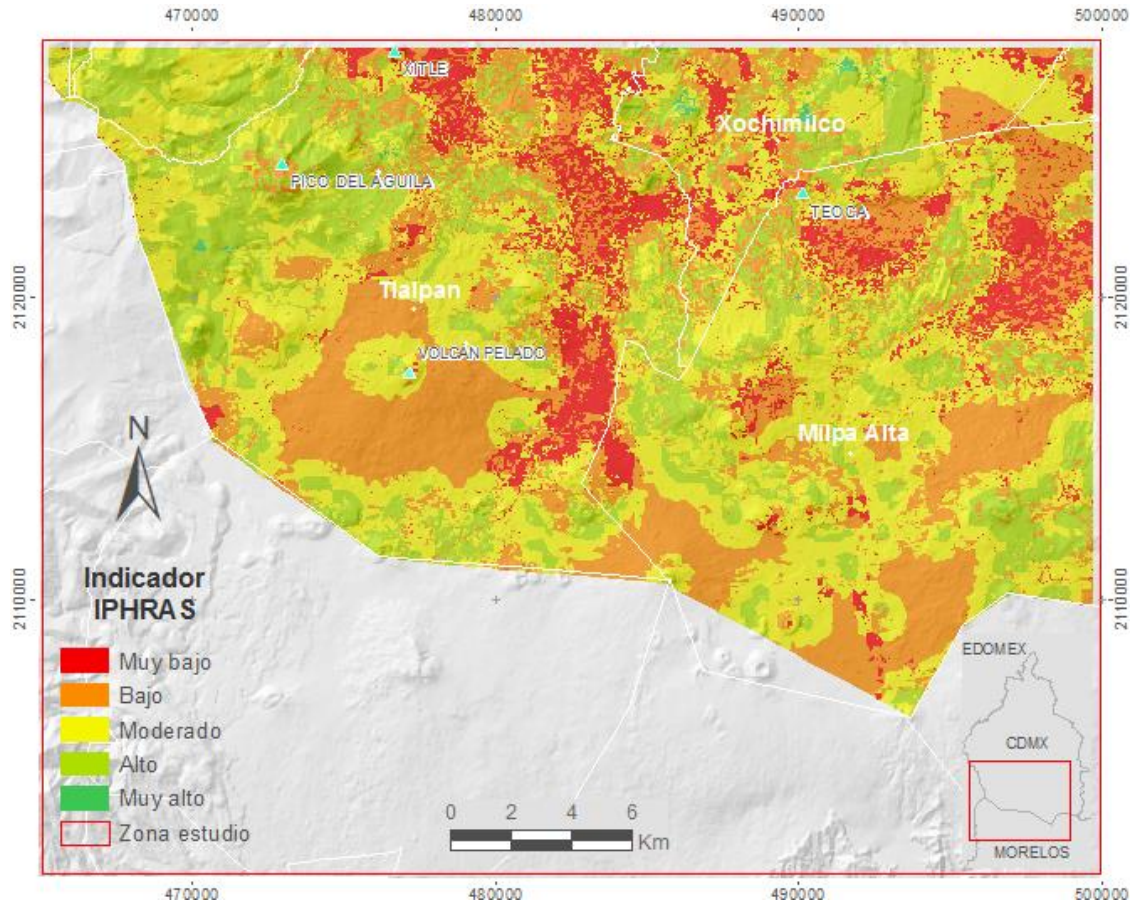


Ilustración 6.2 Clasificación de la zona de estudio de acuerdo con el índice IPHRAS en acuíferos confinados

El único medio viable en esta zona para la recarga de acuíferos es la inyección del recurso de manera directa, la adaptación de estructuras existentes para cumplir con este propósito puede significar un método eficiente y más económico; sin embargo, no debe desecharse la posibilidad de construir nuevos pozos para aminorar los efectos negativos de la sobreexplotación.

Se recomienda la captación de agua de lluvia, incluso en las zonas marcadas con un valor bajo o muy bajo del indicador IPHRAS, este recurso puede usarse en diversos sectores, de ser necesario puede someterse a un tratamiento y ser incluido como parte del consumo doméstico o destinado a la industria incluso en el riego de áreas verdes.

Las alcaldías de Tlalpan y Milpa Alta debido a su disponibilidad territorial, tienen aún la posibilidad de almacenar importantes cantidades de agua en ollas a través de la captación de agua de lluvia, este recurso puede emplearse en el riego de los cultivos que en algunas partes de estas entidades aún se lleva a cabo.

En cualquiera de los escenarios que aquí se presentan, se advierte la necesidad de llevar a cabo estudios más precisos y detallados sobre el área de interés; visitas de campo y estudios geofísicos que permitan conocer las condiciones actuales resultan indispensables. A continuación, se profundiza un poco sobre los estudios geofísicos que se aconsejan como complemento de este análisis.

Estudios geofísicos

El objetivo de la geofísica se centra en la caracterización de los materiales geológicos del subsuelo a partir de la medición de algunas de sus propiedades físicas como la resistividad eléctrica, variaciones locales del campo magnético terrestre, cambios en la magnitud de la aceleración de la gravedad (influida por el espesor y densidad de las rocas ubicadas a bajo del punto de medición) y variaciones en la velocidad a la cual se transmiten las ondas sonoras en los estratos del subsuelo (Price, 2007). De acuerdo con Larsen (1985), en el estudio de cuerpos acuíferos, estas propiedades dependen; entre otros factores, del grado de fracturación, el modo de formación de aguas y la cantidad de sales en disolución

En el estudio de las aguas subterráneas, los métodos geofísicos se centran en la caracterización de la porosidad y permeabilidad de las capas del subsuelo (Astier, 1982); las prospecciones más usadas para este fin son la eléctrica y sísmica. A continuación, se describen brevemente estas técnicas:

Métodos de resistividad eléctrica:

Es la técnica terrestre más empleada en el estudio de agua subterránea; se basa en la introducción de una corriente eléctrica al interior de la tierra y la caracterización de la distribución de los potenciales a través de un par de electrodos insertados en la tierra y conectados a un voltímetro sensible. Las heterogeneidades en los elementos del subsuelo, desvían las corrientes y distorsionan estos potenciales de acuerdo con su grado de conductividad eléctrica. A partir de esta medición de diferencia de potencial, es posible calcular el valor de la resistividad en un punto medio del dispositivo y a una profundidad conocida, lo cual permite identificar la estructura o el material geológico en cuestión.

La resistividad eléctrica de las rocas y minerales es una propiedad muy variable que depende de una serie de factores. La resistividad in situ de las rocas cristalinas depende en gran medida de la cantidad de agua que posean las fracturas y fisuras presentes. De manera similar, la resistividad en rocas arenosas y rocas calizas depende de factores como la porosidad, el grado de saturación y la naturaleza de sus poros electrolitos.

De acuerdo con Larsson (1985), las fracturas acuíferas en rocas duras generalmente resultan mejores conductores eléctricos que las rocas circundantes y pueden ser detectadas gracias a la creación de mapas eléctricos. La técnica resulta sencilla si los terrenos que sirven

de recubrimiento son uniformes y bastante resistivos desde el punto de vista eléctrico; sin embargo, raramente ocurre esto.

Variaciones en la resistividad de un área pueden interpretarse como límites de un acuífero o cambios en la calidad del agua subterránea. Los Sondeos Eléctricos Verticales pueden indicar la presencia de acuíferos, profundidad del nivel estático, salinidad, formaciones impermeables y profundidad del basamento (Todd & Mays, 2005).

A pesar de la efectividad de los sondeos 2D, no pueden negarse las ventajas de la caracterización en 3D que ofrece la Tomografía de Resistividad Eléctrica; el método de adquisición es prácticamente el mismo con la única variación de la disposición electródica, de rejilla cuadrada o en líneas paralelas. Sus aplicaciones en la hidrogeología van desde la localización de fuentes de abastecimiento hasta la caracterización de plumas contaminantes, etc.

Como limitante del método, nos encontramos que cualquier factor que altere el campo eléctrico en las vecindades de los electrodos invalidará las lecturas de resistividad. Estos pueden incluir heterogeneidades geológicas laterales, tuberías subterráneas, cables y cercas metálicas.

Métodos sísmicos:

El método de refracción sísmica se basa en la generación de ondas sísmicas en superficie a través de pequeñas explosiones o el golpe de un martillo; posteriormente se mide el tiempo requerido para que estas ondas sonoras viajen distancias conocidas, las cuales son detectadas con la ayuda de sensores llamados geófonos.

Las ondas sísmicas siguen las mismas leyes de propagación que los rayos de luz, por lo que pueden ser reflejadas o refractadas en cada interface en donde ocurra un cambio de velocidad. La sísmica de reflexión provee información de estructuras geológicas a miles de metros por debajo de la superficie, mientras que, los métodos de sísmica de refracción se limitan alrededor de cien metros de profundidad, ideales para el estudio de agua subterránea.

El tiempo de viaje de una onda sísmica dependerá del medio por el cual atraviese, esta será más grande en rocas ígneas y menor en materiales no consolidados. De manera similar que con las resistividades en la prospección eléctrica, las velocidades de propagación de las ondas sísmicas se encuentran asociadas a materiales geológicos, lo cual permite su identificación.

Los cambios en la velocidad de las ondas sísmicas se encuentran gobernados por los cambios elásticos en las propiedades de las formaciones. Entre más grandes son los contrastes de estas propiedades, resulta más clara la identificación de las formaciones y sus fronteras. En rocas sedimentarias, la textura y la historia geológica son más importantes que

la composición mineral. La porosidad tiende a disminuir la velocidad de las ondas mientras que el agua la incrementa (Todd, 2005).

En el estudio del agua subterránea, este método permite la identificación de fracturas a través de la elaboración de mapas mediante la determinación de las velocidades de las ondas sísmicas a lo largo de perfiles en el área de interés. Si la fracturación en una zona ancha es muy intensa, la zona se transforma en una forma homogénea o casi homogénea, con propiedades físicas características. Por ejemplo, la velocidad de las ondas sísmicas en zonas como ésta es generalmente menor en comparación con la velocidad en rocas duras no alteradas.

Determinar la presencia de agua subterránea a través de este método puede resultar un proceso difícil si no se cuenta con información adicional, ya que de manera general, la velocidad de las ondas sísmicas en zonas saturadas y no saturadas suele traslaparse. Las velocidades sísmicas deben incrementarse con la profundidad para obtener resultados favorables; como resultado, una capa densa sobre un acuífero no consolidado puede ocultar la presencia de este último.

Dentro de sus limitaciones se encuentran que no se adapta fácilmente en áreas pequeñas pues se necesitan distancias mínimas de unos cientos de metros para los perfiles sísmicos. El ruido local o las vibraciones provenientes del tránsito en carreteras, aeropuertos o zonas de construcción interfieren con la adquisición de los datos. Es un método caro y consume más tiempo que los métodos eléctricos y electromagnéticos. Se ha aplicado de manera limitada en el estudio de agua subterránea, sobre todo en la determinación de variaciones en el espesor de acuíferos libres.

A pesar de que los métodos sísmicos y eléctricos son los más usados para el estudio de las aguas subterráneas, los métodos magnéticos y gravimétricos también pueden usarse en casos más particulares, principalmente en acuíferos en rocas duras como se describe a continuación.

Mediciones magnéticas:

El método magnético se basa en la detección de anomalías debido a la desviación del flujo magnético terrestre. El vector de densidad de flujo magnético terrestre está definido en cualquier punto por sus elementos: la intensidad horizontal (H), la declinación D de (H) al este u oeste del norte verdadero, y la intensidad vertical Z. La desviación de H, Z, D o T (campo total) de sus valores normales en el área, se conocen como anomalías y su nomenclatura es ΔH , ΔZ , ΔD , ΔT respectivamente.

En el estudio del agua subterránea, suelen buscarse variaciones en la intensidad de magnetización de las rocas; lo anterior se debe a que los sistemas de fracturas o fisuras en zonas de rocas duras suelen estar relacionados con la ocurrencia de fallas de intrusión en la roca madre. La intensidad de magnetización de algunos tipos de fallas diferirá

considerablemente de la magnetización de las rocas que la rodean, generando anomalías en el campo geomagnético local y la intensidad del campo terrestre puede sufrir considerables cambios localmente. Dependiendo del comportamiento de la falla y la dirección de magnetización de la roca que la rodea, el cambio será bien un aumento o una disminución de la intensidad magnética normal del área (Larsson, 1985).

Métodos gravitatorios:

Este método mide las diferencias de densidad en la superficie de la Tierra lo que puede indicar la presencia de estructuras geológicas. En el estudio de aguas subterráneas, la densidad media de zonas anchas de rocas fracturadas es menor que la de la zona de rocas compactas, por lo que producen un descenso local en la atracción gravitacional de la Tierra. Se necesitan instrumentos muy sensibles (gravímetros) para detectar este descenso que, en general, puede ser del orden de una fracción de parte entre un millón (Larsson, 1985).

Es un método costoso que solo puede usarse bajo condiciones geológicas especiales, además, de que pueden ser necesarias múltiples correcciones debido a la altitud, latitud y variaciones laterales en la densidad del terreno para no enmascarar las anomalías producidas por las zonas de fracturas subyacentes.

Recursos para la recarga

La disponibilidad del recurso a recargar es un factor imprescindible en un proyecto de esta naturaleza; deben considerarse no solo la localización de los puntos de toma y el caudal, sino también, otros elementos como la distribución espacial y temporal de este así como su calidad. A continuación, se sugieren algunas fuentes viables en la zona de estudio:

- **Captación de agua de lluvia**

Es probablemente una de las alternativas más sustentables y económicas para mejorar la situación hídrica del país. Esta técnica puede implementarse prácticamente en toda el área de estudio si se realizan las adaptaciones pertinentes tanto de recolectores como de filtros según las condiciones particulares de cada región.

El agua pluvial posee una calidad relativamente buena; sin embargo, adquiere muchos contaminantes al escurrir sobre los techos de casas y edificios, ya que puede contaminarse con metales pesados, coliformes totales y fecales producto del excremento depositado por roedores, aves y otros animales. En las ciudades altamente pobladas como la Ciudad de México, la calidad del aire puede contaminar el agua con elementos como nitrógeno, oxígeno

y en menor cantidad gases como el dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre. Los desechos tóxicos, la basura y los hidrocarburos son otra fuente de contaminación constante. Por consiguiente, es necesario que el agua pluvial atraviese varios filtros y su uso se destine preferentemente a tareas de limpieza y riego ya que para que pueda ser apta para el consumo humano es necesario someterla a otro tipo de procesos como son los rayos ultravioletas o la purificación por ozono. (Serrano, 2014).

En campo abierto, el agua puede recolectarse a través de ollas de captación de grandes dimensiones o a través de sistemas de represas y zanjas en laderas y colinas, que pueden ser destinadas a otro proceso de recarga como los estanques de infiltración o ser aprovechados para el riego de cultivo o la ganadería.

- **Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales**

Como se mencionó en la construcción de indicador para los acuíferos confinados, las plantas de tratamiento de aguas residuales representa un volumen importante de agua que puede aprovecharse para recargar los acuíferos de los que se abastece la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

En conjunto, los estados de Morelos, México y la Ciudad de México, cuentan con 199 de estas plantas, en las que procesan 10,060.74 l/s. Un 7% de este caudal es liberado en barrancas y colectores, el cual podría ser usado en proyectos de recarga artificial.

De manera específica, dentro de la zona de estudio se identificaron cinco plantas de tratamiento que procesan 739.2 l/s de agua de los cuales, existe la posibilidad de aprovechar un caudal de hasta 44 l/s que actualmente se vierte en barrancas o colectores. Además de estas plantas, se identificaron por lo menos siete plantas que se encuentran a menos de cinco kilómetros de la zona de estudio y que representan también una fuente atractiva para el proyecto.

7 Conclusiones

La construcción del índice del potencial hidrogeológico para la recarga de agua subterránea en el sur de la Cuenca de México, delimitó a la región nor-poniente del municipio de Huitzilac en el estado de Morelos y al oriente de los municipios de Ocuilan, Tianguistenco y Xalatlaco en el Estado de México, como zonas con una alta factibilidad para la recarga de acuíferos libres.

En estas zonas se propone la instalación de estanques de percolación, en los que se retiene un volumen de agua significativo, el cual puede provenir de la desviación de una corriente superficial o ser dispuesto de manera intencional hasta este sitio, con el propósito de favorecer el proceso natural de infiltración desde la base permeable de la estructura y hasta la zona saturada del acuífero.

Si bien, la zona de estudio no cuenta con un gran número de corrientes permanentes de agua, puede aprovecharse el escurrimiento ocasional a través de la construcción de surcos y represas en las laderas de los sistemas montañosos; de esta manera, aunque el volumen infiltrado probablemente no alcance el almacenamiento regional del acuífero, puede mejorar las condiciones de humedad del terreno disminuyendo así la tasa de erosión del mismo.

Existen otras tecnologías que pueden ponerse en práctica en zonas susceptibles a la recarga a través de la infiltración, pero que requieren la participación activa de la comunidad para su correcto funcionamiento, ya sea respetando las restricciones en el uso de suelo o en el mantenimiento de la obra; algunos ejemplos son la inundación controlada y la recarga por riego en donde debe cuidarse la presencia de vegetación, cultivos, agroquímicos y niveles de sal en el suelo, entre otros.

Por su parte, el acuífero confinado de la Ciudad de México presenta las mejores condiciones para la recarga a través de pozos al poniente de la alcaldía de Tlalpan y al sur de la Magdalena Contreras. Hacia el sur de Xochimilco se encontró una pequeña porción con un índice muy alto, en las inmediaciones de la carretera a Santa Cecilia.

Las técnicas MAR que pueden implementarse en estas zonas son la recarga a través de pozos en sus variantes ASR (*Aquifer Storage and Recovery*) y ASTR (*Aquifer Storage, Transport and Recovery*) en donde el agua se inyecta de manera directa en capas de mayor permeabilidad en comparación con las capas confinantes. Se propone la utilización de la infraestructura existente e incluso la adaptación de pozos actualmente en desuso para reducir los costos económicos del proyecto.

La captación de agua de lluvia se presenta como una opción sustentable y económica para suplir la demanda del recurso tanto para su uso directo como para la recarga. Puede recolectarse en casi todos los tipos de uso de suelo, desde la zona urbana a través de recolectores en los techos de edificios y casas, hasta en zonas rurales con el uso de ollas de agua; de ser necesario puede ser sometida a procesos de purificación para asegurar su calidad.

La construcción del Índice del Potencial Hidrogeológico para la Recarga de Agua Subterránea (IPHRAS) ofrece la delimitación de las zonas más favorables y tecnologías apropiadas para llevar a cabo un proyecto de esta índole. La metodología resulta una herramienta efectiva y económica para la evaluación de regiones extensas; sin embargo, se insiste en la necesidad de un análisis más detallado de manera local.

El siguiente paso que se propone, es el estudio particular de las regiones que obtuvieron la calificación de alta o muy alta dentro de este análisis; se sugiere la implementación de técnicas geofísicas como la tomografía eléctrica resistiva o la sísmica de refracción para caracterizar o definir los sistemas de fracturas y la porosidad de las capas; elementos que definen la presencia de agua subterránea, principalmente en acuíferos en rocas duras como el de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

De manera adicional, se sugiere la integración de estudios climatológicos, distribución espacial y temporal de los recursos subterráneos y en superficie, hidroquímica y calidad del agua, velocidad del agua subterránea y direcciones preferenciales de flujo, usos demanda y consumos de agua de manera local. Afortunadamente, la Ciudad de México cuenta con una amplia base de estos datos lo que representa una ventaja considerable con otras partes del país.

Finalmente, se presenta este indicador como parte de una estrategia para mejorar la situación hídrica del Valle de México, este puede usarse como herramienta para la concientización sobre la importancia de cuidar las zonas naturales que favorecen la recarga de nuestros acuíferos. Este plan se complementa con la participación activa de la sociedad y gobierno a través de acciones concretas como la reducción de fugas en el sistema de distribución, fomentar un consumo responsable del recurso haciendo especial énfasis en el reúso de este e implementar la captación de agua de lluvia a gran escala.

Referencias

- Astier, J. L. (1982). *Geofísica aplicada a la hidrogeología* (2ª ed.). Madrid: Paraninfo
- Chuvienco, E. (2009). *Fundamentals of satellite remote sensing: An Environmental Approach*. (2ª ed.). CRC press.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018 -A, 4 enero). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuautla- Yautepec (1702), Estado de Morelos. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103146/DR_1702.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018 -B, 4 enero). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuernavaca (1701), Estado de Morelos. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103145/DR_1701.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018 -C, 4 enero). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tenancingo (1504), Estado de México. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103135/DR_1504.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018 -D, 4 enero). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501), Estado de México. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103132/DR_1501.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018 -E, 4 enero). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901), Distrito Federal. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102942/DR_0901.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018-F). *Estadísticas del Agua en México*, Edición 2018. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019-A). *Censo de aprovechamientos de agua subterránea, Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019-B). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas* [PDF] [XLS]. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperados de https://files.conagua.gob.mx/transparencia/inventario_nacional_plantas.zip
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2019). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad/ Climatología/ Precipitación y evapotranspiración media anual* [SHP]. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Comité de Academias para el Suministro de Agua de la Ciudad de México. (1995). *El suministro de agua de la Ciudad de México, Mejorando la sustentabilidad*. Washington D.C., Estados Unidos de Norteamérica.

- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 2). Barcelona: Omega.
- Dillon, P. J., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., & Ward, J. (2009). Managed aquifer recharge: An introduction. *Waterlines report series*, 13. Australia: National Water Commission.
- Durazo, J. (1996). Ciudad de México. Acuitardo superficial y contaminación acuífera. *Ingeniería Hidráulica en México*, 11 (2), 5-14.
- Escolero, O., Gutiérrez C. & Mendoza E. Y. (Eds.). (2017). *Manejo de la recarga de acuíferos: Un enfoque hacia Latinoamérica*. México: Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua
- Earth Explorer USGS. (29/01/2019). LC08_L1TP_026047_29012019_2019. [gz, zip]. United States Geological Survey. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/> (septiembre, 2019)
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4ª ed.). Prentice Hall.
- González, F. J., Mendoza A. & Arriaga J. A. (2017). *Memorias del taller: Recarga artificial del acuífero del Valle de México, 8 de Junio de 2017*. México: Instituto de Ingeniería UNAM: Red del Agua. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/10/Memoria_Taller-recarga-artificial-acuifero-valle-de-mexico.pdf
- Hiscock, K. M. y Bense V. F. (2014). *Hydrogeology: Principles and Practice*, (2ª ed.) John Wiley & Sons.
- Hernández-Espriú, A., Reyna-Gutiérrez, J. A., Sánchez-León, E., Cabral-Cano, E., Carrera-Hernández, J., Martínez-Santos, P., ... & Colombo, D. (2014). The DRASTIC-Sg model: an extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subject to differential land subsidence, with application to Mexico City. *Hydrogeology Journal*, 22(6), 1469-1485.
- Horton, R.E. (1941), An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity 1. *Soil Science Society of America journal*, 5(c), 399-417.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1984). Carta Geológica Villa Milpa Alta, E14A49, escala 1:50,000 [PDF]. Recuperada de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825640774>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Carta Topográfica Villa Milpa Alta, E14A49, escala 1:50,000 [GeoPDF]. Recuperada <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825206307>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica. Serie III, Milpa Alta. [SHP] Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825268794>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. [PDF] Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825006792.pdf
- Jiménez, B., Marín, L., Morán, D., Fuentes, O. A. E., Alcocer, J., & Martínez, V. H. (Eds.). (2004). *El agua en México vista desde la academia* (p. 430). México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Kallali, H., Anane, M., Jellali, S., & Tarhouni, J. (2007). GIS-based multi-criteria analysis for potential wastewater aquifer recharge sites. *Desalination*, 215(1-3), 111-119.
- Keith T. D. & W. M. L. (2005). *Groundwater Hydrology*, (3ª ed.) John Wiley & Sons.

- Korenfeld D. & Hernández O. J. (2011). Proyecto de planta piloto de tratamiento avanzado para la recarga artificial del acuífero. *Revista Digital Universitaria*, 12 (2) recuperado de <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art13/index.html> ISSN: 1607-6079.
- Krishnamurthy, J., Mani, A., Jayaraman, V., & Manivel, M. (2000). Groundwater resources development in hard rock terrain-an approach using remote sensing and GIS techniques. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2(3-4), 204-215.
- Larsson, I. (1985). *Aguas Subterráneas en rocas duras: Proyecto 8.6 del programa Hidrológico Internacional*. Unesco
- Lavender, S., & Lavender, A. (2015). *Practical handbook of remote sensing*. CRC Press.
- Lugo-Hubp, J. (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada: Métodos Cartográficos*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía, México.
- Martin del Pozzo, A.L. (1982). Monogenetic vulcanism in sierra Chichinautzin, Mexico. *Bulletin Volcanologique*, 45(1), 9.
- Mendoza, E. (2017). Clasificación de Tecnologías MAR. En Escolero, O., Gutiérrez C. & Mendoza E. Y. (Eds.), *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 81-96). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Mexicano, S. G. (2019). Léxico Estratigráfico de México. Servicio Geológico de México, Secretaría de Economía, México. Recuperado de https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/
- Mooser, f., Nairn, A.E., y Negendank, J.F. (1974). Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary ingenous rocks: VIII A paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico. *Geologische Rundschau*, 63(2), 451-483.
- NRMMC, EPHC & AHMC. (2009). *Australian Guidelines for Water Recycling, Managed Aquifer Recharge*. Natural Resource Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and Australian Health Ministers.
- Oficina de Estudios Especiales de la CHCVM-SRH (OEE-SRH) (1970). *Los acuíferos del Alto Lerma*, Pub. No. 7
- Price, M. (2007). *Agua subterránea*. México: Limusa Noriega Editores.
- Rahman, M. A., Rusteberg, B., Gogu, R. C., Ferreira, J. L., & Sauter, M. (2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of environmental management*, 99, 61-75.
- Saraf, A.K. y Choudhury P.R. (1998). Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *International Journal of Remote Sensing*, 19(10), 1825-1841.
- Schwartz, F. W., & Zhang, H. (2004). *Fundamentals of ground water*. John Wiley and sons.
- Şen, Z. (2015). *Practical and applied hydrogeology*. Amsterdam: Elsevier
- Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 115-124.
- Serrano, S. (2014, abril-junio). Aprovechar el agua de lluvia: doble solución. *Impluvium*, Recuperado de <http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero01.pdf>

- Shaban, A., Khawlie M. y Abdallah C. (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14, 433-443
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). (2012). *El gran reto del agua en la Ciudad de México: Pasado, presente y perspectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo*. México.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater hydrology*. (Third edition). Welly Inte.
- Vázquez-Sánchez, E. & Jaimes-Palomera, L.R. (1989). Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, *Revista de la Unión Geofísica Mexicana*. 28 (2), 133-190.
- Verma, S. P., & Tapia, F. V. (2001). Estado actual de la investigación geoquímica en el campo monogenético de la Sierra de Chichinautzin: análisis de información y perspectivas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(1), 1-36.
- White S. E. (1990). *El Ajusco: geomorfología volcánica y acontecimientos glaciales durante el Pleistoceno superior y comparación con las series glaciales mexicanas y las de las Montañas Rocallosas.*, colección científica, serie arqueológica. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia,
- Yeh, H.F., Lee C.H., Hsu K.C. & Chang P.H. (2009) GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environ Geol*, (58), 185-95.
- Yeh, H. F., Cheng, Y. S., Lin, H. I., & Lee, C. H. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*, 26(1), 33-43.
- Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., & Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920-932.
- Younger, P. L. (2007). *Groundwater in the environment: an introduction*. Blackwell publishing