

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE ZONAS DE RECARGA ACUÍFERA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CIUDAD DE MÉXICO

Mayo 2020



Fomentado por el:
Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear

en virtud de una resolución del Parlamento de la República Federal de Alemania

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE ZONAS DE RECARGA ACUÍFERA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CDMX

Este estudio fue cofinanciado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco de La Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua, una iniciativa conjunta entre BID, Fundación FEMSA, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), The Nature Conservancy (TNC) y la Iniciativa de Internacional de Protección del Clima (IKI). Las opiniones expresadas en esta investigación son las de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del BID, FMAM, IKI, BMU, su Junta Directiva o los países que representan países a los que representan.

Estudio contratado por The Nature Conservancy a la empresa Moro Ingeniería, S.C., a través del contrato número C-MX-060619Moro (2.1.5.1)

Cita:

Morales-Escalante R., Borja-Martínez A., Mares-Tepanhaya R. U. (2020). Estudio Hidrogeológico de Zonas de Recarga Acuífera para el Abastecimiento de Agua a la Ciudad de México. México. Moro Ingeniería S.C.-The Nature Conservancy.

Agradecimientos:

Para la realización de este estudio fue muy importante la información proporcionada por los organismos operadores de agua de las entidades federativas involucradas, quienes proporcionaron no sólo información documental sino experiencias de gran valor, este es el caso del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, de la Comisión del Agua del Estado de México, de la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo y del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Muy importantes fueron también las aportaciones y opiniones que se tuvieron del M. en C. Martín Quijano Poumián y del Ing. Juan Manuel Lesser Illades.

Finalmente, queremos agradecer la relevante participación de la Bióloga Hilda Hesselbach Moreno y del Dr. Francisco Reyna Sáenz, quienes en la supervisión del estudio aportaron importantes observaciones, que permitieron que este documento alcanzara una elevada calidad técnica y se tuvieran aportaciones significativas, en lo relativo a la problemática que enfrenta la Cuenca de México, con relación a la localización y protección de sus zonas de recarga.


Fotografía de cubierta: Rainier Uriel Mares Tepanhaya, 2019.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE ZONAS DE RECARGA ACUÍFERA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CDMX

CONTENIDO GENERAL

1. RESUMEN EJECUTIVO	8
2. INTRODUCCIÓN	11
2.1. Objetivo del estudio.....	12
2.2. Alcances	13
2.3. Delimitación del área de estudio	13
3. METODOLOGÍA	20
3.1. Marco geológico e hidrogeología de la Cuenca de México.....	20
3.1.1 Marco geológico.....	21
3.1.2 Marco hidrogeológico.....	28
3.2. Variables de evaluación para el estudio de la recarga al acuífero	44
3.2.1 Selección y análisis de variables.....	45
3.2.2.1 Respuesta del medio a la infiltración (Geología y características litológicas)	45
3.2.2.2 Condición hidrológica de suelo.....	48
3.2.2.3 Vigor de la vegetación.....	51
3.2.2.4 Pendiente del terreno.....	53
3.2.2.5 Precipitación	55
3.2.2.6 Continuidad lateral de los materiales permeables	58
3.2.2.7 Ponderación de variables para evaluar la recarga de acuíferos	61
3.3. Clasificación de la potencialidad de las zonas de recarga identificadas	73
3.4. Cambio climático.....	77
3.5. Pérdida potencial de recarga por cambios de uso del suelo.....	90
4. RESULTADOS.....	98
4.1. Potencial de recarga	98
4.2. Validación de la potencialidad de las zonas de recarga	114
4.3. Cambios esperados en la recarga por efecto del cambio climático	122
4.4. Análisis de la pérdida de potencial de recarga por cambios de suelo.....	131
5. RECOMENDACIONES	137
5.1. Áreas clave de actuación de Agua Capital para mantener y mejorar los procesos de recarga	137
5.2. Portafolio de acciones.....	141



Fomentado por el:
 Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear
en virtud de una resolución del Parlamento de la República Federal de Alemania

5.3. Propuestas de monitoreo	157
5.4. Cómo mejorar el conocimiento sobre los procesos de recarga	161
6. REFERENCIAS	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Agrupaciones del tipo de suelo según el USDA, para determinar el grupo hidrológico de suelo.....	49
Tabla 3.2. Escala de preferencias del método AHP según Saaty	63
Tabla 3.3. Evaluación de la importancia de las variables utilizadas en el proceso de recarga ...	63
Tabla 3.4. Ponderación de las variables generales para la delimitación de zonas de recarga ...	66
Tabla 3.5. Evaluación de los elementos de la variable condición hidrológica del suelo	66
Tabla 3.6. Evaluación de los elementos de la variable respuesta del medio a la infiltración	66
Tabla 3.7. Evaluación de los elementos de la variable pendiente del terreno	67
Tabla 3.8. Evaluación de los elementos de la variable vigor de la vegetación	67
Tabla 3.9. Evaluación de los elementos de la variable precipitación.....	67
Tabla 3.10. Clasificación y características de las zonas de recarga que en el subsuelo tienen continuidad lateral	75
Tabla 3.11. Clasificación y características de las zonas de recarga que en el subsuelo no tienen continuidad lateral	75
Tabla 3.12. Escenarios en términos de forzamiento radiativo.....	77
Tabla 3.13. Datos estadísticos de años con valores de precipitación de las estaciones meteorológicas	78
Tabla 3.14. Modelos de circulación general (MCG) utilizados para México	81
Tabla 3.15. Valores promedio de los modelos en el escenario 8.5 para el periodo 2045-2069..	85
Tabla 3.16. Reclasificación para los datos de la carta de uso de suelo	93
Tabla 3.17. Matriz de cambio de uso de suelo ocurrido en el período 2011-2014	96
Tabla 3.18. Valores de cambio de suelo obtenidos	97
Tabla 4.1. Distribución de las zonas de recarga por acuífero	108
Tabla 4.2. Distribución de las zonas de recarga por Estado	111
Tabla 4.3. Superficies cubiertas por las zonas de recarga con superficie mayor a 0.25 ha	122
Tabla 4.4. Cambio en la cantidad de agua disponible para infiltración por escenario	124
Tabla 4.5. Promedio anual de agua disponible para infiltración, histórico y en los dos escenarios.....	125
Tabla 4.6. Cambio en la cantidad de agua disponible para infiltración por escenario en los acuíferos de la zona de estudio.....	126
Tabla 4.7. Rangos de precipitación por decil.....	129
Tabla 4.8. Disponibilidad de agua para infiltración según el decil.....	129
Tabla 4.9. Resultados del modelo de cambio de uso de suelo	132

Tabla 4.10. Agua disponible por cambios de uso de suelo y cambio climático	135
Tabla 4.11. Porcentaje de pérdida del volumen de agua disponible para infiltración por cambios de uso de suelo y cambio climático	135
Tabla 4.12. Disminución de superficie agrícola conforme al potencial de recarga	135
Tabla 5.1. Medidas y acciones de conservación generales para las zonas de recarga muy alta, alta, media y media o de flujo discontinuo	142
Tabla 5.2. Medidas y acciones de conservación particulares para las zonas de recarga muy alta, alta, media y medio o de flujo discontinuo	143
Tabla 5.3. Otras medidas y acciones de conservación de competencia gubernamental.....	145
Tabla 5.4. Propuestas de monitoreo.....	158
Tabla 5.5. Propuestas de monitoreo relacionadas con hidrogeología.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Comparación entre el límite de la cuenca en el trabajo de ININSA (1986), y el límite de los acuíferos de la CONAGUA.....	14
Figura 2.2. Comparación entre el límite de la cuenca en el trabajo de González Torres (2015), y el límite de los acuíferos de la CONAGUA	15
Figura 2.3. Comparación entre el límite de la cuenca en el trabajo de Arce et al. (2019), y el límite de acuíferos de la CONAGUA.....	16
Figura 2.4. Áreas urbanas clasificadas como zonas de no recarga	18
Figura 2.5. Delimitación del área de estudio utilizando los límites administrativos de los acuíferos de la CONAGUA.....	20
Figura 3.1. Límite del área de estudio, acuíferos y entidades federativas que están incluidas...21	
Figura 3.2. Configuración de profundidad del nivel estático en el Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	31
Figura 3.3. Configuración de elevación del nivel estático para el Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	32
Figura 3.4. Configuración de sólidos totales disueltos en la Zona Metropolitana Ciudad de México.....	33
Figura 3.5. Configuración de profundidad del nivel estático para el Acuífero Chalco-Amecameca	35
Figura 3.6. Configuración de elevación del nivel estático para el Acuífero Chalco-Amecameca	36
Figura 3.7. Configuración de sólidos totales disueltos para el Acuífero Chalco-Amecameca.....	37
Figura 3.8. Configuración de profundidad del nivel estático para el Acuífero Texcoco	39
Figura 3.9. Configuración de elevación del nivel estático para el Acuífero Texcoco	40
Figura 3.10. Configuración de sólidos totales disueltos Acuífero Texcoco.....	41

Figura 3.11. Configuración de profundidad del nivel estático, Acuífero Cuautitlán-Pachuca	43
Figura 3.12. Configuración de elevación del nivel estático, Acuífero Cuautitlán-Pachuca.....	43
Figura 3.13. Configuración de sólidos totales disueltos, Acuífero Cuautitlán-Pachuca	44
Figura 3.14. Mapa con los materiales clasificados en función de su respuesta a la infiltración..	47
Figura 3.15. Mapa con la distribución de los grupos hidrológicos de suelo que corresponden a la edafología de México	50
Figura 3.16. Mapa de vigor de la vegetación	52
Figura 3.17. Forma en la pendiente incide sobre el coeficiente de escorrentía.....	53
Figura 3.18. Mapa de rangos de pendiente en el área de estudio	54
Figura 3.19. Localización de estaciones meteorológicas	55
Figura 3.20. Mapa con la zonificación de la precipitación	57
Figura 3.21. Localización de los manantiales en la zona de estudio.....	59
Figura 3.22. Sección geológica que muestra la falta de continuidad litológica e hidráulica de los materiales volcánicos en la Sierra de Las Cruces	60
Figura 3.23. Mapa con la localización de las unidades litológicas en función de su continuidad	60
Figura 3.24. Esquema del método seguido para definir las zonas de recarga y su ponderación	61
Figura 3.25. Mapa de la condición hidrológica del suelo, resultado de la ponderación	68
Figura 3.26. Mapa de la respuesta del medio a la infiltración, resultado de la ponderación.....	69
Figura 3.27. Mapa de la pendiente del terreno, resultado de la ponderación.....	70
Figura 3.28. Mapa del vigor de la vegetación, resultado de la ponderación.....	71
Figura 3.29. Mapa de la zonificación por precipitación, resultado de la ponderación.....	72
Figura 3.30. Mapa con las zonas de recarga para el área de estudio.....	76
Figura 3.31. Número de años con información por cada estación meteorológica	78
Figura 3.32. Ubicación de las estaciones meteorológicas de CONAGUA utilizadas para el análisis de cambio en la disponibilidad de agua para ser infiltrada por efecto del cambio climático	79
Figura 3.33. Mapa de precipitación histórica para el mes de mayo a partir de la información de las estaciones meteorológicas.....	80
Figura 3.34. Información de desviación de la precipitación conforme al modelo CNRMC-M5 con RPC de 8.5 para dos periodos	82
Figura 3.35. Diagrama de procesamiento de los modelos de cambio climático	83
Figura 3.36. Comparativo de las desviaciones en mm (precipitación) que cada modelo presenta para el mes de junio (periodo 2045-2069)	84
Figura 3.37. Mapa de los cambios de precipitaciones en México y Centroamérica	85

Figura 3.38. Diagrama de procesamiento de los modelos y los datos de precipitación de las estaciones	86
Figura 3.39. Precipitaciones del escenario 2045-2069	86
Figura 3.40. Entrada y salida de agua al sistema con base en la precipitación	87
Figura 3.41. Metodología de análisis para determinar la pérdida de potencial de recarga por cambios de uso de suelo	90
Figura 3.41. Mapa de cambios de uso del suelo para el periodo 2011-2014	95
Figura 4.1. Distribución de las zonas de recarga con potencialidad muy alta y alta.....	100
Figura 4.2. Distribución de las zonas de recarga de potencialidad media y baja	102
Figura 4.3. Distribución de las zonas de recarga de potencialidad media o de flujo discontinuo y baja a media o de flujo discontinuo.....	104
Figura 4.4. Distribución de las zonas de recarga de potencialidad baja o de flujo discontinuo y muy baja a nula	106
Figura 4.5. Distribución de las zonas urbanas en donde no hay recarga a los acuíferos	107
Figura 4.6. Distribución de las zonas de recarga en el Acuífero Cuautitlán-Pachuca	109
Figura 4.7. Distribución de las zonas de recarga en el Acuífero Chalco-Amecameca	109
Figura 4.8. Distribución de las zonas de recarga en el Acuífero Texcoco.....	110
Figura 4.9. Distribución de las zonas de recarga en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	110
Figura 4.10. Distribución de las zonas de recarga en el Estado de Hidalgo, dentro de la zona de estudio	112
Figura 4.11. Distribución de las zonas de recarga en el Estado de México, dentro de la zona de estudio	112
Figura 4.12. Distribución de las zonas de recarga en la Ciudad de México	113
Figura 4.13. Zonas de recarga, con la configuración de elevación del nivel estático para el año 2011	116
Figura 4.14. Zonas de recarga, con la evolución del nivel estático por pozo para el periodo 2010-2011	118
Figura 4.15. Localización de manantiales cartografiados por el INEGI y SACMEX con las zonas de recarga	121
Figura 4.16. Distribución de las zonas de recarga con base en su potencial de recarga	123
Figura 4.17. Disponibilidad de agua para infiltración a partir de los datos de las estaciones meteorológicas (histórico)	124
Figura 4.18. Agua disponible para infiltración derivados del modelo de cambio climático 2015-2039	124
Figura 4.19. Agua disponible para infiltración derivados del modelo de cambio climático 2045-2069	125

Figura 4.20. Cambio en el volumen de agua de lluvia disponible para infiltración, por acuífero, por efecto del cambio climático	127
Figura 4.21. Valor promedio anual de variación en la precipitación para el escenario 2045-2069	128
Figura 4.22. Disponibilidad de agua por decil en la zona de recarga de potencialidad alta.....	130
Figura 4.23. Disponibilidad de agua por decil en la zona de potencialidad baja o de flujo discontinuo	130
Figura 4.24. Resultado de los escenarios de cambio de uso del suelo.....	132
Figura 4.25. Uso de suelo para el escenario 2030.....	133
Figura 4.26. Uso de suelo para el escenario 2050.....	134
Figura 4.27. Zonas de recarga vulnerables al crecimiento de la infraestructura	136
Figura 5.1. Distribución geográfica de las zonas de recarga con potencialidad muy alta y alta	138
Figura 5.2. Distribución geográfica de las zonas de recarga con potencialidad media	139
Figura 5.3. Distribución geográfica de las zonas de recarga con potencialidad media o de flujo discontinuo	140
Figura 5.4. Áreas en donde son necesarias las acciones de conservación de los suelos.....	146
Figura 5.5. Áreas en donde se puede mantener el servicio ecosistémico de captación de agua por medio de la conservación de la cobertura vegetal	148
Figura 5.6. Áreas en donde la cobertura vegetal está sometida a la potencial afectación de las zonas urbanas y agrícolas	149
Figura 5.7. Zonas de recarga que serán afectadas por el crecimiento urbano.....	150
Figura 5.8. Condición actual del agua disponible para infiltración.....	153
Figura 5.9. Agua disponible para infiltración escenario al año 2039 y con el crecimiento de las zonas urbanas a los años 2030 y 2050	153
Figura 5.10. Agua disponible para infiltración escenario al año 2069 y con el crecimiento de las zonas urbanas a los años 2030 y 2050	153
Figura 5.11. Sitios con protección en el área de estudio.....	155
Figura 5.12. Zonas agrícolas localizadas sobre zonas de recarga muy alta, alta y media	156
Figura 5.13. Ubicación de pozos para monitoreo aguas abajo de las zonas de recarga.....	161

ANEXOS

Anexo 1. Información recopilada

Anexo 2. Distribución de la información por tema y mapas generados

Anexo 3. Mapas de zonas de recarga, cambio climático y uso de suelo

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE ZONAS DE RECARGA ACUÍFERA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CDMX

1. RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo del estudio está relacionado con la importancia de los procesos hidrogeológico e hidrológico para la conservación de los ecosistemas y sus servicios en gran parte de la Cuenca de México. En consecuencia, este estudio se desarrolló como una herramienta que permita proporcionar información que coadyuve a la toma de decisiones para la aplicación de inversiones del Fondo de Agua y de la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua, que ayuden a la conservación o restauración del proceso ecosistémico del ciclo de agua en la Cuenca de México, específicamente, con la identificación de zonas de recarga de agua subterránea, donde las condiciones hidrogeológicas permiten la recarga natural del acuífero que abastece a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y a otras ciudades y poblaciones localizadas en la cuenca.

La zona de estudio cubre un área aproximada de 8,339 km², comprende a cuatro de los siete acuíferos administrativos delimitados por la CONAGUA que se encuentran dentro de la Cuenca de México, los acuíferos que se incluyeron en el estudio son: Cuautitlán-Pachuca, Texcoco, Zona Metropolitana de la Ciudad de México y Chalco Amecameca, que cubren parcialmente a los estados de Hidalgo, Estado de México y completamente a la Ciudad de México.

Para determinar las zonas de recarga, se realizó un análisis de información relacionada con la condición hidrológica de los suelos, vegetación y uso del suelo, de la pendiente del terreno, de la precipitación en la cuenca, así como de tipo geológico e hidrogeológico, que permitiera identificar el comportamiento de este conjunto de variables para permitir la infiltración del agua de lluvia y posteriormente recargar a los acuíferos que se localizan en la parte baja de la cuenca. Para complementar este conocimiento se analizó el funcionamiento de los acuíferos, considerando las direcciones de flujo del agua subterránea y la salinidad a través de la concentración de sólidos totales disueltos, para de esta forma, identificar de donde proviene el agua que recarga a los acuíferos. Este análisis se realizó con información oficial de diferentes dependencias como el Servicio Geológico Mexicano (SGM), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), Comisión Estatal de Agua del Estado de México (CAEM), Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado de Hidalgo (CEAA), e información de trabajos técnicos y artículos de investigación.

Para el estudio integral de estas variables se utilizó la técnica de análisis multicriterio, que permitió la ponderación de las variables y de los elementos que constituyen a cada una; el resultado fue la generación de mapas temáticos, los cuales al ser intersecados a través del sistema de información geográfico permitieron la generación de un mapa, en el que se identificaron las zonas de recarga divididas con base en su potencialidad para permitir la infiltración del agua de lluvia y la recarga de los acuíferos.

Los resultados mostraron que las zonas con mayor potencialidad de recarga se encuentran al sur de la Cuenca de México, en la Sierra Chichinautzin, en los acuíferos de Chalco-Amecameca y Zona Metropolitana de la Ciudad de México; estas zonas representan el 16% del total del área estudiada; las zonas de potencialidad media y muy baja a nula son las que mayor distribución

tienen en el área de estudio, con el 31 y 26%, respectivamente. Una vez identificadas las zonas de recarga, se analizaron los posibles cambios en la aportación de agua de lluvia por efectos del cambio climático, aspecto relevante ya que la lluvia es la fuente principal de recarga a los acuíferos, aunque no toda esta llega al acuífero debido a las condiciones del terreno donde se precipita. Como resultado de la aplicación de los modelos de cambio climático se obtuvo que para el periodo 2015-2039 el agua disponible para infiltración en la cuenca descendería en un 0.31%, mientras que para el periodo 2045-2069 y también para la cuenca, sería menor en un 15% (estas comparaciones son con relación a la información histórica obtenida de 92 estaciones climatológicas localizadas en la zona de estudio). Los descensos más importantes se presentarán en el norte, en los acuíferos de Cuautitlán-Pachuca y Texcoco, en donde el agua disponible para infiltración se verá reducida en alrededor del 18% para el periodo 2045-2069.

Si a estos cambios climáticos, se agregan los cambios de uso de suelo dentro de la cuenca, considerando sólo el cambio hacia uso urbano, para el 2050 el agua disponible para infiltración podría decrecer en alrededor de un 30%.

Para hacer frente a estas modificaciones producto del cambio climático y uso de suelo, con el fin de contribuir en el tema de la seguridad hídrica en la Cuenca de México, se propuso efectuar acciones para proteger las zonas de potencialidad muy alta, alta, media y media o de flujo discontinuo, que prestan el servicio ecosistémico de recarga al acuífero; destacan las actividades de conservación de suelos y las encaminadas a reducir la velocidad con que se mueve el agua superficial y su capacidad erosiva, estas acciones se propone se lleven a cabo sobre los cauces de los ríos y arroyos y otras sobre la superficie del terreno.

Otra acción encaminada a mantener el servicio ecosistémico de la recarga es a través de la conservación de la cobertura vegetal, en áreas donde la vegetación no tiene un vigor clasificado como alto. En estas zonas es necesario reducir la presión antropogénica, ocasionada por el desarrollo urbano y las actividades agrícolas, a través de estímulos, como el pago por servicios ambientales como una herramienta de política ambiental, para concientizar y ayudar a los propietarios a mantener los servicios ambientales de sus tierras y evitar cambios en el uso del suelo; de igual forma promover ante autoridades y actores relevantes, la adecuación de instrumentos de regulación urbana y ambiental, que garanticen la conservación de áreas con vegetación.

En la zona norte, donde habrá la mayor disminución del agua disponible para infiltración por efecto del cambio climático, es necesario que las acciones estén enfocadas a promover la concientización entre la población respecto a la relevancia de la conservación y/o restauración de las zonas de recarga de potencialidad media, debido a que son las que predominan en esta zona; además de promover con actores gubernamentales el uso de sistemas, obras o tecnología de reúso del agua residual tratada.

Para que estas acciones se lleven a cabo, se necesita la participación de los propietarios de los terrenos donde se encuentran las zonas de recarga, junto con una mejora de la articulación institucional de los tres niveles de gobierno, encaminado al ordenamiento del uso del agua, para disminuir el impacto en la sobreexplotación del acuífero, esto acompañado de la conservación de las áreas relevantes para la infiltración.

El monitoreo es un complemento muy importante a las acciones propuestas, pues permite por una parte establecer las condiciones en que actualmente se encuentran las variables que se van a monitorear como son el suelo, la vegetación, las zonas urbanas, zonas agrícolas, la calidad del agua residual tratada y los cambios que tendrá el acuífero una vez que se realicen las acciones propuestas para mejorar la recarga.

Para mejorar el conocimiento sobre los procesos de recarga, es necesario obtener información en campo, del estado en que se encuentran las variables que fueron utilizadas para la identificación de las zonas de recarga, en particular en las áreas donde se localizan las de potencialidad muy alta, alta y media, para ello se propone generar nuevos mapas hidrogeológicos, generar y analizar nuevas redes de monitoreo piezométrico diseñadas en las áreas próximas a las zonas de recarga, conocer mejor el subsuelo en las zonas más próximas a las zonas de recarga, conocer con más detalle el comportamiento del acuífero y la calidad del agua que contiene, identificar los contaminantes generados por la mancha urbana o las zonas agrícolas y verificar si en las áreas con buena cobertura vegetal los procesos de erosión de suelos no se presentan o se ven atenuados.

En resumen, para mejorar la recarga y el conocimiento sobre los procesos de recarga, es necesario dar continuidad a este estudio, a través de las actividades recomendadas en el portafolio de acciones y a las actividades propuestas, para lo cual se considera fundamental integrar a todos los actores relacionados con la administración, manejo e investigación del agua subterránea en la Cuenca de México y con la búsqueda de fuentes de financiamiento para la ejecución de las acciones descritas.

2. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas a escala nacional que se ha agravado en los últimos años, es el abastecimiento de agua a la población que habita en las grandes ciudades y en las zonas rurales, debido a que en muchas ocasiones no es suficiente para satisfacer las demandas de las actividades humanas que en estas se desarrollan. La Ciudad de México no es ajena a esta situación, y debido a su importante desarrollo económico y crecimiento poblacional en los últimos años ha tenido un incremento en sus requerimientos de agua. En consecuencia, este estudio se desarrolló como una herramienta que permita proporcionar información que coadyuve a la toma de decisiones para la aplicación de inversiones del Fondo de Agua y de la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua, que ayuden a la conservación o restauración del proceso ecosistémico del ciclo de agua en la Cuenca de México, específicamente, con la identificación de zonas de recarga de agua subterránea.

Para cubrir estas demandas, se han realizado acciones que no han resuelto en su totalidad el problema de los usuarios del agua. Si bien se necesita trabajar en varios frentes para mantener la disponibilidad actual y futura de agua para las personas y la naturaleza (incluyendo la eficiencia en el uso sectorial del agua), es claro que la reducción de la brecha entre la oferta y la demanda sólo será posible si se protegen los ecosistemas que son la fuente insustituible de agua, y son, al mismo tiempo, la protección más efectiva ante los embates hidrometeorológicos extremos que se agudizan por efecto del cambio climático.

Por ello, es de primera importancia proteger las zonas por donde se infiltra el agua de lluvia, para que posteriormente llegue al acuífero, así como realizar acciones que en lo posible incrementen el volumen de recarga. De esta forma se podría tal vez reducir el agua proveniente de los trasvases de otras cuencas.

Esto es lo que busca el presente estudio; identificar las zonas en donde de forma natural se está recargando el acuífero, proponer que se preserven a través de medidas de protección y establecer el tipo de estudios de detalle que permitan diseñar acciones que incrementen la cantidad y calidad del agua que se infiltra. Esto en el marco de los trabajos del Fondo del agua y de la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua, que impulsan mecanismos financieros para alcanzar y mantener la seguridad hídrica con soluciones basadas en la naturaleza.

Para dar inicio con esta actividad, se realizó un análisis bibliográfico aplicado al estudio de las características naturales de la Cuenca de México, a las zonas de recarga de acuíferos y a la evaluación de la potencial variación del agua de lluvia disponible por efectos del cambio climático. Como parte de la información analizada se incluyó la recopilada y generada por The Nature Conservancy (TNC).

Para realizar esta recopilación se visitaron instituciones tanto de tipo gubernamental como privado, en estas se recopiló información de tipo: geológico, hidrogeológico, topográfico, de vegetación, recarga, etc. Las instituciones visitadas fueron: Sistema de Agua de la Ciudad de México (SACMEX), Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), y Comisión Estatal de Agua y Alcantarillado de Hidalgo. En el anexo 1 se presentan las tablas 2.1, 2.2, y 2.3 con el listado del material obtenido, así como los originales y resúmenes de los documentos que aportaron información de interés para este proyecto.

Es importante mencionar que del análisis efectuado por Moro Ingeniería (Moro), se observó que presentan un sesgo en el tipo de variables utilizadas, en función de la especialidad o formación académica de los participantes. Por esta razón Moro en el desarrollo del estudio integró un equipo de trabajo multidisciplinario, para tomar en cuenta los diferentes enfoques según sus especialidades, participando los siguientes profesionistas: M. en I. Raúl Morales Escalante, Ingeniero Geólogo con especialidad y maestría en recursos hidráulicos, en particular en el área de hidrogeología; Ingeniera Adriana Borja Martínez, Ingeniera Geóloga; Ingeniero Rainier Uriel Mares Tepanohaya, Ingeniero Geólogo; Ingeniero Agustín Puig Valadez, Ingeniero Civil con especialidad en hidrología y climatología; Ingeniero Roberto A. Sención Aceves, Ingeniero Geólogo con especialidad en evaluación de la disponibilidad de los acuíferos; M. en C. Martín Quijano Poumián, especialista en sistemas medio ambientales; Biólogo Miguel Ángel Trinidad Trinidad; Geógrafa Mariana Hernández Hernández, especialista en Sistemas de Información Geográfica, así como varios ingenieros recién egresados de las carreras de geología e ingeniería civil, para el procesamiento de la información recopilada. Esto permitió conjuntar opiniones variadas, que aportaron ideas al estudio desde diversos puntos de vista y criterios, lo que fue de suma importancia para la determinación de las zonas de recarga. Adicionalmente en las revisiones realizadas por TNC, participaron con observaciones, propuestas y modificaciones, otros especialistas con formaciones académicas complementarias.

Otro de los aspectos importantes para determinar las zonas de recarga, fue conocer con el mayor detalle posible (a partir de los documentos analizados), las propiedades y características de los diferentes tipos de rocas, suelos, vegetación y clima, así como las afectaciones antropogénicas que se tienen en el área, para lo cual se hicieron intervenir las variables de mayor relevancia, que permitieran evaluar de la forma más adecuada la ubicación de las zonas citadas.

Una parte relevante del trabajo consistió en considerar las características bióticas presentes en la superficie y las abióticas en la superficie y en el subsuelo, las cuales en conjunto intervienen para permitir la infiltración y posteriormente la recarga. Como ejemplo de su funcionamiento y relación, se tiene el hecho de que pueden existir zonas con abundante vegetación, en las que llueva mucho, pero si en la superficie del terreno y en el subsuelo hay materiales de muy baja permeabilidad, no será factible la infiltración del agua; de igual forma, en zonas de alta permeabilidad, la vegetación y precipitación son relevantes para establecer variaciones en la cantidad de agua que se puede infiltrar.

2.1. Objetivo del estudio

Apoyar a la toma de decisiones para la conservación de procesos y zonas de recarga de aguas subterráneas en la Cuenca de México con base científica.

2.2. Alcances

- Identificar las áreas donde las condiciones hidrogeológicas permiten la recarga del acuífero.
- Generar mapas con las variables que intervienen en la recarga y un mapa final con la localización geográfica de las zonas de recarga.
- Establecer la potencialidad de las zonas de recarga y su ubicación geográfica.
- Inferir el movimiento del agua subterránea desde las zonas donde se infiltra el agua de lluvia hasta su conexión con los acuíferos.
- Estimar variaciones en el agua disponible para la recarga por efectos del cambio climático.
- Proponer acciones para mantener y mejorar los procesos de recarga.
- Establecer los lineamientos de monitoreo que permitan concluir si las acciones que realice el Fondo del Agua contribuyen con el proceso de recarga.
- Estimar los cambios que puede haber en la recarga potencial por efectos de variaciones en el uso del suelo a mediano y largo plazo.

2.3. Delimitación del área de estudio

Una vez concluida la revisión de documentos, se trabajó con la delimitación de la Cuenca de México que se utilizó en este estudio. Para esto se revisaron las propuestas realizadas por diversos autores. Los límites que se analizaron por ser los más adecuados desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, fueron los establecidos en los acuíferos administrativos de la CONAGUA, publicados en diferentes años, así como los utilizados en otros trabajos (ININSA S.A., 1986; González-Torres et al., 2015; Arce et al., 2019).

De esta revisión se concluyó que el límite más adecuado era el de los acuíferos administrativos de la CONAGUA, debido a que cubre la totalidad de la Cuenca de México y a que no sólo consideran el parteaguas topográfico, sino parte de las cuencas hidrológicas vecinas, lo cual es correcto debido a que las estructuras geológicas ubicadas fuera del parteaguas pueden aportar agua hacia la zona de estudio. En las figuras 2.1, 2.2 y 2.3, se muestran las comparaciones entre los límites de los acuíferos de la CONAGUA contra las áreas de estudio de los autores citados; en dos de las figuras no se incluye la totalidad de la Cuenca de México, porque el área de estudio de los investigadores incluía sólo una parte de esta.

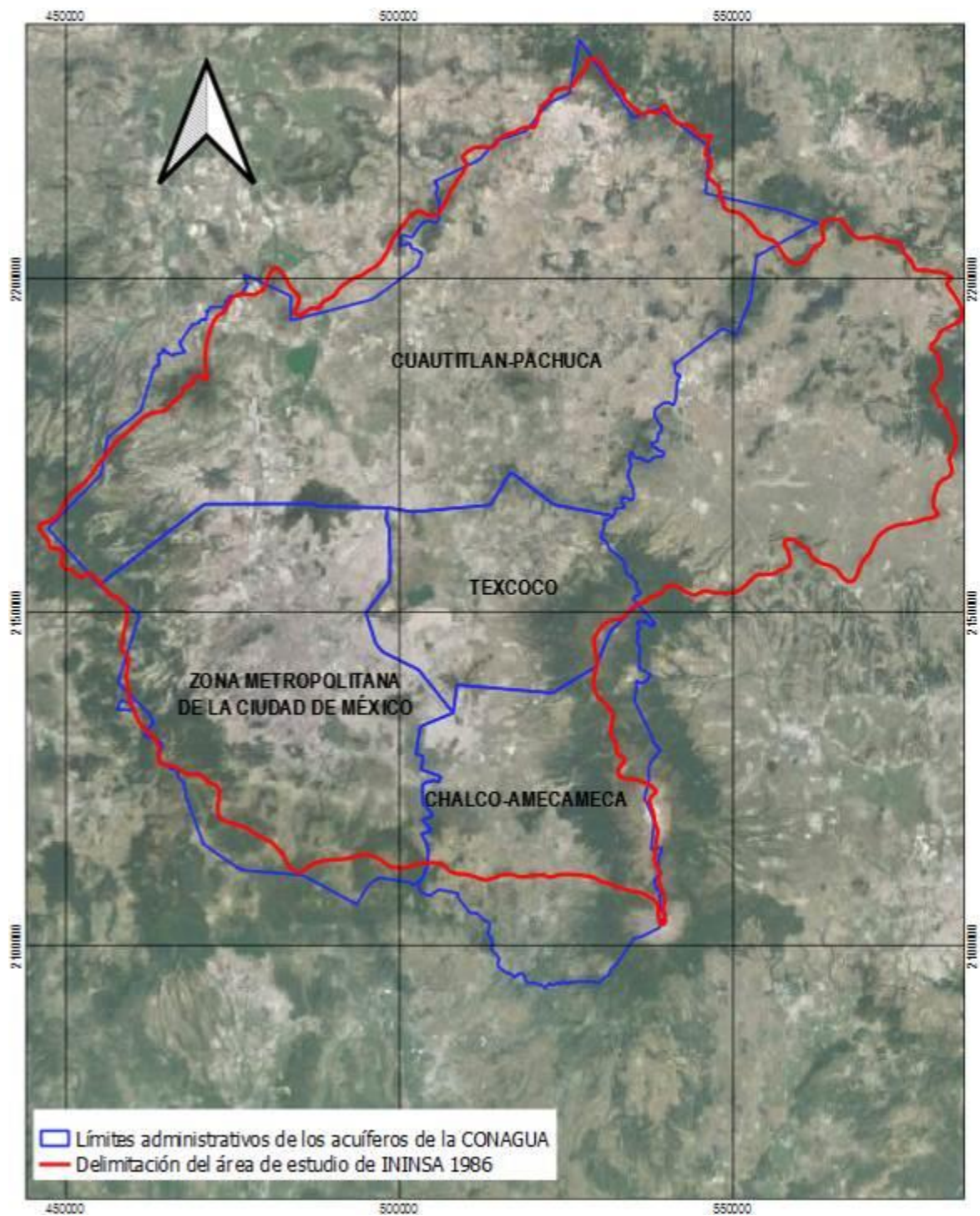


Figura 2.1. Comparación entre el límite de la cuenca en el trabajo de ININSA (1986), y el límite de los acuíferos de la CONAGUA

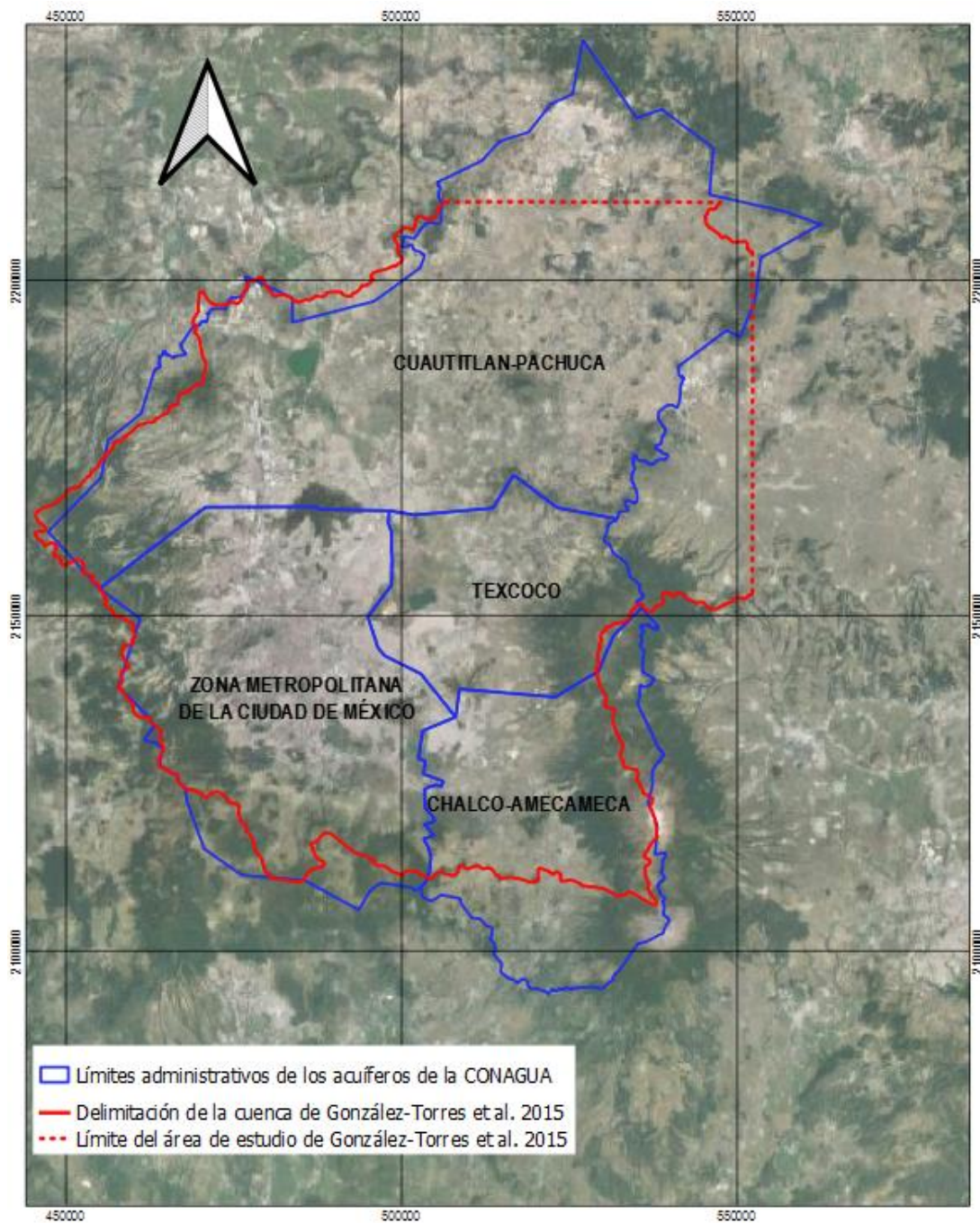


Figura 2.2. Comparación entre el límite de la cuenca en el trabajo de González Torres (2015), y el límite de los acuíferos de la CONAGUA

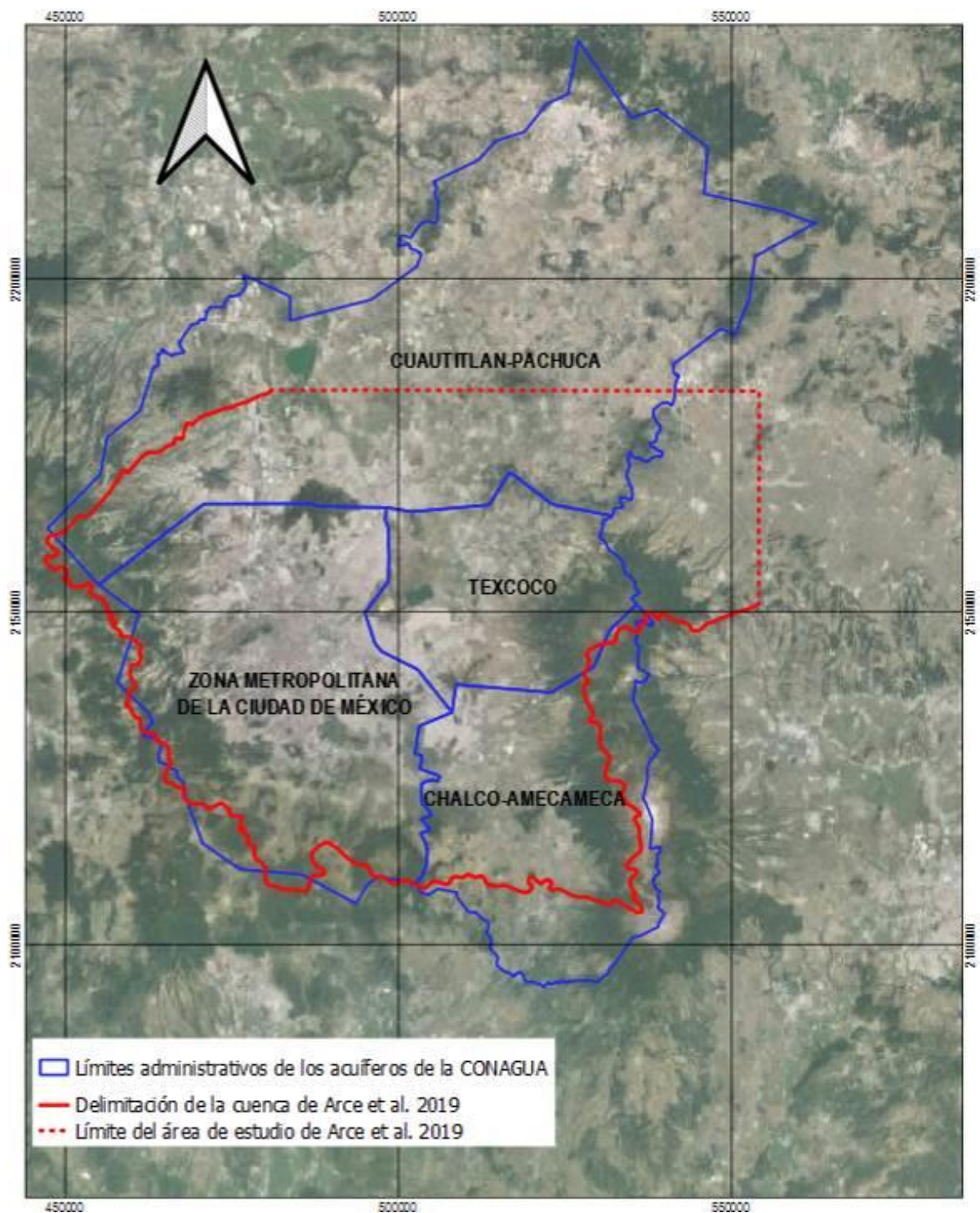


Figura 2.3. Comparación entre el límite de la cuenca en el trabajo de Arce et al. (2019), y el límite de acuíferos de la CONAGUA

La Cuenca de México está integrada por siete acuíferos. En este estudio se incluyeron los cuatro más próximos a la zona metropolitana de la Ciudad de México, debido a que son los más importantes desde el punto de vista abastecimiento de agua a la mega urbe y a que además están conectados hidráulicamente. Estos fueron: Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca; en estos acuíferos están incluidas las poblaciones más relevantes próximas a la Ciudad de México.

Para delimitar las zonas urbanas se utilizó la Cartografía Geoestadística Urbana y Rural, en formato vectorial, de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Ciudad de México y Estado de México (INEGI, 2015); en estas se consideró que no hay recarga (ZNR) debido a que están cubiertas por pavimento, asfalto, edificaciones, techumbres y/o materiales prácticamente impermeables (figura 2.4). Las grandes áreas verdes localizadas dentro de las ciudades, como reservas ecológicas y bosques, fueron incluidas en el análisis de zonas de recarga.

De esta forma quedó delimitada el área de estudio, en donde se evaluó si puede existir infiltración natural y probablemente recarga. Esta área se muestra en la figura 2.5 y tiene una extensión aproximada de 8,339 Km².

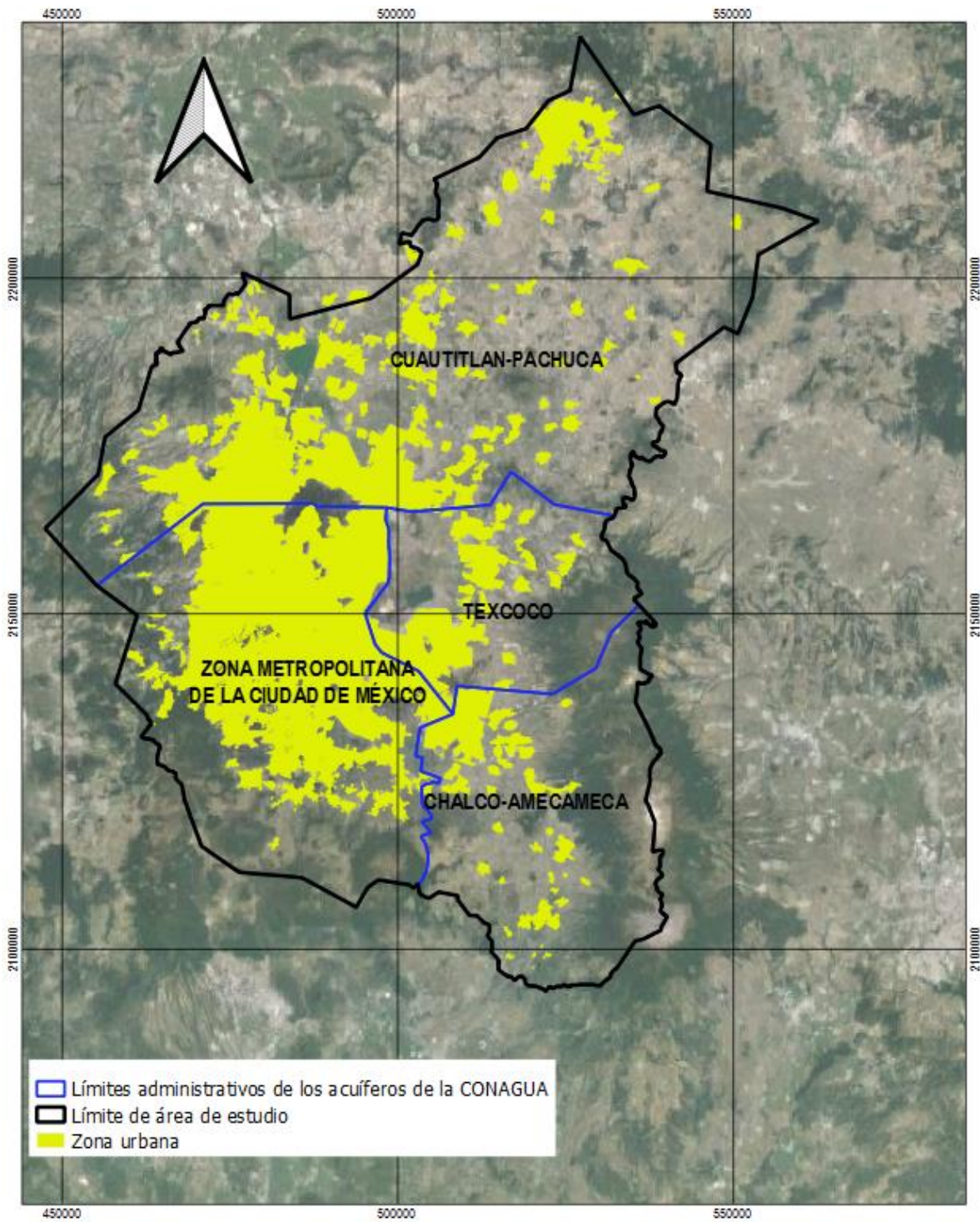


Figura 2.4. Áreas urbanas clasificadas como zonas de no recarga

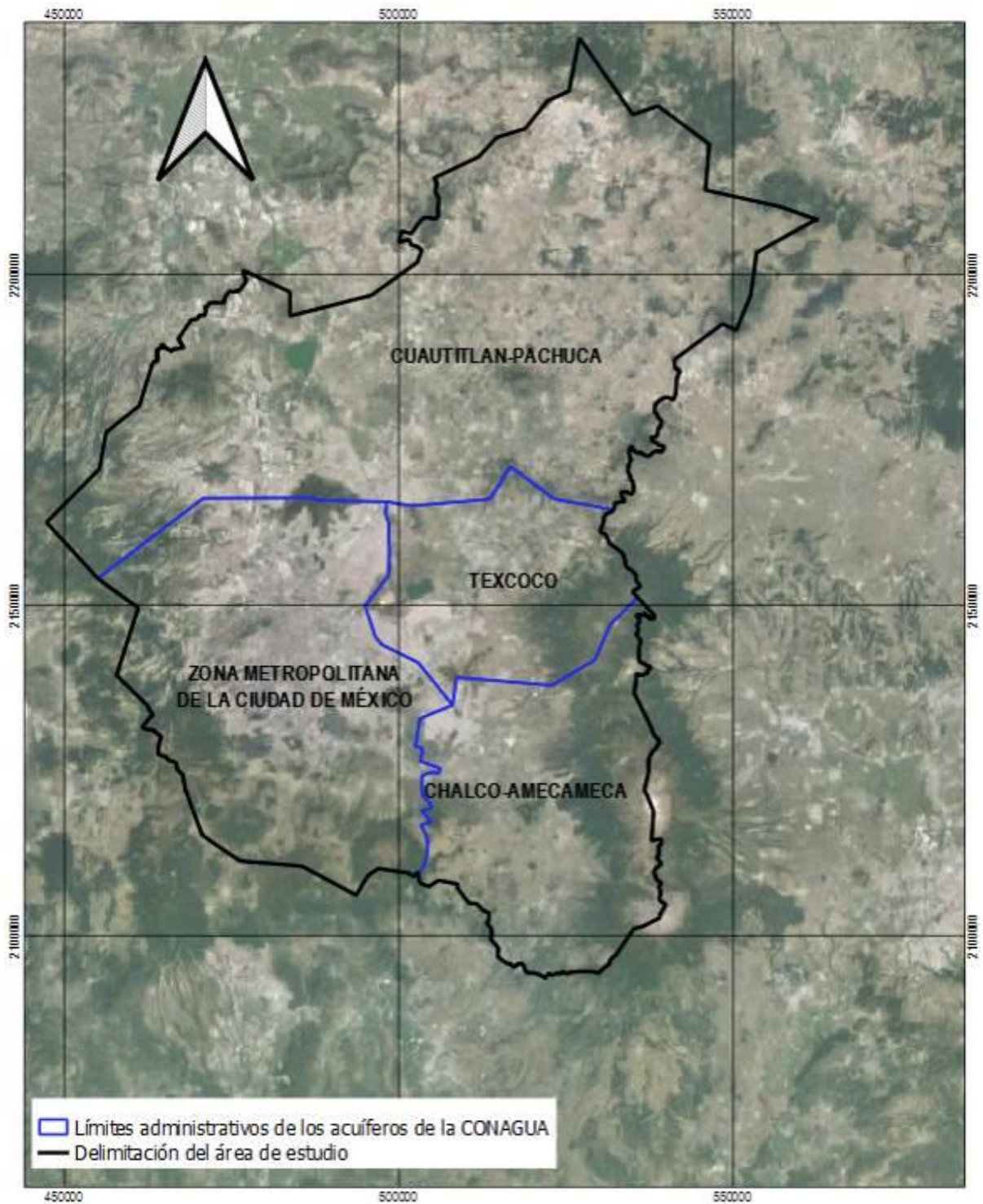


Figura 2.5. Delimitación del área de estudio utilizando los límites administrativos de los acuíferos de la CONAGUA

3. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la descripción de las variables que intervienen en el proceso de recarga, los métodos empleados para evaluar sus características, la metodología de ponderación y como fueron clasificadas en función de su potencialidad; de igual forma se establece la manera en que se analizaron los efectos del cambio climático y como pueden afectar a la recarga las variaciones en el uso del suelo. A continuación, se hace una descripción de la metodología.

Como punto de partida se describe la definición de recarga natural, la cual indica que es el volumen de agua que entra al subsuelo durante un periodo de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua (Custodio y Llamas, 1983).

En este proceso intervienen una gran cantidad de variables que más adelante en este capítulo se revisan.

Para establecer la forma en que se comporta el agua subterránea, primero se debe tener el marco de referencia del medio por donde se mueve. Para ello se requiere conocer la geología de la región estudiada, en especial las características físicas de las rocas, ya que son los materiales por los cuales el agua fluye y forma acuíferos; de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales de México y su Reglamento, un acuífero es “Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo” (CONAGUA, 2017).

Con objeto de tener este marco de referencia, en el siguiente tema se hace una descripción de la geología y su comportamiento hidrogeológico dentro de la Cuenca de México.

3.1. Marco geológico e hidrogeología de la Cuenca de México

A continuación, se describen las unidades litológicas que, de acuerdo con la información analizada, constituyen el subsuelo de las sierras que limitan la Cuenca de México, identificando los tipos de rocas que predominan, la forma en que están arregladas horizontal y verticalmente, así como sus principales características físicas. Esta información sirvió de base para que, en el tema de hidrogeología, se pudiera explicar porque los materiales pueden o no constituir zonas de recarga.

En el anexo 2 se incluyen en carpetas, los artículos y materiales que dan soporte a lo que se explica en el texto y que permitieron establecer las características generales del comportamiento geológico del subsuelo y el tipo de unidades litológicas que se pueden tener. En el caso de la información hidrogeológica los documentos están separados por acuífero.

3.1.1 Marco geológico

La Cuenca de México se localiza en la parte central de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, que se ubica en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Puebla y Veracruz (PEMEX, 2010); la cuenca está rodeada al norte por la Sierra de Pachuca, al sur por la Sierra de Chichinautzin, al este por la Sierra Nevada y al oeste por la Sierra de Las Cruces, todas constituidas por materiales volcánicos (ver figura 3.1).

Diversos autores han descrito la litología de la cuenca, por lo cual se hizo un análisis de esta información para presentar un resumen de las características de las unidades geológicas y relacionarlas con su comportamiento hidrogeológico; las unidades que a continuación se describen, resultan de la integración de los trabajos de investigación y mapas elaborados por diversos autores e instituciones, por lo que no se pueden conjuntar todos estos documentos en un mapa geológico, ya que los materiales referidos son muy variados en detalle (escala) y en la forma en que científicamente son tratados; sin embargo en la descripción de cada unidad se indica la zona de la Cuenca de México en donde se presentan.

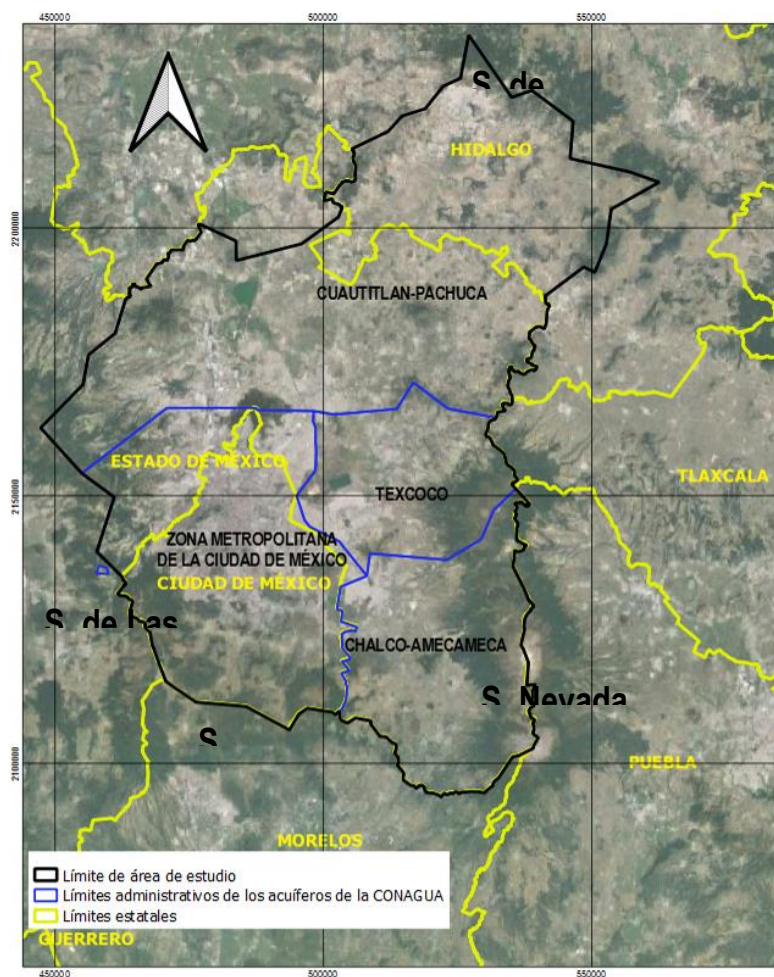


Figura 3.1. Límite del área de estudio, acuíferos y entidades federativas que están incluidas

Las rocas más antiguas que afloran en la cuenca son de edad Oligoceno, sin embargo, a través de la información obtenida en varios de los pozos profundos, se sabe que en el subsuelo se encuentran rocas sedimentarias de edad Cretácico; con la información recopilada se realizó un análisis para determinar si era factible separar las unidades litológicas por acuífero, sin embargo la mayoría son de gran extensión y se presentan con algunas variaciones en toda la cuenca, por lo que se decidió realizar la descripción de la litología de forma general, a escala de toda la zona de estudio.

A continuación, se describen sólo las formaciones que afloran ya que son las que permiten la infiltración del agua de lluvia, el orden en que se citan va de acuerdo con su edad (posición estratigráfica), iniciando de la más antigua a la más joven.

- o Riolitas, riolacitas y lavas dacíticas del Oligoceno temprano-Mioceno temprano

Esta unidad está compuesta por una secuencia de riolitas, riolacitas y lavas dacíticas de las formaciones Xochitepec, Tlzapotla, Taxco y Huautla; de estas unidades sólo la primera aflora en la porción sur de la cuenca, el resto se encontraron a profundidad en el pozo Mixhuca 1, Roma 1 y Texcoco 1, a profundidades de 2,207, 1,740, y 950 m, respectivamente (Arce et al., 2019).

La Formación Xochitepec está formada por tobos, brechas, complejos volcánicos y lavas, que normalmente están muy compactas y consolidadas, con excepción de donde están afectadas por sistemas de fallas regionales; se han reportado afloramientos al sur de la Cuenca de México, en la pendiente oeste del volcán Iztaccíhuatl, en la base de la Sierra de Guadalupe, en el Cerro de Chapultepec, al norte y oriente de Texcoco, al oriente de Apan y Ciudad Sahagún, en los límites de la cuenca en el Estado de Hidalgo (ININSA, S.A., 1986; SGM, 2014).

Debido a su diferente litología esta formación no tiene un comportamiento hidrogeológico único, en ocasiones puede favorecer el escurrimiento y funcionar como barrera al paso del agua y en donde está fracturada formar zonas de recarga y acuíferos de potencialidad variable.

- o Lavas, piroclastos y lahares de la Formación Tepoztlán del Oligoceno-Pleistoceno

Está constituida por depósitos de lavas, piroclastos y lahares de composición andesítica a dacítica, con horizontes arenosos, así como por intercalaciones de sedimentos fluviales y lacustres; en la cuenca han sido identificadas en los pozos Texcoco 1 y Mixhuca 1, a profundidades entre 920 y 1,190 m, respectivamente (Arce, et al., 2019).

Esta formación ha sido reportada al sur de la cuenca, al norte del Volcán Tláloc y al este de la Sierra de Guadalupe (SGM, 2014). Cuando aflora favorece el escurrimiento sobre la infiltración, a profundidad puede formar barreras al paso del agua.

- o Andesitas, dacitas y tobos del Grupo Pachuca del Oligoceno medio-Mioceno tardío

Este grupo consta de lavas y tobos, con intercalaciones de piroclastos y aglomerados de composición principalmente andesítica y dacítica; en general están afectados por escasos sistemas de fracturas y las tobos se encuentran mediana y altamente consolidadas; sus afloramientos están en la zona norte de la cuenca, al norte de Apan y forma parte de las sierras de Pachuca y Los Pitos (ININSA, S.A., 1986; SGM, 2009).

La mayor parte del Grupo Pachuca son amplios afloramientos que consisten en sucesiones de derrames lávicos de composición andesítica y dacítica, intercalados con brechas volcánicas y tobas, separadas por suelos (CONAGUA, 2018).

En sus partes fracturadas favorecen la infiltración del agua; cuando no están fracturadas como es el caso de las tobas, predomina el escurrimiento y forman barreras al paso del agua.

- o Andesitas a dacitas del Mioceno medio y tardío-Pleistoceno

Esta unidad incluye a la Formación Tarango, así como a las andesitas y dacitas de la Sierra de Guadalupe; está formada por depósitos de piroclastos, aglomerados, tobas y horizontes de pómez, con algunas intercalaciones de lavas y depósitos de aluvión.

En la Sierra de Guadalupe la unidad está formada por rocas ígneas de composiciones andesítica a dacítica; presentan alternancias de brechas, lahares (flujos de lodo), lavas andesíticas y basálticas, así como por depósitos lacustres y aluviales no consolidados; se encuentra afectada por fallas y numerosas fracturas (ININSA, S.A., 1986). Cuando está intensamente fracturada permite la infiltración del agua y según su continuidad en el subsuelo puede formar acuíferos; en las zonas donde no está fracturada la infiltración se reduce y se favorece la escorrentía.

En particular la Formación Tarango tiene una amplia variedad litológica, está compuesta por: tobas, brechas y tobas, depósitos fluviales con clastos de origen volcánico y capas delgadas de pumicita, lahares (flujos de lodo), depósitos aluviales, intercalaciones de limolita y pumicita, areniscas, lutitas y algunos lentes de caliza continental; presenta un grado de consolidación medio a alto; está en contacto lateral con la mayoría de las unidades volcánicas dentro de la cuenca (SGM, 2009); su comportamiento al paso del agua es variable y está en función de la litología predominante, tamaño y grado de selección de los fragmentos, así como de su grado de compactación y fracturamiento.

- o Riodacitas, dacitas y andesitas de la secuencia volcánica de Las Cruces del Plioceno al Holoceno

Esta secuencia forma parte de la Sierra de Las Cruces al oeste de la cuenca. Está constituida por los volcanes La Catedral, La Bufa, Iturbide, Chimalpa, Salazar, San Miguel, Ajusco y La Corona, entre otros; aflora en un tramo del Desierto de Los Leones-La Marquesa; está constituida por lavas, aglomerados, brechas, piroclastos y tobas de composición riodacítica, dacítica y andesítica; las más antiguas se encuentran afectadas por un intenso fracturamiento originado por enfriamiento (ININSA, S.A., 1986). También se tienen flujos piroclásticos generalmente no soldados, cenizas cristalinas, vítreas, de pómez y bloques de composición heterogénea y grado de compactación variable (CONAGUA, 2018).

Cada estructura volcánica (volcán) produjo flujos de lava y domos que fueron haciendo que la sierra fuera cada vez más alta; los depósitos piroclásticos intercalados con lahares constituyen la parte inferior del relieve con una morfología en forma de abanico (Arce et al., 2019); estos abanicos presentan su mayor longitud hacia la Cuenca de México y hacia la fosa Tula-Mixhuca, localizada al este de la Sierra de Las Cruces.

Esta unidad por haberse formado por una gran cantidad de eventos volcánicos, derivados de diversos focos de emisión, dio como resultado una serie de capas de poca continuidad, lo que propicia que la infiltración sea muy irregular y que el agua que se infiltra a través de los materiales permeables fluya distancias cortas y posteriormente salga a la superficie formando manantiales, hecho que limita la infiltración profunda y que la recarga no llegue hasta la Cuenca de México.

- o Andesitas y dacitas de la Formación Zempoala del Mioceno tardío al Plioceno temprano

Es un conjunto de productos volcánicos derivados de dos centros eruptivos alineados con dirección norte-sur, localizados al suroeste de la cuenca; a esta formación la dividen en dos grandes unidades: avalancha de escombros Zempoala y flujos de lava andesítico-dacítico del Volcán Zempoala; la primera es subdividida a su vez en tres eventos: el primero es proximal y consiste de lavas andesíticas y dacíticas con fracturamiento intenso; el segundo es denominado axial, forma pequeños montículos constituidos por fragmentos de andesitas y bloques empacados en una matriz arenosa; el tercer evento es el distal, está constituido por bloques con un 60% de matriz arenosa (SGM, 2014).

De acuerdo con el SGM (2014), esta unidad descansa sobre la Formación Tepoztlán y tiene un comportamiento hidrogeológico variable, en las zonas donde hay rocas fracturadas favorece la infiltración y en donde hay bloques empacados en una matriz de textura fina favorece el escurrimiento.

- o Brechas volcánicas y piroclastos de color oscuro del Plioceno tardío

Estas rocas están constituidas por derrames lávicos alternados con capas de poco espesor de brechas volcánicas y/o con piroclastos (CONAGUA, 2018). Incluye a la Formación Otomí, que está localizada al occidente de la Cuenca de México, en la Sierra de Monte Alto.

La unidad, de acuerdo con la descripción del SGM (2018), está formada en su mayor parte por depósitos piroclásticos, aunque en las regiones altas de la Sierra de Monte Alto también presenta lavas intercaladas con brechas volcánicas.

Su comportamiento al paso del agua es variable, en las coladas de lava fracturadas predomina la infiltración, pero en las zonas de flujos piroclásticos hay una reducción en la permeabilidad y se favorece el escurrimiento.

- o Ignimbritas de la Formación Don Guinyó del Plioceno

Esta unidad está formada por capas compactas de ignimbrita (tobas soldadas), en las que predominan los fragmentos de pómez en una matriz de ceniza fina, con lentes horizontales de vidrio negro; cubre extensas áreas sobre la carretera Ixmiquilpan-Huichapan (Hidalgo), se encuentra también al norte de Golondrina y en las inmediaciones de Tula de Allende (Cerro Xicuco, Arroyo del Corazón y Río Jilotepec) (SGM, 2009). Su comportamiento al paso del agua es variable, de acuerdo con el grado de fracturamiento que es generalmente bajo; puede permitir la infiltración, formar acuíferos pobres, o bien barreras al paso del agua.

- o Riolita Navajas del Plioceno

Está formada por depósitos asociados al vulcanismo de la Sierra de Las Navajas, en la zona de la Sierra de Pachuca; está constituida por un complejo volcánico de composición riolítica, con vidrio volcánico, flujos de lava intercalados con depósitos de caída libre y flujos piroclásticos, así como por grandes flujos de avalancha (flujos de lodo) asociados al colapso del complejo volcánico principal (SGM, 2008).

Su comportamiento al paso del agua es variable, de acuerdo con el grado de fracturamiento que es generalmente bajo; puede formar zonas de recarga y acuíferos pobres o barreras al paso del agua.

- Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno

Son depósitos de productos piroclásticos y fluviales; en el subsuelo de la porción meridional de la cuenca están constituidos por tobas, brechas volcánicas y aglomerados con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas; se encuentran cubiertos por aluvión del Cuaternario y están acumulados en fosas tectónicas (Graben de Chalco) y rellenando amplios valles. Su comportamiento al paso del agua es variable ya que depende de su granulometría (cantidad de materiales finos y gruesos) y grado de compactación; se encuentra rellenando depresiones topográficas en donde forma acuíferos y zonas de recarga de potencialidad variable.

- Secuencia volcánica del Plioceno-Pleistoceno

Está constituida por lavas, aglomerados, piroclastos y tobas de composición andesítico-basáltica y basáltica; en general las lavas y aglomerados se encuentran fracturados; los piroclastos y las tobas tienen grados de consolidación medios a bajos; afloran en El Peñón del Márquez, Cerro de La Estrella, Cerro de Xico, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla, San Martín de las Pirámides y Melchor Ocampo, en el Estado de Hidalgo (ININSA, S.A., 1986). A continuación, se describe a las unidades litológicas que conforman a la secuencia volcánica del Plioceno-Pleistoceno:

- Andesitas, dacitas y riodacitas de la Formación Llano Grande

Es una secuencia eruptiva de composición variable de andesitas, dacitas y riodacitas; está constituida por capas delgadas de lapilli (fragmentos del tamaño de las gravas finas y arenas), cenizas volcánicas y brechas soldadas, cubiertas por lavas andesíticas. Aflora al noroeste de la Sierra Nevada, a lo largo de las cañadas El Agua y Cosa Mala (SGM, 2014). Esta unidad tiene un comportamiento hidrogeológico variable en función del grado de fracturamiento de los derrames de lava y del grado de compactación del lapilli; puede formar zonas de recarga de potencialidad media y a profundidad acuíferos de potencialidad moderada.

- Andesitas y basaltos de la Formación El Pino

Son rocas de composición andesítico-basáltica que se presentan formando conos cineríticos (volcanes de cenizas), volcanes de escudo y amplias coladas de lava fracturadas; forman parte de los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla y los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba (SGM, 2014). Permiten la infiltración del agua por su porosidad y fracturamiento; a profundidad puede formar acuíferos de media a alta potencialidad.

- Secuencia volcánica de la Sierra Nevada. Mioceno medio-Holoceno

Esta secuencia volcánica está compuesta de norte a sur por los estratovolcanes Tláloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tláloc y Telapón son las estructuras más antiguas (Arce et al., 2019).

La composición química de la Sierra Nevada varía de andesítica a riolítica, para las estructuras Tláloc y Telapón, mientras que la composición de las secuencias volcánicas del Iztaccíhuatl y Popocatepetl varía de andesítica a dacítica. A continuación, se describen las unidades litológicas que conforman a la secuencia volcánica de la Sierra Nevada.

- Andesitas, latitas, dacitas y riolitas de la Formación Tláloc del Mioceno medio-Plioceno

Esta unidad está conformada por coladas de lava que forman parte de la Sierra Río Frío; su composición varía entre andesítica, latítica y dacítica; consta de sucesiones compuestas por pómez y algunos líticos del tamaño de lapilli, con gradación de materiales finos a gruesos; hay también flujos de cenizas cristalinas, vítreas y pómez (CONAGUA, 2018).

En el Cerro Telapón los depósitos piroclásticos se intercalan o son cubiertos por derrames de lava. De acuerdo con el SGM (2018), la base de la Sierra de Río Frío se encuentra interdigitada con aluviones y tobas de la Formación Tarango y se encuentran sobre las formaciones El Pino y Llano Grande. Esta unidad permite la infiltración del agua en los derrames de lava fracturados y en los depósitos piroclásticos porosos.

- Andesitas y dacitas de la Formación Iztaccíhuatl del Plioceno

Esta unidad se localiza en los volcanes Llano Grande, Iztaccíhuatl y Nexpayantla; está compuesta principalmente por andesitas y dacitas y en menor proporción andesitas basálticas; las rocas tienen estructura masiva y alternan ocasionalmente con brechas volcánicas (CONAGUA, 2018).

Su comportamiento al paso del agua es variable, en las zonas de rocas fracturadas forma excelentes zonas de recarga y donde hay brechas volcánicas poco fracturadas predomina el escurrimiento.

- Depósitos piroclásticos y lavas de la Formación Popocatepetl del Plioceno tardío-Holoceno

Está formada por el material producido de la actividad del Volcán Popocatepetl, que es un estratovolcán compuesto por una alternancia de depósitos piroclásticos y lavas de composición andesítica a dacítica (Macías, 2005).

Esta unidad cubre a la porción meridional de la Formación Iztaccíhuatl y probablemente se interdigita hacia el poniente con la Formación Chichinautzin, ya que son contemporáneas (CONAGUA, 2018). La infiltración del agua se presenta en las zonas donde hay rocas fracturadas y en los materiales piroclásticos porosos.

- Depósitos piroclásticos y lavas del Campo Volcánico Chichinautzin del Cuaternario

Este campo volcánico está constituido por más de 220 estructuras generadas en un solo evento; es de composición andesítico-basáltica, basáltica, andesítica e incluso dacítica, con edades desde 1.2 Ma a 1,600 años (Cuaternario).

De acuerdo con la edad, tipo de estructuras y composición química, se agrupan a varias estructuras que se encuentran dentro de la Cuenca de México (Cerro de La Estrella, Peñón del Marqués, Sierra Santa Catarina, Tlapacoya y Sierra Chichinautzin); basados en su edad, algunos autores mencionan que otra estructura llamada El Papayo, ubicada entre los volcanes Telapón e Iztaccíhuatl, podría ser considerado como parte del Campo Volcánico de Chichinautzin (Arce et al., 2019).

Las lavas de esta unidad son en general extensas, vesiculares, masivas o lajeadas; tienen una composición principalmente andesítico-basáltica y andesítica; las coladas de lava se encuentran prácticamente siempre fracturadas, formando bloques de diferentes tamaños; en algunas zonas los derrames de lava son de tipo AA (lavas fracturadas formando bloques), de alta permeabilidad por fracturamiento. También se encuentran piroclastos que van del tamaño de bloques a cenizas; pueden estar alternados con coladas de lava o formar conos cineríticos.

Estos materiales permiten el paso del agua por su fracturamiento en el caso de las coladas de lava y en los materiales piroclásticos por su porosidad y poca o nula compactación; en superficie forman buenas zonas de recarga y a profundidad acuíferos de alta potencialidad.

- Depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno

Estos depósitos están compuestos por fragmentos de rocas de diferente composición que van del tamaño de gravas, arenas, limos y arcillas; muestran gran heterogeneidad en su granulometría. Descansan sobre los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y localmente sobre rocas volcánicas más antiguas, se interdigitan con formaciones volcánicas de la misma edad (CONAGUA, 2018).

En general su grado de compactación es muy bajo, se encuentran al pie de las elevaciones topográficas, y forman los rellenos en barrancas y depresiones (ININSA, S.A., 1986). Por su baja o nula consolidación pueden formar buenas zonas de recarga y acuíferos de alta potencialidad.

- Depósitos lacustres del Plioceno-Holoceno

Incluyen sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica alrededor de la cuenca; fueron depositados en los antiguos lagos; estos depósitos se extienden desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec.

Los sedimentos lacustres han sido encontrados en el pozo San Lorenzo desde 604 m hasta la superficie; están intercalados con rocas volcánicas (Arce et al., 2019). Esta secuencia se reportó también en el pozo Tulyehualco 1, donde los sedimentos lacustres aparecen a profundidades de 700 m y están intercalados con capas volcánicas; su grado de compactación varía de medio a muy bajo. Su comportamiento hidrogeológico es variable, en donde predominan los materiales volcánicos puede tener alta permeabilidad y en los depósitos arcillosos limitar la infiltración y formar acuitardos (materiales que transmiten muy lentamente el agua).

CONCLUSIÓN:

Como resultado de estas descripciones se concluye que hay una variedad muy grande en los tipos de materiales que constituyen al área de estudio; que cada una de las unidades descritas tiene a su vez una gran variedad de tipos de roca, con diferentes características físicas como: grado de soldamiento, grado de compactación, heterogeneidad granulométrica, grado de fracturamiento, grado de alteración y poca continuidad lateral, lo que en conjunto propicia cambios continuos en la permeabilidad y discontinuidad en el flujo del agua. A partir del análisis hidrogeológico de estas unidades, se generó un mapa de zonificación por permeabilidad que se puede consultar en el anexo 2, mapa 3.1.

3.1.2 Marco hidrogeológico

La información recopilada permitió realizar la descripción del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos definidos por la CONAGUA. Cabe resaltar que la información disponible para cada uno fue diferente, ya que el grado de investigación y actualización de datos no es homogéneo. En el caso de los datos piezométricos (profundidad y elevación del nivel del agua subterránea), se utilizó información del año 2011, debido a que en este año se tuvo la mayor cobertura geográfica en los acuíferos estudiados; para el caso de los sólidos totales disueltos (STD) se empleó información del año 2007 por las mismas razones; en ambos casos los datos fueron proporcionados por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), de la CONAGUA; esta información no se encuentra publicada y se obtuvo de informes internos, previa autorización para su uso.

A continuación, se hace una descripción de las características de cada acuífero:

o Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Dentro de sus límites afloran rocas de origen volcánico de diferentes composiciones que forman las principales sierras que circundan a la cuenca, además de sedimentos de granulometría variada que rellenan los valles y depresiones; estas rocas han sido clasificadas con base en su comportamiento al paso del agua, lo cual constituye unidades hidrogeológicas; según la clasificación realizada por Cardona y Hernández (1995) se agrupan de la siguiente forma:

Unidad Hidrogeológica	Unidad Geológica	Comportamiento
I (Acuífero)	Depósitos lacustres y aluviales del Cuaternario	Rocas y sedimentos consolidados de alta conductividad hidráulica
	Rocas basálticas del Cuaternario	
	Rocas andesíticas del Plioceno-Cuaternario	
	Formación Tarango	
	Depósitos aluviales y piroclastos del plioceno superior	
II	Depósitos lacustres y piroclásticos del Plioceno inferior	Rocas y sedimentos consolidados de baja conductividad hidráulica
	Rocas andesíticas del Mioceno	

III	Depósitos lacustres	Sedimentos de granulometría fina no consolidados de baja conductividad hidráulica
-----	---------------------	---

Cardona (1995), menciona los siguientes tipos de acuíferos dentro de la cuenca: acuífero libre en rocas volcánicas fracturadas de las sierras de Las Cruces y Chichinautzin y en rocas fracturadas y materiales granulares aluviales en las porciones topográficamente bajas; acuíferos semiconfinados en materiales granulares dentro de la zona lacustre y libre en rocas volcánicas fracturadas en los alrededores de la Sierra Santa Catarina.

De acuerdo con esta información, dentro del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, las rocas que permiten el paso del agua se encuentran en las sierras de Guadalupe, Las Cruces y Chichinautzin, las cuales a profundidad también forman parte del acuífero; con base en información de SACMEX (Peña, 2002), en la zona poniente de la ciudad, el acuífero se encuentra en la Formación Tarango y en la secuencia aluvial.

En la Sierra de Las Cruces, se tienen localizados una gran cantidad de manantiales en las cartas topográficas del INEGI a escala 1:50,000, que confirman la falta de continuidad de los materiales permeables, ya que el agua se infiltra, pero al encontrar otros materiales de baja a muy baja permeabilidad, impiden que esta llegue hasta el acuífero principal, formando manantiales y acuíferos colgados que pueden ser libres o semiconfinados.

Al norte de la ciudad, en la Sierra de Guadalupe, de acuerdo con información de cortes litológicos de SACMEX, el acuífero se encuentra en brechas volcánicas y andesitas, principalmente en material fracturado producto de eventos tectónicos (Lugo-Hubp y Salinas-Montes, 1996) que forman la Fosa de Cuatepec y otras de menor tamaño.

Al sur de la ciudad, el acuífero se encuentra en materiales derivados de eventos volcánicos provenientes de la Sierra Chichinautzin, como se reporta en estudios de SACMEX (Benton y Asociados, 2013; Zúñiga Arista, 2003).

En los documentos publicados oficialmente por la CONAGUA, no se tiene una información fidedigna del número de pozos que hay dentro de los acuíferos, debido a que en su Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), se tiene sólo información sobre la cantidad de concesiones de agua subterránea que existen en un acuífero y no de la cantidad de pozos. Es común que al revisar en campo los pozos que se reportan en las concesiones estos no se encuentren, por esta razón no se utilizó esta información a fin de no proporcionar datos que no son confiables. Debido a lo anterior se decidió usar la información interna proporcionada por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), que en el año 2006 reportó 1,126 aprovechamientos, de los cuales 773 estaban activos y correspondían con pozos, en esta información no se incluyen manantiales. Del total de aprovechamientos activos, 571 eran de uso público-urbano, 192 de uso industrial, seis de uso agrícola, uno de uso pecuario y tres de uso hotelero y doméstico.

En la misma información de OCAVM (2006), los caudales son de hasta 92 lps en los pozos perforados en las zonas donde se encuentran rocas de la Sierra Chichinautzin; de hasta 86 lps para la zona de la Formación Tarango y de hasta 63 lps para las andesitas de la Sierra de Guadalupe.

La profundidad del agua subterránea, de acuerdo con la configuración del OCAVM (2011), se encuentra entre 26 y más de 180 metros, las profundidades máximas se presentan hacia la porción occidental de la Ciudad de México en la zona serrana, mientras que los valores más bajos se localizan en la porción oriental de la Alcaldía Gustavo A. Madero, como se puede observar en la figura 3.2.

El movimiento del agua se estableció con la elevación sobre el nivel del mar, del agua subterránea en cada pozo; de acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para 2011, proporcionada por OCAVM, el flujo converge hacia el centro del valle, recibiendo su alimentación de las sierras del poniente y sur, como se muestra en la figura 3.3, esto es indicativo de que las zonas de recarga se encuentran en estas sierras, aunque vale la pena citar que la tendencia original del movimiento del agua subterránea, está intensamente modificada por la extracción de los pozos.

Otro indicio para establecer de forma general de donde proviene la recarga de un acuífero es considerar las concentraciones de sólidos totales disueltos (STD); para ello se analizó el informe proporcionado por el OCAVM (Ariel Consultores, S.A., 2007a), en donde se observa que las concentraciones varían entre 150 y 2,500 ppm (ver figura 3.4). Las curvas de menor valor ocupan áreas cercanas a las sierras de Las Cruces y Chichinautzin, lo que indica que el agua en el subsuelo ha tenido poca interacción con la roca y sus características son más parecidas al agua de lluvia, esto permite concluir la localización de las zonas de recarga para este acuífero; las concentraciones mayores, de entre 2,000 y 2,500 ppm se localizan cercanas al aeropuerto.

La edad del agua del acuífero se ha datado por medio del método Carbono 14, en los estudios realizados por Edmunds et al. (2002); los resultados arrojaron un valor de hasta 6,080 años, lo que los autores clasificaron como un agua moderna; estos análisis se realizaron en las cercanías de la Sierra de Las Cruces. Hacia el Aeropuerto Benito Juárez y en las cercanías del Cerro de La Estrella, la edad evaluada por los mismos autores fue de 5,880 y 6,080 años, respectivamente; otra datación que se reporta es la efectuada en el pozo San Lorenzo Tezonco, que da una edad de $14,237 \pm 265$ años (Morales et al., 2014), en este caso en el reporte los autores indican que consideran que es un valor anómalo.

Por otra parte, de acuerdo con lo reportado por Edmunds et al. (2002), los valores de ^{18}O y ^2H próximos a la Sierra de Las Cruces se encuentran muy cercanos del valor medio de la precipitación local, lo que representa una recarga rápida sin pérdidas significativas por evapotranspiración.

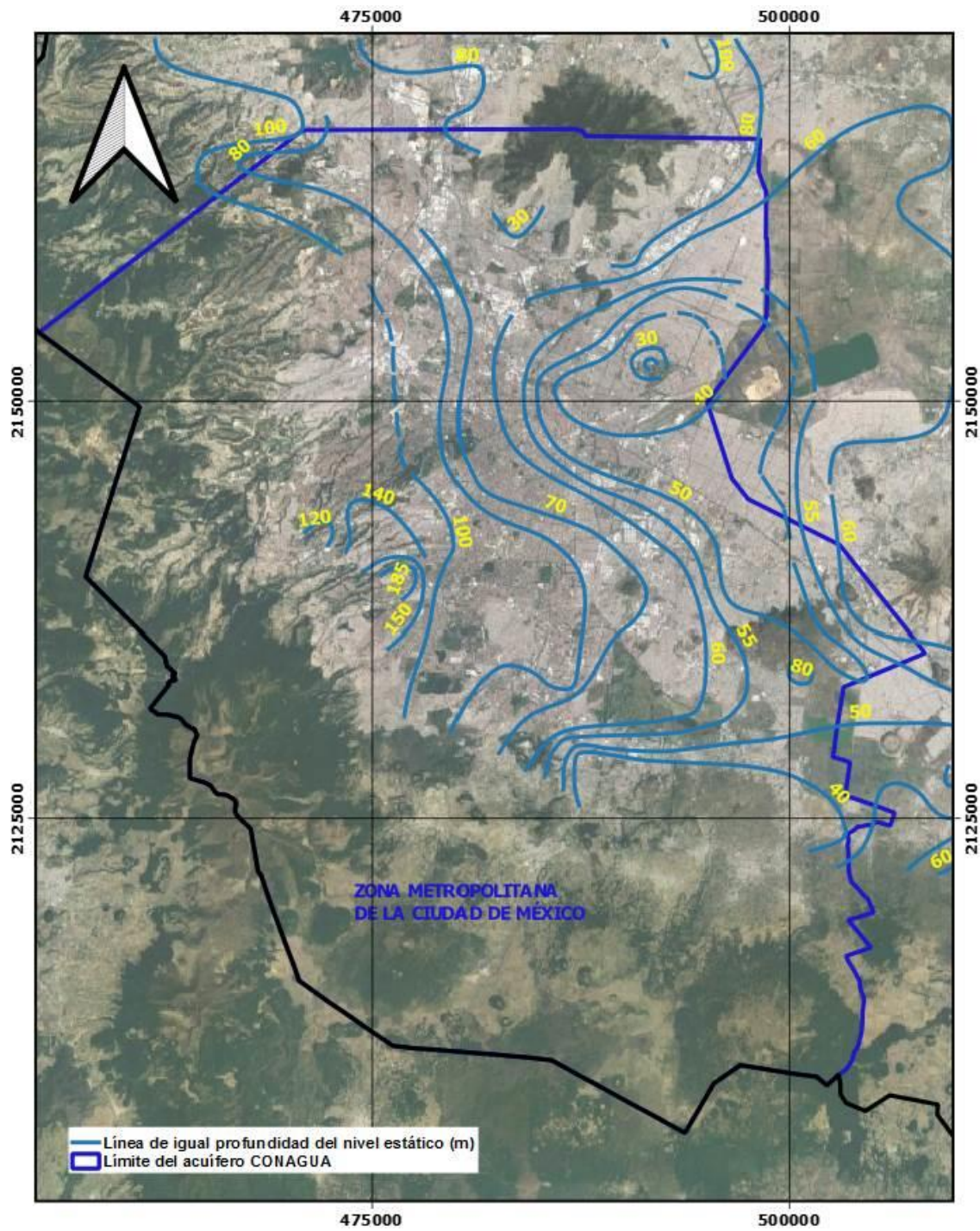


Figura 3.2. Configuración de profundidad del nivel estático en el Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

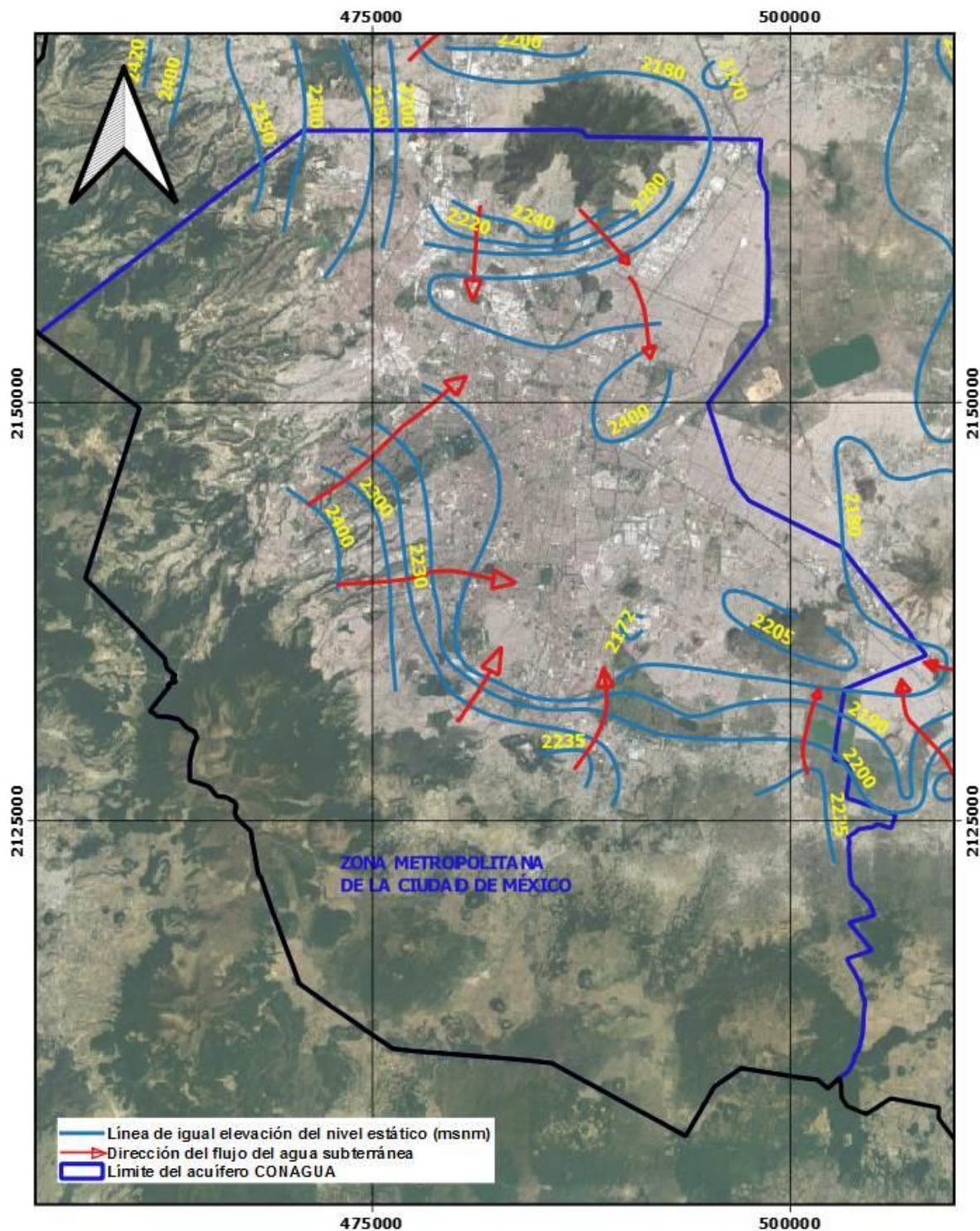


Figura 3.3. Configuración de elevación del nivel estático para el Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

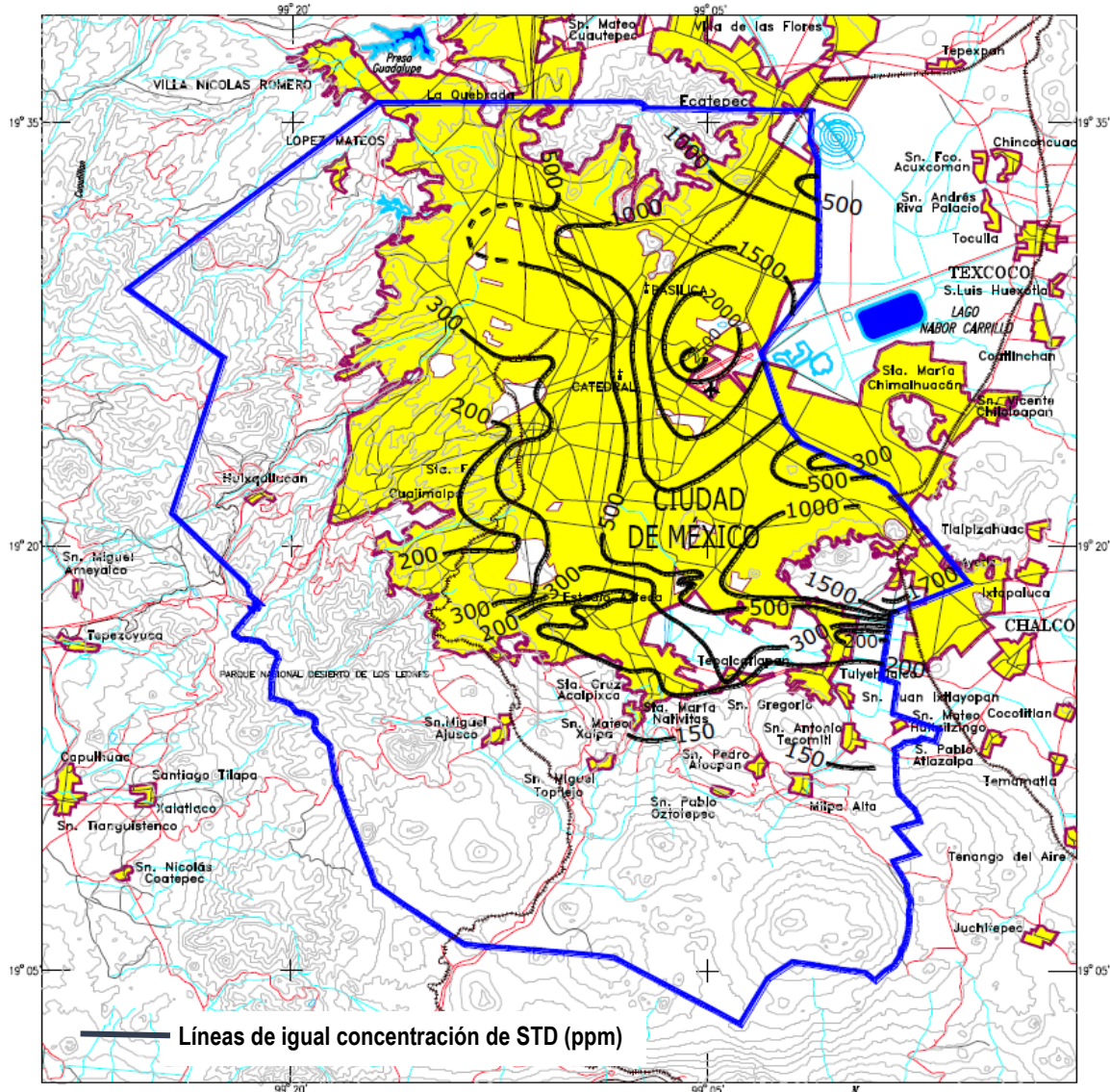


Figura 3.4. Configuración de sólidos totales disueltos en la Zona Metropolitana Ciudad de México

○ Acuífero Chalco Amecameca

Al igual que en el acuífero anterior, dentro de los límites del acuífero afloran rocas de origen volcánico de diferentes composiciones, que forman las sierras Chichinautzin y Nevada, además de sedimentos clásticos que rellenan los valles; estas rocas se pueden clasificar de acuerdo con su comportamiento al paso del agua, según Andreu, Morales y Guzmán (1983), de la siguiente forma:

- ✓ Acuíferos: Formación Chichinautzin y depósitos aluviales

- ✓ Acuífugos: Formación Chichinautzin y Tarango
- ✓ Acuitardos: Formación Popocatepetl
- ✓ Acuícludo: Formación Tlaloc

Estos autores, mencionan que, en el caso de las formaciones volcánicas, su comportamiento depende del grado de fracturamiento que presenten. Los cortes litológicos en pozos localizados en Chalco muestran que en los primeros 152 m se tienen depósitos lacustres, que pueden tener horizontes arenosos, después de esto se tienen piroclastos y tobas, que forman el acuífero; de acuerdo con la profundidad de los niveles piezométricos que en esta zona están entre 10 y 55 m, se considera que el acuífero es de tipo confinado; esto se comprueba con los diseños constructivos de los pozos que tienen tubería lisa hasta los 152 m de profundidad, para evitar el aporte de agua de los sedimentos lacustres (información de cortes litológicos de los pozos Chalco 1, 1A, Pozo 2 Chalco, proporcionados por CAEM).

En la parte noreste, el acuífero se encuentra en andesitas que provienen de la Sierra Nevada (corte litológico del pozo Hospital Psiquiátrico), ya que desde los 30 a los 94 m de profundidad se reportan andesitas y después de esto una secuencia de tobas arenosas y gravosas hasta los 300 m de profundidad (profundidad total del pozo).

En los documentos disponibles no se tiene información del número de aprovechamientos dentro del área administrativa del acuífero; sin embargo, por la problemática que puede representar la información del REPDA, se trabajó con información interna del OCAVM, en donde se reportan para 2006, 184 aprovechamientos, de los cuales 144 estaban activos y corresponden a pozos. Del total de aprovechamientos activos 84 eran de uso público-urbano, 30 de uso agrícola, ocho de uso industrial, siete de uso pecuario, 11 para uso múltiple, recreativo y servicios y cuatro más sin uso.

Los caudales de los pozos de extracción variaban de la siguiente forma: en la zona cercana a la Sierra Chichinautzin, entre 3 y 80 lps; en la Sierra Nevada, entre 3.5 y 55 lps, y en la zona centro del valle entre 3 y 78 lps.

La profundidad del agua subterránea de acuerdo con la configuración realizada por el OCAVM (2011), era de 96 m en la porción suroriental (ver figura 3.5), a partir de esta zona los valores de profundidad descendían en dirección noroeste, hacia la parte central donde se asienta la comunidad de Chalco, en esta zona las profundidades estaban entre 5 y 8 m.

La configuración de curvas de elevación del nivel piezométrico realizada por el OCAVM (2011), mostró que el flujo del agua subterránea proviene de las sierras Nevada y Chichinautzin (ver figura 3.6), hacia el centro del valle, lo que muestra que la recarga del acuífero se presenta en estas sierras. Cabe recordar que esta trayectoria en el sentido del flujo subterráneo está fuertemente influenciada por la extracción de los pozos.

De acuerdo con el informe proporcionado por el OCAVM (Ariel Consultores, S.A., 2007b), las concentraciones de STD variaban entre 150 y 1,500 ppm. Hacia el oriente, en el pie de monte, se encuentran las curvas de menor valor, confirmando que la recarga del acuífero proviene de las serranías, después se incrementan en sentido NW hasta alcanzar la concentración de 1,500 ppm (ver figura 3.7).

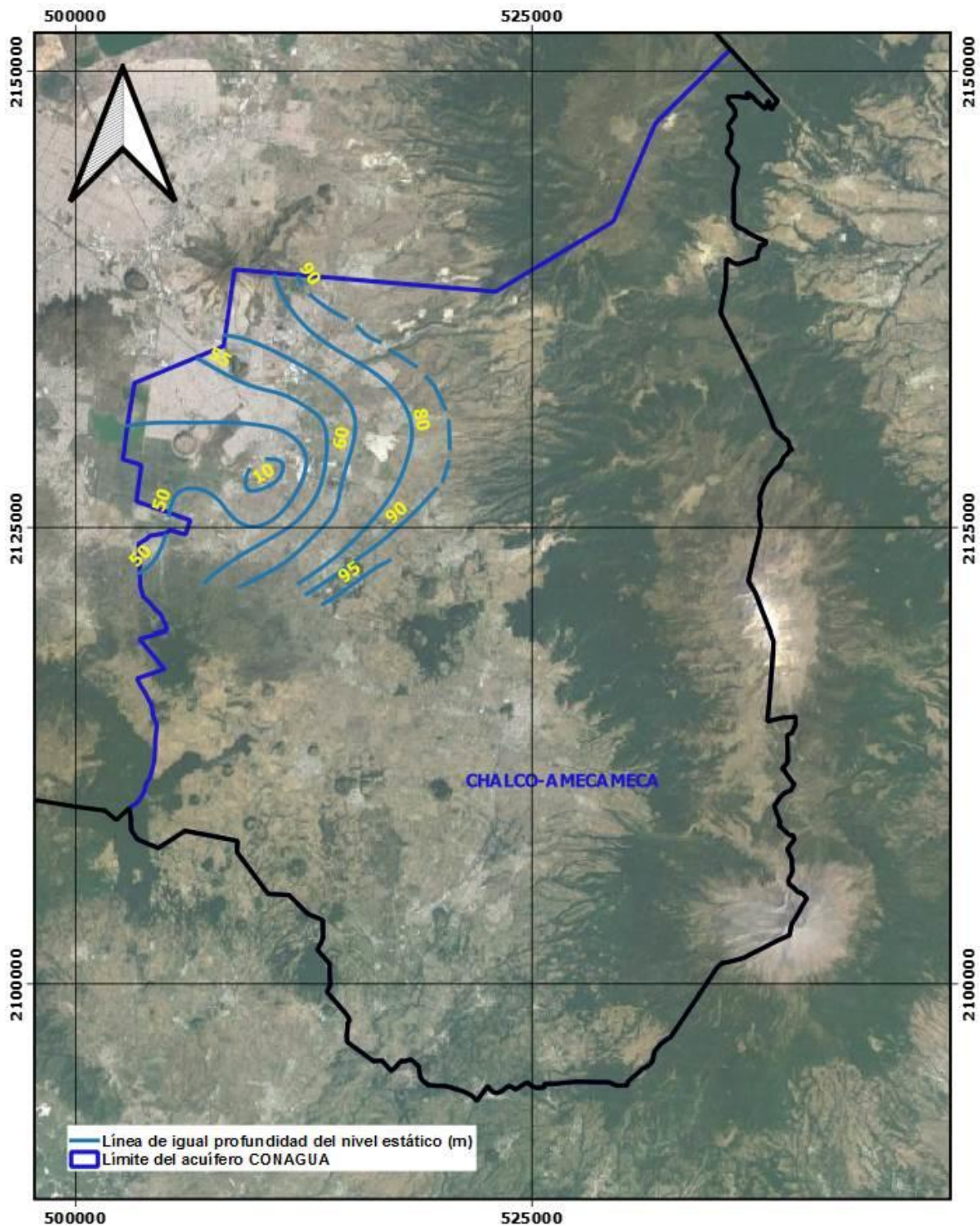


Figura 3.5. Configuración de profundidad del nivel estático para el Acuífero Chalco-Amecameca

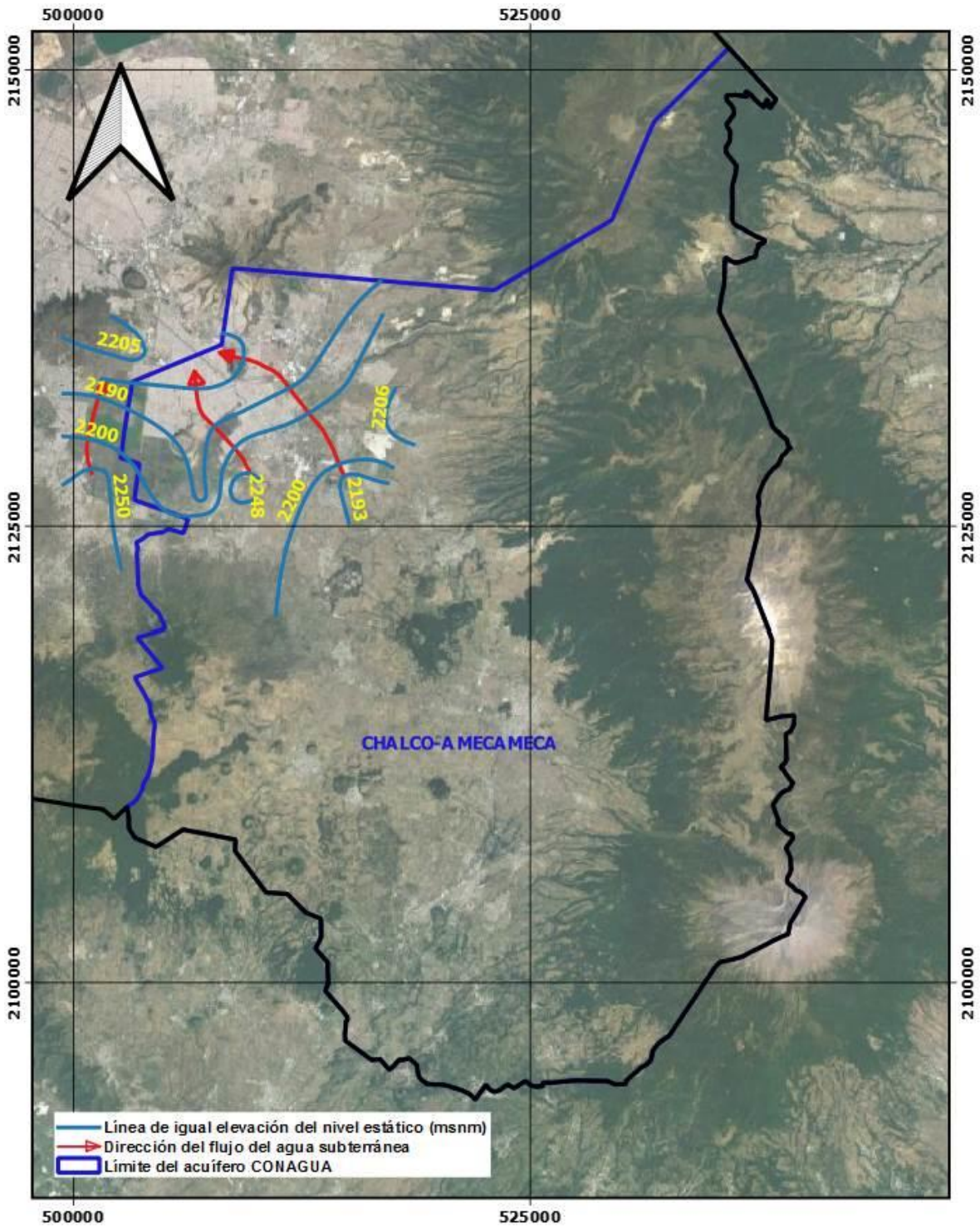


Figura 3.6. Configuración de elevación del nivel estático para el Acuífero Chalco-Amecameca

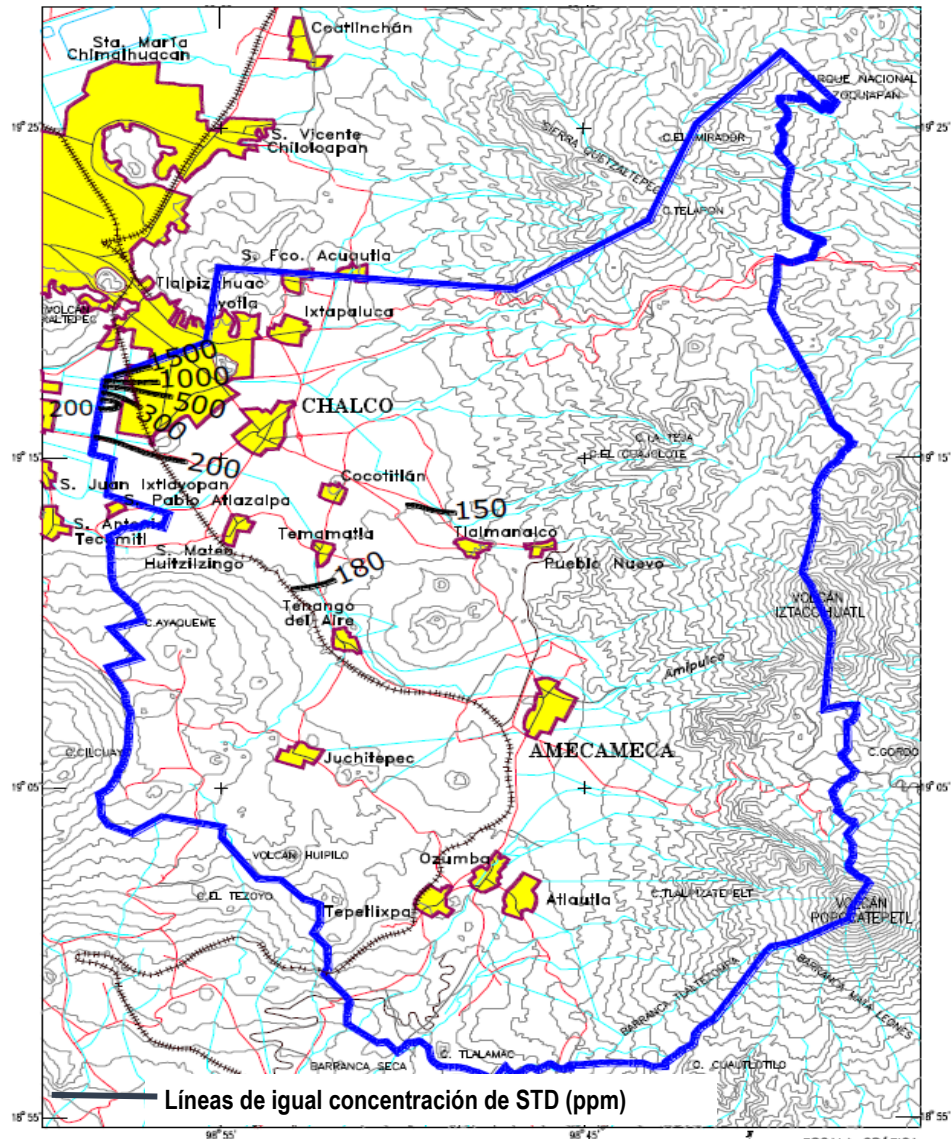


Figura 3.7. Configuración de sólidos totales disueltos para el Acuífero Chalco-Amecameca

○ Acuífero Texcoco

En este acuífero afloran rocas sedimentarias de tipo lacustre y aluvial, sobre rocas volcánicas del Oligoceno y Cuaternario, la principal sierra que domina este acuífero es la Sierra Nevada, que se encuentra al este; las unidades geológicas de acuerdo con un informe interno de la CONAGUA (Ariel Consultores, 2007c), las clasifican con base en su respuesta al paso del agua de la siguiente forma:

La unidad U1 está representada por los sedimentos lacustres que se caracterizan por su baja permeabilidad.

La unidad U2 agrupa a los abanicos aluviales y piroclásticos de la Formación Tarango, caracterizándose ambas por una permeabilidad media.

La unidad U3 integra en general a los materiales volcánicos del Cuaternario, que cuando están afectadas por fracturamiento tienen una permeabilidad alta y funcionan como zonas importantes de recarga a los acuíferos, e incluso pueden conformar buenos acuíferos.

La unidad U4 representa a los materiales volcánicos más antiguos del Mioceno y Plioceno; su escaso fracturamiento les confiere baja permeabilidad y funcionan como el basamento hidrogeológico.

De acuerdo con la información oficial publicada por la CONAGUA (Gerencia de Aguas Subterráneas, sigagis.conagua, 2018), en 2006 se tenían 1,009 aprovechamientos, de los cuales 552 eran activos; incluían norias, manantiales y pozos. Del total de aprovechamientos activos, 256 se destinaban al uso agrícola, 193 para uso público-urbano, 30 para actividades pecuarias, 24 para uso industrial y 49 para uso múltiple y de servicios.

Los valores máximos de profundidad en el Acuífero de Texcoco se encuentran al oriente, en la cercanía de la Sierra de Quetzaltepec, con profundidades superiores a los 100 m.

Con la configuración de igual profundidad de nivel estático para 2011 elaborada por el OCAVM, se observó que las isolíneas son casi paralelas a la sierra, los valores de profundidad disminuyen gradualmente hacia el oeste hasta alcanzar cerca de los 50 m (ver figura 3.8). Sin embargo, con los cortes litológicos recabados en esta misma fuente se observó que existen niveles piezométricos muy someros de 10 m o menos, lo cual está relacionado con la existencia de acuíferos colgados.

El movimiento del agua subterránea, de acuerdo con información de configuraciones realizadas por el OCAVM para 2011, indicaba que el flujo era de este a oeste, de la Sierra Nevada hacia la zona del Lago de Texcoco (ver figura 3.9), lo que indica que la fuente de recarga proviene de la sierra, aunque como se ha comentado esta trayectoria está muy influenciada por la extracción de agua en los pozos.

Los contenidos de STD variaban entre 200 y 1,500 ppm (Ariel Consultores, S.A., 2007c), las curvas de menor valor están cercanas a la Sierra Nevada (ver figura 3.10), indicando la posición aproximada del área de recarga. Los valores máximos se localizaban en la porción oeste de la planicie con 1,500 ppm de concentración.

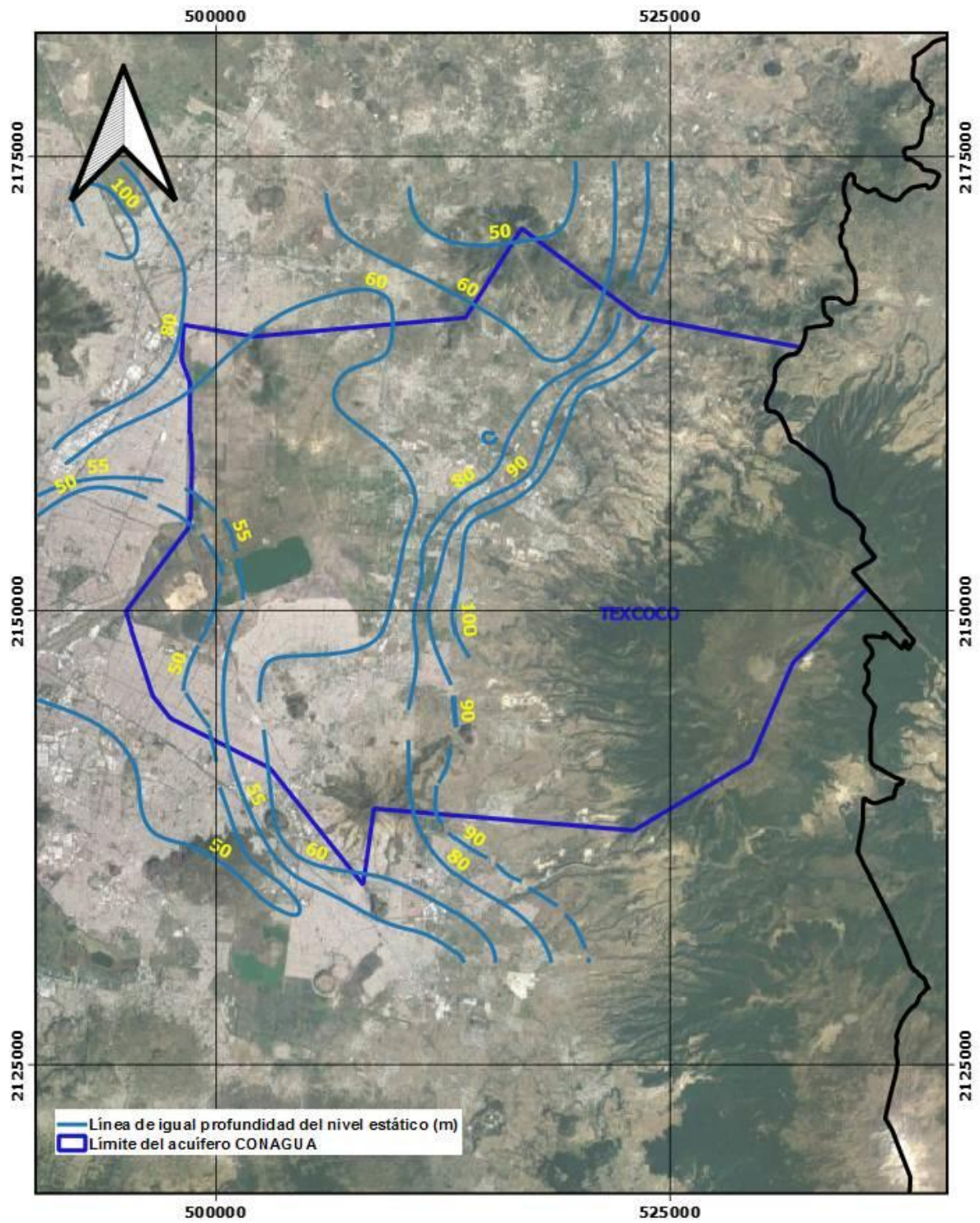


Figura 3.8. Configuración de profundidad del nivel estático para el Acuífero Texcoco

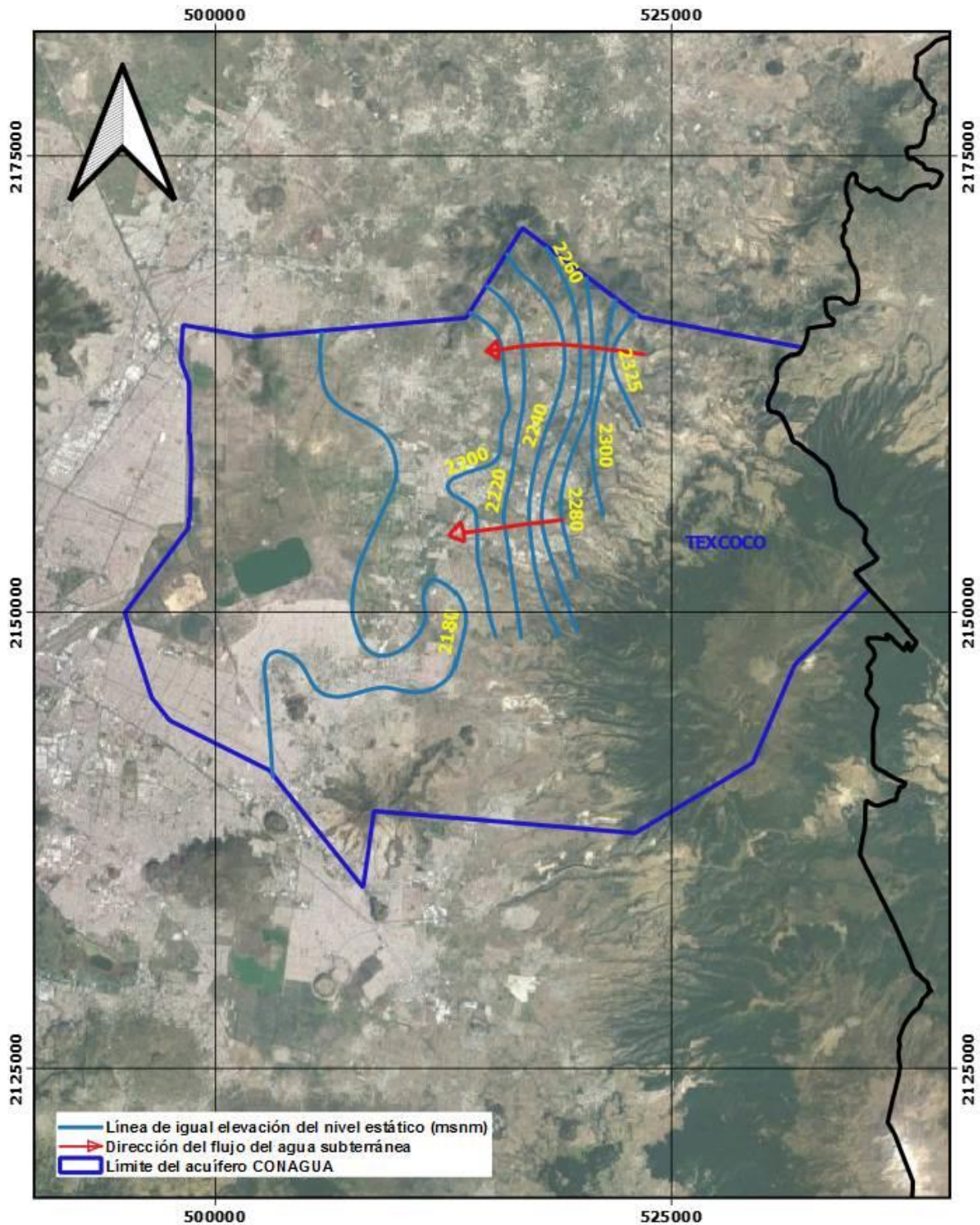


Figura 3.9. Configuración de elevación del nivel estático para el Acuífero Texcoco

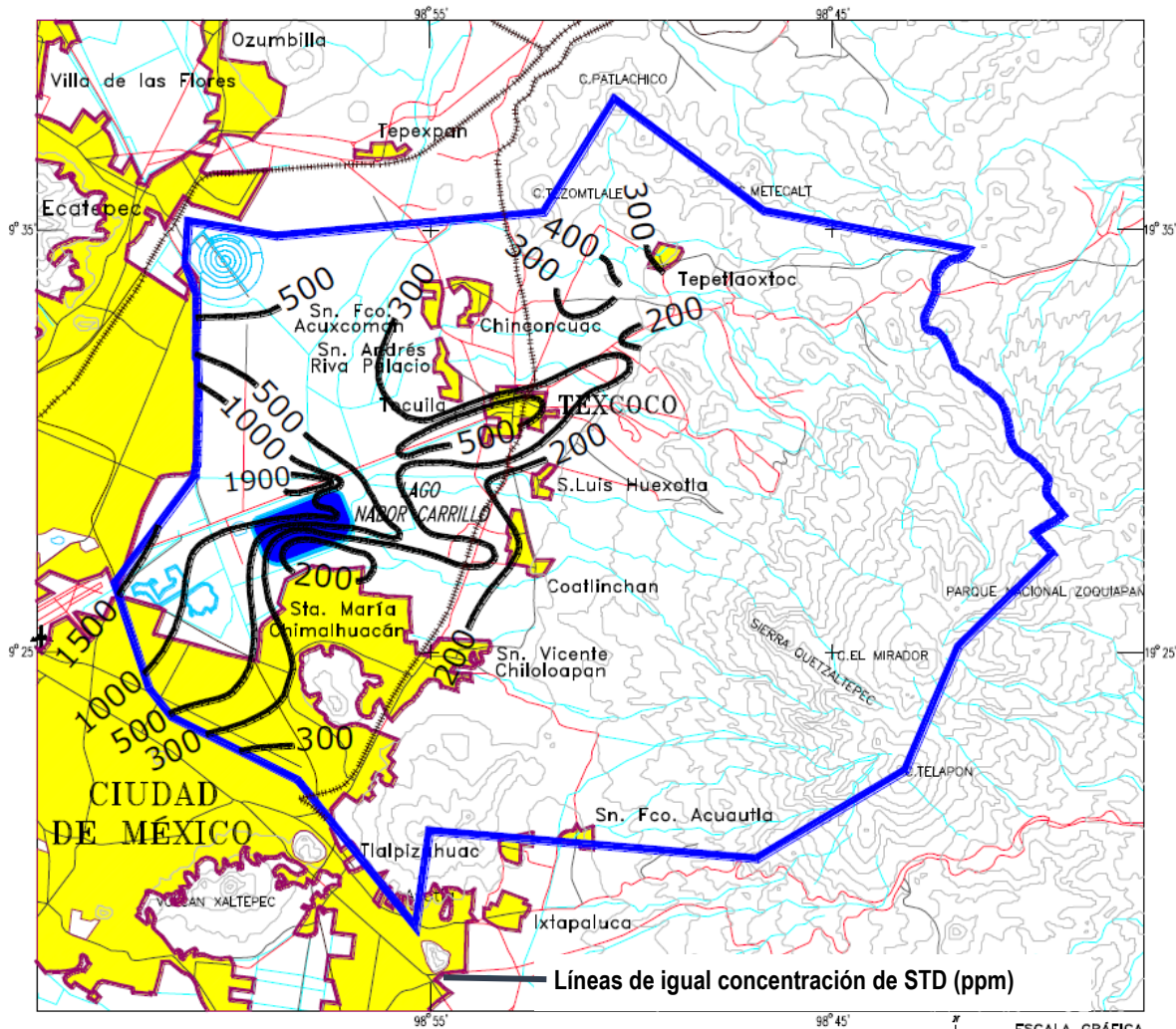


Figura 3.10. Configuración de sólidos totales disueltos Acuífero Texcoco

○ Acuífero Cuautitlán-Pachuca

De acuerdo con la información publicada en el documento de actualización de la disponibilidad media anual del agua subterránea, publicado por la CONAGUA (2018), en este acuífero predomina el material de origen volcánico de diferentes composiciones, que se distribuyen de la siguiente manera:

- La unidad basal está representada por rocas volcánicas riolíticas de escaso fracturamiento, a la cual se le atribuye una permeabilidad baja.
- La unidad superior corresponde con rocas volcánicas andesíticas, con intenso fracturamiento, asociadas con brechas volcánicas poco consolidadas y tobas arenosas, de grano grueso y bastante alteradas, por lo que se considera que tienen una buena

permeabilidad; constituyen el acuífero principal profundo. Sobre la unidad anterior se tiene una secuencia de materiales del Terciario, que incluyen basaltos, brechas y tobas intercalada con materiales piroclásticos finos y sedimentos lacustres; en sus partes volcánicas se consideran altamente permeables.

- Finalmente, sobre esta última secuencia se tienen arenas, arcillas y tobas poco permeables del Cuaternario-Reciente, además de lavas intercaladas con tobas, normalmente drenadas; estos materiales constituyen acuíferos semiconfinados de baja potencialidad hidrogeológica.

De acuerdo con la información oficial publicada por la CONAGUA (2018), en 1991 se tenían 1,038 aprovechamientos, de los cuales 386 eran utilizados para fines agrícolas, 371 eran de uso público urbano, 96 domésticos, 77 pecuario, 73 industrial, 18 comercial y de servicios, nueve recreativos y ocho se utilizaban para la generación de energía eléctrica.

Los caudales de extracción dentro de este acuífero, de acuerdo con información proporcionada por el OCAVM, se encontraban entre uno y 124 lps; los de mayor caudal están ubicados en los alrededores de Tizayuca.

En este acuífero los valores de profundidad del nivel estático son muy variados, como se puede observar en la figura 3.11, los niveles al norte superan los 80 m de profundidad, mientras al sur, en las cercanías de Teotihuacán se encuentran entre 50 y 90 m; al suroeste los valores estaban entre 60 y 100 m; en algunas zonas al suroeste del acuífero en las partes cercanas a la Sierra de Las Cruces, se presentaban valores de entre 10 y 20 m, esto puede deberse a la existencia de un acuífero colgado.

De acuerdo con la configuración de las curvas de elevación del nivel piezométrico realizada por el OCAVM (2011), el flujo del agua subterránea provenía de las sierras de las Cruces, Pachuca y Los Pitos (ver figura 3.12), para continuar su movimiento hacia el centro del valle; esto confirma que la recarga se presenta en estas sierras; como en los acuíferos antes descritos, se debe considerar que el movimiento original del agua subterránea ha sido intensamente modificado por la gran extracción de agua.

Los contenidos de sólidos totales disueltos variaban entre 300 y 1,300 ppm; las menores concentraciones se encontraban al sureste y suroeste, confirmando así la posición de la zona de recarga (ver figura 3.13). Después de su recorrido en el subsuelo las concentraciones alcanzaban valores máximos de 800 ppm hacia la Ciudad de Pachuca; de 900 hacia la Laguna de Zumpango, y de hasta 1,000 ppm al oriente de Cuautitlán.

La edad del agua en el acuífero se ha establecido por medio del método de Carbono 14 (Lesser y Asociados S.A. de C.V., 2008), con edades que van desde 1,278 a 24,330 años; esta información sólo se determinó para la parte del acuífero que corresponde al Estado de Hidalgo.

Las dataciones no tienen una distribución que confirme el sentido en que mueve el agua subterránea, lo cual debe estar relacionado con el hecho de que los pozos aprovechan unidades acuíferas a diferentes profundidades, como en el caso de los pozos de Tlanalpa (al este del acuífero), en donde el pozo que se encuentra al este de la comunidad, reporta una edad de 13,598 años y el ubicado al oeste de 1,484 años; las profundidades totales de estos pozos son de 300 y 200 m, respectivamente y están separados a 2,300 m en línea recta.

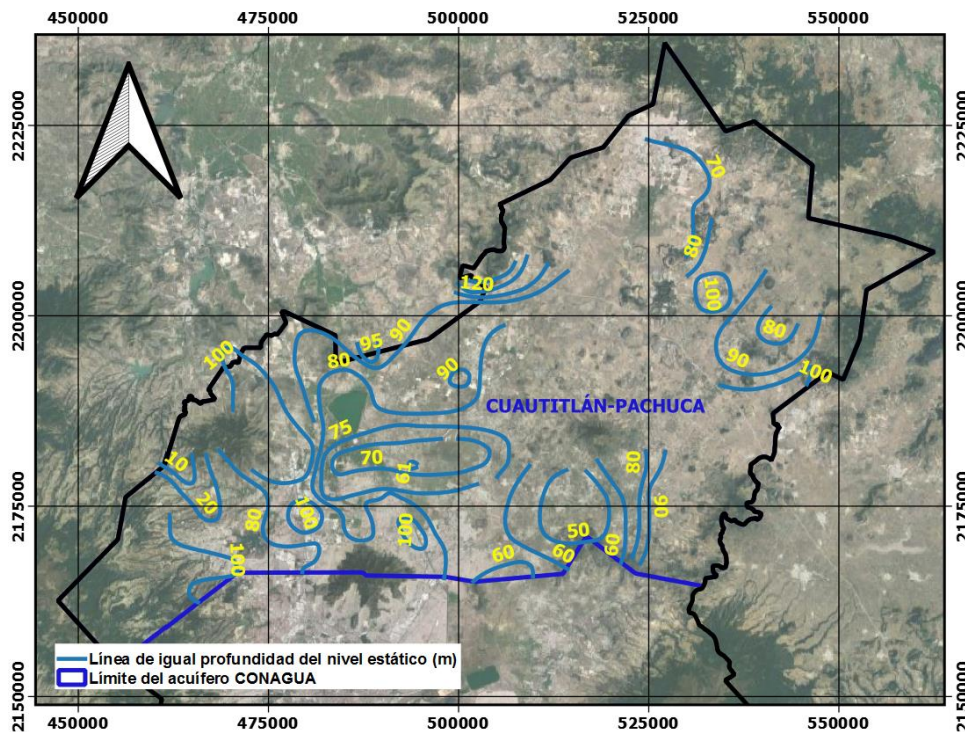


Figura 3.11. Configuración de profundidad del nivel estático, Acuífero Cuautitlán-Pachuca

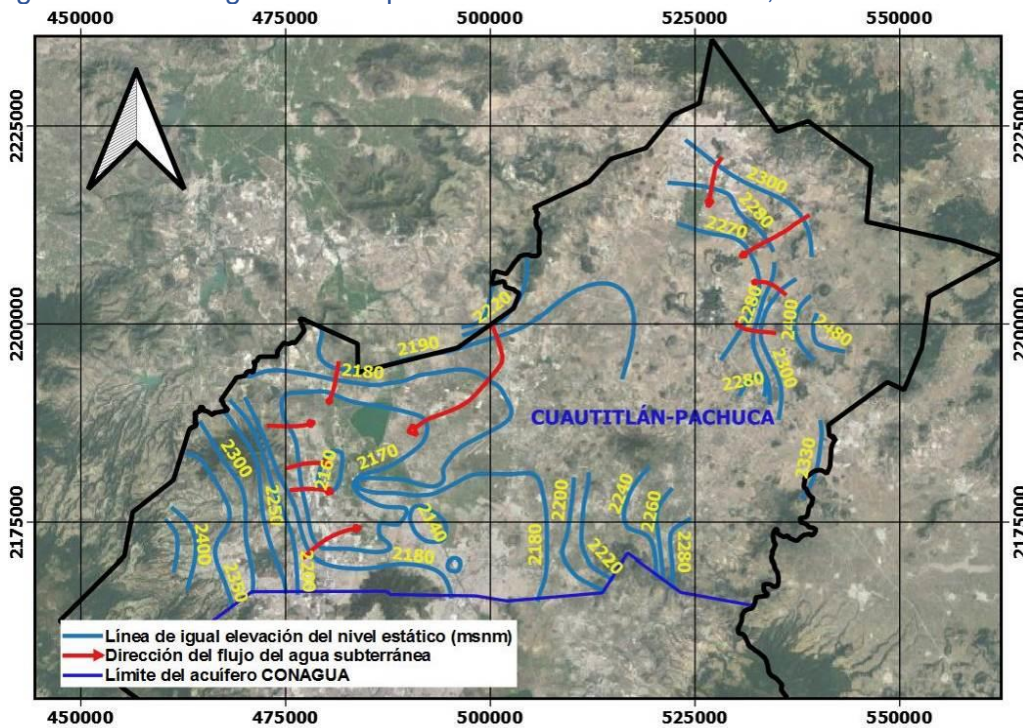


Figura 3.12. Configuración de elevación del nivel estático, Acuífero Cuautitlán-Pachuca

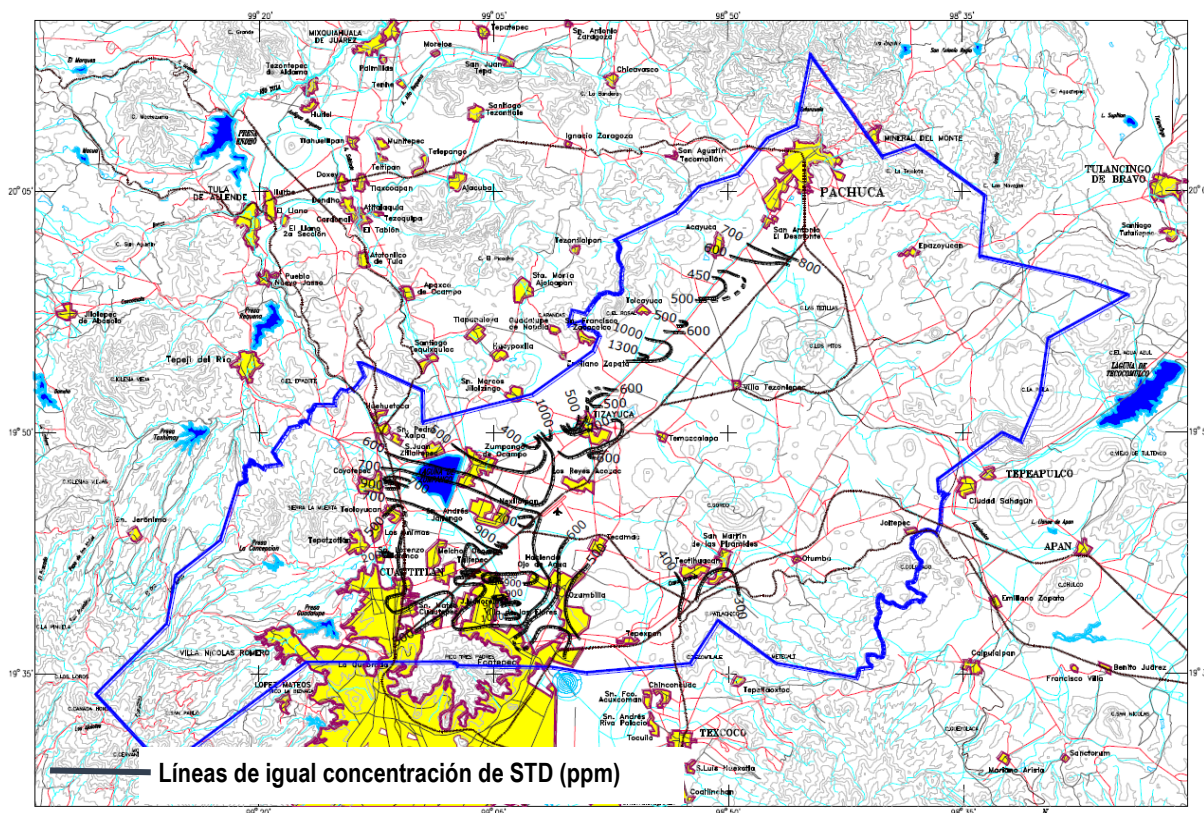


Figura 3.13. Configuración de sólidos totales disueltos, Acuífero Cuautitlán-Pachuca

3.2. Variables de evaluación para el estudio de la recarga al acuífero

Con toda la información disponible y relacionada con la recarga de los acuíferos, se analizaron las variables que en cada uno de estos documentos fueron utilizadas para proporcionar información sobre la capacidad del medio para permitir la infiltración y recarga al acuífero; posteriormente de todas estas variables se seleccionaron aquellas que intervienen de forma directa en el proceso de recarga a los acuíferos que integran el área de estudio.

En la identificación de las zonas de recarga, algunas de las variables pueden ser observadas en superficie y ser fácilmente evaluadas, mientras que otras como la continuidad de los materiales permeables en el subsuelo, se dificulta, por no conocer la comunicación hidráulica de manera directa, para establecer si es factible que el agua que se infiltra pueda llegar hasta el acuífero y recargarlo; esta variable no puede ser observada ni cuantificada directamente. Para evaluar este tipo de variables de comportamiento oculto, se analizó con detalle la información geológica e hidrogeológica recopilada, para interpretar si es factible que exista continuidad en los materiales.

Las variables consideradas como relevantes en el proceso de análisis de recarga, derivadas de los diferentes documentos consultados se presentan en el siguiente listado:

1. Geología
2. Pendiente

3. Densidad de drenaje
4. Tipo de suelo
5. Geomorfología
6. Vegetación y uso de suelo
7. Profundidad del nivel estático
8. Topografía
9. Clima
10. Precipitación
11. Evapotranspiración
12. Escorrentía
13. Capacidad de infiltración

Las variables antes mencionadas y otras que se consideraron relevantes, se agruparon de acuerdo con su relación directa con el medio ambiente, analizando cuáles intervienen de forma directa en el proceso de recarga; de esta forma se dividieron en variables relacionadas con: respuesta del medio a la infiltración; medio biótico; uso del suelo; clima y la pendiente del terreno; todas estas fueron definidas y evaluadas con la información obtenida en las diferentes instituciones consultadas; las variables generales que se emplearon fueron las siguientes:

- Geología y geomorfología, para establecer la respuesta del medio a la infiltración.
- Continuidad lateral, para inferir si el agua que se filtra en las zonas de recarga puede llegar al acuífero de la Cuenca de México y transformarse en recarga.
- Pendiente, a fin de establecer donde se favorece la escorrentía sobre la infiltración.
- Suelo evaluado en función de su condición hidrológica, que es una representación de la conductividad hidráulica del suelo cuando está saturado.
- Vegetación y uso de suelo, analizado con base en el vigor de la vegetación, que estima la densidad, calidad y desarrollo de la vegetación, en función de su grado de verdor, determinado a partir de sensores remotos.
- Precipitación, evaluada a través del análisis estadístico y espacial, con la información de 92 estaciones climatológicas, localizadas dentro y fuera del área de estudio.

3.2.1 Selección y análisis de variables

Con la revisión de la bibliografía, con el apoyo de la cartografía y con el uso e interpretación de las imágenes de satélite de Google Earth (<https://www.google.com/intl/es-419/earth/>), se realizó el análisis de las características del medio en el área de estudio; concluida esta etapa se llevó a cabo una evaluación para definir la importancia de las variables en el proceso de recarga; las variables seleccionadas fueron las citadas al final del apartado 3.2; a continuación se realiza su descripción:

3.2.2.1 Respuesta del medio a la infiltración (Geología y características litológicas)

Para establecer la respuesta a la infiltración de los materiales que conforman a la Cuenca de México, que fueron ampliamente descritos en los capítulos 3.1.1 y 3.1.2 de este informe y que constituyen a los acuíferos de: Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca, se consultaron más de 40 documentos y mapas relacionados con su geología (consultar anexo 1); de todos estos documentos sólo en 18 fue posible conocer

las características físicas de los materiales que pueden favorecer la infiltración y la recarga de los acuíferos (consultar anexo 2).

Con base en los estudios incluidos en el anexo 2 y en la cartografía geológica del INEGI para distintos años, se obtuvieron los tipos de roca existentes, su distribución geográfica, arreglo en vertical (cuál es más joven y cuál más antigua), y los procesos geológicos que provocaron su fracturamiento; esto en conjunto constituye las características físicas de las rocas y determina la facilidad que ofrecen a la infiltración del agua de lluvia.

En el caso de las rocas volcánicas que se encuentran en el área de estudio, se consideró el tipo de proceso predominante durante su génesis, es decir si fueron emitidas a través de procesos de poca energía que dieron lugar a coladas de lava; o bien durante eventos explosivos que generaron: productos piroclásticos (materiales derivados de explosiones volcánicas sin ningún grado de compactación como lapilli y ceniza), tobas y brechas volcánicas (materiales piroclásticos con diferente grado de compactación) e ignimbritas (productos piroclásticos soldados por el fuego).

De igual forma, con base en su composición química se estableció que, en las coladas de lava basálticas y andesíticas, durante su enfriamiento se fracturan, en mayor grado las basálticas (Arce et al., 2019); por otra parte, los materiales piroclásticos llegan a formar conos de cenizas (conos cineríticos) con laderas de pendiente de entre 30° y 40° (Tarbuck y Lutgens, 2005) y grado de compactación variable.

Las tobas y brechas volcánicas no soldadas que por su génesis se localizan en las cimas de sierras o en valles, pueden llegar a presentar un grado de consolidación que varía de medio a alto (SGM, 2009), en estos casos su porosidad dependerá de la granulometría de sus componentes, así como de su grado de compactación. Cuando las tobas y brechas volcánicas están soldadas (ignimbritas), en función de su composición química estarán más o menos fracturadas; en este caso las de composición riolítica suelen presentar un mayor grado de fracturamiento.

Existen también estructuras volcánicas combinada (estratovolcanes), en las que están intercalados materiales piroclásticos y coladas de lavas, llegando a formar volcanes muy altos y de gran extensión (SGM, 2014), con inclinaciones de hasta 40° (Tarbuck y Lutgens, 2005); en estos estratovolcanes los productos piroclásticos no están soldados y su grado de compactación varía de moderado a bajo; el fracturamiento de las coladas de lava intercaladas dependerá nuevamente de su composición química, siguiendo la misma regla de que las de composición basáltica estarán más fracturadas; estos volcanes forman parte de las grandes montañas que limitan la cuenca.

Con esta información se tuvo conocimiento de las unidades litológicas y formaciones geológicas que se presentan en la cuenca, así como de sus características físicas; su distribución geográfica se determinó a través de los mapas geológicos disponibles; adicionalmente, se analizaron las geoformas por medio de la interpretación de los mapas topográficos del INEGI a escala 1:50,000 y de las imágenes de satélite del portal de Google Earth; de esta manera se generó un mapa en el que se delimitaron terrenos en los que predominan rocas fracturadas, materiales porosos y estructuras volcánicas en las que están alternadas rocas fracturadas y porosas; como resultado

se obtuvo una clasificación y zonificación cualitativa, de áreas en función de su respuesta a la infiltración (figura 3.14).

Por lo antes expuesto, el shape resultante no fue un mapa geológico con unidades litológicas ni con formaciones geológicas, sino una capa del sistema de información geográfico en el que se delimitaron los principales tipos de materiales con base en sus características físicas que permiten el paso del agua; de esta forma se identificaron las rocas fracturadas (basaltos, andesitas-dacitas y riolitas), los materiales porosos (piroclastos y tobas), los materiales volcánicos combinados, así como los sedimentos aluviales y lacustres; en esta capa se delimitaron también las zonas urbanas (figura 3.14 y mapa 3.2).

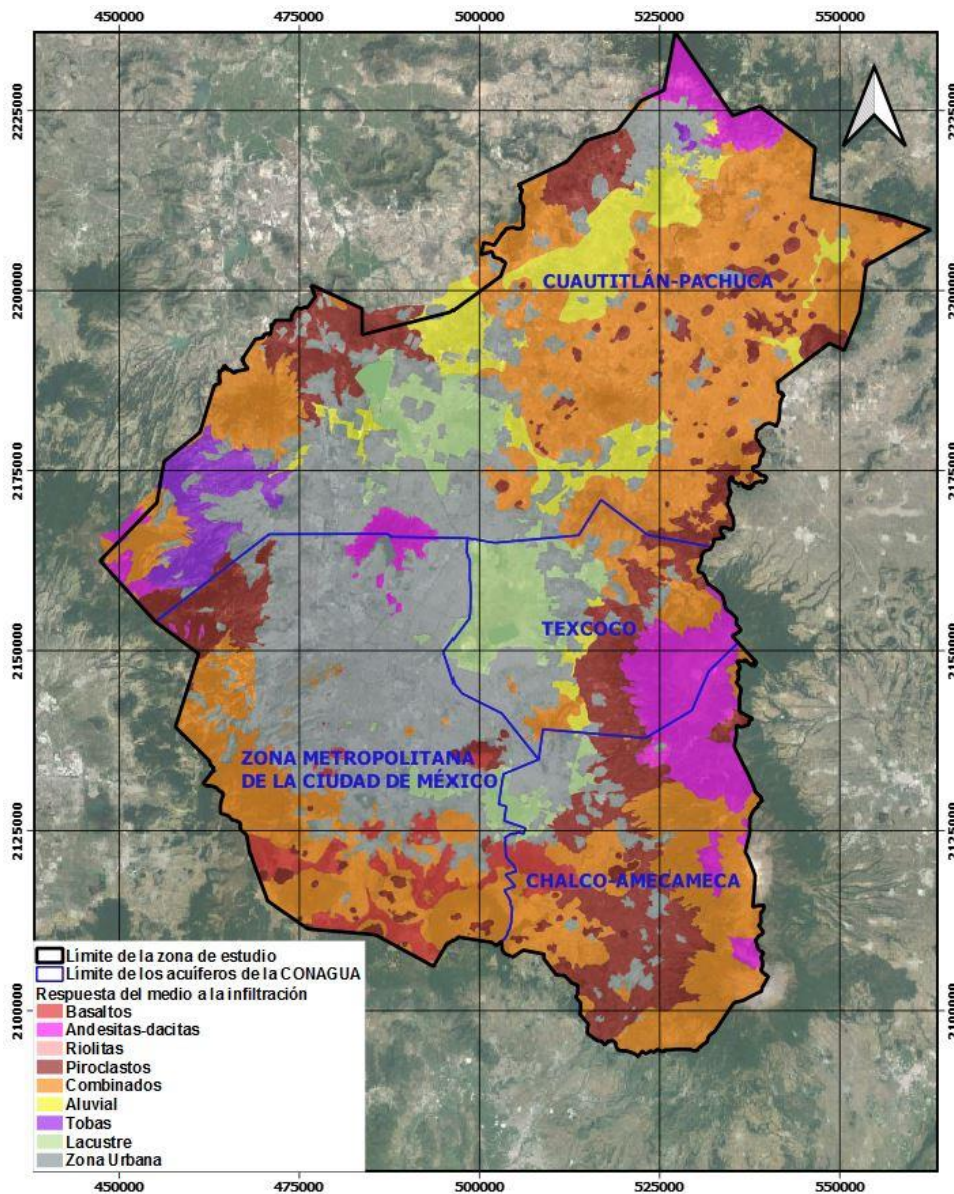


Figura 3.14. Mapa con los materiales clasificados en función de su respuesta a la infiltración

3.2.2.2 Condición hidrológica de suelo

Para la evaluación de esta variable primero se realizó un análisis para determinar el uso de la “clasificación hidrológica” del suelo, publicada en el “Part 630 Hydrology National Engineering Handbook”, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés), publicado en 2009 (Natural Resources Conservation Service, 2009).

Al no contar con la información directa (de campo) para aplicar la metodología establecida por la USDA, se consideró como alternativa el uso de la metodología para determinar el grupo hidrológico, con base en la propuesta de Hernández (2014), quien calcula el “Número de Curva (NC)” para toda la República Mexicana, aplicando la metodología del TR-55 “Hidrología urbana para cuencas pequeñas”, publicada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos” (Division, 1986).

La clasificación de grupos hidrológicos de suelos de acuerdo con la TR-55, busca conocer la tasa mínima de infiltración obtenida para un suelo desnudo, después de una humectación prolongada. Se considera que la tasa de infiltración es la tasa a la que el agua ingresa al suelo y está controlada por las condiciones de la superficie. De acuerdo con el TR-55 los grupos de suelos tienen las siguientes características de infiltración y escorrentía:

- Los suelos del grupo A, tienen bajo potencial de escorrentía y altas tasas de infiltración, incluso cuando están completamente mojados. Consisten principalmente de un espesor grande de arena, o bien la arena o grava está excesivamente drenada y tienen una alta tasa de transmisión de agua (mayor que 0.76 cm/h).
- Los suelos del grupo B, tienen tasas de infiltración moderadas cuando están saturados y consisten principalmente de suelos moderadamente gruesos, moderadamente bien a bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. En este grupo los suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua (0.38 a 0.76 cm/h).
- Los suelos del grupo C, tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente humedecidos y consisten principalmente de suelos con una capa que impide el movimiento descendente de agua; son suelos con textura moderadamente fina a fina. Estos tienen una baja tasa de transmisión de agua (0.12 a 0.38 cm/h).
- Los suelos del grupo D, tienen un alto potencial de escorrentía, tienen muy bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados y consisten principalmente en suelos arcillosos con un alto potencial de hinchamiento; son suelos con una capa freática alta de forma permanente, tienen una capa de arcilla en o cerca de la superficie, a poca profundidad; son suelos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión de agua (0.00 a 0.12 cm/h).

Con este punto de partida, para asignar el grupo hidrológico de suelos se utilizó el Conjunto Nacional de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250,000, Serie II, elaborada entre 2002 y 2007, en formato digital, del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2015).

De acuerdo con la clasificación de suelos en México propuesta por Hernández (2014), se consideró el tipo de suelo, la unidad clasificadora y la textura (gruesa, media y fina); esta

información se obtuvo de la carta edafológica del INEGI (2015) y la clasificación se determinó con base en la tabla 3.1 (ver mapa 3.3, anexo 2).

Tabla 3.1. Agrupaciones del tipo de suelo según el USDA, para determinar el grupo hidrológico de suelo

Tipo de suelo (INEGI)	Unidad calificadora	Grupo de suelo según el USDA por textura						
		Gruesa	Media	Fina				
Gleysol	abráptico, álbico, alcálico, ándico, arénico, arídico, cálcico, cálcico, crómico, cutánico, dístrico, endoesquelético, endoestágnico, endopetrogípsico, endosálico, endosódico, epiesquelético, epipetrogípsico, episálico, episódico, esquelético, estágnico, ferrálico, férrico, fibrico, flúvico, fólico, gélico, gípsico, gipsírico, grúmico, háptico, hipercálcico, hiperdístrico, hiperesquelético, hipergípsico, hiperótrico, hipersálico, hipersódico, hipocálcico, hipoferrálico, hipolúvico, hipoplíntico, hiposálico, hiposódico, hístico, húmico, mázico, melánico, mesotrófico, mólico, molihúmico, nátrico, ótrico, ortodístrico, páquico, paralítico, pélico, petrosálico, prótico, réico, réndzico, ródico, rúbico, rúptico, sálico, saprihístico, silándico, sódico, téfrico, úmbrico, umbrihúmico, vítrico, yémico.	B	C	D				
Histosol								
Planosol								
Plintosol								
Solonchak								
Solonetz								
Acrisol	abráptico, álbico, alcálico, ándico, arénico, arídico, cálcico, cálcico, crómico, cutánico, dístrico, endoesquelético, endoestágnico, endopetrogípsico, endosálico, endosódico, epiesquelético, epipetrogípsico, episálico, episódico, esquelético, estágnico, ferrálico, férrico, fibrico, flúvico, fólico, gélico, gípsico, gipsírico, grúmico, háptico, hipercálcico, hiperdístrico, hiperesquelético, hipergípsico, hiperótrico, hipersálico, hipersódico, hipocálcico, hipoferrálico, hipolúvico, hipoplíntico, hiposálico, hiposódico, hístico, húmico, mázico, melánico, mesotrófico, mólico, molihúmico, nátrico, ótrico, ortodístrico, páquico, paralítico, pélico, petrosálico, prótico, réico, réndzico, ródico, rúbico, rúptico, sálico, saprihístico, silándico, sódico, téfrico, úmbrico, umbrihúmico, vítrico, yémico.	B	B	C				
Alisol								
Cambisol								
Gipsisol								
Lixisol								
Luvisol								
Nitosol	calcárico, endogléyico, endoléptico, endopétrico, endopetrocálcico, endopetrodútrico, endoplíntico, epigléyico, epiléptico, epipétrico, epipetrocálcico, epipetrodútrico, epiplíntico, eútrico, gléyico, hiperéutico, léptico, lítico, lúvico, nítrico, pétrico, petrocálcico, petrodútrico, plíntico, profúndico, síltico, takírico, vértico.	B	C	D				
Vertisol								
Andosol	abráptico, álbico, alcálico, ándico, arénico, arídico, cálcico, cálcico, crómico, cutánico, dístrico, endoesquelético, endoestágnico, endopetrogípsico, endosálico, endosódico, epiesquelético, epipetrogípsico, episálico, episódico, esquelético, estágnico, ferrálico, férrico, fibrico, flúvico, fólico, gélico, gípsico, gipsírico, grúmico, háptico, hipercálcico, hiperdístrico, hiperesquelético, hipergípsico, hiperótrico, hipersálico, hipersódico, hipocálcico, hipoferrálico, hipolúvico, hipoplíntico, hiposálico, hiposódico, hístico, húmico, mázico, melánico, mesotrófico, mólico, molihúmico, nátrico, ótrico, ortodístrico, páquico, paralítico, pélico, petrosálico, prótico, réico, réndzico, ródico, rúbico, rúptico, sálico, saprihístico, silándico, sódico, téfrico, úmbrico, umbrihúmico, vítrico, yémico.	A	B	C				
Arenosol								
Calcisol								
Chermozem								
Durisol								
Fluvisol								
Kastañozem								
Leptosol								
Phaeozems					calcárico, endogléyico, endoléptico, endopétrico, endopetrocálcico, endopetrodútrico, endoplíntico, epigléyico, epiléptico, epipétrico, epipetrocálcico, epipetrodútrico, epiplíntico, eútrico, gléyico, hiperéutico, léptico, lítico, lúvico, nítrico, pétrico, petrocálcico, petrodútrico, plíntico, profúndico, síltico, takírico, vértico.	B	C	D
Regosol								
Umbrisol								

Fuente: Hernández, 2014.

Con los resultados de este análisis se elaboró otra capa del sistema de información geográfico, la cual se presenta en la figura 3.15 y en el mapa 3.3 del anexo 2.

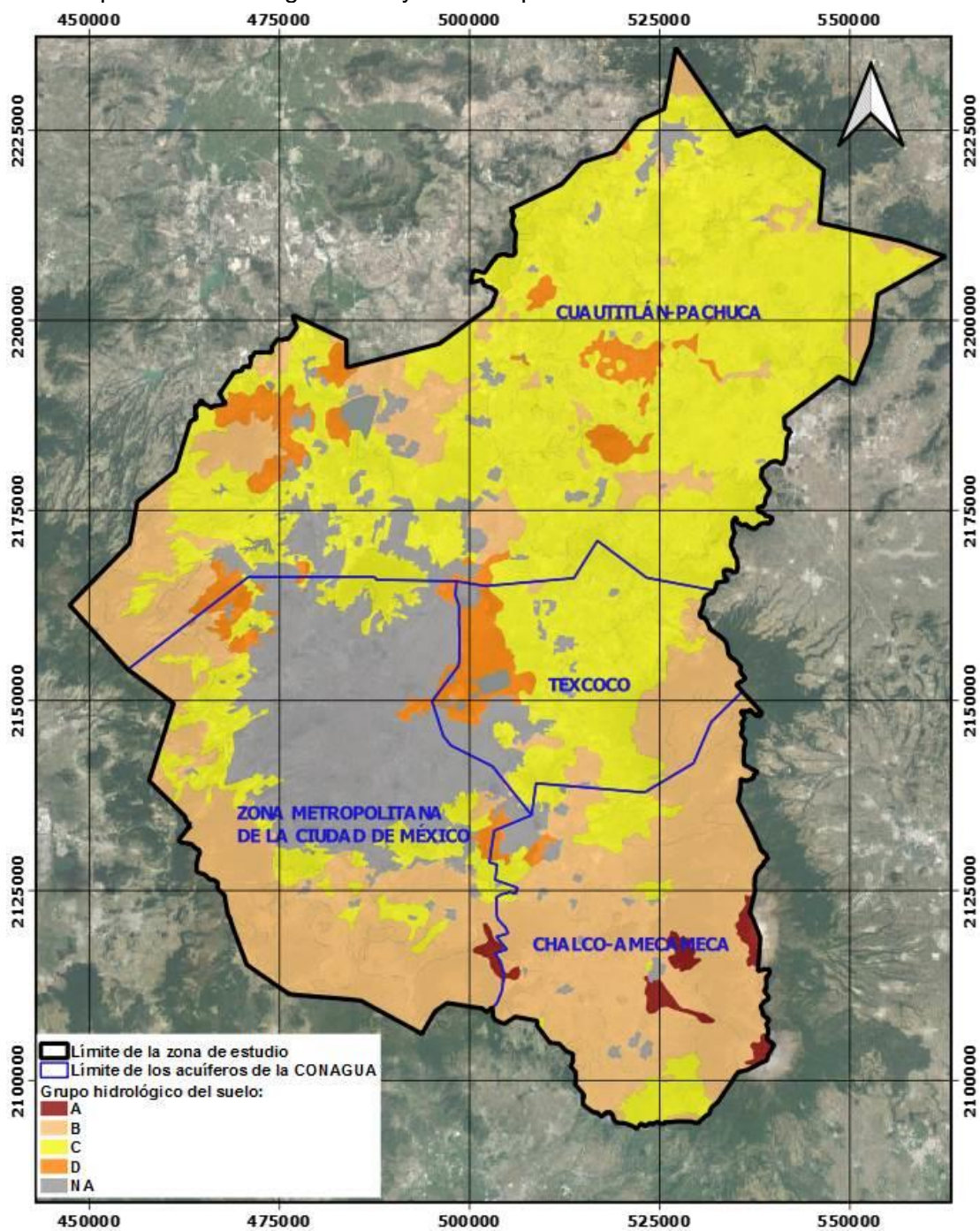


Figura 3.15. Mapa con la distribución de los grupos hidrológicos de suelo que corresponden a la edafología de México

3.2.2.3 Vigor de la vegetación

Esta variable se determinó a partir de los índices de vegetación que a continuación se describen:

- Índices de vegetación

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada, para producir un valor simple que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable (Campbell y Wynne, 2013).

También puede interpretarse como una medida de la reflectancia de la superficie y proporciona una estimación cuantitativa del crecimiento de la vegetación y la biomasa (Arabameri y Reza, 2019).

En general, si hay mucha más radiación en longitudes de onda cercanas al infrarrojo que en longitudes de onda visible reflejada, es probable que la vegetación en ese píxel sea densa y pueda contener algún tipo de bosque. Si hay muy poca diferencia entre la intensidad de longitudes de onda visibles y del infrarrojo cercano reflejadas, la vegetación es escasa.

El Índice Normalizado de Vegetación (Normalized Difference Vegetation Index o NDVI), se calcula a partir de la luz visible e infrarroja reflejada por la vegetación. La vegetación densa absorbe la mayor parte de la luz visible que le llega, y refleja una gran parte de la luz del infrarrojo cercano. La vegetación escasa o poco saludable refleja más luz visible y menos luz en el infrarrojo (Cambell y Wynne, 2013).

En resumen, el índice NDVI, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, con base en la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja; este proceso se realiza por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial.

- Desarrollo del mapa de vigor de la vegetación para el área de estudio

Para elaborar este mapa, se usó el índice NDVI a partir de imágenes de satélite Sentinel-2 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>), en particular una imagen de noviembre del 2018 y otra del mes de marzo del 2019, con las cuales se obtuvo el promedio de los valores del índice para ambos periodos.

Posteriormente, con el método de desviación estándar, se reclasificó el NDVI en cinco clases, para definir los valores de cada clase; después, a partir del área se realizó un proceso de generalización para eliminar polígonos muy pequeños, a fin de tener áreas mínimas de 0.5 ha.

En resumen, el mapa de vigor de la vegetación obtenido es un indicador indirecto de la cantidad y estado de la vegetación en el área de estudio. En la figura 3.16 y en el mapa 3.4 del anexo 2, se presentan los resultados gráficos de este análisis.

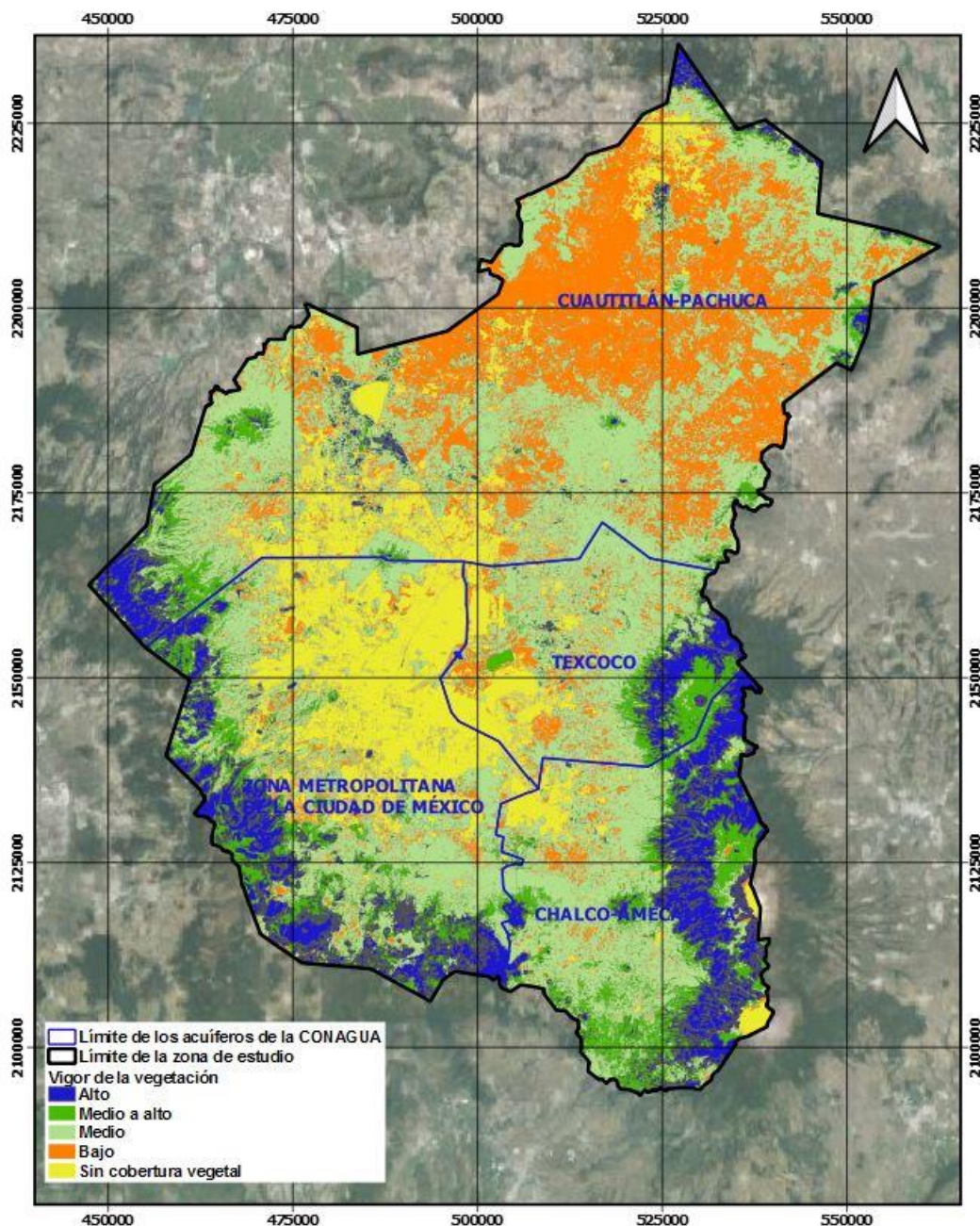


Figura 3.16. Mapa de vigor de la vegetación

3.2.2.4 Pendiente del terreno

Desde el punto de vista de recarga de acuíferos, la variable pendiente resulta de gran importancia, ya que a mayor pendiente se favorece el escurrimiento más que la infiltración y a menor pendiente se tiene mayor tiempo de estadía del agua sobre el terreno y se favorece la filtración. Para realizar la evaluación de la pendiente se revisaron los documentos más importantes en donde se ha realizado el cálculo de la recarga, estos son: Velasco-Molina (1991) y Martínez de Azagra (2006).

Como resultado de la revisión de los documentos, se encontró que se han desarrollado diferentes métodos para relacionar la pendiente con la infiltración, los cuales en su mayoría están enfocados al concepto de “*infiltración del agua de lluvia en suelos*”. En los documentos consultados siempre se vincula la pendiente a otras variables, como la textura del suelo, su grado de permeabilidad y el tipo de vegetación, para finalmente evaluar un coeficiente de infiltración (C_i).

De esta forma, una de las variables que en todos los casos se hace intervenir para el cálculo del C_i , es la pendiente, de la cual se cita lo siguiente:

“La pendiente aumenta el coeficiente de escorrentía, pues una misma microtopografía embalsa más agua en terrenos tendidos que en terrenos empinados (figura 3.17). A su vez al aumentar la escorrentía superficial crece la erosión hídrica que lima el microrelieve del terreno alisando la ladera y reduciendo las microdepresiones. Ambos motivos explican la dependencia del coeficiente de escorrentía con la pendiente. Conviene añadir, que los dos efectos señalados no inciden en superficies prácticamente lisas (tejados, zonas asfálticas etc.) de manera que en tales superficies no cabe esperar tal dependencia” (Martínez de Azagra, 2006)

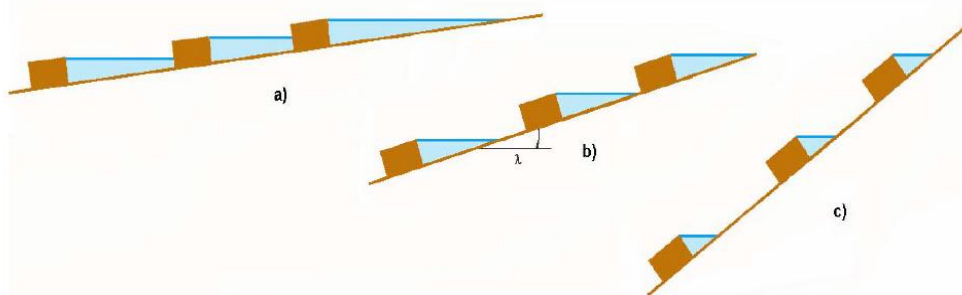


Figura 3.17. Forma en la pendiente incide sobre el coeficiente de escorrentía

En publicaciones de hidrología, para estimar el coeficiente de escorrentía se han desarrollado tablas que apoyan y orientan sobre el valor del coeficiente de acuerdo con la vegetación, uso de suelo tipo de suelo y rangos de pendiente.

Para el objetivo de este proyecto, en donde la pendiente es una variable independiente, se buscaron tablas en las que se utilizaron rangos para dividir a esta variable, de estas se seleccionó la presentada por Velasco y Molina (1991, citado en Martínez de Azagra, 2006); en donde la pendiente se hace intervenir para obtener el C_i . De esta forma se tomaron como base las

consideraciones de este investigador y la variable pendiente quedó dividida en los siguientes rangos: 0 a 5%, 5 a 10% y 10 a 30%.

En esta clasificación los rangos de la pendiente se manejan en porcentaje (%); para facilitar el manejo se realizó la conversión de las pendientes de porcentajes a grados. Los rangos ya transformados fueron los siguientes: de 0° a 3°; de 3° a 6° y de 6 a 18°; como en la superficie de la zona de estudio se tienen pendientes mayores a 18°, se incluyó una cuarta división correspondiente a las pendientes mayores a 18°.

Los resultados del análisis de la pendiente del terreno se muestran en la figura 3.18 y en el mapa 3.5 del anexo 2.

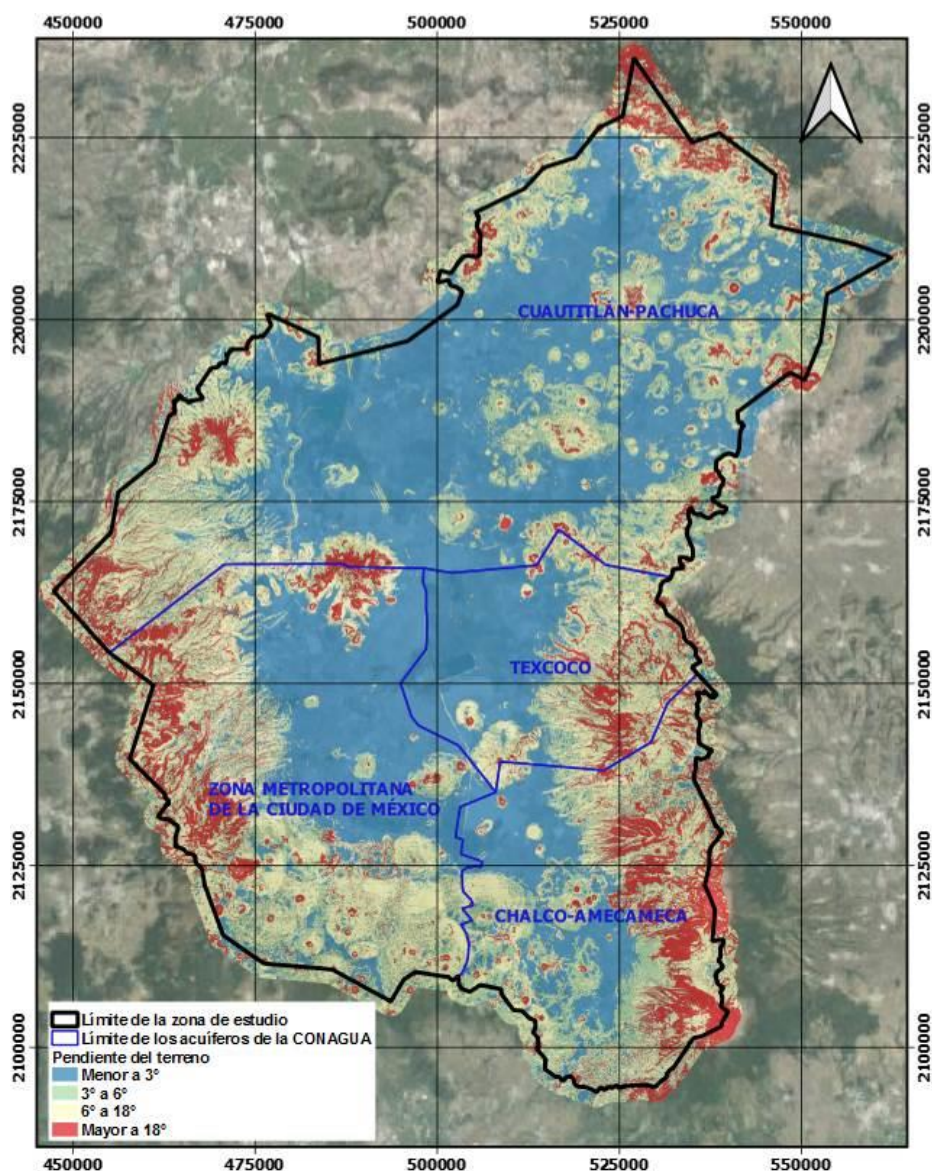


Figura 3.18. Mapa de rangos de pendiente en el área de estudio

3.2.2.5 Precipitación

La cantidad de agua que se infiltra al subsuelo y que puede recargar a los acuíferos de forma natural proviene de la lluvia, por tal motivo fue importante el análisis de esta variable; para conocer y determinar la disponibilidad del agua de lluvia, se consultó la información del Extractor Rápido de Información Climatológica IV (ERIC), realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), publicado en 2016; de esta fuente se obtuvieron datos de precipitación de las estaciones meteorológicas activas dentro y fuera de la zona de estudio (figura 3.19); en total se obtuvo información de 92 estaciones (activas e inactivas).

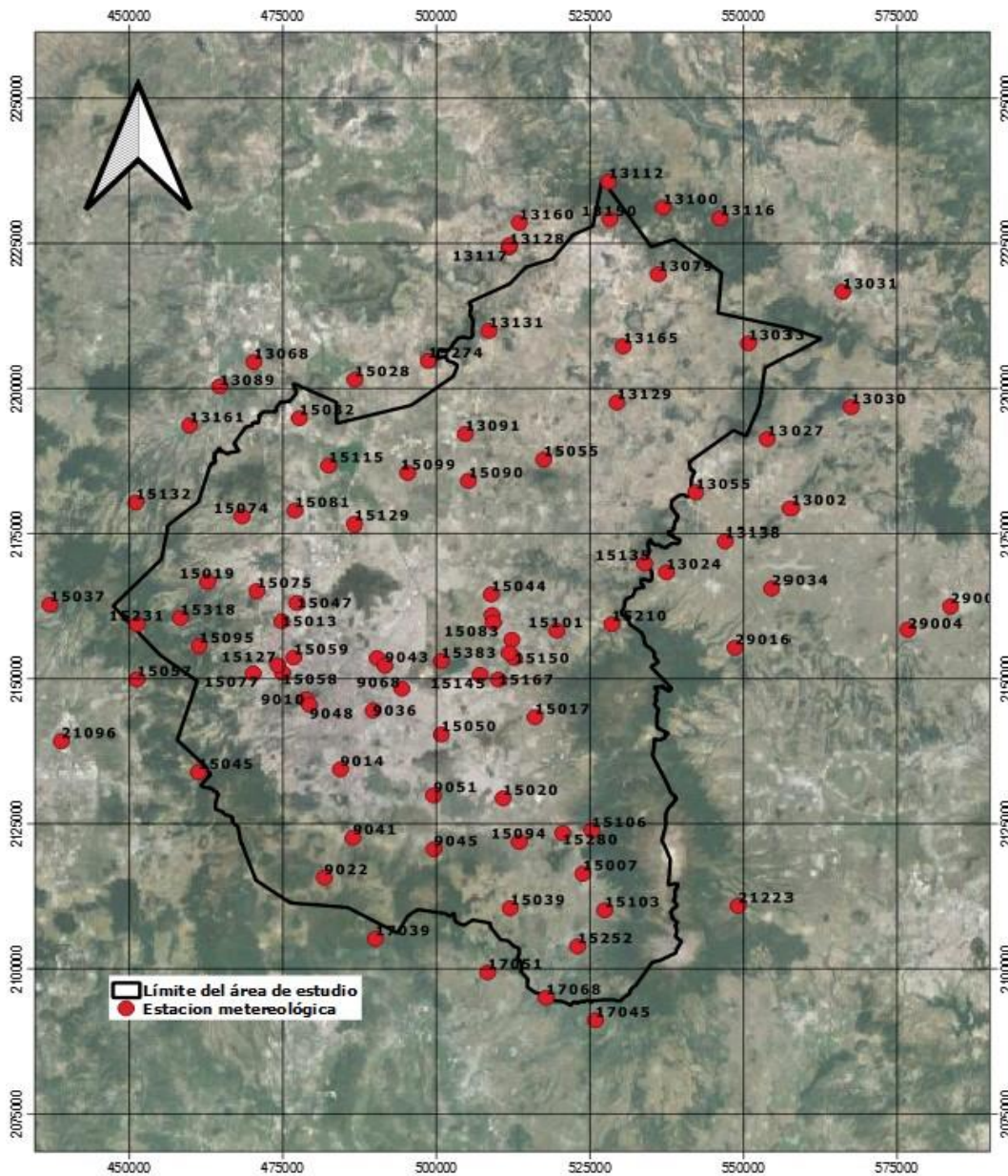


Figura 3.19. Localización de estaciones meteorológicas

Para clasificar y asignar pesos a la variable de precipitación, se interpolaron los valores de las estaciones meteorológicas por medio del método Kriging, con el modelo de semivariograma lineal, el resultado fue un shape y un archivo ráster; con esta base posteriormente se realizó la definición de intervalos con el método de desviación estándar, con el cual se definieron de manera automática el número de intervalos y los límites de cada intervalo.

Los promedios de precipitación en cada rango o intervalo se obtuvieron a partir del análisis espacial zonal; como información de entrada para la generación de la figura 3.20 y del mapa 3.6 contenido en el anexo 2, se usaron los polígonos de la precipitación con la clasificación de rangos incluidos en el shape citado, así como el archivo ráster derivado del proceso de interpolación.

Los rangos finalmente generados fueron los siguientes:

- Menos de 640 mm
- Entre 640 y 842 mm
- Entre 842 y 1,045 mm
- Entre 1,045 y 1,248 mm
- Más de 1,248 mm

En la figura 3.20 se observa que los menores valores de precipitación se presentan al noreste de la zona de estudio y los mayores al sur y este.

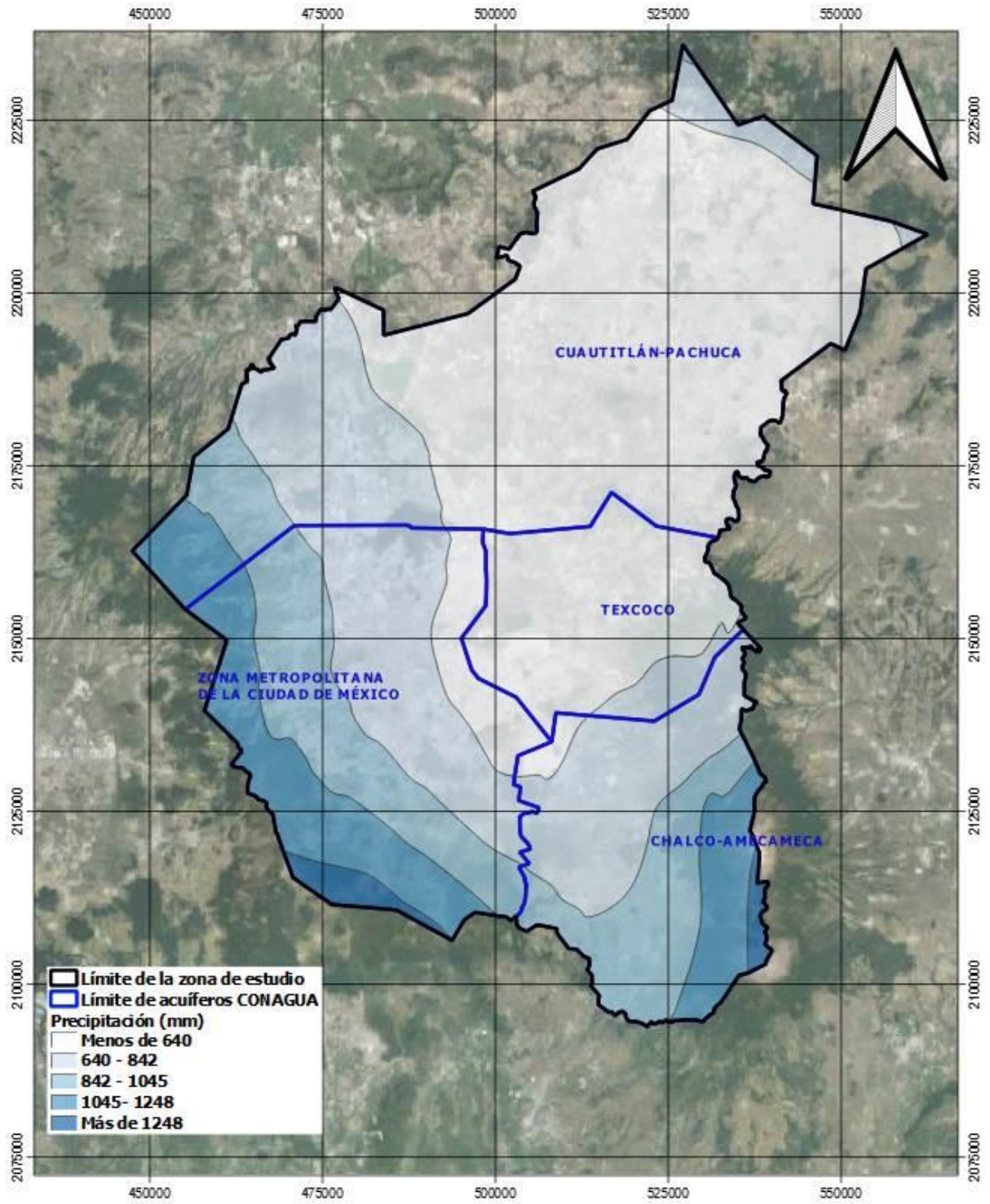


Figura 3.20. Mapa con la zonificación de la precipitación

3.2.2.6 Continuidad lateral de los materiales permeables

Como punto de partida para evaluar esta variable, se analizó la información bibliográfica recopilada para conocer la geología del subsuelo, con objeto de identificar la secuencia de las unidades y formaciones geológicas (estratigrafía), lo cual fue de gran utilidad para inferir la distribución a profundidad de las unidades litológicas.

Con base en este conocimiento, la continuidad de las unidades litológicas se consideró en dos direcciones: horizontal (lateral) y vertical; de esta forma las unidades en el subsuelo se dividieron en continuas y no continuas, en función de la extensión de las rocas que se encuentran aflorando y su potencial continuidad hidráulica hacia el acuífero; con esto se infirió si el agua que se infiltra en las zonas de recarga puede llegar hasta los materiales en donde se localizan los pozos que aprovechan al acuífero.

Para determinar la continuidad de las unidades se consultaron los estudios hidrogeológicos más representativos, como: Ariel Consultores, S.A. (2007a); Lesser y Asociados S.A. de C.V., (2008); Morales-Casique et al. (2014); Edmunds et al. (2002), entre otros; de forma complementaria se analizaron cortes litológicos obtenidos en SACMEX, OCAVM y CAEM, perforados en distintos años, de los pozos cercanos a las zonas de recarga identificadas. De esta manera se correlacionó el tipo de materiales que afloran en las zonas de infiltración, con los que fueron perforados en los pozos próximos.

Las unidades en el subsuelo conocidas con base en los documentos analizados se subdividieron y se clasificaron en lavas y tobas soldadas (materiales fracturados), productos piroclásticos y tobas compactadas (materiales porosos), así como en intercalaciones de los dos primeros.

Una forma de conocer la falta de continuidad de los materiales permeables, así como de inferir la heterogeneidad de estos, fue a través de la existencia de manantiales (ver figura 3.21), ya que el agua de lluvia que se infiltra, en su movimiento descendente encuentra formaciones geológicas de baja a muy baja permeabilidad que impiden que su flujo vertical continúe. En consecuencia, se genera movimiento horizontal hasta que se alcanza la superficie del terreno y se origina un manantial. Allí donde termina una capa permeable, aparece un manantial (Tarbuck y Lutgens, 2005); por lo antes expuesto la presencia de manantiales es indicativa de la falta de continuidad de las unidades que permitieron la infiltración y como resultado la no llegada de esta agua hasta el acuífero de la Cuenca de México; la distribución de los manantiales en la Sierra de Las Cruces, se muestran en las cartas topográficas a escala 1:50,000 del INEGI y de la DGCOH (1992), así como en la figura 3.21 y en el mapa 3.7 del anexo 2.

Un ejemplo de esta falta de continuidad litológica, se comenta en el artículo de García-Palomo et al. (2008), en donde se cita que la Sierra de Las Cruces, está conformada por ocho estratovolcanes traslapados y que estos tuvieron periodos alternados de actividad en los que hubieron emisiones volcánicas tranquilas (emitiéndose lavas) y otras explosivas en las que se fueron expulsados una gran variedad de fragmentos de roca de diversos tamaños; adicionalmente, los materiales volcánicos fueron afectados por fallas, lo que puso en contacto a rocas de diferente permeabilidad; estos eventos en conjunto, dieron como resultado el traslape de materiales de muy variada porosidad y fracturamiento en los que se pierde la continuidad hidráulica. La figura 3.22, muestra los contactos y la discontinuidad de las rocas, así como los cambios de permeabilidad.

Con los resultados del análisis de la continuidad en el subsuelo, de los materiales que constituyen al área de estudio, se elaboró el mapa que se muestra en la figura 3.23.

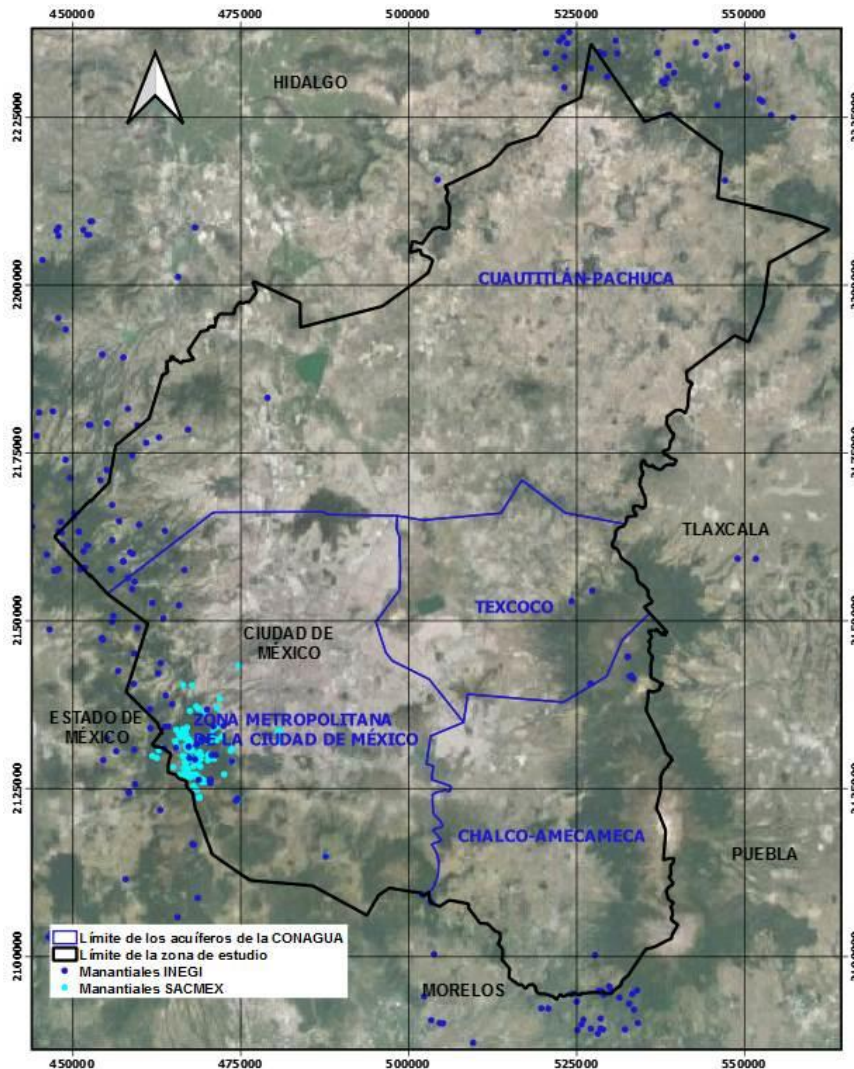


Figura 3.21. Localización de los manantiales en la zona de estudio

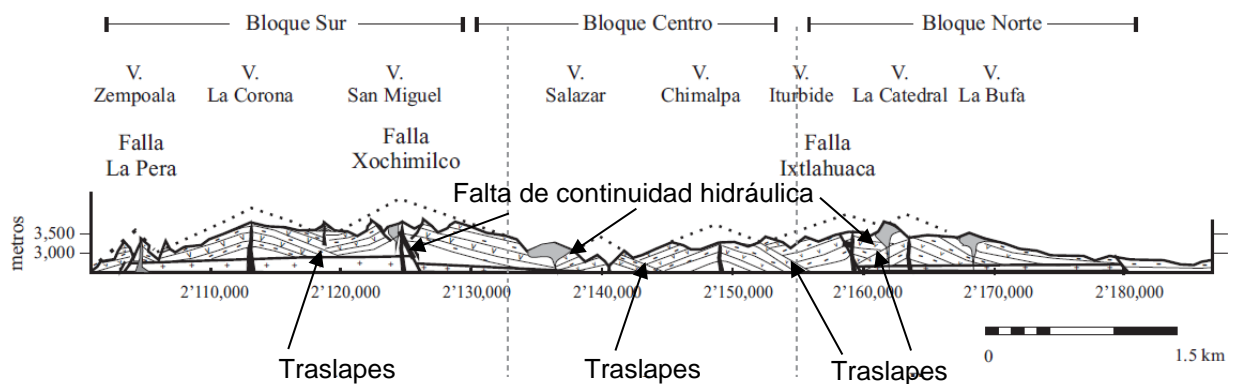


Figura 3.22. Sección geológica que muestra la falta de continuidad litológica e hidráulica de los materiales volcánicos en la Sierra de Las Cruces

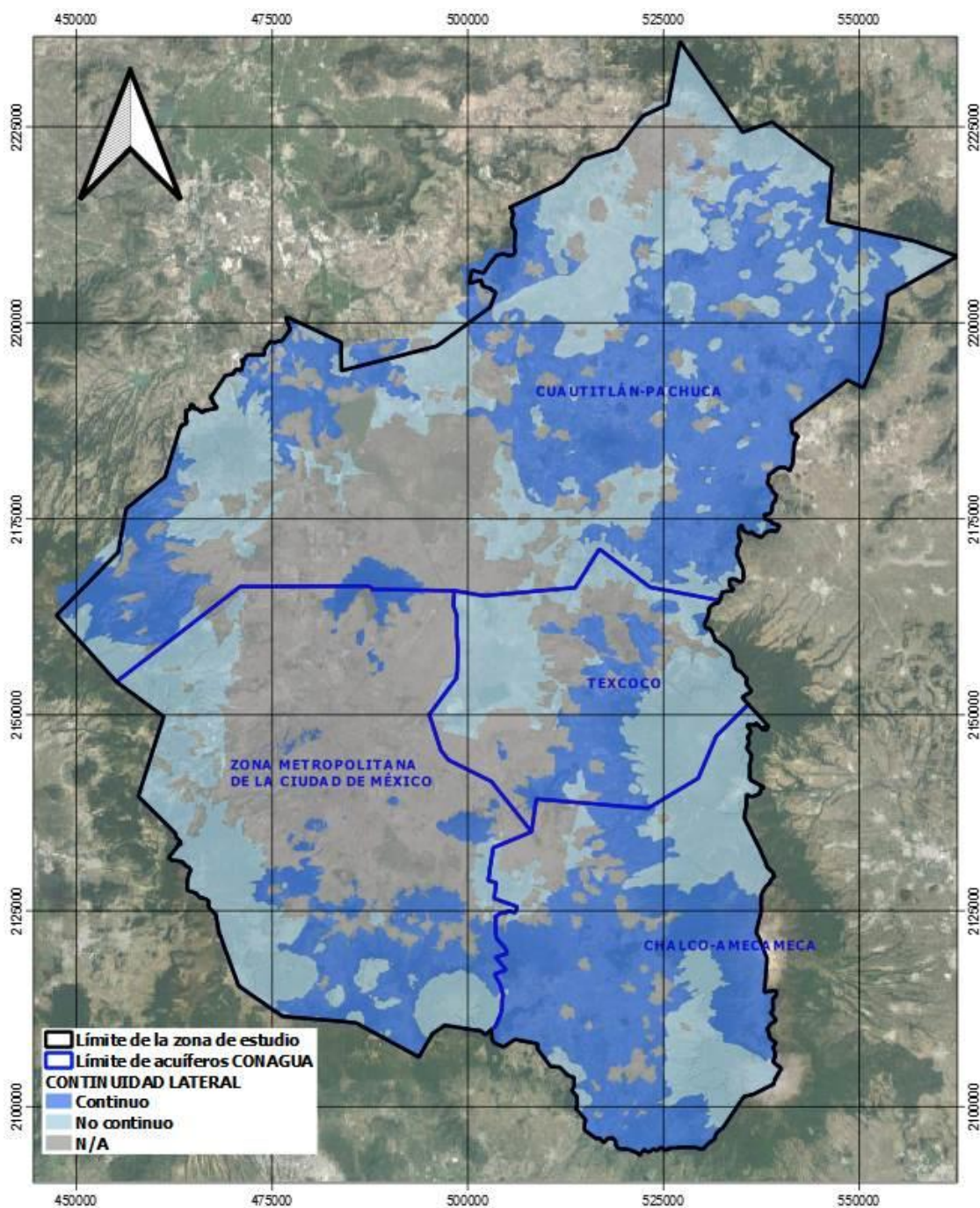


Figura 3.23. Mapa con la localización de las unidades litológicas en función de su continuidad

3.2.2.7 Ponderación de variables para evaluar la recarga de acuíferos

Para establecer la importancia de las variables que intervienen en la recarga, se realizó un análisis jerárquico, el cual se aplicó a los shapes de variables, para posteriormente realizar su intersección en el sistema de información geográfico; en la figura 3.24 se resume el método de ponderación de variables y más adelante se describen los pasos que se siguieron para obtener el mapa con la potencialidad de las zonas de recarga.

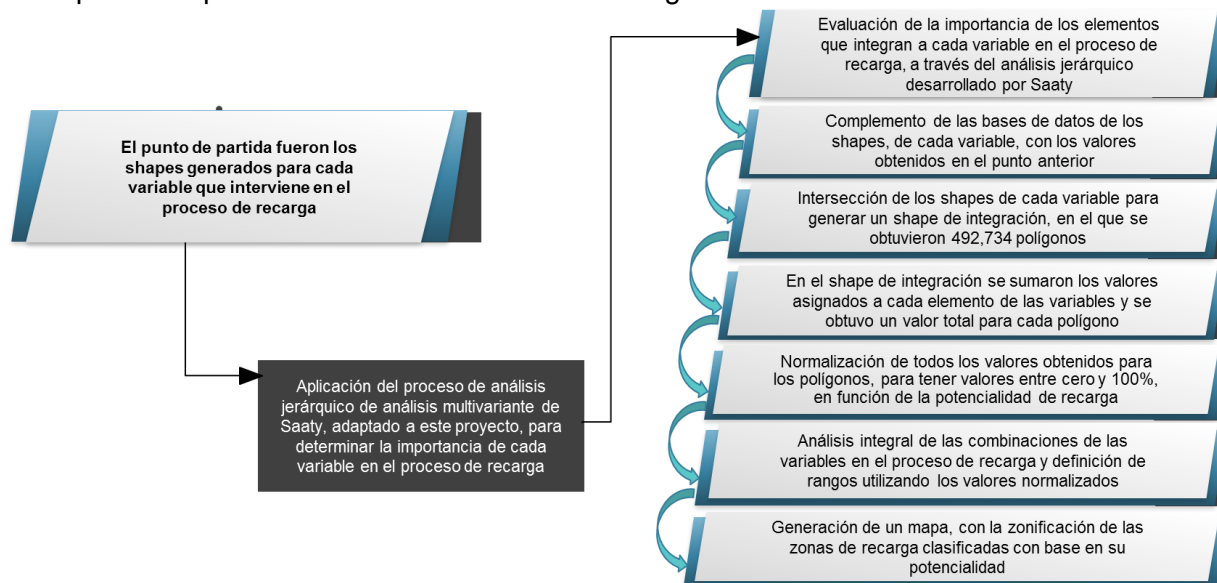


Figura 3.24. Esquema del método seguido para definir las zonas de recarga y su ponderación

Para establecer cuáles de las variables seleccionadas tenían mayor importancia en el proceso de recarga y determinar el peso relativo de estas, así como el peso de los componentes de cada una, se utilizó el *Proceso de Análisis Jerárquico* de Saaty (AHP, por sus siglas en inglés), que es utilizado para evaluar variables dentro de un análisis multicriterio.

El fundamento del proceso de análisis jerárquico (AHP), se basa en la estructura de matrices consistentes y está conformado por un grupo de conceptos que delimitan el alcance del entorno estudiado (Saaty y Kulakowski, 1986). La metodología AHP hace comparaciones en parejas, es decir entre dos variables a la vez, lo cual se considera muy útil para el caso de la ponderación de zonas de recarga, pues elimina la dificultad de valorar al mismo tiempo a todas variables en su conjunto; aunque al final del proceso todas estas son valoradas e integradas.

Esta metodología fue diseñada para resolver problemas complejos de criterios o de variables múltiples, como es el caso del proyecto de recarga de acuíferos; el método utiliza los siguientes principios rectores: construcción de las jerarquías, establecimiento de prioridades y consistencia lógica (Pacheco y Contreras, 2008). El proceso requiere de efectuar evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada una de las variables y que después, se especifique su importancia con respecto a las demás. El resultado del AHP es una ponderación a través de la cual se identifica la importancia de cada una de las variables. Este método ha sido utilizado en estudios para analizar el potencial del agua subterránea en regiones como Marruecos, en donde se hizo intervenir el análisis multivariable a través del método de Saaty (Argaz et al., 2019).

La ventaja del AHP consiste en que permite incorporar factores cualitativos que suelen quedar fuera del análisis, debido a su complejidad para ser medidos, como es el caso de la geología del subsuelo y la continuidad de los materiales permeables debajo de la superficie del terreno. Esto es particularmente útil en el caso de las variables de este proyecto, en donde muchas de estas son subjetivas y se tienen que hacer suposiciones, con base en la información bibliográfica disponible, o del comportamiento del acuífero en áreas distantes a la ubicación de las zonas de recarga.

El AHP, se realiza a través de la construcción de matrices jerárquicas, lo que permite de una manera eficiente organizar la información, descomponerla y analizarla por partes, así como hacer intervenir los cambios y la subjetividad en las variables; las matrices permiten determinar la prioridad de los elementos en su nivel inmediatamente inferior.

Desde este punto de vista las ventajas del AHP para el proyecto son las siguientes:

- Estructura un modelo jerárquico a través de matrices multicriterio
- Pondera cada una de las variables que integran al modelo jerárquico
- Permite realizar comparaciones binarias entre los elementos, lo cual facilita la ponderación al comparar únicamente dos variables a la vez
- Permite evaluar las variables mediante la asignación de "pesos"
- Facilita la clasificación de las alternativas de acuerdo con los pesos identificados
- Permite hacer una síntesis de la forma en que intervienen las variables
- Hace una validación de los resultados a través de un análisis de consistencia
- Permite trabajar con un equipo multidisciplinario

En el método AHP, quien lo utiliza toma las decisiones y selecciona la prioridad de cada variable, de acuerdo con el conocimiento que tenga de cada criterio, esto dependerá de la formación académica y experiencia del grupo de profesionales que intervienen, así como de la información disponible para cada una de las variables. El proceso permite dar valores numéricos a las variables y también a los elementos que las integran, logrando medir cómo contribuyen en el proceso de recarga.

Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de importancia, sobre la base de una escala numérica propuesta por Saaty (1980), que va desde 1 hasta 9; estos números son la síntesis del conjunto de juicios que arroja la escala de intensidades de preferencias (prioridad) entre el total de elementos comparados. De esta forma, es posible integrar el pensamiento lógico con el conocimiento y la intuición (que es reflejo de la experiencia). Los juicios que son ingresados en las comparaciones a pares responden a estos factores (Pacheco y Contreras, 2008).

Esta escala numérica se muestra en la tabla 3.2; que fue adaptada por Moro Ingeniería para este proyecto de recarga de acuíferos; es importante mencionar que la escala se utiliza para hacer comparaciones entre dos elementos, de la matriz formada para cada variable que interviene en el proceso de ponderación de zonas de recarga.

Para mostrar la forma en que se utilizan los valores de la tabla 3.2, se aplicó la metodología en la definición de la ponderación las variables seleccionadas para calificar las zonas de recarga; esto se muestra y explica en la tabla 3.3.

Tabla 3.2. Escala de preferencias del método AHP según Saaty

Escala	Explicación	Escala numérica
Igual importancia.	Las dos variables contribuyen igualmente en el proceso de recarga.	1
Moderadamente más importante una variable que la otra.	El juicio, la información y la experiencia, favorecen a una variable frente a la otra en el proceso de recarga.	3
Fuertemente más importante una variable que la otra.	El juicio, la información y la experiencia, favorecen fuertemente a una variable frente a la otra en el proceso de recarga.	5
Mucho más fuerte la importancia de una variable que la otra.	Una variable domina fuertemente. Su dominio en el proceso de recarga está comprobado a través de la información disponible y/o del método de evaluación utilizado.	7
Importancia extrema de una variable frente a la otra.	Una variable domina a la otra con el mayor orden de magnitud posible, en el proceso de recarga.	9

Fuente: (Saaty, 1980, citado en Moreno, 2002. Adaptada por Moro Ingeniería). Nota: Los valores 2, 4, 6 y 8, suelen utilizarse en situaciones intermedias.

Cabe mencionar que la variable de continuidad no fue considerada en el método AHP, debido a que al contar sólo con dos alternativas de comparación (continuas y no continuas), la matriz par a par de Saaty arrojaría solo dos pesos o valores y se vuelve innecesaria.

A través del método AHP, en la tabla 3.3 se analiza la importancia de las variables descritas en el apartado 3.2 de este informe.

Tabla 3.3. Evaluación de la importancia de las variables utilizadas en el proceso de recarga

Variables	Condición hidrológica del suelo	Respuesta del medio a la infiltración	Precipitación	Vigor de la vegetación	Pendiente del terreno	Peso	Total
Condición hidrológica del suelo	1	1	1	2	9	0.2875	48.69
Respuesta del medio a la infiltración	1.00	1	1	3	7	0.2670	
Precipitación	1.00	1.00	1	5	5	0.2670	
Vigor de la vegetación	0.50	0.33	0.20	1	5	0.1445	
Pendiente del terreno	0.11	0.14	0.20	0.20	1	0.0340	
Sumatoria de cada columna	3.61	3.48	3.40	11.20	27.00	1.00	
Cálculo de λ_{max}	5.41						
IC	0.10						
PC	0.09						

En esta tabla:

- Los valores que están por encima de la diagonal con los números 1, representan el resultado de haber usado la escala de preferencia de la tabla 3.3, es decir el valor de comparación entre las variables; para obtenerlo se realizó la comparación entre pares de variables; por ejemplo:
 - La *condición hidrológica del suelo* en la primera fila, al compararse contra la *respuesta del medio a la infiltración*, se consideró que tiene igual importancia para permitir la infiltración del agua de lluvia, esto quedó de manifiesto al asignarle el número 1 de la escala numérica de la tabla 3.3. La misma magnitud se consideró en la comparación entre la *condición hidrológica del suelo* contra la *precipitación*.
 - En la comparación de la *condición hidrológica del suelo* contra la *pendiente del terreno*, se consideró que la primera variable tiene una importancia extrema sobre la segunda en el proceso de infiltración, debido a que, si el suelo es muy permeable y de poco espesor, el escurrimiento se verá reducido a pesar de la pendiente. Por esta razón se le asignó el valor de 9, que representa que la *condición hidrológica del suelo* domina a la variable *pendiente del terreno*, con el mayor orden de magnitud posible, en el proceso de recarga.
 - De esta forma se procedió a realizar par a par, la comparación entre todas las demás variables.
- Los valores que están por debajo de la diagonal con los valores de 1 son los recíprocos que están por encima de la diagonal citada; se trata de la misma comparación, pero en sentido inverso.
- Posteriormente como se muestra en la tabla 3.3, se obtiene el cociente de los valores que están por debajo de la diagonal y se hace la sumatoria de cada columna, lo que da los valores contenidos en la fila resaltada con color verde.
- Con este valor se obtiene el peso o importancia de cada variable, de la siguiente manera: se hace la sumatoria de los valores de cada fila y se dividen entre el valor que está en la celda denominada “Total”; este último se obtiene de la suma lateral de todos los valores contenidos en la fila de color verde, sin considerar el resultante del “Peso”; o bien representa la suma de todas las celdas contenidas en la matriz multicriterio, sin considerar las magnitudes en la fila de color verde.

Una ventaja de este método es que la matriz resume las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio, además de que se puede validar su consistencia, a través del cálculo de la proporción o razón de consistencia, que permite identificar la coherencia en términos matemáticos de la comparación que se ha desarrollado. Cuando la razón de consistencia es mayor que 0.10, indica que hubo alguna imprecisión en las comparaciones entre pares; cuando esto pasa se reanalizan las comparaciones en pares antes de continuar.

Para calcular la proporción de consistencia se realiza lo siguiente:

- Primero se lleva a cabo la sumatoria de cada columna, cuyo resultado se muestra en la fila denotada en color verde en la tabla 3.3 y se obtiene el promedio de los valores (λ_{max}), encontrados en la matriz, de la siguiente forma:

$$(3.61 \ 3.48 \ 3.40 \ 11.20 \ 27.00) * \begin{pmatrix} 0.28 \\ 0.26 \\ 0.26 \\ 0.14 \\ 0.03 \end{pmatrix}$$

Esta es una operación matricial de la cual se obtiene el siguiente resultado:

$$\lambda_{max} = (3.61*0.28 + 3.48*0.26 + 3.40*0.26 + 11.20*0.14 + 27.00*0.03)$$

$$\lambda_{max} = 5.41$$

- Posteriormente se calcula el índice de consistencia de la matriz de comparaciones (CI por sus siglas en inglés), a través de la siguiente ecuación:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$$

Dónde:

n = Es el tamaño de la matriz multivariable (en este caso es 5).

El resultado se obtiene de la siguiente forma: $CI = (5.41 - 5) / (5 - 1) = 0.10$

- Finalmente, se procede a calcular la proporción de consistencia y comprobar que es menor a 0.10; la ecuación para conocer la proporción de consistencia es la siguiente:

$$\text{Proporción de consistencia} = \text{Índice de consistencia} / \text{Índice aleatorio}$$

El índice aleatorio es un índice dado por el método, que depende del tamaño de la matriz y que tiene los valores que se muestran en la siguiente tabla:

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Para el caso de la matriz de la tabla 3.3 el resultado fue:

$$\text{Proporción de consistencia} = 0.10 / 1.12 = 0.09$$

Con lo cual se cumple que la proporción de consistencia sea menor a 0.10, y se comprueba que la valoración asignada dentro de la matriz multivariable está en el campo de la validez, es decir que las comparaciones resultaron lógicas y consistentes (ver tabla 3.3).

Con los resultados obtenidos se determinó la importancia, peso o relevancia de las variables propuestas para establecer la ponderación de las zonas de recarga, quedando de la siguiente forma:

T

Tabla 3.4. Ponderación de las variables generales para la delimitación de zonas de recarga

Variable	Peso (%)
Condición hidrológica del suelo	28.75
Respuesta del medio a la infiltración	26.70
Precipitación	26.70
Vigor de la vegetación	14.45
Pendiente del terreno	3.40
Suma del peso de las variables	100.00

Esta misma metodología se siguió para los elementos que componen a cada una de las variables de la tabla 3.4; los valores resultantes de las tablas de ponderación se aplicaron a los polígonos de cada shape y se agregó este valor en una columna en el archivo dbf (archivos de base de datos) que contiene cada shape, para generar los mapas temáticos ya clasificados; estos mapas se presentan a continuación a nivel de figuras junto con la tabla de ponderación y en el anexo 2 se pueden consultar con mayor detalle. Los resultados de la evaluación para cada variable se presentan a continuación en las siguientes tablas y figuras:

Tabla 3.5. Evaluación de los elementos de la variable condición hidrológica del suelo

Tipo de suelo	A	B	C	D	Peso	Total
A	1	3	5	9	0.54	33.51
B	0.33	1	3	5	0.28	
C	0.20	0.33	1	3	0.14	
D	0.11	0.20	0.33	1	0.05	
Σ de cada columna	1.64	4.53	9.33	18.00	1.00	
Cálculo de λ_{max}	3.94					
IC	-0.02					
PC	0.00					

A las zonas urbanas se les asignó un valor de cero ya que, al estar cubiertas por materiales prácticamente impermeables, no se consideran como zonas de recarga, además debido a que el suelo está más consolidado por el uso de vehículos y construcciones se pierde su porosidad natural.

Tabla 3.6. Evaluación de los elementos de la variable respuesta del medio a la infiltración

Litología	Basaltos	Andesitas-dacitas	Combinados	Piroclastos	Riolitas-ignimbritas	Aluvial	Tobas	Lacustre	Peso	Total
Basaltos	1	2	3	3	6	6	8	9	0.26	145.99
Andesitas-dacitas	0.50	1	2	3	5	6	8	9	0.24	
Combinados	0.33	0.50	1	2	3	4	7	9	0.18	
Piroclastos	0.33	0.33	0.50	1	4	4	5	9	0.17	
Riolitas-ignimbritas	0.17	0.20	0.33	0.25	1	1	2	3	0.05	
Aluvial	0.17	0.17	0.25	0.25	1.00	1	2	3	0.05	
Tobas	0.13	0.13	0.14	0.20	0.50	0.50	1	1	0.02	
Lacustre	0.11	0.11	0.11	0.11	0.33	0.33	1.00	1	0.02	
Σ cada columna	2.74	4.44	7.34	9.81	20.83	22.83	34.00	44.00	1.00	
Cálculo de λ_{max}	8.87									
IC	0.12									
PC	0.09									

Tabla 3.7. Evaluación de los elementos de la variable pendiente del terreno

Pendiente	Menor 3°	3° a 6°	6° a 18°	Mayor a 18°	Peso	Total
Menor 3°	1	3	4	9	0.54	31.61
3° a 6°	0.33	1	3	4	0.26	
6° a 18°	0.25	0.33	1	3	0.14	
Mayor a 18	0.11	0.25	0.33	1	0.05	
Σ de cada columna	1.69	4.58	8.33	17.00	1.00	
Cálculo de λ_{max}	4.24					
IC	0.08					
PC	0.09					

Tabla 3.8. Evaluación de los elementos de la variable vigor de la vegetación

Condición del vigor de la vegetación	Abundante	Media alta	Media	Baja	Sin cobertura	Peso	Total
Alta	1	1	5	7	9	0.41	55.73
Media alta	1.00	1	2	5	8	0.31	
Media	0.20	0.50	1	4	5	0.19	
Baja	0.14	0.20	0.25	1	1	0.05	
Sin cobertura	0.11	0.13	0.20	1.00	1	0.04	
Σ de cada columna	2.45	2.83	8.45	18.00	24.00	1.00	
Cálculo de λ_{max}	5.38						
IC	0.10						
PC	0.09						

Tabla 3.9. Evaluación de los elementos de la variable precipitación

Precipitación en mm	Menos de 640.28	640-842	842-1,045	1,045-1,248	Más de 1,248	Peso	Total
Menos de 640	1.00	1.00	1.00	2.00	3.00	0.28	28.33
640- 842	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	0.24	
842 – 1,045	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	0.21	
1,045 – 1,248	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.14	
Más de 1,248	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	0.12	
Σ de cada columna	3.83	4.00	4.50	7.00	9.00	1.00	
Cálculo de λ_{max}	5.07						
IC	0.02						
PC	0.02						

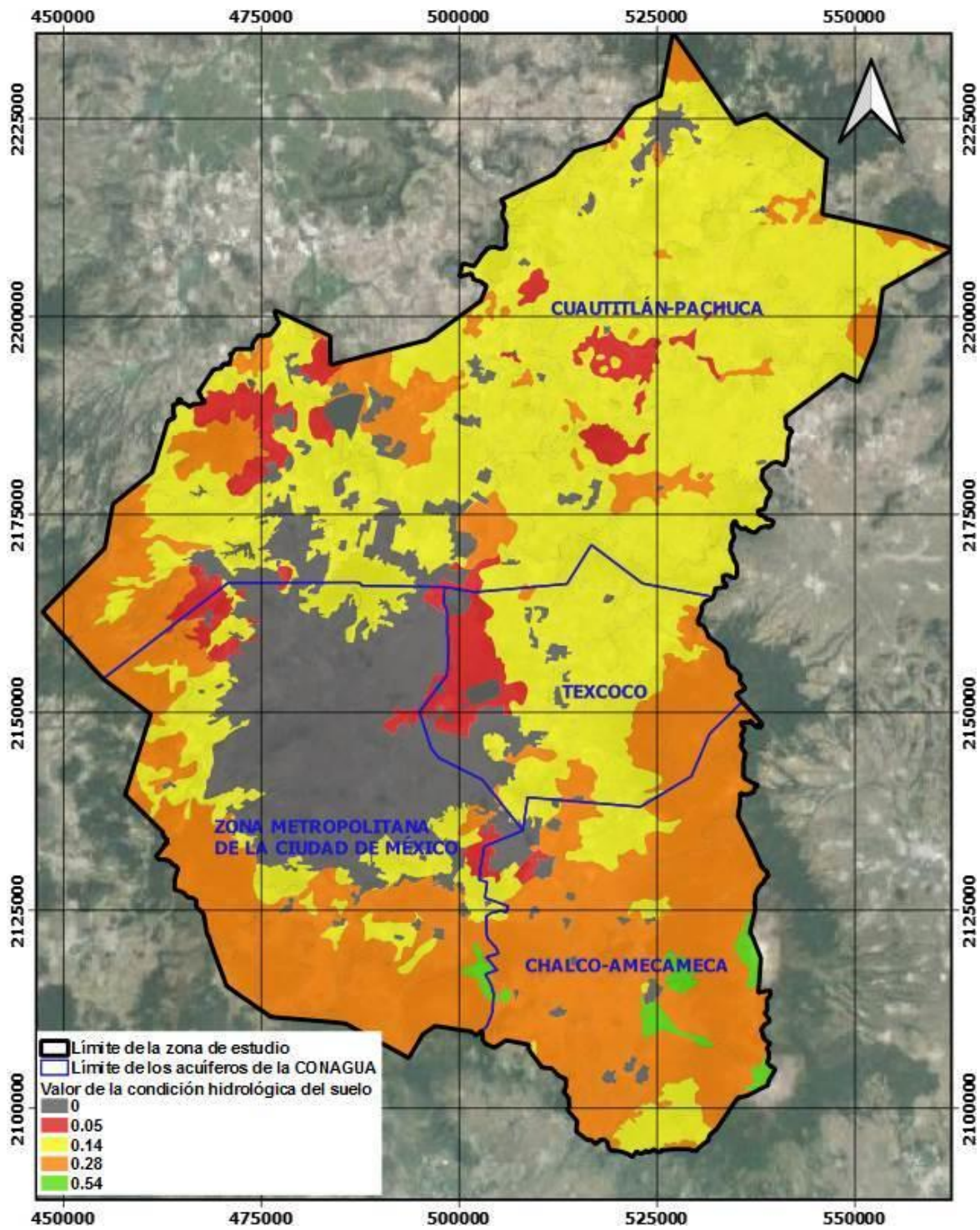


Figura 3.25. Mapa de la condición hidrológica del suelo, resultado de la ponderación

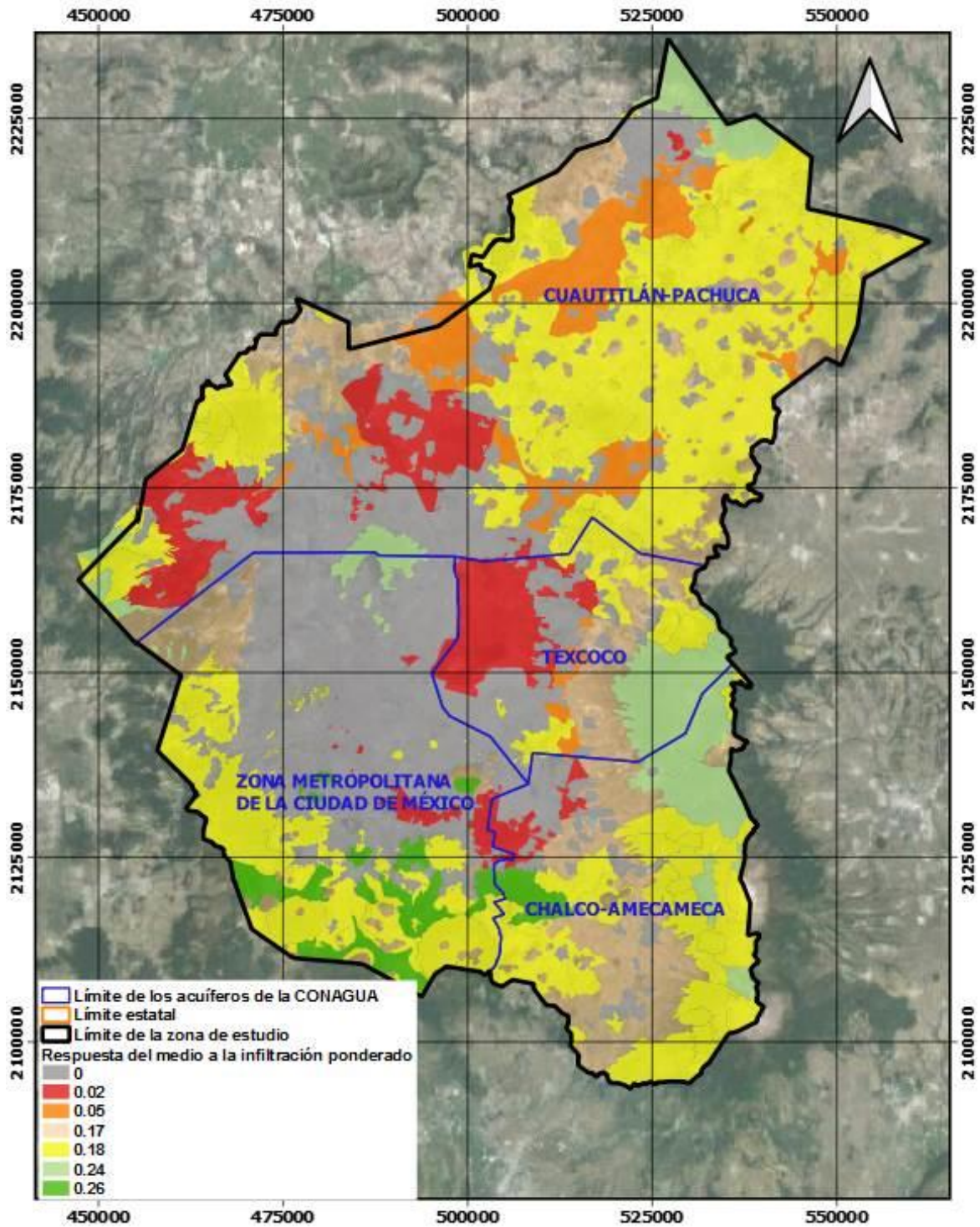


Figura 3.26. Mapa de la respuesta del medio a la infiltración, resultado de la ponderación

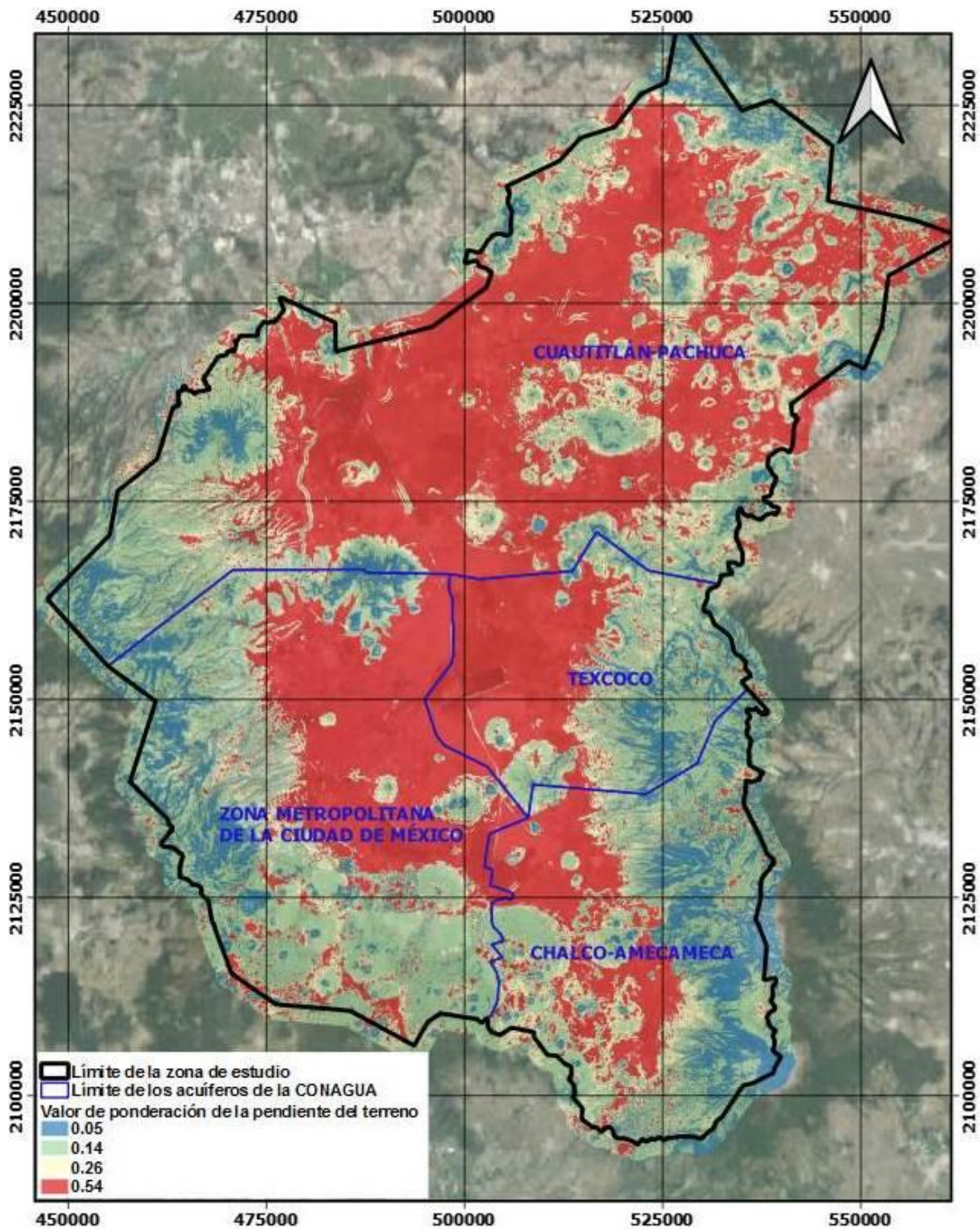


Figura 3.27. Mapa de la pendiente del terreno, resultado de la ponderación

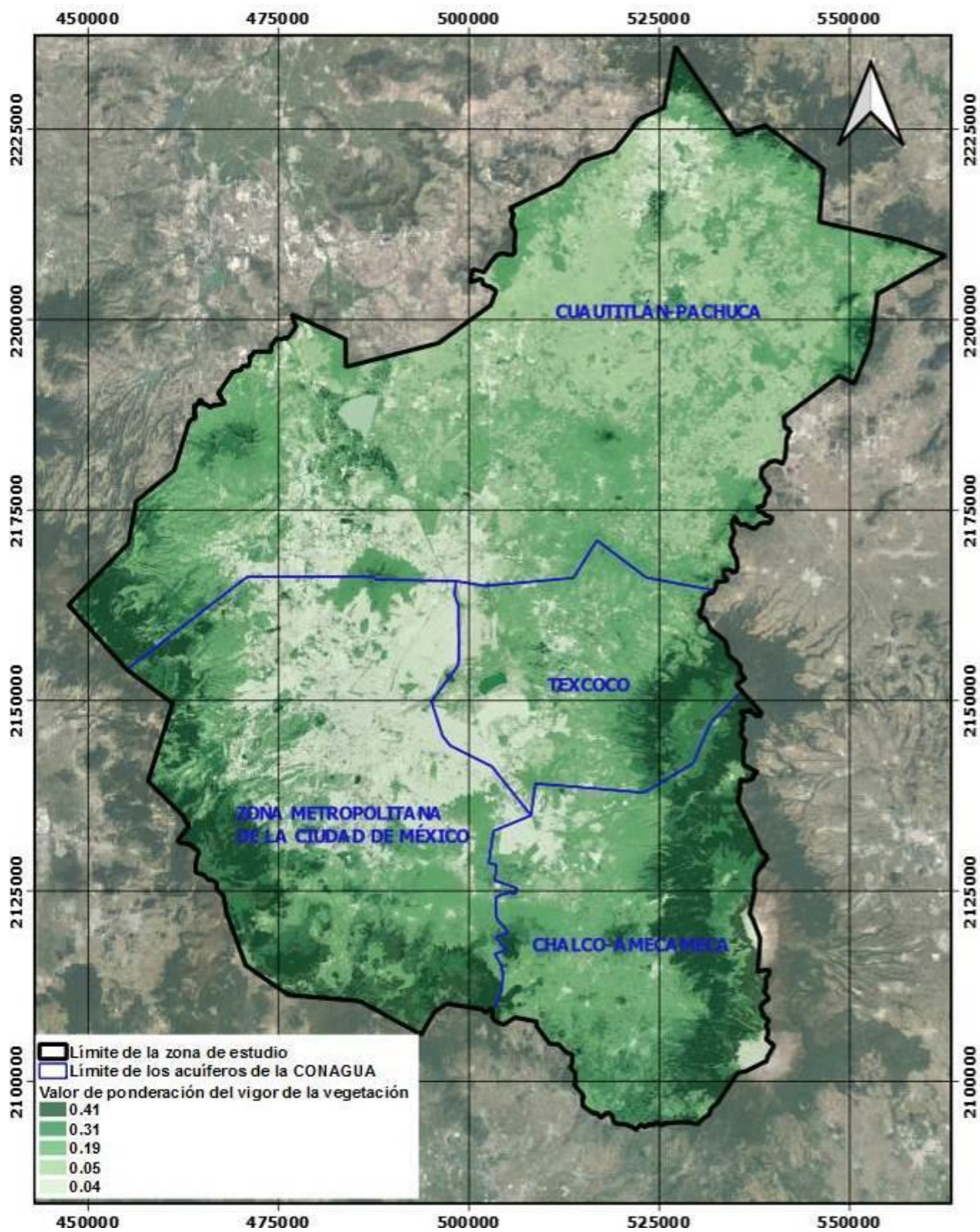


Figura 3.28. Mapa del vigor de la vegetación, resultado de la ponderación

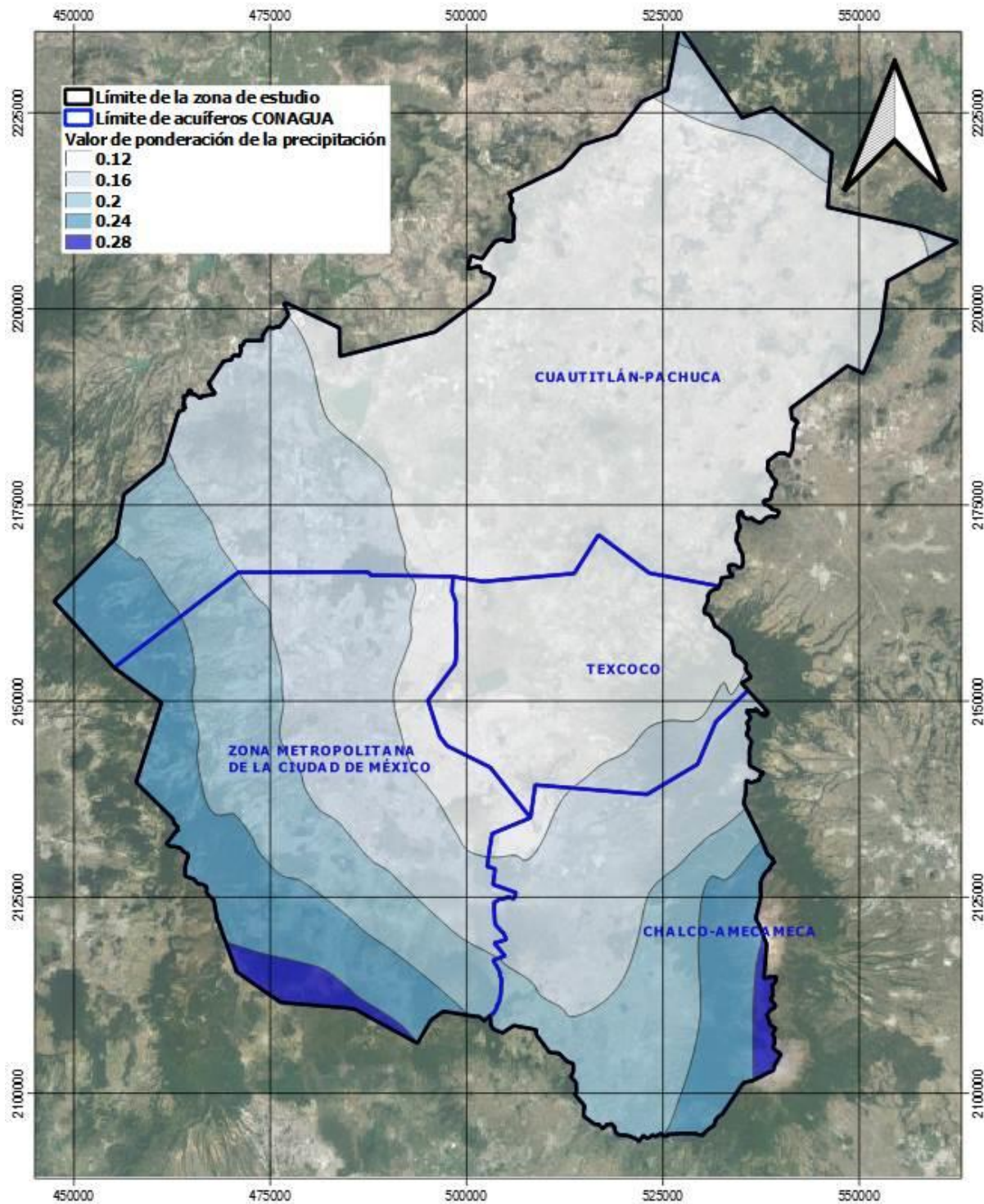


Figura 3.29. Mapa de la zonificación por precipitación, resultado de la ponderación

Con cada uno de los mapas se generó un shape en el sistema de información geográfico (SIG); a todos los polígonos contenidos en los shapes de cada una de las variables se les asignó el “peso” evaluado para cada elemento; posteriormente, este peso se multiplicó por el valor del “peso” de la ponderación general obtenido en la tabla 3.5; finalmente, estos shapes se correlacionaron a través del proceso conocido como sobreposición de mapas; posteriormente a través de la intersección de los shapes se obtuvo la suma de los valores, así como nuevos polígonos y un nuevo shape, el cual en su base de datos contiene la información de todas las capas, además del valor de la suma de los pesos.

Los resultados de la suma de los valores ponderados de las variables que intervienen en la recarga se encuentran entre 0.0595 y 0.50060; para establecer de forma más práctica las áreas con mayor potencialidad para la recarga se realizó una normalización, empleando el método de valor mínimo y máximo, en donde los valores de la base de datos se transforman a valores que están entre 0 y 1, respectivamente, y todos los demás datos quedan entre el rango {0,1}, utilizando la siguiente ecuación:

$$S'_{ij} = (S_{ij} - \min_j) / (\max_j - \min_j)$$

Donde, S'_{ij} es el dato i transformado del conjunto de datos j ; S_{ij} es el dato i original del conjunto de datos j ; \min_j es el valor mínimo del conjunto de datos j ; \max_j es el valor máximo del conjunto de datos j , (Gil, Mora, y Pérez, 2014).

Una vez obtenidos los valores entre 0 y 1, los resultados se multiplicaron por cien para obtener un valor entre cero y cien y comparar con facilidad que zonas de recarga tienen mayor potencialidad.

Para probar la validez de los resultados, se efectuó un análisis detallado de los valores obtenidos en las zonas resultantes de la sobreposición de mapas y de la normalización, contra las características de las variables que constituyen a cada zona de recarga y su ubicación geográfica, respecto a las zonas de posible recarga determinadas en estudios previos, así como con evidencias reales (cortes litológicos, configuraciones del nivel piezométrico y concentraciones de sólidos totales disueltos, entre otras), registradas en las áreas acuíferas más cercanas a las zonas de recarga determinadas.

3.3. Clasificación de la potencialidad de las zonas de recarga identificadas

Con base en los resultados de la ponderación y normalización, se realizó un análisis detallado en el que participaron todos los especialistas involucrados; este fue un análisis integral en que se hicieron intervenir todos los elementos que integran a las variables, evaluando sus características naturales para permitir la infiltración y la recarga.

En este proceso, se partió de la agrupación de los elementos que representaban las mejores condiciones naturales del medio para permitir la infiltración y de la existencia del mayor volumen disponible de agua para este fin; de esta forma se identificaron los polígonos con las mejores características, que idealmente serían los que tuvieran los siguientes elementos de las variables: continuidad hidráulica en el subsuelo; condición hidrológica del suelo tipos A y B; debajo del suelo tuvieran rocas que permitieran fácilmente la infiltración; estuvieran localizados en áreas con

precipitación media anual mayor a 842 mm; las pendientes del terreno fueran menores a 6°; y el vigor de la vegetación fuera alto y medio alto.

Siguiendo este criterio ideal se identificaron combinaciones de estas variables que representan diferente potencialidad a la infiltración. Una vez que se establecieron estas combinaciones y agrupaciones de polígonos, se realizó un análisis de los valores resultantes de la estandarización, para cada agrupación y con ello se definieron sus intervalos; finalmente a estos grupos de variables se les asignó una clasificación cualitativa en función de su potencialidad. El resultado fue la delimitación geográfica de cuatro agrupaciones de polígonos, las cuales se pueden observar en la figura 3.30 y sus características principales en la tabla 3.11.

Para el caso de las zonas de infiltración en donde los materiales en el subsuelo no tienen continuidad lateral, se realizó también una zonificación que siguió los mismos criterios comentados al inicio de este subtema (pero sin incluir la continuidad lateral); los resultados se muestran en la tabla 3.12.

Tabla 3.10. Clasificación y características de las zonas de recarga que en el subsuelo tienen continuidad lateral

Continuidad lateral de los materiales permeables	Zona de recarga con potencialidad	Rango	Condición hidrológica del suelo	Respuesta del medio a la infiltración en función del tipo de material	Precipitación en mm	Pendiente	Vigor de la vegetación	Superficie que ocupa (Km ²)	%
Continuo	Muy alta	70-100	A y B	Combinados, fracturados y piroclastos	Predominan en un 96% las lluvias mayores a 842 mm	Las pendientes menores a 6° son del 50%	La categoría y media alta representa el 78%	128.74	2.16
	Alta	50-70	A y B	Combinados, fracturados, piroclastos y tobas	Predominan en un 66% las lluvias mayores a 842 mm	Las pendientes menores a 6° son del 51%	La categoría y media altas representa el 47%	831.33	13.95
	Media	25-50	B y C	Combinados, fracturados, piroclastos, tobas y aluviales	Predominan en un 88% las lluvias menores a 842 mm	Las pendientes mayores a 6° son del 67%	Las categorías media, baja y sin cobertura vegetal son del 91%	1,875.37	31.47
	Baja	Menores a 25	C y D	Combinados, fracturados, piroclastos, tobas y aluviales	Predominan en un 96% las lluvias menores a 842 mm	Las pendientes menores a 6° son del 71%	Las categorías media, baja y sin cobertura vegetal son del 93%	147.42	2.47

Tabla 3.11. Clasificación y características de las zonas de recarga que en el subsuelo no tienen continuidad lateral

Continuidad lateral de los materiales permeables	Zona de recarga con potencialidad	Condición hidrológica del suelo	Respuesta del medio a la infiltración en función del tipo de material	Precipitación en mm	Pendiente	Vigor de la vegetación	Superficie que ocupa (Km ²)	%
No continuo	Media o de flujo discontinuo	A y B	Combinados, fracturados, piroclastos y tobas	Las lluvias son mayores a 842 mm	Las pendientes menores a 6° son del 82%	La categoría alta y media alta representa el 83%	725.51	12.17
	Baja a media o de flujo discontinuo	B	Combinados, piroclastos, fracturados, aluviales y lacustres	Las lluvias son menores a 842 mm	Las pendientes mayores a 6° son del 63%	Las categorías alta y media alta representa el 54%	584.65	9.81
	Baja o de flujo discontinuo	C y D	Combinados, piroclastos, tobas y fracturados	Las lluvias son mayores a 842 mm	Las pendientes mayores a 6° son del 83%	Las categorías media, baja y sin cobertura vegetal son del 55%	142.81	2.40
	Muy baja a nula	C y D	Combinados, fracturados, piroclastos, tobas, aluviales y lacustres	Las lluvias son menores a 842 mm	Las pendientes menores a 6° son del 72%	Las categorías media, baja y sin cobertura vegetal son del 90%	1,524.23	25.57

La superficie total de la Cuenca de México que se estudio fue de 8,339 Km², los 5,960 km² que se incluyen en las zonas de recarga de estas tablas, no consideran el área ocupada por las zonas urbanas.

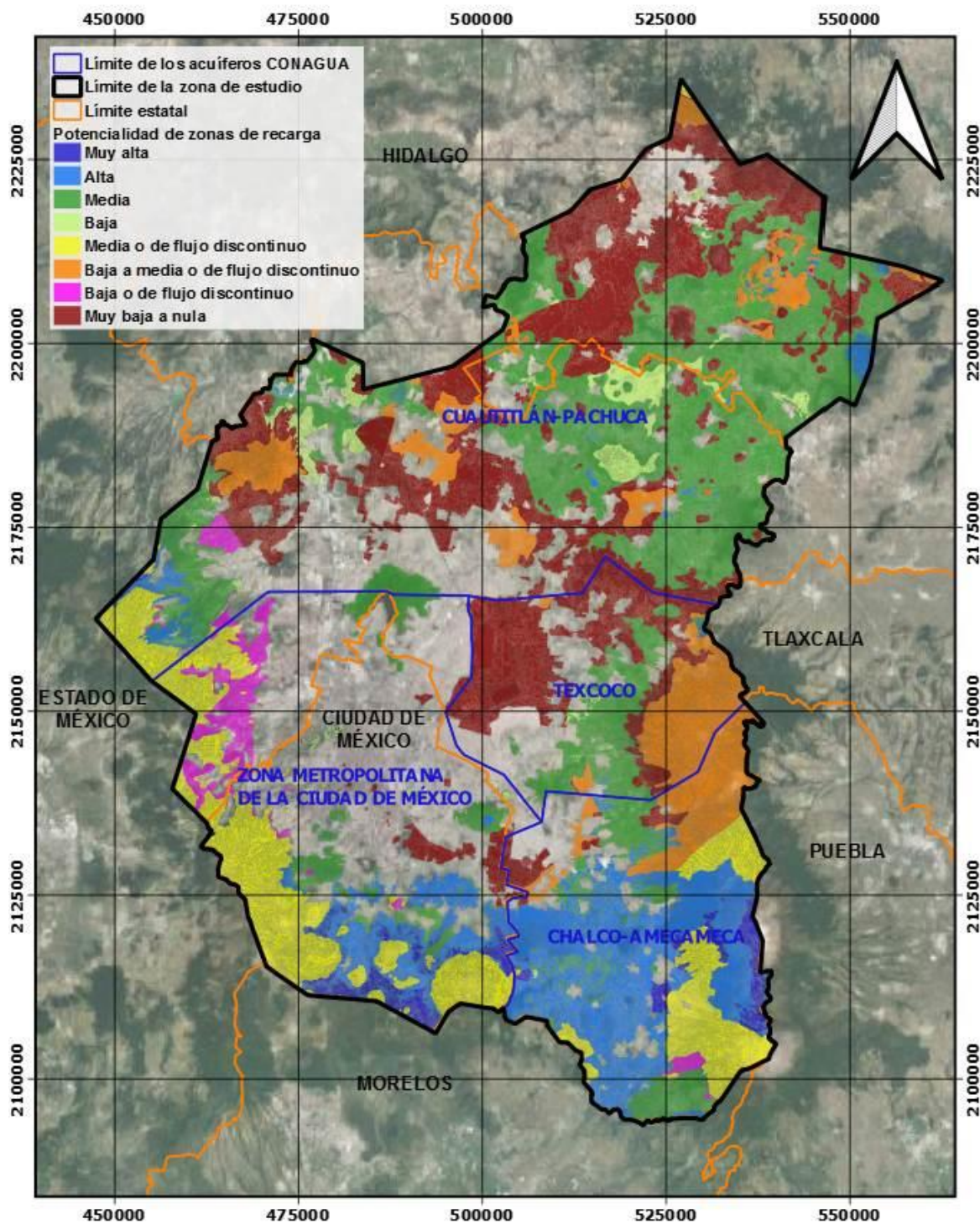


Figura 3.30. Mapa con las zonas de recarga para el área de estudio

3.4. Cambio climático

Con objeto de establecer las variaciones que se tendrán en los volúmenes de agua que se infiltran en las zonas de recarga, se llevó a cabo un análisis de la variación de estos volúmenes en función de escenarios de cambio climático, para esto se utilizaron los cuatro modelos de cambio climático recomendados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) para México (CNRMC-M5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR), con el escenario de crecimiento económico 8.5 y con fronteras temporales 2015-2039 y 2045-2069.

Este escenario de crecimiento económico está basado en los modelos de cambio climático actuales, que consideran actividades económicas constantes y/o en aumento, emisiones de gases efecto invernadero en aumento o estabilizados; de esta forma se desarrollaron los 4 escenarios en los cuales los forzamientos radiativos son diferentes; se denomina forzamiento radiativo al cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12,000 m sobre el nivel del mar), como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera o cambios en el aporte externo de energía solar. Se expresa en W/m^2 . Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento. (GreenFacts, 2020).

En la tabla 3.12 se muestran las variaciones de cada uno de los escenarios en términos de forzamiento radiativo, concentración de gases efecto invernadero y comportamiento a futuro (forma del itinerario).

Tabla 3.12. Escenarios en términos de forzamiento radiativo

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración	Forma del itinerario
VCR8.5	>8.5 W/m^2 en 2100	> ~1370 CO_2 -eq en 2010	En aumento
VCR6	Estabilización en ~6 W/m^2 a partir de 2100	850 CO_2 -eq (estabilización a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
VCR-4.5	Estabilización en ~4.5 W/m^2 a partir de 2100	650 CO_2 -eq (estabilización a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
VCR3-CD	Máximo a ~3 W/m^2 antes de 2100; disminución posterior	Máximo a ~490 CO_2 -eq antes de 2100; disminución posterior	Culminación seguida de disminución

Tomado de Andrade Velázquez y Montero Martínez, 2012.

Existen dos escenarios de corto plazo y de nivel intermedio 4.5 y 6, uno de nivel alto 8.5 y uno de nivel bajo VCE3-CD.

Para alimentar este análisis, se utilizó la información histórica de precipitación de 92 estaciones meteorológicas de la CONAGUA, ubicadas cerca y dentro del área de estudio (línea base); con esto se modelaron los cambios mediante el uso del algoritmo del InVest (modelo elaborado por la Universidad de Stanford), de producción de agua superficial anual, que estima las

contribuciones relativas del agua de diferentes partes de un paisaje, ofreciendo una idea de cómo los cambios en los patrones de uso de la tierra afectan el rendimiento anual de agua superficial. Con esto, se modela el volumen anual de agua disponible para ser infiltrada en el presente y en los dos periodos mencionados. Este modelo considera las precipitaciones anuales, los procesos de evapotranspiración y las características propias del terreno, como pendiente, profundidad del suelo, cobertura vegetal, etc., para obtener el volumen de agua disponible a ser infiltrada.

Dicho producto, se utilizó para calcular los volúmenes que pueden infiltrarse a través de los sitios con los diferentes potenciales de recarga y así obtener una estimación aproximada de los cambios que sufrirá este “potencial de infiltración”, ante los efectos del cambio climático en la región.

Los resultados ayudan a identificar aquellos sitios que, debido a los cambios en las precipitaciones, disminuirán el volumen de agua que se pudiera infiltrar, asimismo, indica cuales sitios según su potencial de recarga, deben ser conservados para que el potencial total de infiltración del área de estudio no se vea comprometido.

Son inevitables los efectos del cambio climático, pero como medidas de mitigación, es muy importante reconocer estos sitios con la intención de preservar su capacidad de infiltración y permitir que, aunque las precipitaciones disminuyan, sigan siendo los proveedores del agua que surtirá a los acuíferos de los cuales la población depende.

o Información de las estaciones meteorológicas

Para la obtención de datos climáticos, en particular para conocer los valores de precipitación históricos, se seleccionaron 92 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera del área de estudio, pertenecientes a la red de estaciones de CONAGUA; cada estación tiene diferentes periodos de colecta de datos; los estadísticos son los siguientes:

Tabla 3.13. Datos estadísticos de años con valores de precipitación de las estaciones meteorológicas

Estadístico	Años
Promedio	41.6
Mínimo	10
Máximo	65

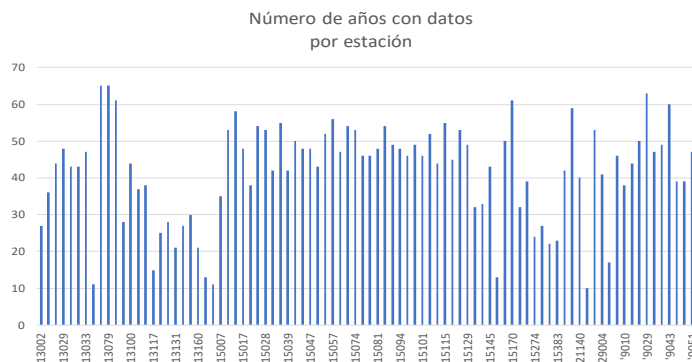


Figura 3.31. Número de años con información por cada estación meteorológica

Analizando las series de datos, se encontró que sólo 18 estaciones tuvieron menos de 30 años de datos, el resto tiene 30 o más años con información diaria y acumulados mensuales por año. Las estaciones están distribuidas de la siguiente manera:

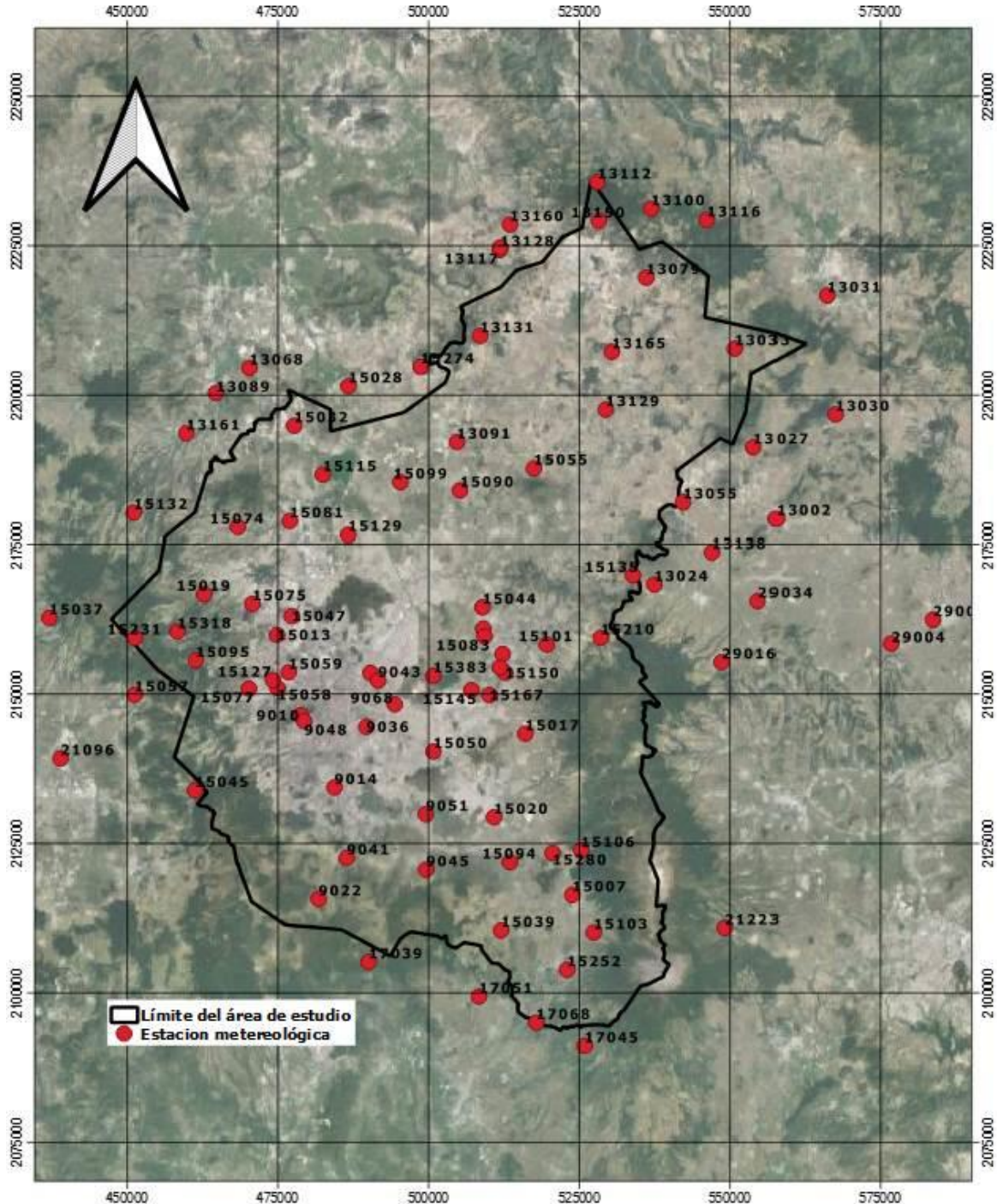


Figura 3.32. Ubicación de las estaciones meteorológicas de CONAGUA utilizadas para el análisis de cambio en la disponibilidad de agua para ser infiltrada por efecto del cambio climático

De estas estaciones, 64 se encuentran dentro del polígono del área de interés y 25 fuera, pero a una distancia máxima de 50 km aproximadamente del borde de los límites del área de estudio.

A partir de estos datos diarios de las estaciones meteorológicas, se calcularon los valores de precipitación mensual promedio, para los meses de enero a diciembre, con la intención de obtener el valor climático normal de la precipitación por estación.

Estos valores se anexaron a la tabla de ubicación de las estaciones meteorológicas y se corrió un análisis de interpolación geográfica de Kriging ordinario, con semivariograma esférico, el cual no sólo considera el valor y la distancia de las estaciones, sino el arreglo geográfico general de las mismas, produciéndose un ráster con los valores de precipitación promedio por mes.

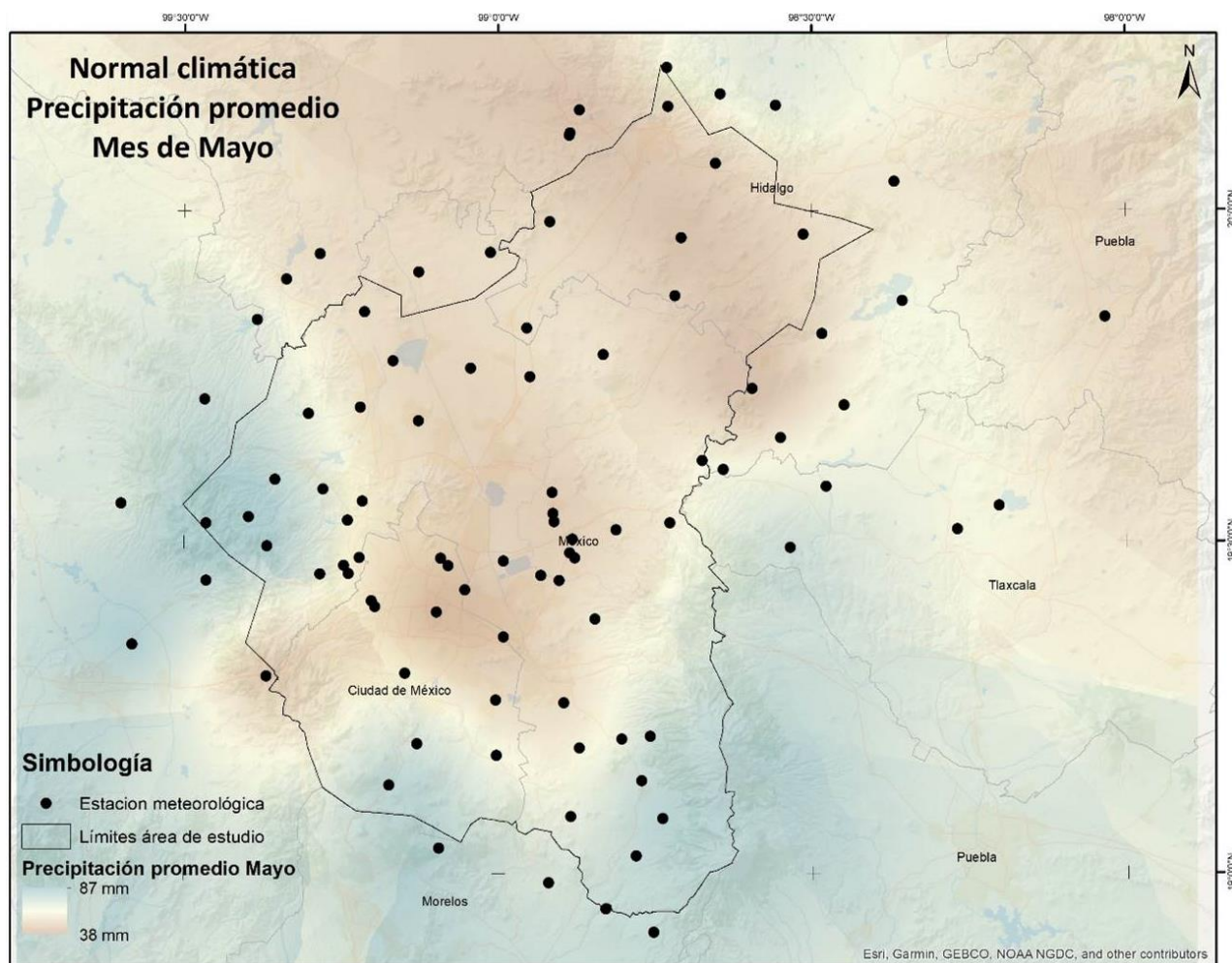


Figura 3.33. Mapa de precipitación histórica para el mes de mayo a partir de la información de las estaciones meteorológicas

Los valores de precipitación mensual en formatos ráster se calcularon para todos los meses del año y son a los que se les aplicaron los deltas calculados en los escenarios de cambio climático.

○ Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático son una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basados en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construyen para ser utilizados de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirven a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos.

Estos escenarios NO son pronósticos climáticos, ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro. Se realizó un análisis para evaluar el desempeño regional de los Modelos de Circulación General (MCG), usando un período histórico específico, el cual brinda elementos para observar la reproducción de procesos atmosféricos de importancia para México. El desempeño de los modelos debe evaluarse ya que un MCG puede representar bien una región y tener un mal desempeño en otra.

Debido a la incertidumbre, se recomienda usar siempre más de un MCG, más de un horizonte, más de un forzamiento (actualmente dados por las Trayectorias de Concentraciones Representativas, RCP, por sus siglas en inglés).

Tabla 3.14. Modelos de circulación general (MCG) utilizados para México

Modelo	Institución responsable	País
CNRMCM5	Centre National de Recherches Meteorologiques	Francia
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Estados Unidos
HADGEM2-ES	Met Office Hadley Center	Reino Unido
MPI-ESM-LR	Max Plank Institute for Meteorology	Alemania

Cada modelo con dos escenarios el 4.5 y el 8.5, que representan diferentes contextos económicos de emisiones y de producción de CO₂ para dos periodos: 2015-2039 y 2045-2069.

Estos escenarios de cambio climático tienen una resolución espacial de 30" de longitud por 30" de latitud, la cual es excelente para fines de análisis de grandes áreas, países, regiones o continentes, pero son muy generales para áreas más pequeñas.

Para el presente estudio, se realizó un promedio de los cuatro escenarios y se seleccionó el RCP de 8.5 ya que estos escenarios son los más fuertes y reflejan mejor la realidad en la que se encuentra la zona de estudio.

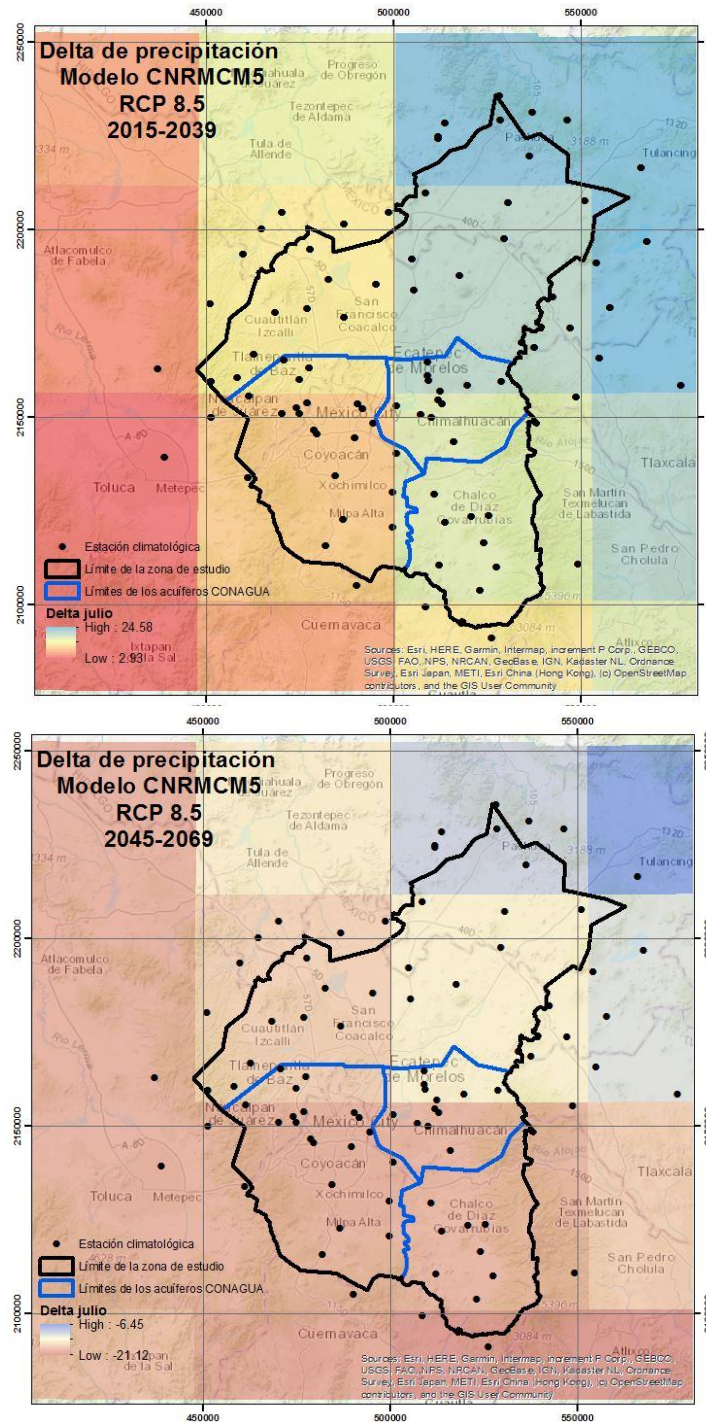


Figura 3.34. Información de desviación de la precipitación conforme al modelo CNRMC-M5 con RPC de 8.5 para dos periodos

o Procesamiento

A partir de los modelos descargados en el sitio del INECC, comentados en la sección anterior, se realizaron los siguientes procesamientos:

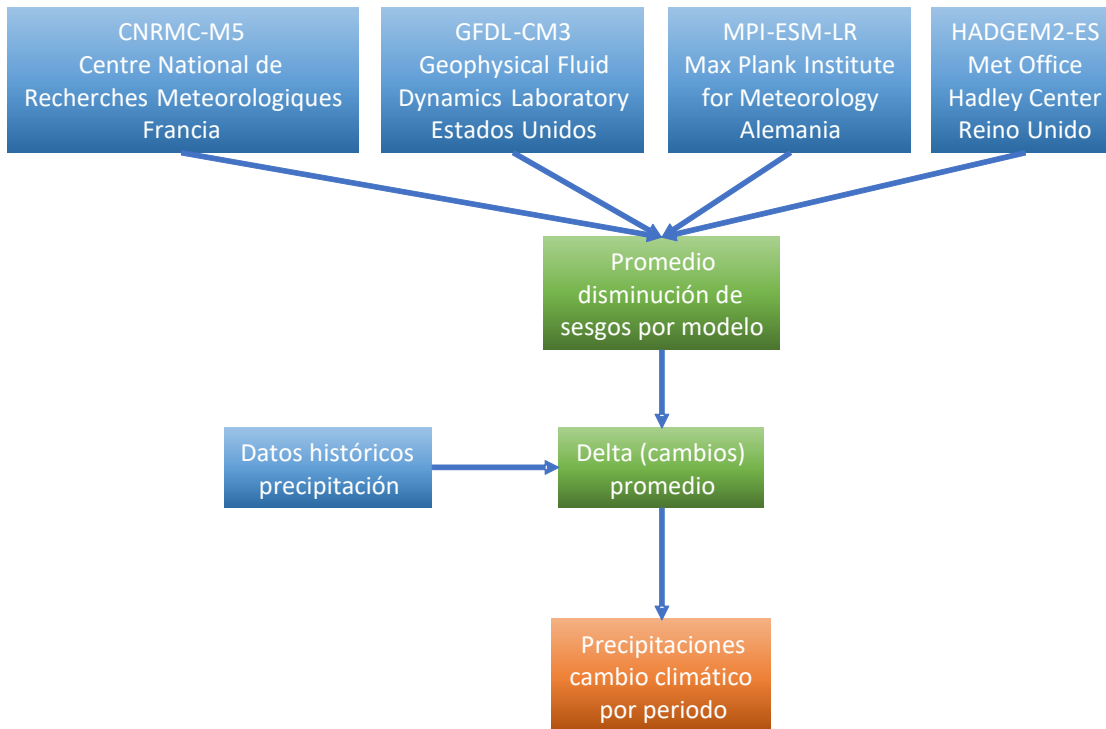


Figura 3.35. Diagrama de procesamiento de los modelos de cambio climático

- 1) Un promedio de desviaciones a partir de los cuatro modelos, con el cual se pretende reducir los sesgos que cada uno de los modelos pueda presentar.
- 2) Utilización de ese promedio para calcular a partir de los datos históricos de las estaciones meteorológicas, las desviaciones que sufrirán las precipitaciones en los dos periodos y con el escenario 8.5.
- 3) Calcular el agua disponible para ser infiltrada en el área de estudio.
- 4) Calcular el agua disponible para ser infiltrada en los polígonos que tienen mayor capacidad de infiltración.

o Promedio de desviaciones

Cada uno de los modelos presenta las desviaciones a la precipitación por mes, y los promedios se realizaron ajustando las desviaciones para cada mes del año, mediante el uso de la media estadística de los cuatro modelos.

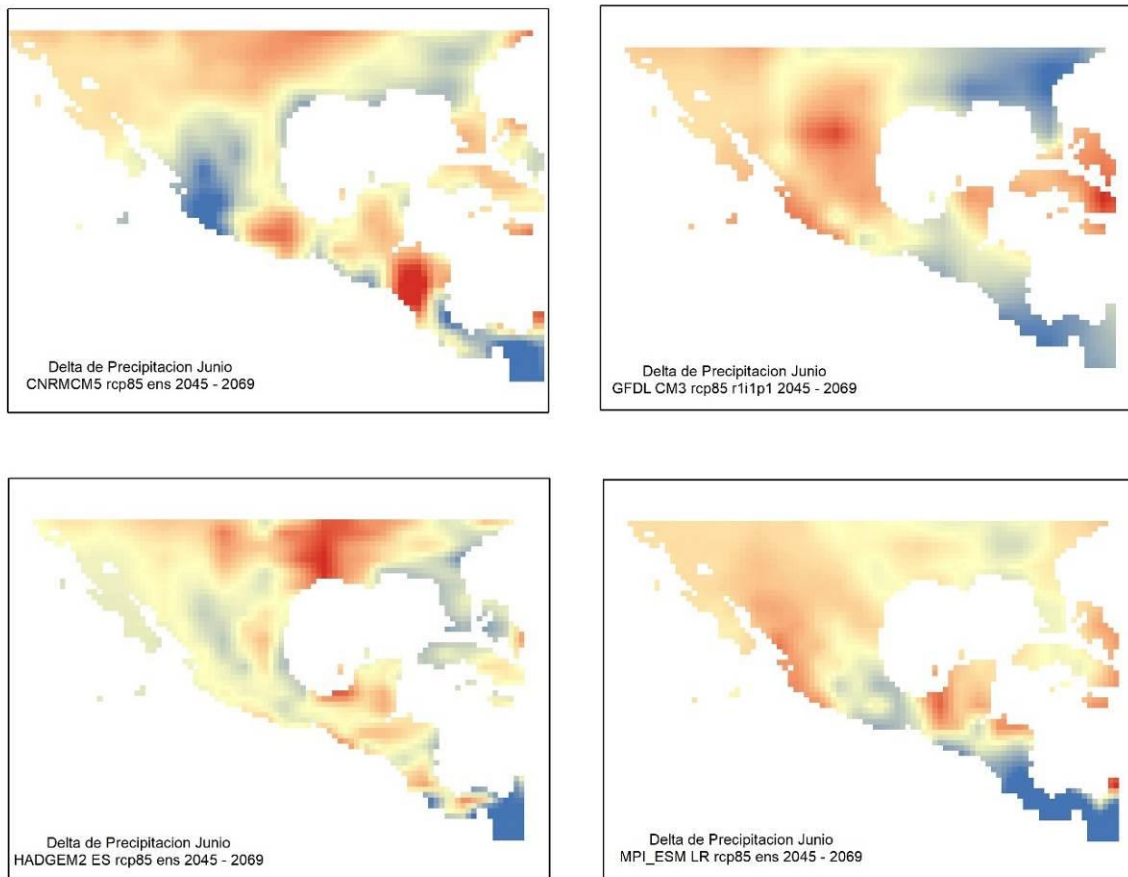


Figura 3.36. Comparativo de las desviaciones en mm (precipitación) que cada modelo presenta para el mes de junio (periodo 2045-2069)

Como puede observarse, cada modelo marca posibles desviaciones como mayores precipitaciones o menores en sitios diferentes, esto es debido a la información fuente, a los factores que consideran y a los diferentes algoritmos.

Las diferencias, aunque en los mapas parecen grandes, con el tiempo han ido disminuyendo entre los diferentes modelos y ahora son de pocos milímetros de diferencia entre unos sitios y otros.

o Precipitaciones ajustadas

A partir de la información de las estaciones meteorológicas y usando los promedios de desviación de la precipitación promedio generada a partir de los cuatro modelos, se calculó la precipitación en milímetros para los dos escenarios 2015-2039 y 2045-2069.

Estos modelos muestran variaciones mensuales en la desviación en la precipitación, en algunos meses lloverá más que en el histórico y otros meses lloverá menos, tal y como se muestra en la

tabla 3.15; los datos fueron obtenidos a partir de un punto al norte del área de estudio (ver figura 3.37).

Tabla 3.15. Valores promedio de los modelos en el escenario 8.5 para el periodo 2045-2069

Mes	Desviación (mm/mes)
Enero	-1.59
Febrero	-7.88
Marzo	-10.43
Abril	-13.13
Mayo	-9.35
Junio	1.9
Julio	-11.41
Agosto	-22.03
Septiembre	2.48
Octubre	-1.1
Noviembre	5.25
Diciembre	2.08
Total anual	-65.21

Como puede observarse en la tabla, la tendencia de cambio climático serán menores precipitaciones los primeros meses del año y en la época de lluvia, aumentando ligeramente los promedios en los meses de noviembre y diciembre.

En los meses de abril y agosto, las precipitaciones promedio disminuirán sensiblemente.

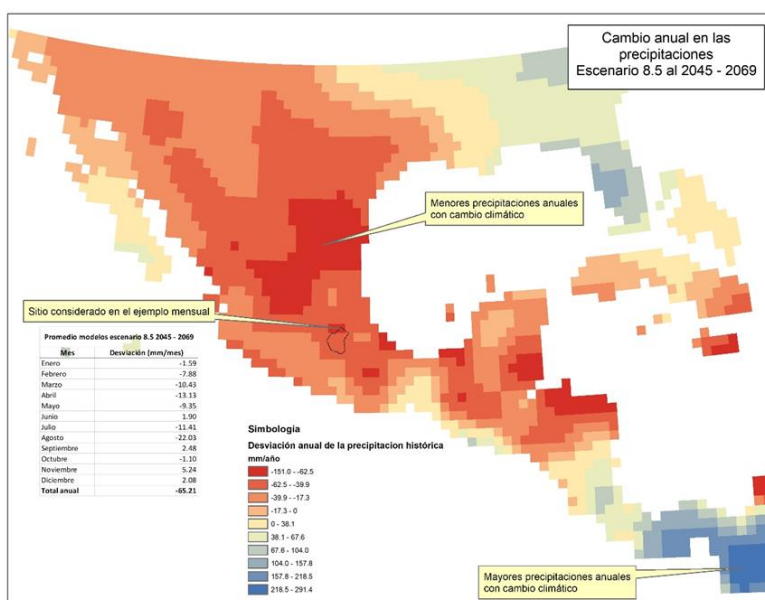


Figura 3.37. Mapa de los cambios de precipitaciones en México y Centroamérica

En este mapa se pueden observar los cambios en precipitaciones a menor escala, Centroamérica presentará precipitaciones mayores, el norte de México será afectado con menores precipitaciones de hasta -155 mm/año y si se considera que las precipitaciones anuales en las

zonas desérticas del norte son de 200 a 300 mm/anuales, entonces es casi el 50% de la precipitación la que dejará de caer (conforme el promedio de estos modelos).

En la zona centro que es donde se localiza el área de estudio, las precipitaciones también disminuirán, haciendo que menor cantidad de agua esté disponible para infiltración.

Una vez revisado esto, el fundamento para asegurar que las precipitaciones disminuirán en el área de estudio se encuentra en los 4 modelos internacionales usados.

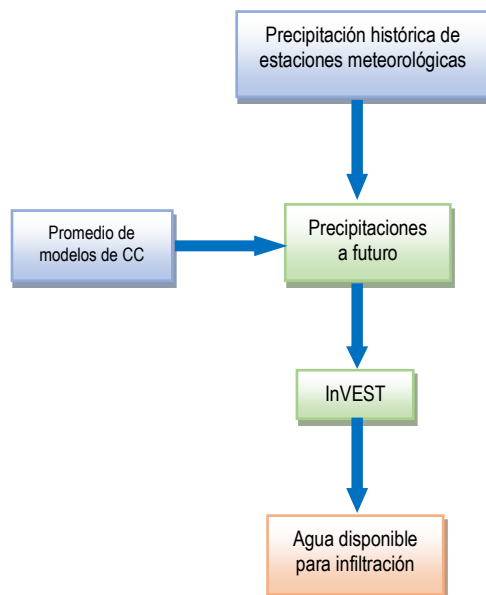


Figura 3.38. Diagrama de procesamiento de los modelos y los datos de precipitación de las estaciones

Con estas precipitaciones modificadas se alimentó el modelo utilizado para calcular el agua disponible para infiltración.

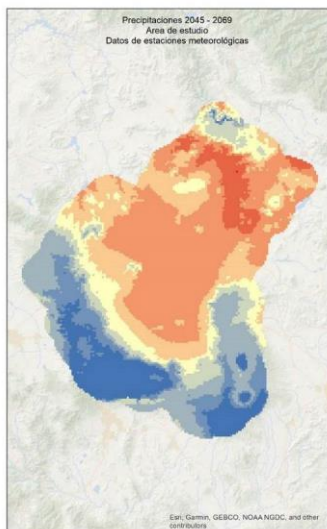


Figura 3.39. Precipitaciones del escenario 2045-2069

Utilizando como insumo las precipitaciones históricas en la zona y las desviaciones ajustadas a futuro para los periodos 2015-2039 y 2045-2069, se alimentó al algoritmo de InVEST para realizar las estimaciones de la precipitación para estos periodos; como se comentó antes, este es un software de cálculo de servicios ambientales desarrollado por la Universidad de Stanford junto con otras ONG's de conservación (TNC entre ellas) bajo el Proyecto de Natural Capital.

Con esta información se alimentó el modelo, obteniendo de esta manera la disponibilidad de agua para infiltración siguiendo las condiciones históricas de precipitación, así como la disponibilidad ante el cambio climático de las fronteras de tiempo ya indicadas.

Los impactos a los cambios en las precipitaciones del área modificaron las cantidades de agua disponible para ser infiltrada, pudiendo ser mayor en algunas áreas o menor en otras.

- o Agua disponible para infiltración

El cálculo para determinar el agua disponible para infiltración se realizó a partir del siguiente balance:

$$\text{Precipitación total} - \text{Evapotranspiración potencial} = \text{Agua disponible para infiltración}$$

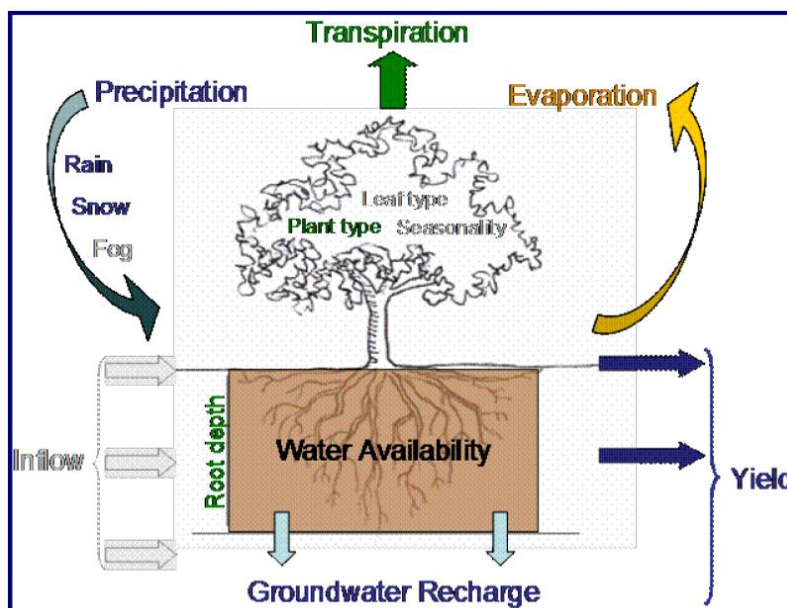


Figura 3.40. Entrada y salida de agua al sistema con base en la precipitación

Para estimar estos valores se utilizó el algoritmo del InVest de producción de agua superficial anual, que permite estimar las contribuciones relativas del agua de diferentes partes de un paisaje, ofreciendo una idea de cómo los cambios en los patrones de uso de la tierra afectan el rendimiento anual de agua superficial.

Modelar las conexiones entre los cambios del paisaje y los procesos hidrológicos no es simple; existen modelos sofisticados de estas conexiones y procesos asociados (como el modelo WEAP), pero requieren de muchos recursos y datos. Por el contrario, para correr InVEST, existen datos

que están fácilmente disponibles para calcular el rendimiento anual promedio de agua de un paisaje, en lugar de abordar directamente el efecto de los cambios de uso de suelo, ya que este proceso está estrechamente relacionado con la variación en la entrada de agua en una escala de tiempo diaria a mensual; en cambio, InVEST calcula un promedio anual de la contribución relativa de cada parcela de tierra.

El modelo se ejecuta en un mapa cuadrículado. Estima la cantidad y el valor del agua producido por cada subcuenca en el área de interés y determina la cantidad de agua que fluye de cada píxel por la precipitación, menos la fracción del agua que sufre evapotranspiración.

El modelo no diferencia entre la superficie, el subsuelo y el flujo base, pero supone que todo el rendimiento de agua de un píxel alcanza el punto de interés a través de una de estas vías. Este modelo suma y promedia el rendimiento del agua a escala de la subcuenca. Los cálculos al detalle de píxeles permiten representar la heterogeneidad de los factores clave del rendimiento del agua, como el tipo de suelo, la precipitación, el tipo de vegetación, etc.; sin embargo, la teoría que se está utilizando como base de este conjunto de modelos se desarrolló a nivel de la subcuenca, por lo que el mayor grado de confianza que se alcanza en la interpretación es a esta escala.

o El Modelo

El modelo de rendimiento de agua se basa en la curva de Budyko (1981) y la precipitación promedio anual. Primero se determina el rendimiento anual de agua $Y(x)$ para cada píxel en el paisaje x de la siguiente manera:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x)$$

Donde $AET(x)$ es la evapotranspiración anual para el píxel x y $P(x)$ es la precipitación anual en el píxel x .

Para el uso de suelo y la vegetación, la porción de evapotranspiración del balance hídrico, $AET(x)/P(x)$, se basa en una expresión de la curva de Budyko propuesta por Fu (1981) y Zhang (2004).

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{1/\omega}$$

donde $PET(x)$ es la evapotranspiración potencial y $\omega(x)$ es un parámetro no físico que caracteriza las propiedades del suelo-clima, ambas detalladas a continuación.

La evapotranspiración potencial $PET(x)$ se define como: $PET(x) = K_c(\ell_x) \cdot ET_0(x)$

Donde, $ET_0(x)$ es la evapotranspiración de referencia del píxel x y $K_c(\ell_x)$ es la evapotranspiración de la vegetación y el coeficiente asociado con el uso de suelo y cobertura del suelo (LULC, por sus siglas en inglés) ℓ_x en píxel x . $ET_0(x)$ refleja las condiciones climáticas locales, basadas en la evapotranspiración de una vegetación de referencia como la alfalfa que se cultiva en ese lugar. $K_c(\ell_x)$ está determinado en gran medida por las características del uso del suelo/cobertura encontradas en ese píxel (Allen y Pereira, 1998). K_c ajusta los valores de ET_0 al tipo de cultivo o vegetación en cada píxel del mapa de uso/cobertura del suelo.

Por otra parte, se hace el cálculo de $\omega(x)$, que es un parámetro empírico que se puede expresar como función lineal de $AWC * N/P$, donde N es el número de eventos por año, y AWC es el contenido de agua disponible de la planta, en este algoritmo se utiliza la expresión propuesta por Donohue et al. (2012) en el modelo InVEST, y así definen:

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25$$

Dónde:

$AWC(x)$ es el contenido de agua disponible de la planta (mm). La textura del suelo y la profundidad efectiva de enraizamiento definen $AWC(x)$, que establece la cantidad de agua que se puede retener y liberar en el suelo para su uso por la planta. Esto se estima como el producto de la capacidad de agua disponible de la planta (PAWC) y el mínimo de profundidad de la raíz:

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{Rest.layer.depth}, \text{root.depth}) \cdot PAWC$$

La profundidad de la capa de restricción de la raíz es la profundidad del suelo a la cual se inhibe la penetración de la raíz debida o características químicas. La profundidad de enraizamiento de la vegetación a menudo se da como la profundidad a la que se encuentra el 95% de la biomasa radicular. PAWC es la capacidad de agua disponible de la planta, es decir, la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez.

Para otros LULC (aguas abiertas, urbanas, humedales), la evapotranspiración real se calcula directamente a partir de la evapotranspiración de referencia $ET_0(x)$ y tiene un límite superior definido por la precipitación:

$$AET(x) = \text{Min}(K_c(l_x) \cdot ET_0(x), P(x))$$

donde $ET_0(x)$ es la evapotranspiración de referencia y $K_c(l_x)$ es el factor de evaporación para cada uso de suelo. Este algoritmo del modelo de rendimiento de agua genera el rendimiento de agua total y promedio, en el nivel de la subcuenca y por pixel.

Los insumos utilizados para su cálculo son:

1. Profundidad de las raíces de la vegetación
2. Precipitación
3. Agua disponible para las plantas (PAW)
4. Evapotranspiración anual de referencia
5. Uso de suelo/ vegetación
6. Límites de área de estudio
7. Subcuencas

<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

3.5. Pérdida potencial de recarga por cambios de uso del suelo

La SEMARNAT, describe al cambio de uso del suelo como la transformación de la cubierta vegetal original para convertirla a otros usos o la degradación de la calidad de la vegetación modificando la densidad y la composición de las especies presentes. Algunos factores que causan el cambio de uso de suelo y vegetación son la agricultura, ganadería y ampliación de infraestructura. Entre las consecuencias más importantes del cambio de uso de suelo se encuentran la pérdida de la biodiversidad y los servicios ambientales, como es la recarga de acuíferos.

En el presente análisis se consideró el cambio que va desde vegetación natural, pastizales y agricultura, hacia infraestructura urbana, ya que este cambio bloquea completamente la capacidad del suelo para infiltrar agua de lluvia y recargar a los acuíferos.

Una consideración que se tomó en el análisis fue en los pastizales, los cuales se analizaron de forma diferente debido al uso que se les da a estos terrenos; los pastizales, naturales e inducidos son utilizados principalmente para uso ganadero; el uso agrícola y ganadero son los que presentan una mayor tendencia al crecimiento de las ciudades, como lo mostró el análisis de cambio de uso de suelo utilizando las series de INEGI (5 y 6).

A continuación, se muestra a través de un esquema (figura 3.41), la secuencia de actividades que se realizaron para determinar la pérdida de potencial de recarga por cambios en el uso del suelo, incluyendo también los efectos del cambio climático.

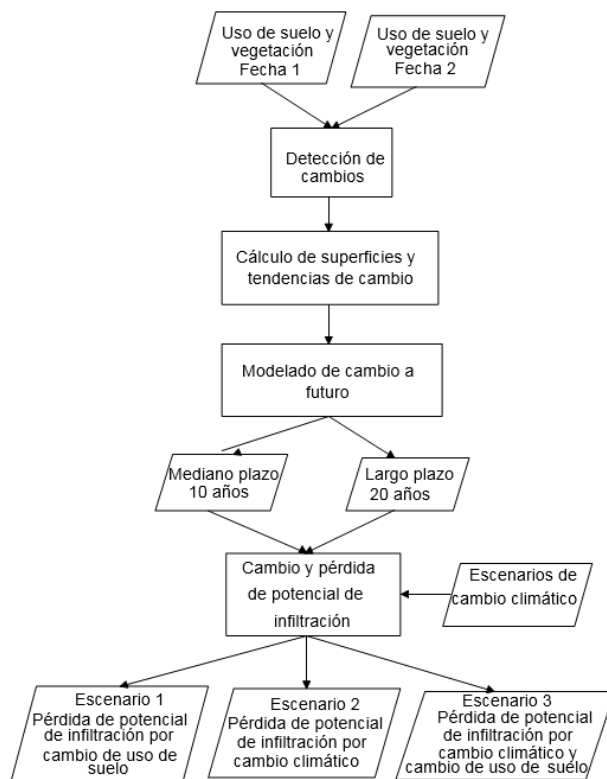


Figura 3.41. Metodología de análisis para determinar la pérdida de potencial de recarga por cambios de uso de suelo

Para el análisis de cambio histórico para establecer los cambios de uso del suelo se tuvieron las siguientes consideraciones:

Primero: La dirección en que los cambios ocurren: agricultura hacia asentamientos humanos y pastizales hacia asentamientos humanos como fuerzas más importantes, sin embargo, hubo también otros cambios que en el modelado no son considerados, tales como, vegetación natural hacia agricultura y vegetación natural hacia pastizales, 2,100 y 1,200 hectáreas, respectivamente. Estos cambios no fueron considerados, porque estos usos de suelo no bloquean la capacidad de infiltración del terreno independientemente de si hay vegetación natural, pastizal o agricultura.

Segundo: Las tasas de cambio anuales anteriormente eran mucho mayores, pero si se considera que la legislación actualmente limita el cambio de uso de suelo, como se establece en el Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, publicado en 2003 o el Plan Estatal de Desarrollo Urbano 2019 del Estado de México, se puede suponer que bajo condiciones legales iguales este valor anual se mantendrá.

Las proyecciones a futuro se hacen considerando estas tasas moderadas de cambio, pero definitivamente es factible que puedan haber elementos humanos que hagan variar este proceso, ya que los procesos de cambio de uso de suelo, tienen un elemento temporal de gran importancia, pues están relacionadas con variaciones en las condiciones económicas y políticas (leyes) del país; las tendencias que guían el cambio de uso de suelo no son constantes a través del tiempo y debido a esto se utilizó el periodo más reciente de cambio (serie 5 y serie 6 del INEGI) ya que el panorama económico y legal actual, es el que está guiando estos cambios y es probable que lo siga haciendo.

Para obtener esta información, se analizó la información geográfica de uso de suelo y vegetación de INEGI series 5 (condición 2011) y serie 6 (condición 2014), a escala 1: 250,000; se utilizó esta información debido a que es la información oficial, proviene del análisis de imágenes de satélite y es la que tiene varias series que pueden ser comparadas unas con otras.

Para la serie 5, de acuerdo con la información de los metadatos, la fecha de referencia del conjunto de datos espaciales es del 2013-05-15, para la cual se emplearon imágenes de satélite Landsat TM5 Multiespectral principalmente de 2011 y en algunos casos se completó con imágenes 2010. Para la serie 6 el conjunto de datos espaciales es del 2016-12-16, para la cual se emplearon imágenes de satélite Landsat TM8 multiespectral principalmente de 2014.

Las series del INEGI contienen una amplia variedad de clases de los usos de suelo y la vegetación, conforme a su sistema de clasificación; por ejemplo tiene diferentes tipos de bosques, de selvas, de pastizales, de vegetación de matorral, diferentes tipos de usos de suelo, como los agrícolas y pecuarios; debido a esta gran variedad en la información se hizo necesaria una generalización de estas clasificaciones, debido a que el modelo utilizado funciona mejor con pocas clases, ya que el utilizar una clasificación muy amplia en el uso de suelo, no facilita los procesos de cálculo para determinar el crecimiento que tendrá una clase particular de uso de suelo.

Además de que una clasificación más detallada de uso de suelo no enriquece los resultados, dado que las presiones por aumento de uso de suelo no actúan sobre un tipo de vegetación en especial, por ejemplo, no hay mayor tendencia a cambiar sobre un bosque de pino, que sobre una selva baja, la expansión de la infraestructura (que es el uso que interesa) se realiza por igual

en ambos tipos de vegetación, y está guiada por las necesidades de crecimiento de la misma y no por el tipo de vegetación. Los usos son los que determinan los posibles cambios, y esto se ve claramente en el análisis realizado entre la serie 5 y 6 de INEGI, el crecimiento de la infraestructura, actuó mayormente sobre suelos con usos ganaderos (pastizales) y suelos con usos agrícolas, en especial en esta zona, en donde el cambio fue muy gradual hacia la vegetación natural y poco representativo comparado con el cambio que dio hacia estos dos tipos de uso de suelo.

Con estas consideraciones se definieron cuatro clases que permitieron medir de mejor manera los cambios de uso de unas a otras; para generarlas, se consideraron las clasificaciones que se encuentran en el documento guía para la interpretación de la cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI del 2009, en el documento del uso potencial del suelo también del INEGI y de la clasificación de uso de suelo de la Ciudad de México (Iktancorp, 2020).

Conforme al documento guía para la interpretación de la cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI del 2009, los tipos de uso de suelo y vegetación se clasifican en los siguientes rubros generales:

Información ecológica florística fisonómica: incluye las agrupaciones de las comunidades vegetales, definidas con base en sus afinidades ecológicas y florísticas.

Información agrícola pecuaria forestal: presenta información sobre áreas en las que ha sido desplazada la cobertura vegetal para desarrollar actividades agropecuarias, así como zonas donde se utiliza con fines de explotación forestal y de utilización de la cubierta forestal.

Información complementaria: incluye información derivada de la información topográfica y que refuerzan directa o indirectamente la información de uso del suelo y vegetación.

Conforme al uso potencial del suelo del INEGI, la clasificación del uso es: uso potencial agrícola, uso potencial pecuario, uso potencial forestal, uso potencial urbano y el uso potencial en conservación.

Ya que en el INEGI aparece sólo el uso potencial urbano, se utilizó la clasificación de uso de suelo de la CDMX, sólo para entender cuáles son sus clases y los cambios de uso de suelo que permite este ordenamiento que lo clasifica de la siguiente forma:

Suelo urbano: habitacional, habitacional con comercio en planta baja, habitacional mixto, habitacional con oficinas, equipamiento, industria, áreas verdes, espacios abiertos, centro de barrio.

Comunidades y poblados rurales: habitación rural, habitación rural de baja densidad, habitación rural con comercio y servicios, equipamiento rural.

Suelo de conservación: rescate ecológico, preservación ecológica, producción rural agroindustrial.

Una vez analizada la información sobre la clasificación del tipo de suelo dentro de la zona de estudio, se realizó la clasificación de los cuatro tipos de vegetación y uso del suelo guiada por

estas tres fuentes, considerando además las alteraciones a la capacidad del suelo en cuanto a infiltración, quedando de la siguiente forma:

Vegetación: todo aquel suelo que contiene vegetación natural en cualquier estado de sucesión y elementos naturales como el agua, que no tiene un uso humano que directamente cambie la cobertura del suelo (uso forestal) o uso acuícola (no altera los cuerpos de agua). Todos estos no alteran la capacidad de infiltración del terreno.

Asentamientos humanos: aquellas áreas en donde debido a la infraestructura, los demás usos de suelo no son posibles (incluye a ciudades y poblados). Este uso nulifica la capacidad de infiltración del agua de lluvia a través del suelo.

Pastizal: áreas en las cuales, ya sea por ser pastizales inducidos o naturales, se realiza con mucho mayor frecuencia la ganadería. Este uso no altera la capacidad de infiltración.

Agricultura: áreas con uso agrícola ya sea tradicional o mecanizado y que no permiten un uso diferente simultáneamente. Este uso se considera que no nulifica la capacidad de infiltración, ya que su infiltración puede ser variable, pero no nula.

A continuación, se muestra la reclasificación que se efectuó para la serie 6 de uso de suelo y vegetación de INEGI.

Tabla 3.16. Reclasificación para los datos de la carta de uso de suelo

Reclasificación	Uso de suelo / vegetación	Superficie (ha)
Agricultura	Agricultura de humedad anual	25.26
	Agricultura de riego anual	7,165.45
	Agricultura de riego anual y permanente	310.41
	Agricultura de riego anual y semipermanente	43,543.80
	Agricultura de riego semipermanente	7,016.61
	Agricultura de temporal anual	243,856.58
	Agricultura de temporal anual y permanente	51,655.55
	Agricultura de temporal permanente	7,763.85
	Agricultura de temporal semipermanente	59.55
	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	700.07
Asentamientos humanos	Urbano construido	184,583.97
Pastizal	Pastizal cultivado	498.69
	Pastizal halófilo	10,145.02
	Pastizal inducido	61,957.20

Tabla 3.16. Reclasificación para los datos de la carta de uso de suelo (continuación)

Reclasificación	Uso de suelo / vegetación	Superficie (ha)
Vegetación	Agua	5,142.87
	Área desprovista de vegetación	849.98
	Bosque cultivado	7,530.50
	Bosque de encino	13,637.30
	Bosque de encino-pino	5,537.02
	Bosque de oyamel	26,060.41
	Bosque de pino	44,924.00
	Bosque de pino-encino	4,785.94
	Bosque de táscate	558.15
	Matorral crasicaule	18,521.15
	Matorral desértico rosetófilo	1,661.27
	Matorral sarcocaula	274.40
	Pradera de alta montaña	4,094.87
	Sin vegetación aparente	9,709.10
	Tular	93.30
	Vegetación halófila hidrófila	275.82
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	5,314.04
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	85.01
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de oyamel	691.50
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	8,293.50
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	421.83
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de táscate	493.10
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	22,955.44
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	2,185.54
	vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel	3,755.63
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	16,170.18
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	2,475.90
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	3,600.93
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	3,885.91
	Vegetación secundaria herbácea de bosque de encino	673.30
	Total general	833,939

Una vez realizada esta reclasificación, para las dos series del INEGI, se realizó el análisis de cambio que ha ocurrido en los dos periodos, 2011 y 2014; posteriormente se elaboró una matriz de cambios que muestra las superficies de cambio y de que clase a que clase ocurrieron; este análisis consistió en la sobreposición de capas y cálculos de superficies.

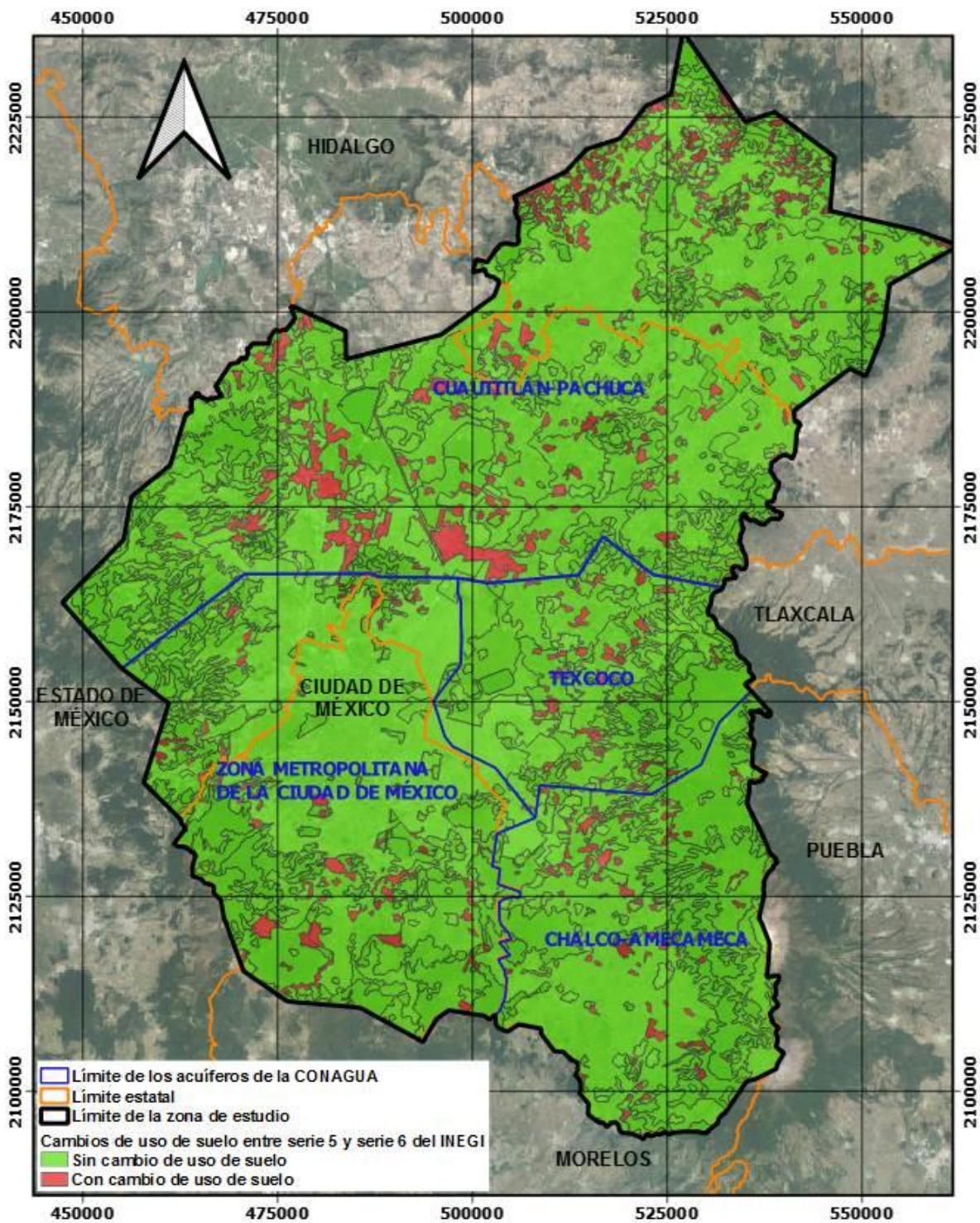


Figura 3.42. Mapa de cambios de uso del suelo para el periodo 2011-2014

Tabla 3.17. Matriz de cambio de uso de suelo ocurrido en el período 2011-2014

Serie 5 (2011)	Serie 6 (2014)				Total General (ha)
	Agricultura (ha)	Asentamientos (ha)	Pastizal (ha)	Vegetación (ha)	
Agricultura	356,995.44	29,603.55	988.10	5,058.12	392,645.21
Asentamientos	0.00	150,014.45	0.00	0.00	150,014.45
Pastizal	2,911.85	3,418.78	70,368.87	4,740.46	81,439.96
Vegetación	2,189.82	1,547.19	1,243.93	204,861.64	209,842.58
Total	362,097.12	184,583.97	72,600.90	214,660.21	833,942.20

En la tabla 3.17 las superficies indican las transiciones que hubo entre 2011 y el 2014 y se lee tomando en cuenta la categoría 2011 y su cambio a 2014, por ejemplo: 29,603.55 ha de agricultura se convirtieron en asentamientos humanos, 988.10 ha terminaron como pastizales y 5,058.12 ha fueron ocupadas por crecimiento vegetal natural, seguramente matorrales secundarios debido al abandono de estas tierras de cultivo.

El pastizal se convirtió a agricultura en 2,911.85 ha y 1,547.19 ha de vegetación fueron convertidas en ciudades o poblados (infraestructura), asimismo, 4,740.46 ha pasaron de pastizales (posiblemente inducidos) a algún tipo de crecimiento secundario de vegetación natural.

La diagonal principal, en color amarillo, manifiesta la superficie que no sufrió ningún cambio entre el 2011 y el 2014.

En resumen, los asentamientos humanos pasaron de cubrir 150,014.45 ha en el año 2011, a tener 184,583.97 ha en el año 2014; las 34,569.52 ha de diferencia, invadieron 29,603.55 ha de terrenos agrícolas, 3,418.78 ha de pastizales y 1,547.19 ha de algún tipo de vegetación.

Normalmente los cambios son los siguientes:

De vegetación natural a agricultura, este cambio es considerado deforestación; de pastizal a agricultura es considerado cambio de uso.

Para este análisis sólo se consideraron los cambios que van de agricultura, pastizales y vegetación natural, hacia asentamientos humanos, debido a que las coberturas de carpeta asfáltica o cemento de las ciudades son las que bloquean por completo la capacidad de los suelos para la infiltración del agua, los demás cambios siguen permitiendo que este servicio ambiental continúe.

En resumen, la matriz indicó que los mayores cambios que ocurrieron durante el periodo 2011-2014 fueron: agricultura a asentamientos humanos con 29,603.55 ha y pastizales a asentamientos humanos con 3,418.78 ha.

Partiendo de esta información, se alimentó al modelo de cambio de uso privilegiando el cambio de agricultura a asentamientos y de pastizal a asentamientos.

Para saber la cantidad de cambio (ha) que debe ser tomada en cuenta para las fronteras de tiempo que se consideraron 2030 y 2050, se calculó la tasa de cambio conforme a la siguiente fórmula usada por la FAO para estos fines.

$$\delta_n = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

Donde:

S1: es la superficie en el tiempo 1

S2: es la superficie en el tiempo 2

n: es el número de años que hay entre estos dos escenarios

El resultado es el porcentaje de cambio que hay por año.

Una vez aplicada esta fórmula se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 3.18. Valores de cambio de suelo obtenidos

Clase	Serie 5 2011 (ha)	Serie 6 2014 (ha)	Tasa de cambio anual (%)
Agricultura	392,063.30	362,097.12	-0.020
Asentamientos	150,930.34	184,583.97	0.052
Pastizal	81,423.43	72,600.90	-0.028
Vegetación	209,522.81	214,657.88	0.006

De esta forma se obtuvieron las superficies de cambio esperadas para los dos escenarios, 2030 y 2050. Con esta información y las tendencias de cambio obtenidas del análisis anterior, se alimentó al modelo que generaría los escenarios de cambio de uso de suelo.

El modelo

El modelo de generación de escenarios de cambio de uso de suelo desarrollado en el proyecto NatCap, que integra un conjunto de herramientas de modelado, incluida la evaluación integrada de servicios ambientales y compensaciones “InVEST”, versión 3.1.0, 2014 (Berg et al., 2015); cabe mencionar que este modelo ya ha sido probado para determinar la generación de escenarios de cambio de uso de suelo. A partir de estas herramientas se realizó el modelado para los escenarios de 2030 y 2050, considerando las tasas de cambio del análisis anterior, con la premisa de que el crecimiento de las zonas urbanas se dará alrededor de las actuales (Scenario generator proximity based), para mayor detalle de cómo funciona el modelo consultar el documento Scenario Generator: Proximity Based, en el anexo 2.

Este modelo utiliza información obtenida con diferentes procesos como el análisis geográfico, el análisis histórico, la consulta con expertos o a través de talleres comunitarios (Ardavan, 2017; Berg, 2015), que determinan las tendencias (drivers) que guían el cambio de uso de suelo. Así se alimenta al modelo, con lo cual se calculan las probabilidades que cada píxel tiene de cambiar

de un uso de suelo a otro y genera varios escenarios en los cuales y a partir de estas probabilidades, el suelo cambia ante diferentes fronteras temporales (Sharp et al., 2018). <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.

Para que el algoritmo funcione, se definen tres tipos de cobertura terrestre:

- 1) La cobertura terrestre focal. Es el uso de suelo que establece las reglas de proximidad desde las cuáles se plantearán los escenarios a determinar. El generador de escenarios partirá de este uso actual y mide la distancia hacia dónde ocurrirá la conversión.
- 2) La cubierta terrestre convertible. Es el uso de suelo que se pueden convertir, este uso podría ser el mismo que los de la cobertura terrestre focal, un subconjunto o ser completamente diferente.
- 3) La cubierta de tierra de reemplazo. Es el uso de suelo a la que se convertirán las cubiertas de tierra convertibles. Este sólo puede ser un tipo de uso de suelo por modelo ejecutado.

El modelo se alimenta con los siguientes insumos:

1. Cobertura de uso de suelo actual
2. Número de años que se considerarán
3. Superficie que puede ser transformado (cambio de uso)
4. Usos sobre los cuales se efectuará la transformación

Toda esta información fue obtenida con los análisis anteriores: matriz de cambios y tasa de cambio.

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la identificación de las zonas de recarga, con el método descrito en el capítulo 3.4, que dio como resultado la división de los polígonos en ocho categorías, en función de su potencialidad de recarga; a continuación, se hace una descripción de cada una de estas categorías, de sus análisis estadísticos y de la forma en que se revisó que los resultados obtenidos fueran correctos. La relación de archivos electrónicos (SIG) se encuentra en el anexo 3.

4.1. Potencial de recarga

El área total de estudio tiene una extensión aproximada de 8,340 Km² (incluyendo las áreas urbanas), de los cuales en 5,960 Km² puede existir la infiltración y en su caso la recarga al acuífero, en esta última superficie se realizó el análisis con el cual se generó el mapa 4.1; a continuación, se describe cada una de las zonas de recarga determinadas:

Zonas de recarga muy alta

Representan extensiones con la mayor potencialidad para permitir la recarga de los acuíferos, su localización se presenta en la figura 4.1; incluye a los materiales con mayor permeabilidad; se localizan principalmente al sur de la cuenca, en la Sierra Chichinautzin y algunas porciones del

Iztaccíhuatl; tiene una superficie aproximada de 129 Km², que representa el 2.16% del área. Sus características son:

- Continuas hidráulicamente de forma lateral y vertical, permitiendo el flujo del agua desde las zonas altas hasta las zonas donde se localizan los acuíferos (en algunos casos forman parte de estos)
- La condición hidrológica del suelo es de los tipos A y B, con bajo potencial de escorrentía y altas a moderadas tasas de infiltración
- Están constituidas por rocas fracturadas, porosas y/o por la combinación de ambas
- En gran parte de su extensión las lluvias son altas, ya que en el 96% de su superficie llueve más de 842 mm al año
- Los pozos cercanos presentan bajas concentraciones de sólidos totales disueltos, menores a 300 ppm, los que muestra que son aguas de reciente infiltración, que han interactuado poco con las rocas
- El vigor de la vegetación es variable, sin embargo, predominan las categorías alta y media alta, que cubren el 78% de su superficie
- La pendiente es variable, en el 50% de su superficie son menores a 6°

Zonas de recarga alta

Incluye a los materiales con buena permeabilidad; se localizan principalmente al sur de la cuenca, en la Sierra Chichinautzin y algunas porciones del Iztaccíhuatl, al igual que en pequeñas superficies al noreste y suroeste de la Cuenca de México; su extensión es de aproximadamente 831 km², que representa el 13.95% del total de la superficie donde se puede dar la recarga (ver figura 4.1). Sus características son:

- Continuas hidráulicamente de forma lateral y vertical, permitiendo el flujo del agua desde las zonas altas hasta las zonas donde se localizan los acuíferos (en la mayoría de los casos forman parte de ellos)
- La condición hidrológica del suelo es de los tipos A y B, con bajo potencial de escorrentía y altas a moderadas tasas de infiltración
- Están constituidas por materiales fracturados, porosos y/o por la combinación de ambos, así como por algunas tobas
- El medio tiene una moderada a alta facilidad de infiltración
- En el 66% de su superficie llueve más de 842 mm al año
- El vigor de la vegetación es muy variable; las categorías alta y media alta cubren el 47% de la superficie
- La pendiente es variable, en el 51% de su extensión son menores a 6°
- Existen pozos perforados con bajas concentraciones de sólidos totales disueltos, con valores de entre 150 a 300 ppm

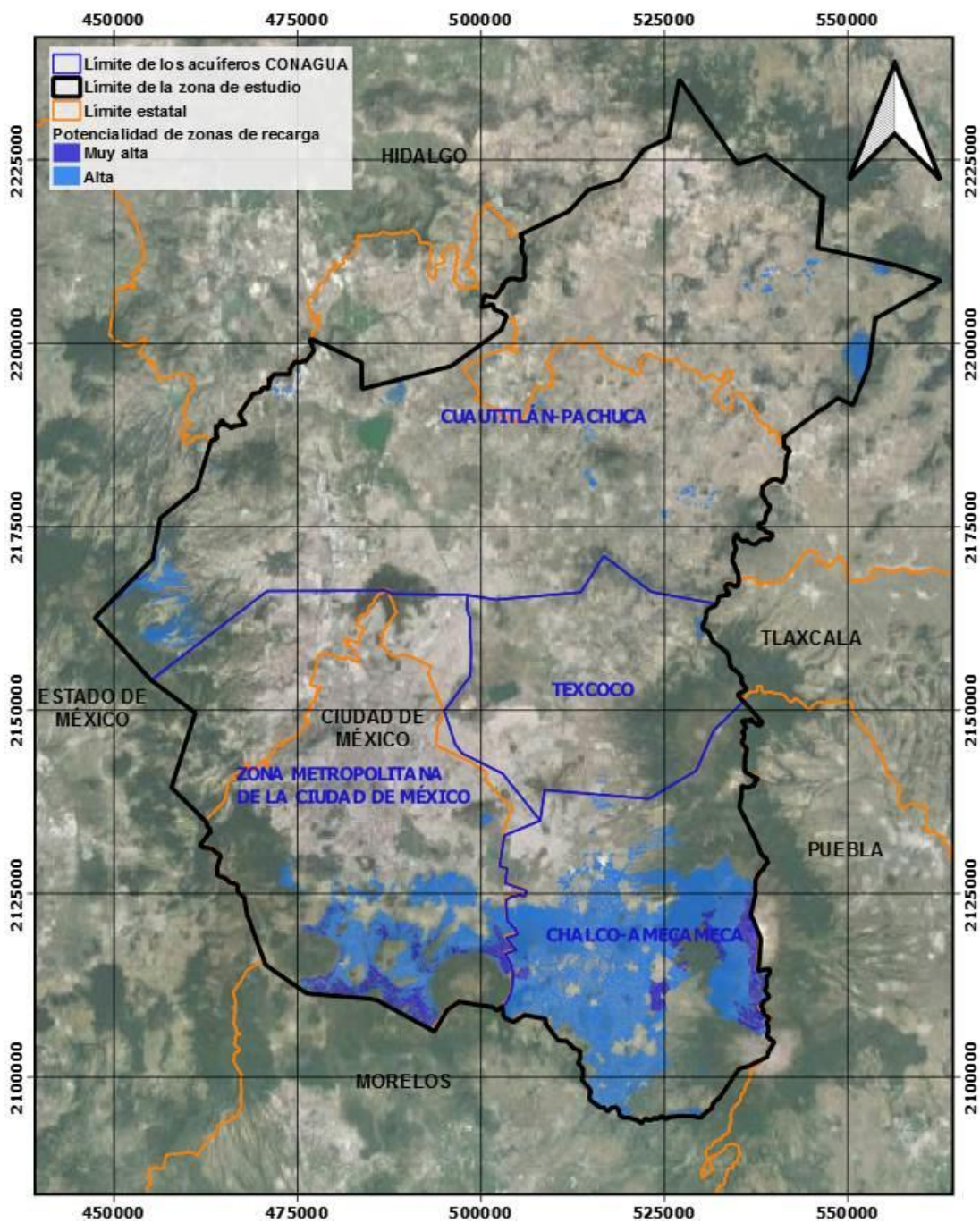


Figura 4.1. Distribución de las zonas de recarga con potencialidad muy alta y alta

Zonas de recarga media

Representan extensiones del terreno con moderada potencialidad para permitir la recarga de los acuíferos; incluye a los materiales con buena a media permeabilidad; están distribuidos en toda la cuenca, sin embargo, predominan al norte y noreste (ver figura 4.2); cubren un área del orden de los 1,875 km² que representa el 31.37% del área donde es posible la infiltración. Sus características son:

- Continuas hidráulicamente de forma lateral y vertical, permitiendo el flujo del agua desde las zonas altas hasta las zonas donde se localizan los acuíferos (en la mayoría de los casos forman parte de ellos)
- La condición hidrológica del suelo es de los tipos B y C; predominan los suelos tipo C, que cubren el 86 % de su superficie; son suelos con bajas tasas de infiltración cuando están completamente humedecidos
- Están constituidas por materiales fracturados, porosos y/o por la combinación de ambos, así como por tobas y materiales aluviales
- Las lluvias menores a 842 mm predominan en un 88%
- En lo relativo al vigor de la vegetación, predominan las categorías media, baja y sin cobertura vegetal, las cuales en conjunto representan el 91% de su superficie
- Las pendientes predominantes son las mayores a 6°, que están presentes en el 67% de su superficie
- Existen pozos perforados en estas zonas con concentraciones de sólidos totales disueltos de entre 291 y 1,300 ppm

Zonas de recarga baja

Se localizan en pequeñas porciones distribuidas en toda la cuenca (ver figura 4.2), sin embargo, predominan al norte, donde cubren un área aproximada de 147 km²; que representa el 2.47% del área donde se puede llevar a cabo la infiltración. Sus características son:

- Continuas hidráulicamente de forma lateral y vertical, permitiendo con alguna dificultad el flujo del agua desde las zonas altas hasta las zonas donde se localizan los acuíferos
- La condición hidrológica del suelo de tipo D predomina en un 78%; estos suelos tienen una capa de arcilla sobre o cerca de la superficie
- Incluye unidades litológicas de tipo combinado, fracturado, piroclastos, tobas y sedimentos aluviales, moderadamente consolidados o con bajo fracturamiento
- Las lluvias menores a 842 mm cubren el 96% de su superficie
- En el vigor de la vegetación, las categorías: media, baja y sin cobertura vegetal representan el 93% de su superficie
- Las pendientes predominantes son las mayores a 6°, que representan el 71% de su superficie
- Existen pozos perforados cercanos a estas zonas con concentraciones de sólidos totales disueltos de entre 600 y 900 ppm

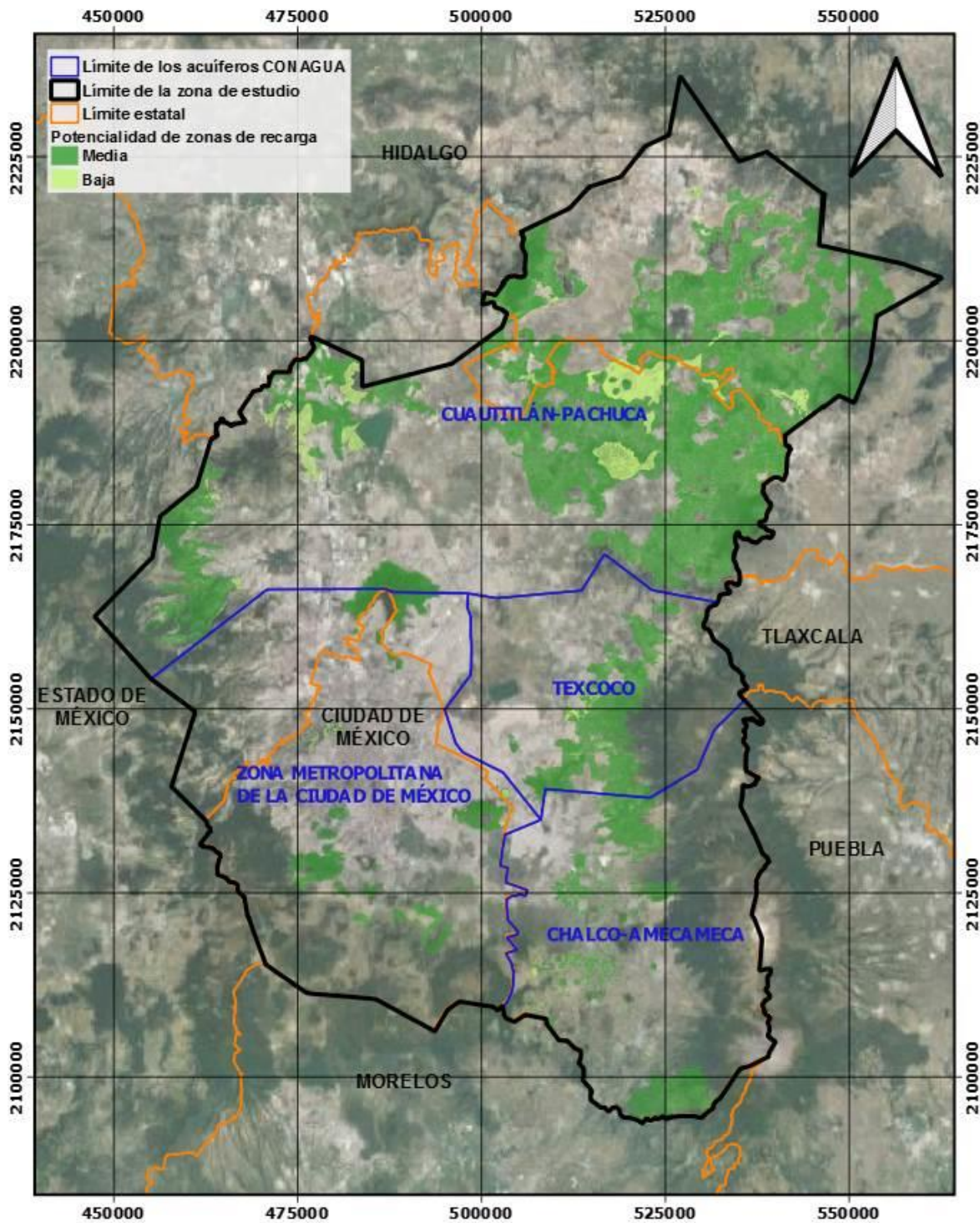


Figura 4.2. Distribución de las zonas de recarga de potencialidad media y baja

Zonas de recarga media o de flujo discontinuo

Representan extensiones con potencialidad media para permitir la recarga de los acuíferos; pueden formar acuíferos colgados; es frecuente la presencia de manantiales; se localizan principalmente al este, oeste y sur de la zona de estudio, en las sierras de Las Cruces, algunas porciones de la Sierra Nevada y en extensiones reducidas de la Sierra Chichinautzin (ver figura 4.3); cubren una superficie del orden de los 726 km² que representa el 12.17% del total del área por donde se puede dar la infiltración. Sus características son las siguientes:

- No siempre son continuas lateral y verticalmente, lo que en ocasiones impide el flujo del agua desde las partes altas hasta las donde se localizan los acuíferos
- En el subsuelo en ocasiones el medio limita la infiltración del agua, lo que provoca que se tenga flujo discontinuo y que el agua aflore originando manantiales o se formen acuíferos colgados
- Tienen suelos de condición hidrológica de los tipos A y B. Predominan los de tipo B
- Su litología incluye materiales combinados, fracturados, piroclastos y tobas, con grados de fracturamiento y compactaciones muy variables
- Predominan las lluvias mayores a 842 mm
- Con relación al vigor de la vegetación, las categorías: alta y media alta, representan el 83% de su superficie
- Las pendientes que predominan son las menores a 6°, que representan el 82% de su superficie
- No existen evidencias de la calidad del agua debido a que donde se localizan no hay pozos próximos

Estas zonas, aunque puedan no aportar recarga al acuífero, son importantes porque constituyen acuíferos colgados y permiten la formación de una gran cantidad de manantiales.

Zonas de recarga baja a media o de flujo discontinuo

Representan extensiones con media a baja potencialidad para permitir la recarga de los acuíferos, sin embargo pueden formar acuíferos colgados y por la falta de continuidad de los materiales permeables propician la formación de manantiales; se localizan principalmente al este y norte de la zona de estudio; cubre una superficie aproximada de 585 km² que representa el 9.81% del área donde se puede llevar a cabo la infiltración; están ubicadas principalmente al norte de la Sierra Nevada, así como en parte del Acuífero Cuautitlán-Pachuca (ver figura 4.3). Sus características son las siguientes:

- No son continuas lateral y verticalmente, lo que en muchas ocasiones impide el flujo del agua desde las áreas altas hasta donde se localizan los acuíferos
- En el subsuelo el medio frecuentemente limita la infiltración del agua, generando un flujo discontinuo que da lugar a la formación de manantiales y acuíferos colgados
- El suelo es de condición hidrológica B
- Su litología incluye materiales combinados, piroclastos, fracturados y aluviales, con grados de fracturamiento y compactación muy variables; en las partes bajas incluye sedimentos de origen lacustre
- La precipitación es menor a 842 mm
- En lo relativo al vigor de la vegetación, las categorías alta y media alta, representan el 54% de su superficie

- Las pendientes que predominan son las mayores a 6°, que representan el 63% de su superficie

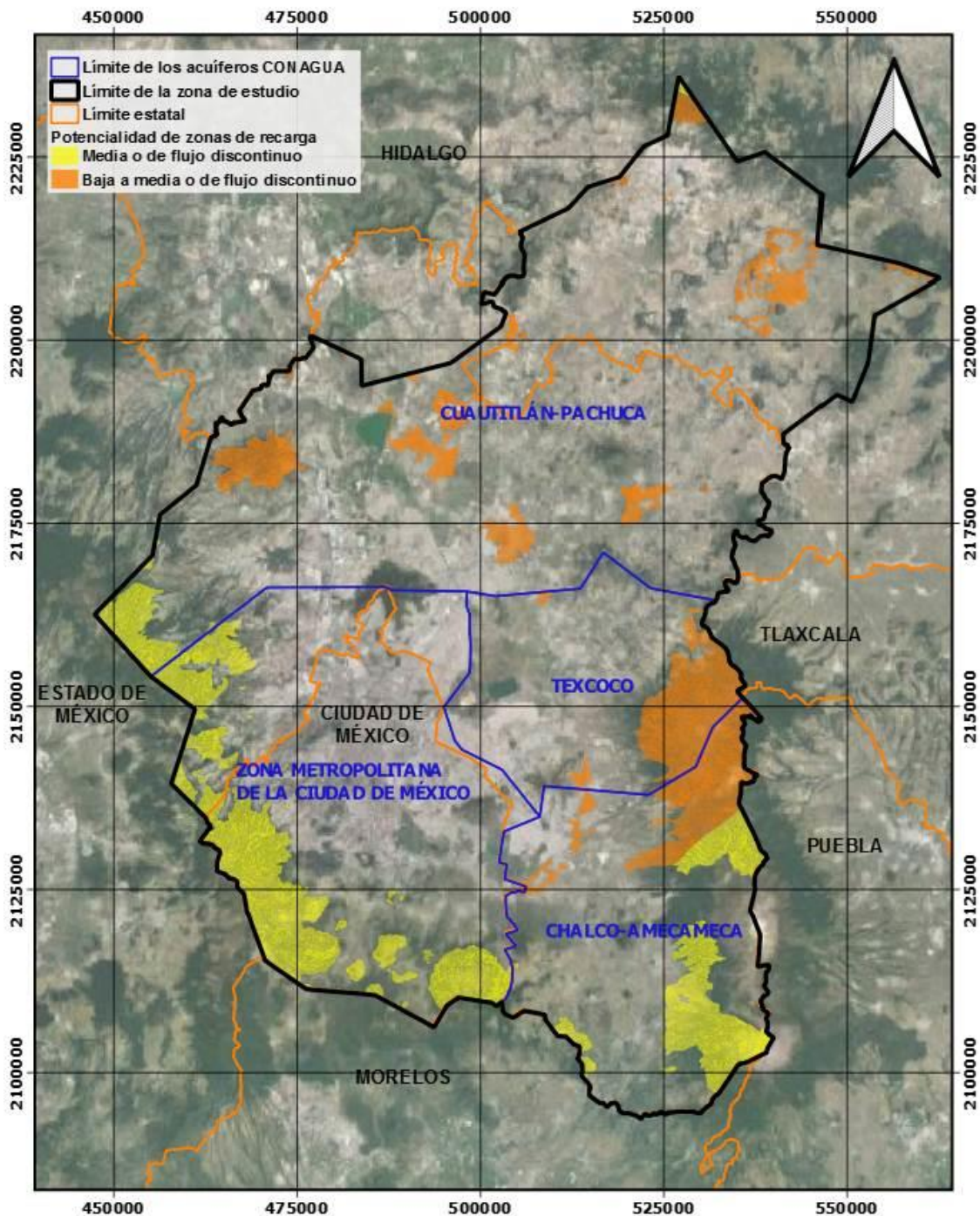


Figura 4.3. Distribución de las zonas de recarga de potencialidad media o de flujo discontinuo y baja a media o de flujo discontinuo

Zonas de recarga baja o de flujo discontinuo

Representan extensiones con baja potencialidad para permitir la recarga de los acuíferos, sin embargo, pueden formar acuíferos colgados de dimensiones reducidas; es frecuente que en esta zona se presenten manantiales; se localizan al este y norte de la zona de estudio, principalmente al norte de la Sierra de Las Cruces y otras porciones de menores dimensiones al sur de la Sierra Nevada (ver figura 4.4); cubre una superficie aproximada de 143 km² que representan el 2.40% del área donde se puede llevar a cabo la infiltración. Sus características son las siguientes:

- No son continuas lateral y verticalmente, lo que impide el flujo del agua desde las zonas altas hasta donde se localizan los acuíferos
- En el subsuelo el medio limita la infiltración del agua dando lugar a un flujo discontinuo, a la formación de manantiales y de acuíferos colgados
- La condición hidrológica de los suelos es de tipo C y D, con predominio del tipo C que cubre el 86% de su superficie
- Su litología incluye materiales combinados, piroclastos, tobas y rocas fracturadas, con grados de fracturamiento y compactación muy variables
- La precipitación es mayor a 842 mm
- En lo relativo al vigor de la vegetación, las categorías, media, baja y sin cobertura vegetal, representan el 55% de su superficie
- Las pendientes que predominan son las mayores a 6°, que representan el 83% de su superficie

Zonas de recarga muy baja a nula

Representan extensiones con las peores condiciones para permitir la recarga de los acuíferos; en el mejor de los casos pueden formar acuíferos colgados de reducidas dimensiones; cubre una superficie aproximada de 1,524 km², que representa el 25.57% del área donde se puede llevar a cabo la infiltración; se localizan distribuidos en toda el área de estudio, principalmente en los acuíferos Cuautitlán-Pachuca y Texcoco y en algunas porciones entre Chalco y la Ciudad de México (ver figura 4.4). Sus características son las siguientes:

- No son continuas lateral y verticalmente, lo que impide el flujo del agua desde las partes altas hasta donde se localizan los acuíferos
- El medio normalmente no permite la infiltración del agua; en el mejor de los casos el flujo es discontinuo y el agua sale a la superficie formando manantiales
- La condición hidrológica de los suelos es de los tipos C y D ; predomina el suelo tipo C que cubre el 84% de su superficie
- Su litología incluye materiales combinados, fracturados, piroclastos, tobas, depósitos aluviales y lacustres, con grados de fracturamiento y compactación muy variables
- La precipitación que predomina es menor a 842 mm
- En lo relativo al vigor de la vegetación, las categorías, media, baja y sin cobertura vegetal representan el 90% de su superficie
- Las pendientes predominantes son las menores a 6°, que representan el 72% de su superficie

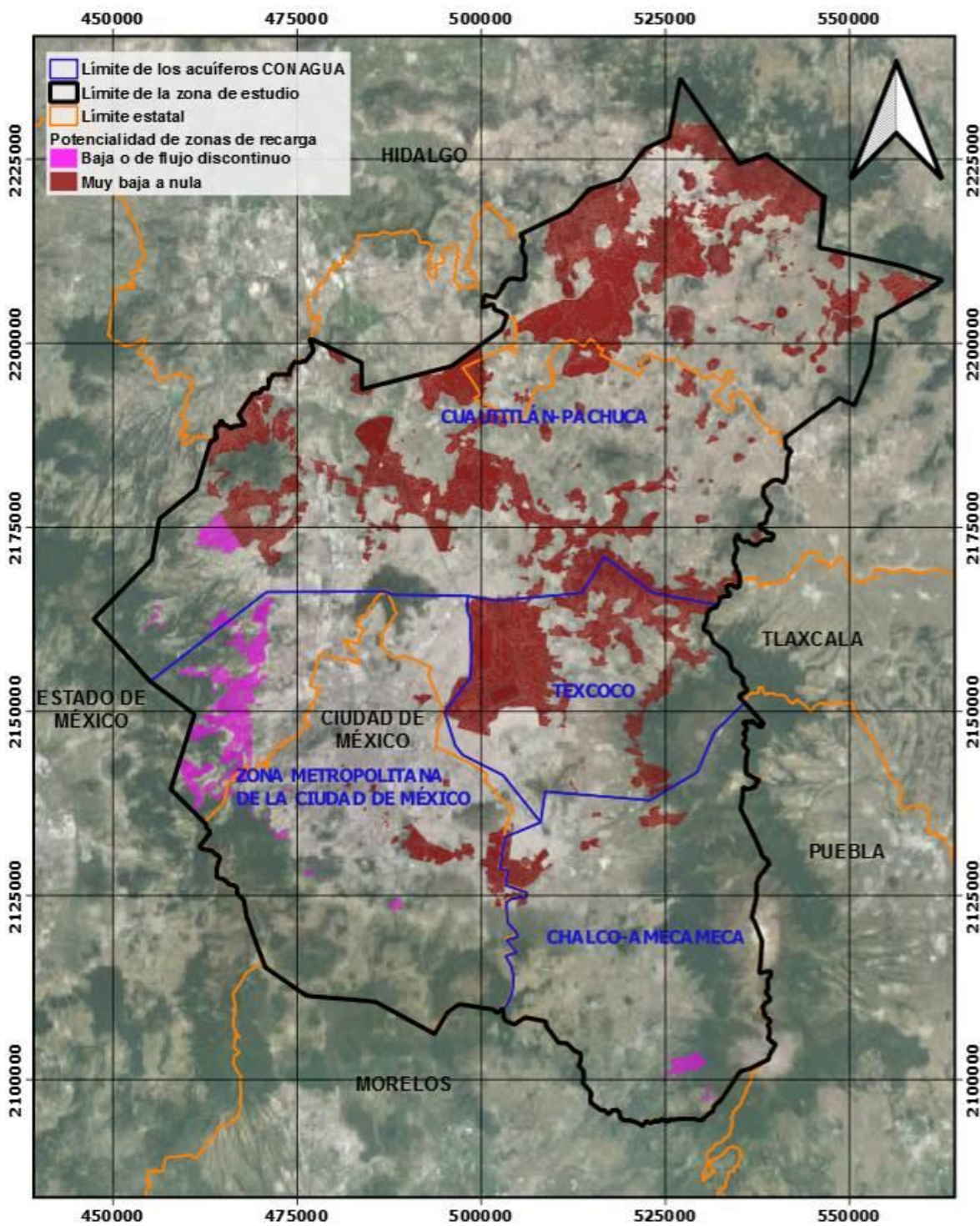


Figura 4.4. Distribución de las zonas de recarga de potencialidad baja o de flujo discontinuo y muy baja a nula

Las extensiones consideradas como **zonas de no recarga**, representan el 28.40% del total y corresponden con zonas urbanas (figura 4.5); en estas extensiones del terreno la infiltración del agua de lluvia está limitada por los materiales impermeables relacionados con la infraestructura urbana, sin embargo en la literatura consultada se cita que puede haber recarga inducida por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado, sin embargo no ha sido cuantificada de forma confiable; esta situación tiene que ser valorada detalladamente, debido a que los materiales en donde más se presentan las fugas es en los sedimentos lacustres de muy baja permeabilidad.

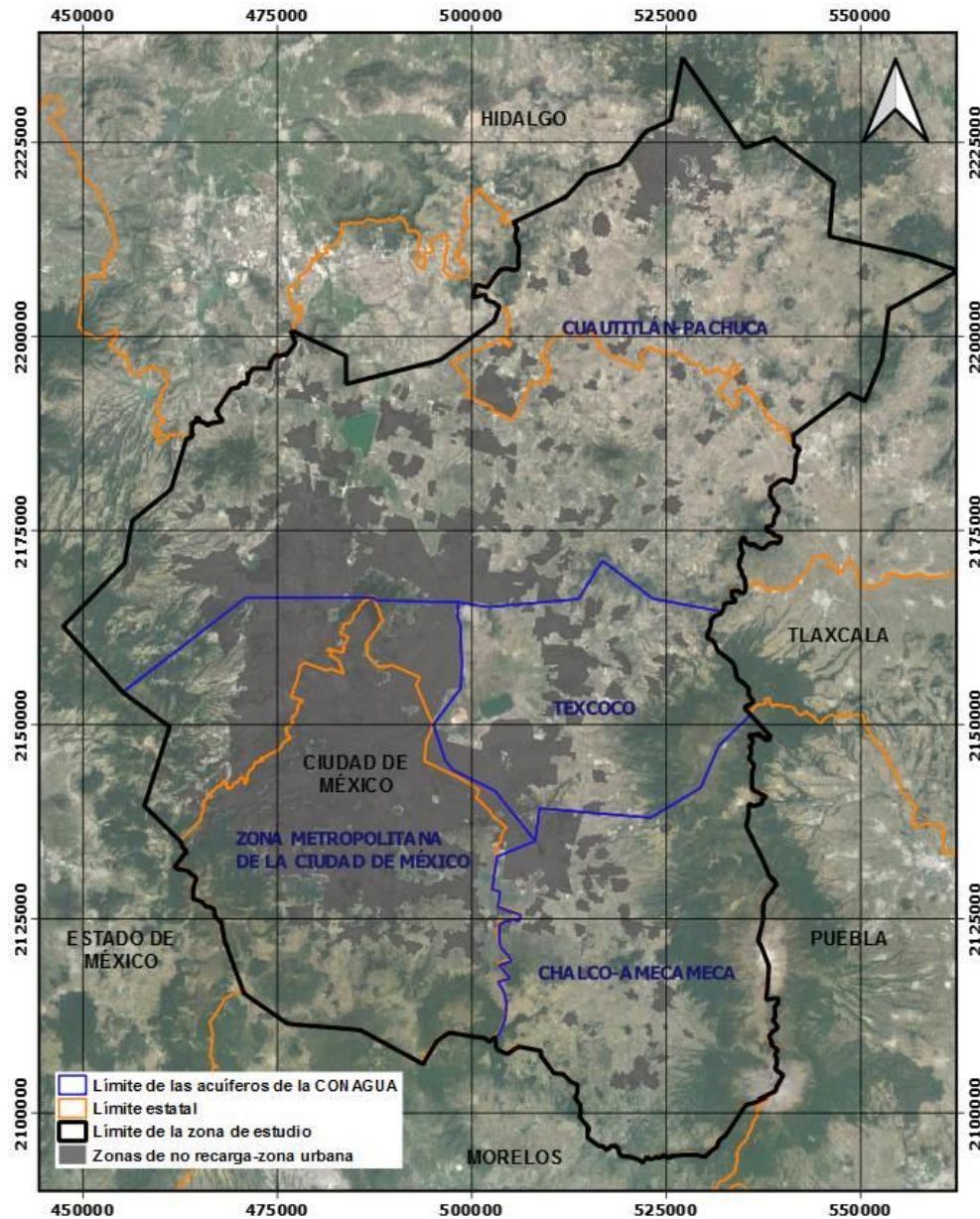


Figura 4.5. Distribución de las zonas urbanas en donde no hay recarga a los acuíferos

En la tabla 4.1 se hace un resumen de la distribución de las zonas de recarga por acuífero de la CONAGUA, y en general en la zona de estudio.

Tabla 4.1. Distribución de las zonas de recarga por acuífero

Acuífero administrativo	Chalco-Amecameca	Cuatitlán-Pachuca	Texcoco	ZMCM	Área donde puede existir la infiltración	Área donde puede existir la infiltración %
Zonas de recarga según potencialidad	Área (Km ²)	Área (Km ²)	Área (Km ²)	Área (Km ²)	Área (Km ²)	%
Muy alta	56.85	1.70	0	70.20	128.74	2.16
Alta	567.89	78.36	3.14	181.94	831.33	13.95
Media	166.15	1,429.00	174.34	105.88	1,875.38	31.47
Baja	1.46	129.89	7.44	8.62	147.42	2.47
Media o de flujo discontinuo	221.47	70.83	0.00	433.20	725.50	12.17
Baja a media o de flujo discontinuo	167.61	241.27	175.26	0.50	584.65	9.81
Baja o de flujo discontinuo	10.72	23.32	0	108.77	142.81	2.40
Muy baja a nula	36.99	1,085.50	346.44	55.30	1,524.22	25.57
Superficie total	1,229.13	3,059.88	706.62	964.42	5,960.05	100.00

ZMCM: Zona metropolitana de la Ciudad de México

De esta tabla se puede concluir que en el Acuífero Chalco-Amecameca, predominan las zonas de recarga de potencialidad alta; en el Acuífero Cuatitlán-Pachuca predominan las zonas de potencialidad media; en el Acuífero de Texcoco, las de potencialidad muy baja a nula y en el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México predominan las zonas de potencialidad media o de flujo discontinuo; su distribución geográfica se muestra en las siguientes figuras.

Por otra parte las zonas de recarga muy alta y alta ocupan las siguientes superficies y porcentajes por acuífero: Chalco-Amecameca 624.74 km², que representa el 50.83% de la superficie del acuífero; Cuatitlán-Pachuca 80.06 km², representa el 2.62% de la superficie de ese acuífero; Texcoco 3.14 km², que son el 0.44% de la superficie del acuífero; y Zona Metropolitana de la Ciudad de México con 252.14 km², que representan el 26.14% de su superficie. En el total de la superficie estudiada, sin considerar las zonas urbanas, las zonas de recarga muy alta y alta cubren 960 km², que representan el 16.11% de los 5,960 km² analizados.

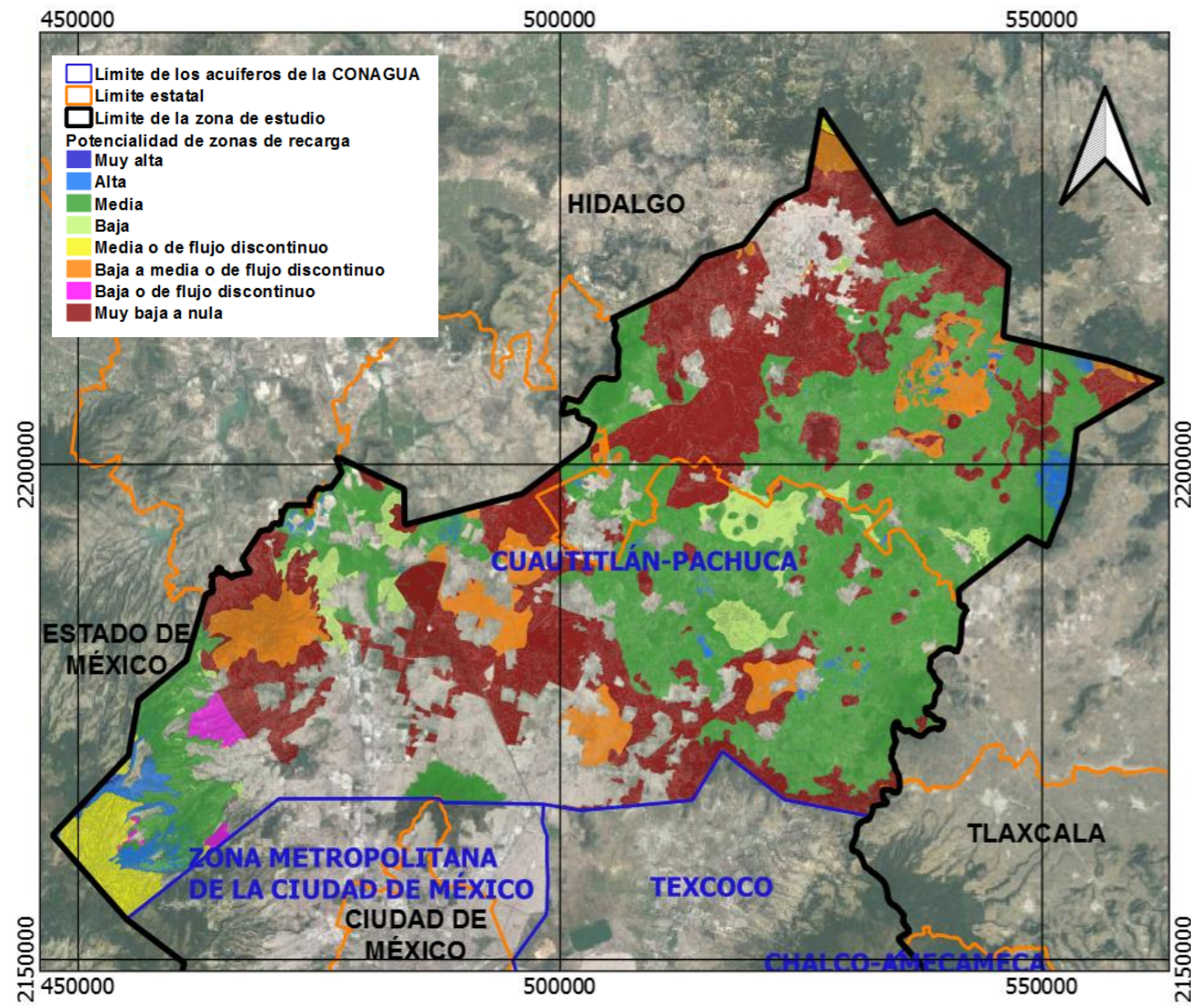


Figura 4.6. Distribución de las zonas de recarga en el Acuífero Cuautitlán-Pachuca

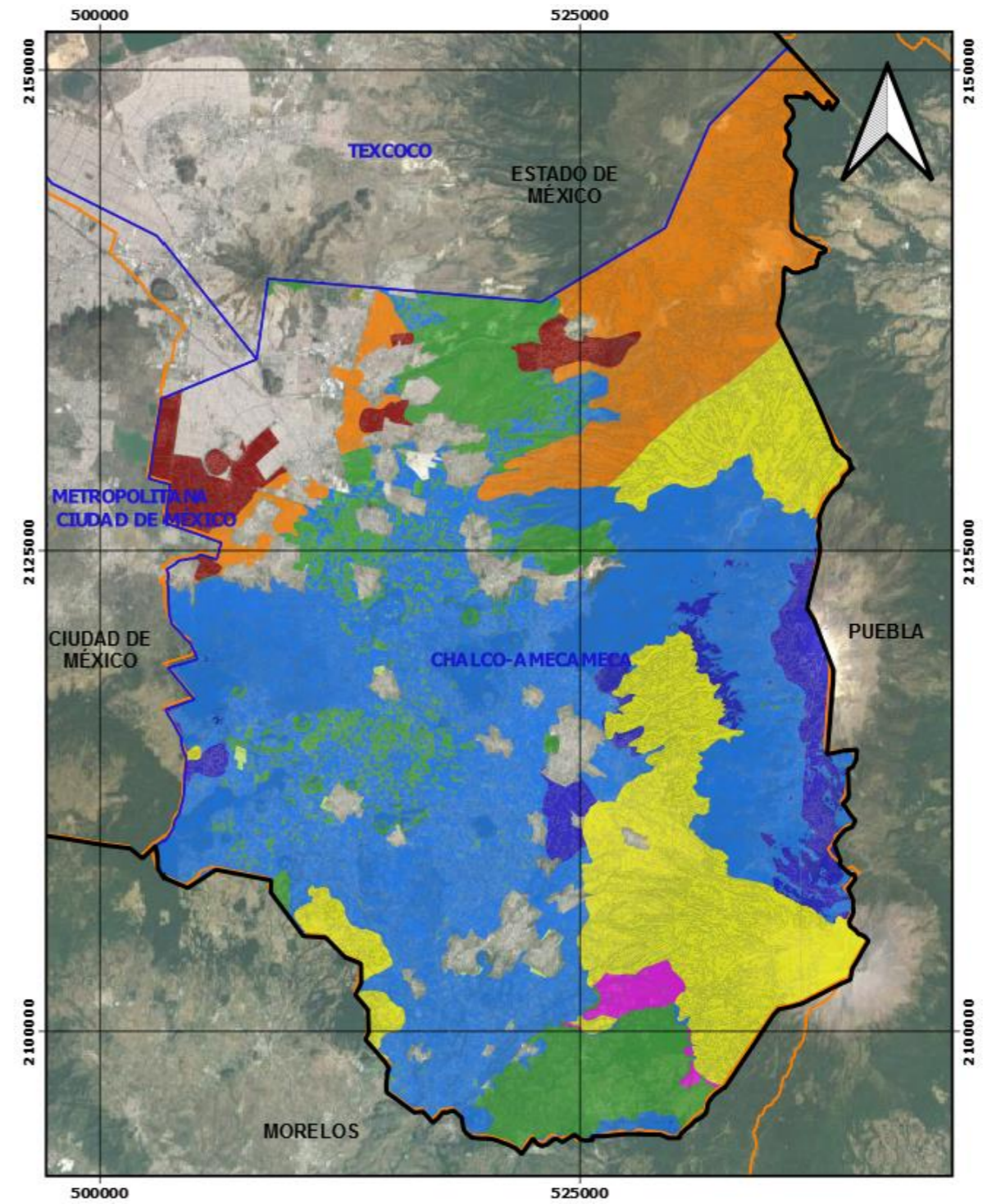


Figura 4.7. Distribución de las zonas de recarga en el Acuífero Chalco-Amecameca

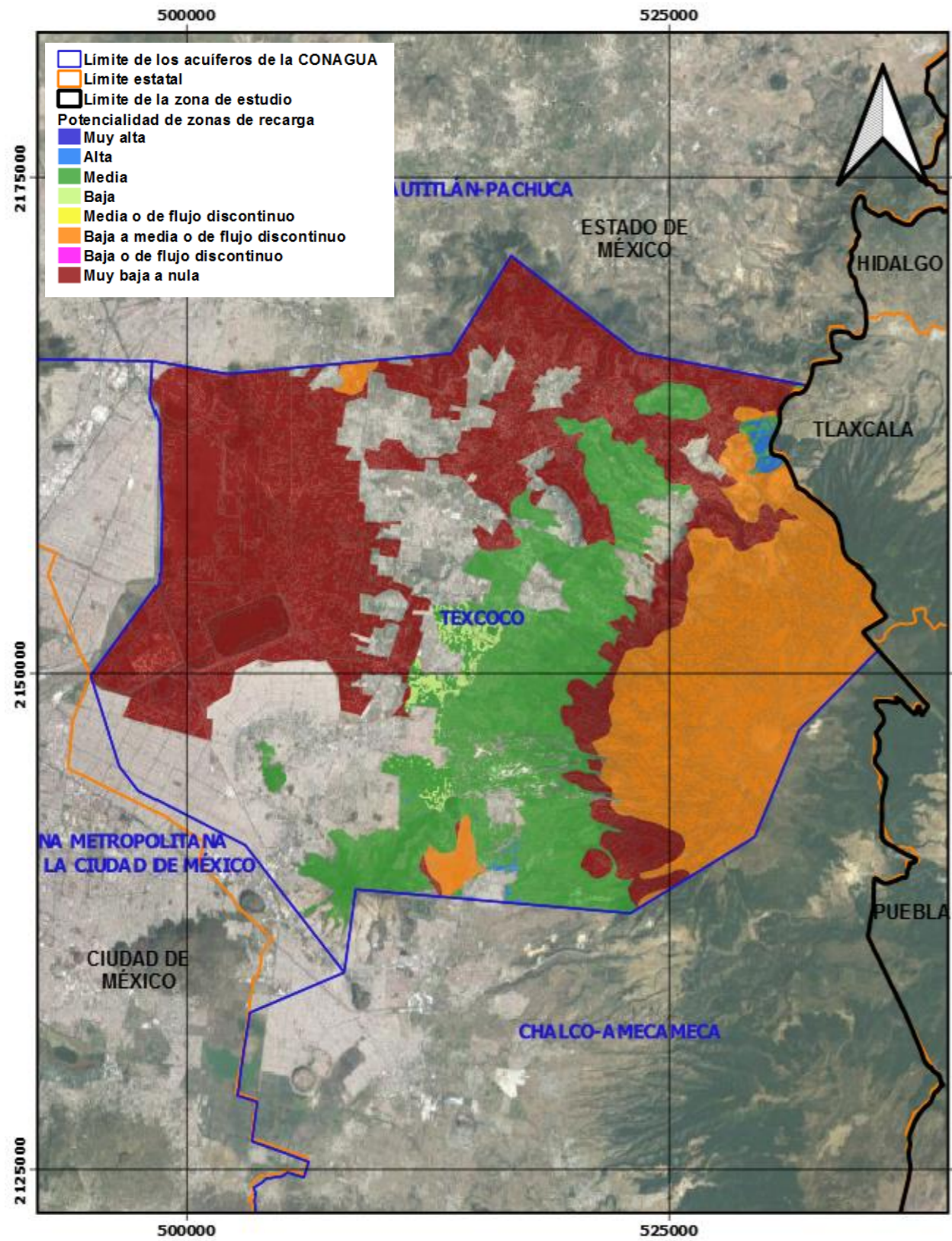


Figura 4.8. Distribución de las zonas de recarga en el Acuífero Texcoco

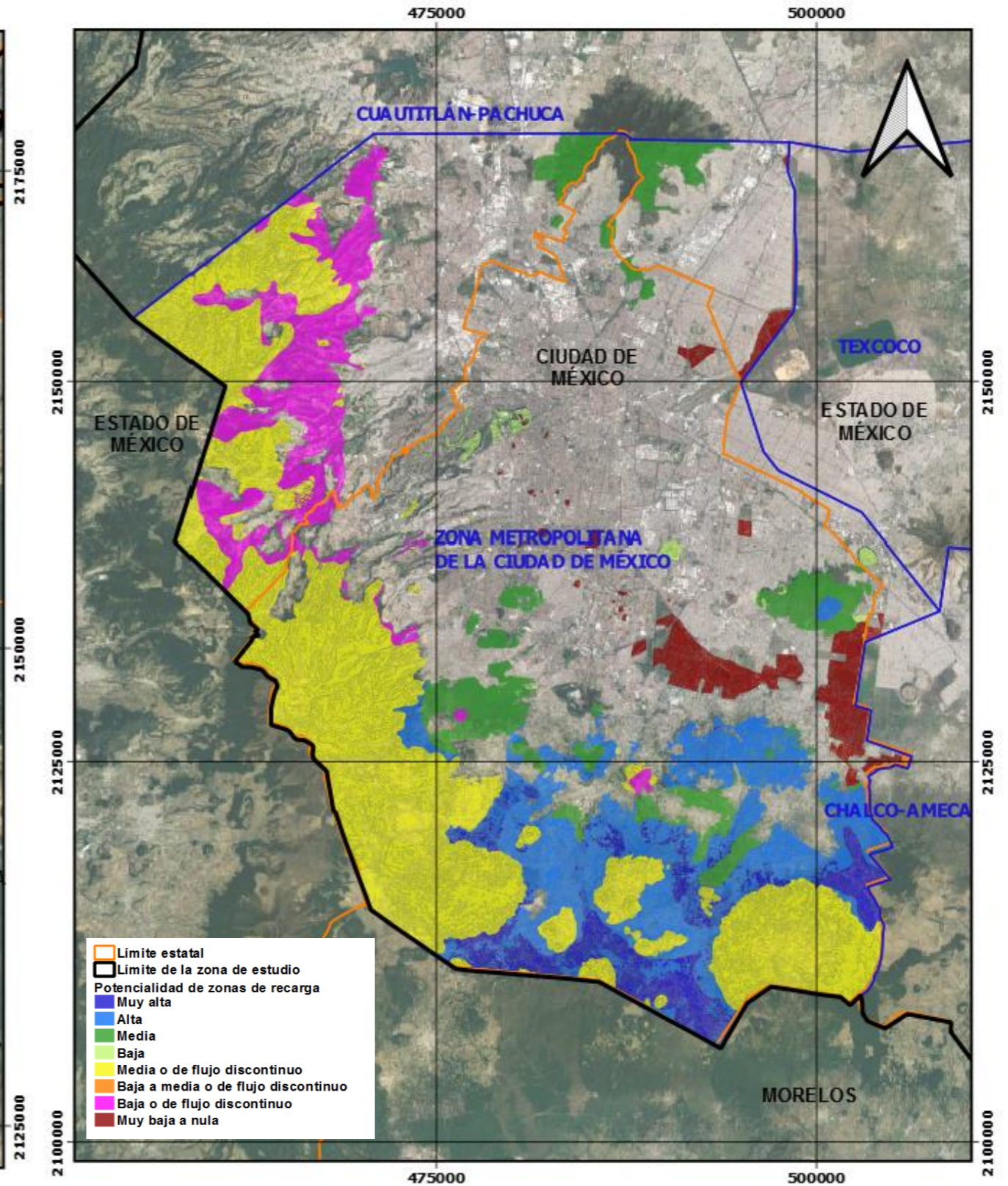


Figura 4.9. Distribución de las zonas de recarga en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México

En la tabla 4.2, se muestra un resumen de la distribución de las zonas de recarga por Estado, dentro de la zona de estudio y en las siguientes figuras su distribución geográfica.

Tabla 4.2. Distribución de las zonas de recarga por Estado

Estado	Ciudad de México	Estado de México	Hidalgo	Área donde puede existir la infiltración	Área donde puede existir la infiltración %
Zonas de recarga de potencialidad:	Área (Km ²)	Área (Km ²)	Área (Km ²)	Área (Km ²)	%
Muy alta	70.06	58.68	0.00	128.74	2.16
Alta	181.03	624.80	25.50	831.33	13.95
Media	79.41	1,203.50	592.46	1,875.38	31.47
Baja	7.50	120.58	19.34	147.42	2.47
Media o de flujo discontinuo	315.22	407.79	2.49	725.50	12.17
Baja a media o de flujo discontinuo	0.52	507.44	76.69	584.65	9.81
Baja o de flujo discontinuo	9.37	133.44	0.00	142.81	2.40
Muy baja a nula	48.42	935.77	540.04	1,524.22	25.57
Total	711.54	3,991.99	1,256.52	5,960.05	100.00

De los datos contenidos en esta tabla se concluye que, en la Ciudad de México, predominan las zonas de recarga de potencialidad media o de flujo discontinuo y en el Estado de México e Hidalgo predominan las zonas de recarga media.

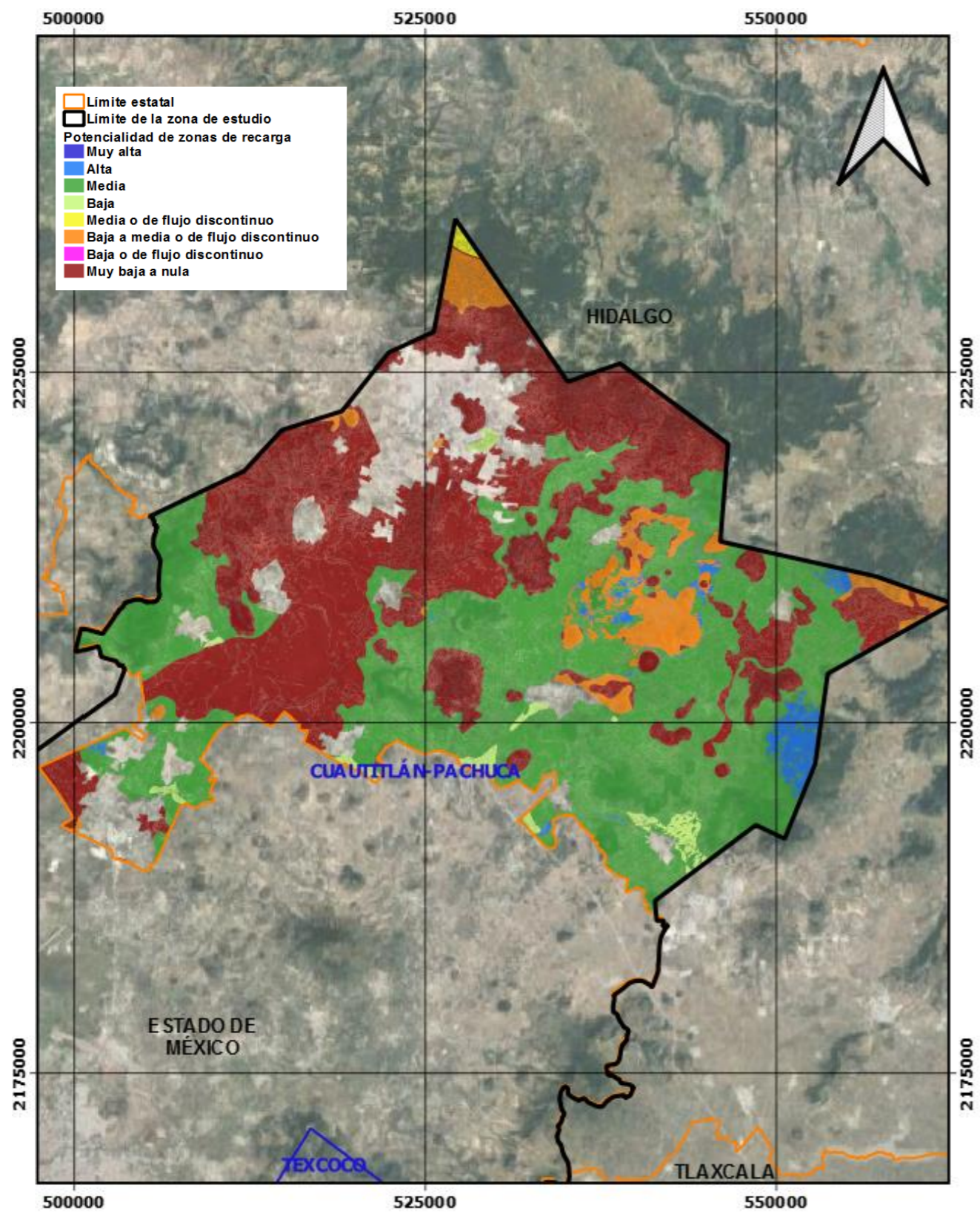


Figura 4.10. Distribución de las zonas de recarga en el Estado de Hidalgo, dentro de la zona de estudio

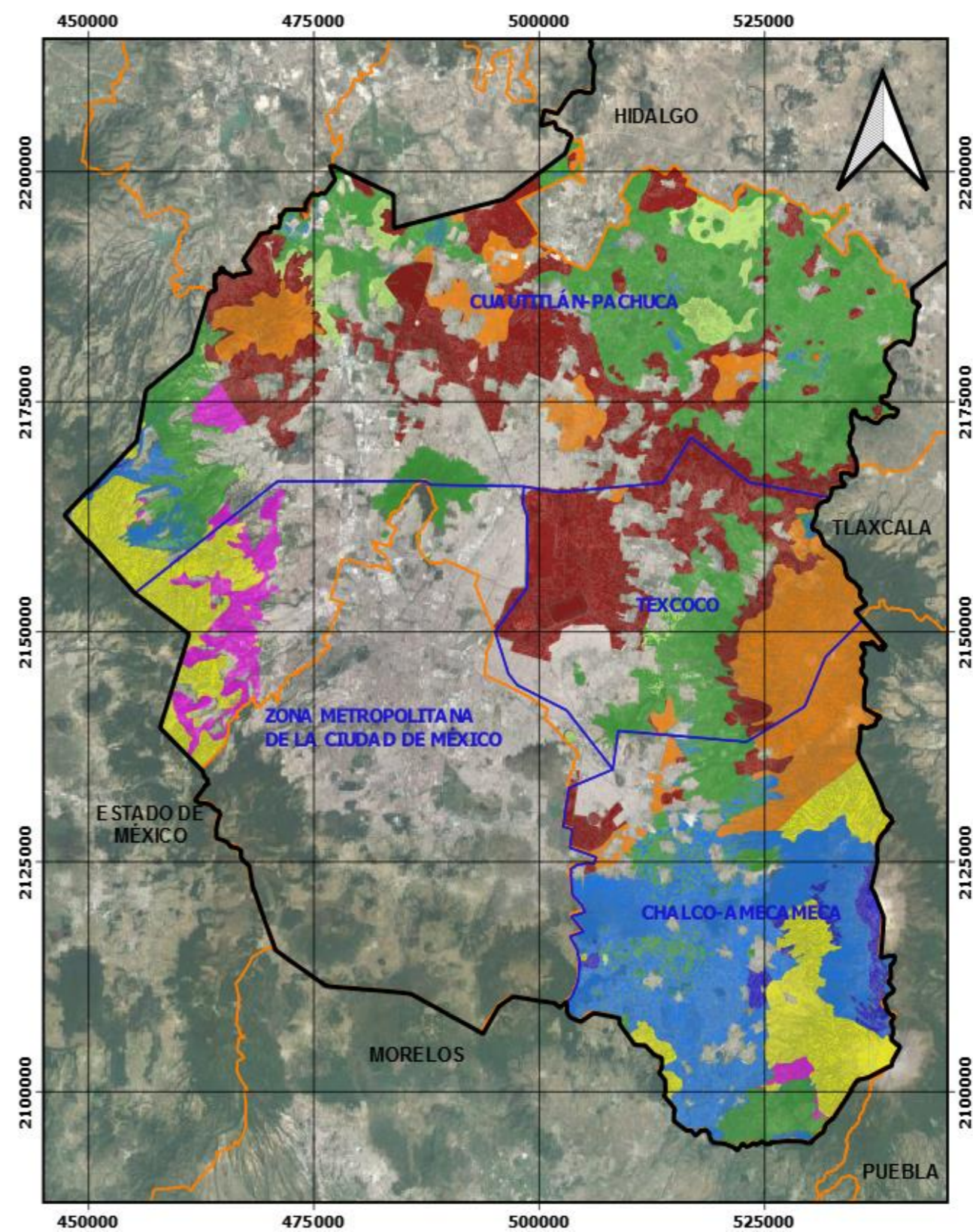


Figura 4.11. Distribución de las zonas de recarga en el Estado de México, dentro de la zona de estudio

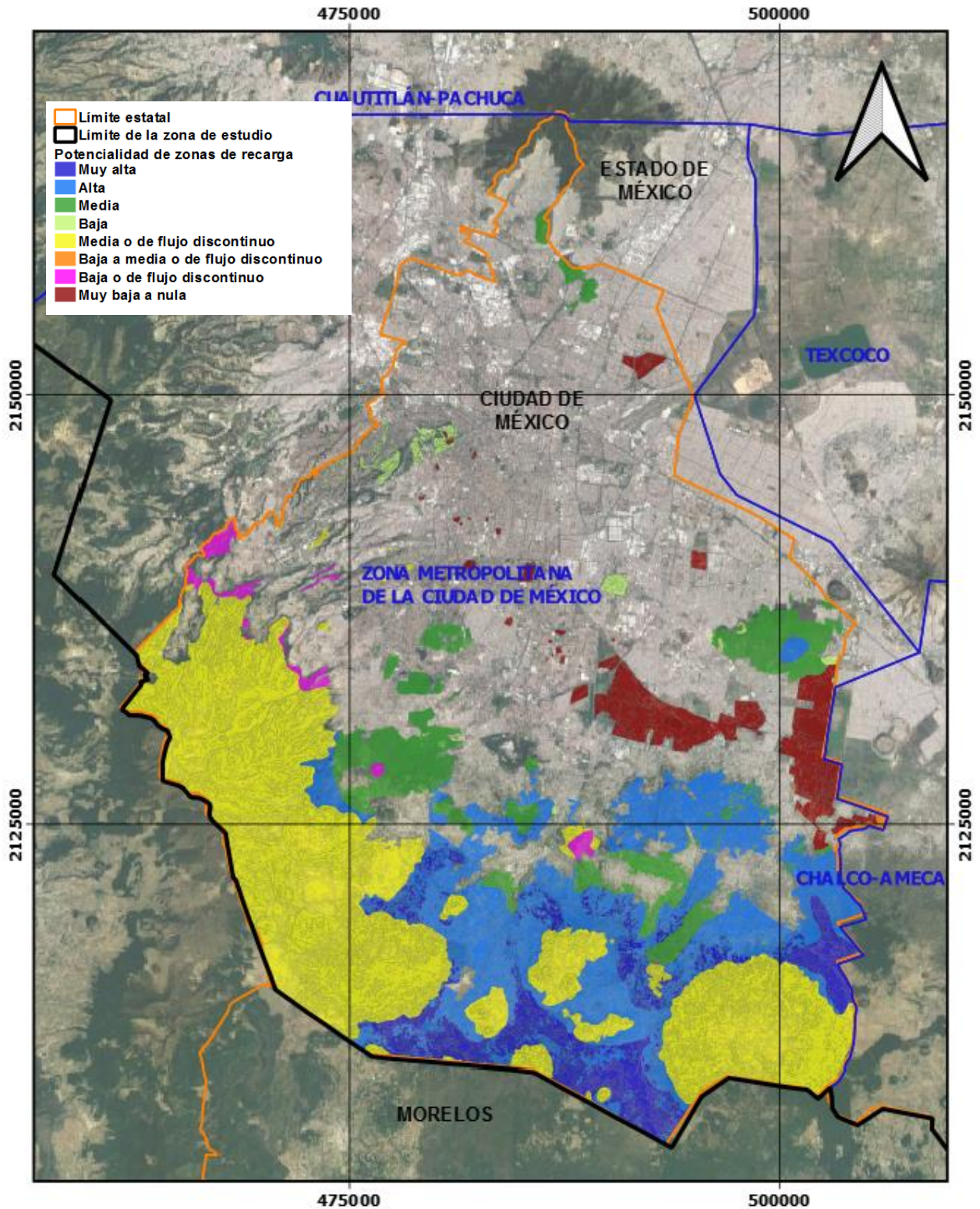


Figura 4.12. Distribución de las zonas de recarga en la Ciudad de México

4.2. Validación de la potencialidad de las zonas de recarga

Para comprobar los resultados, se utilizó la información obtenida en las diferentes dependencias públicas, institutos de investigación y estudios de la iniciativa privada; en particular la información que geográficamente se localiza más próxima a las zonas de recarga determinadas; con este material se infirió la continuidad del conjunto de rocas volcánicas y su conexión hidráulica; esta documentación consistió en: cortes litológicos de pozos; concentración de sólidos totales disueltos en el agua subterránea; redes de flujo a partir de las cuales se confirmó la zona de la que proviene el agua subterránea; caudales que extraen los pozos; y la variación (evolución) de los niveles del agua, entre otra. Con relación a las redes de flujo, se hicieron intervenir también las modificaciones que han tenido, en consecuencia, de la muy elevada extracción de agua subterránea en zonas de concentración de pozos.

De forma complementaria se consultaron los estudios de apoyo realizados por OCAVM (2007), para la publicación de la disponibilidad de agua subterránea publicados por la CONAGUA, donde de manera general se cita hacia donde están las zonas de recarga, pero sin delimitarlas geográficamente. Por otra parte, en algunos artículos como los de Cardona (1995) y Edmunds et al. (2002), se menciona que las zonas de recarga se encuentran en las sierras que rodean a la cuenca.

Con base en lo antes expuesto, se estableció que las zonas de recarga con potencialidad muy alta y alta, se localizan al sur de la Cuenca de México, en particular en la Sierra de Chichinautzin; de estas las ubicadas más lejanas al acuífero en explotación, representan recursos hídricos cuyo tiempo de llegada al acuífero depende de que se muevan por rocas fracturadas, porosas o a través de ambas, ya que en su trayecto transitan por materiales volcánicos cuyas estructuras que les dan permeabilidad son fracturas (coladas de lava) que están en contacto lateral y vertical con materiales porosos (piroclastos); las zonas de recarga más próximas pueden aportar agua en lapsos relativamente más cortos, que no han sido evaluados en pozos cercanos a las sierras.

Con base en información obtenida en el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (2018), en los basaltos fracturados de la Formación Chichinautzin se han determinado altas conductividades hidráulicas del orden de 31.59 m/d (OCAVM, 2018); esta situación es muy diferente en la zona de Sierra de Las Cruces, al oeste de la Cuenca de México, en donde predominan las zonas de recarga clasificadas en este estudio con potencialidades media o de flujo discontinuo y baja o de flujo discontinuo; para confirmar esto es relevante comentar que en la Sierra de las Cruces investigadores como Mendoza-Cázares et al. (2017), en un proyecto de recarga realizado en la zona de Los Dinamos dirigido por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, citan que como consecuencia de las 22 represas de gaviones que se construyeron a lo largo del Río Magdalena para favorecer la recarga, se evidenció un incremento en los caudales de los manantiales cercanos al sitio de su proyecto, sin embargo en los pozos de monitoreo que se localizaban aguas abajo en el acuífero, no se detectaron cambios, por lo que concluyeron que la recarga es local y no impacta de forma directa al acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, sin embargo, favorece la recarga a los acuíferos colgados que se localizan en la zona alta de la sierra. Esto está relacionado con

la falta de comunicación hidráulica y con las medias a muy bajas conductividades hidráulicas, las cuales han sido reportadas en alrededor de 1.4 m/día (OCAVM, 2018) y entre 9.072×10^{-6} m/día y 0.371 m/día (1.05×10^{-8} cm/s a 4.30×10^{-4} cm/s) (ICA-COTRISA, 2016), medidas durante la perforación de pozos geotécnicos en los trabajos relacionados con el tren suburbano México-Toluca. Esta información es relevante ya que tradicionalmente se ha citado que la Sierra de Las Cruces es una zona de recarga importante para el acuífero de la Cuenca de México, sin embargo, evidencias como las citadas muestran que la recarga existe, pero no en la magnitud que se supone y mucha del agua que se infiltra en esta sierra, aporta agua a acuíferos colgados localizados en zonas topográficamente elevadas, que en muchas ocasiones alimentan a manantiales; más adelante se hace una descripción complementaria sobre las características hidrogeológicas de esta sierra.

En el apartado 3.4 y en el 4.1 de este capítulo se comentaron a detalle las características de las zonas de recarga. A continuación, se hace una comparación con la información recopilada, para confirmar la existencia y potencialidad de las zonas de recarga. Esta validación se realizó a partir de las configuraciones de elevación del nivel estático, evoluciones y salinidades del agua subterránea; de igual forma se hace una revisión complementaria de las características reportadas por diferentes autores para la Sierra de Las Cruces, para confirmar que en esta predominen las zonas de recarga media, media o de flujo discontinuo y baja o de flujo discontinuo.

Una manera en que se confirmó la existencia de las zonas de recarga fue a partir de las configuraciones que muestran la forma en que se mueve el agua subterránea; para esto se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para 2011 proporcionada por OCAVM; se usó la de esta fecha porque es la que integra la trayectoria del agua subterránea en toda el área de estudio, hay más recientes, pero no cubren la totalidad del área citada. Esta configuración muestra, que siempre el agua procede de las zonas topográficamente elevadas, sin embargo, es importante tomar en cuenta que la trayectoria del flujo está influenciada por la extracción de los pozos, que se ha concentrado hacia la porción baja de la cuenca, por esta razón esta evidencia de la trayectoria no es del todo resolutiva, para determinar la procedencia de la recarga.

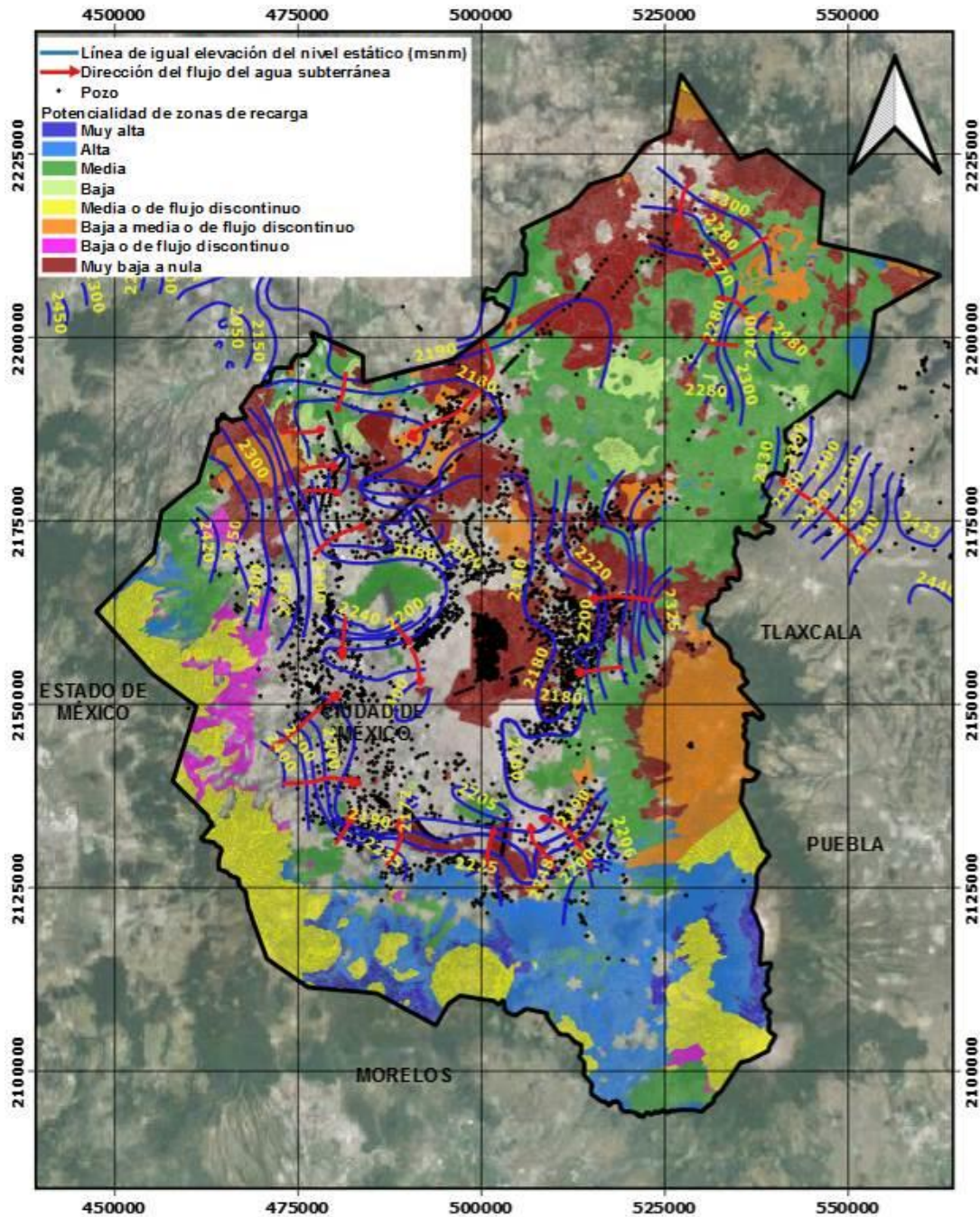


Figura 4.13. Zonas de recarga, con la configuración de elevación del nivel estático para el año 2011

Otro método que se utilizó para comprobar de donde proviene el agua, fue a través del análisis de la evolución de los niveles en los pozos cercanos a las zonas de recarga, partiendo de la hipótesis de que las evoluciones positivas (donde los pozos han tenido

recuperación en su nivel con respecto al tiempo), se localizan en donde el volumen de agua que ingresa al acuífero es mayor que la extracción; cuando la evolución es negativa la extracción es mayor que la recarga; en ambos casos, la evolución de los niveles está influenciada no sólo por la procedencia de la recarga y su capacidad de infiltración, sino también por la cantidad de pozos, su caudal de extracción y la forma en que operan.

Del análisis de la red piezométrica proporcionada por el OCAVM se observó que, frente a las zonas de recarga con potencialidad alta, concentradas principalmente al sur de la Cuenca de México (ver figura 4.14), las evoluciones de los niveles de agua en los pozos varían entre -8.28 y 7.3 m (para el periodo 2010-2011) y de este rango la evolución que predomina es la que está entre -0.98 y 7.3 m (OCAVM, 2011). Esta es una región de la cuenca en la que hay una gran cantidad de pozos, por lo que tener una evolución negativa no tan alta, así como evoluciones positivas, confirma que el agua de lluvia que se está infiltrando en las zonas identificadas como de recarga, están proporcionando agua al acuífero.

Este comportamiento es diferente en las cercanías de las zonas de potencialidad de recarga media, donde la evolución del nivel del agua en los pozos es muy variable; en este caso la evolución está entre 14.98 m y -3.02 m; en esta región predomina una baja densidad de pozos, con excepción de las extensiones que rodean a la Sierra de Guadalupe y Texcoco (ver figura 4.14); los valores con evolución positiva más alta están al noreste en el Acuífero Cuautitlán-Pachuca, en donde hay una baja densidad de pozos; la evolución negativa de -3.02 m se observó en Cuautitlán, al norte de la Sierra de Guadalupe, aquí existe una alta densidad de pozos (figura 4.14) y una elevada extracción de agua. Esta información en conjunto permite concluir que en ocasiones los datos disponibles no permiten confirmar de forma contundente la potencialidad de las zonas de recarga, debido a que la intervención de las actividades humanas relacionadas con el uso del agua provoca que la relación infiltración-recarga no sea el único proceso que interviene, sin embargo, si permiten confirmar que la recarga se está dando pues de lo contrario no habría evoluciones positivas (recuperaciones).

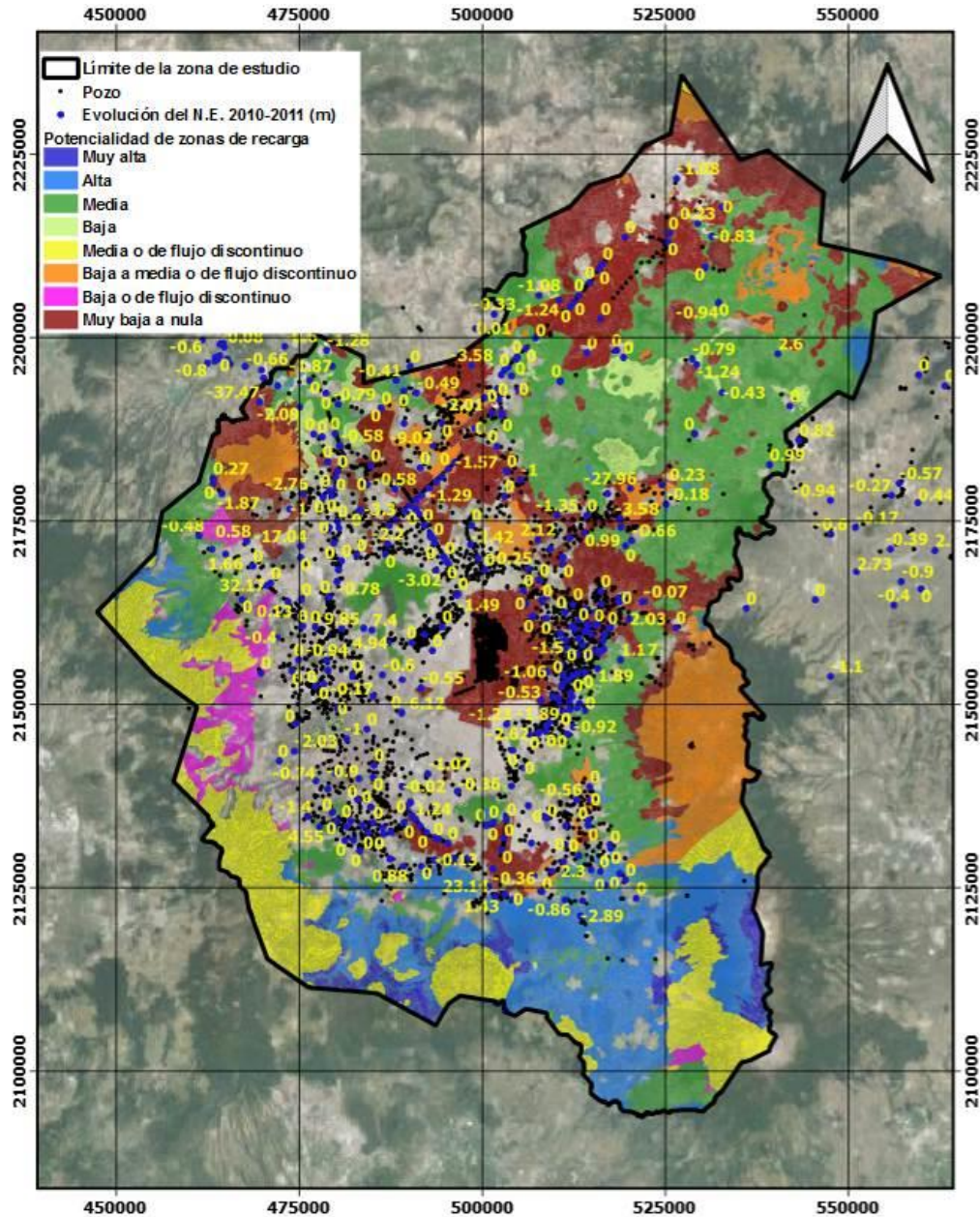


Figura 4.14. Zonas de recarga, con la evolución del nivel estático por pozo para el periodo 2010-2011

Otra forma de confirmar la capacidad del medio para permitir la recarga, fue a través de la concentración de los sólidos totales disueltos (STD) en el agua, debido a que el agua de lluvia y la que tiene poco tiempo de contacto con los materiales que constituyen el acuífero,

presentan bajas salinidades; en este caso los valores de STD cercanos a las zonas de recarga de mayor potencialidad, tienen concentraciones de 150 ppm, lo cual se muestra al sur de la figura 3.4, presentada en el apartado 3.1.2 “Marco hidrogeológico”; en comparación, las áreas ubicadas aguas abajo de las zonas con potencialidad de recarga media, tienen concentraciones de más de 200 y 300 ppm.

En la Sierra de Las Cruces las zonas se clasificaron como de recarga media, media o de flujo discontinuo y baja o de flujo discontinuo, debido a que los materiales que las conforman no siempre tienen continuidad hidráulica, por lo que el agua que se infiltra en superficie en algunos casos no llega al acuífero de la Cuenca de México, originándose acuíferos colgados, así como una gran cantidad de manantiales (figura 4.15), lo que muestran la discontinuidad de las estructuras por las que se mueve el agua o bien, la descarga de los acuíferos colgados que tienen reducida continuidad vertical y lateral; a continuación se explica con más detalle las razones por las cuales se asignó esta clasificación a las zonas de recarga en la citada sierra.

En el caso particular de la Sierra de Las Cruces, se realizó un análisis detallado de aproximadamente 20 documentos, previamente seleccionados, estos fueron realizados por dependencias de gobierno, institutos de investigación y por la iniciativa privada (en el anexo 3 del informe, se incluyen junto con tablas resumen). En esos trabajos se desarrollaron levantamientos geológicos con diversos grados de detalle, perforaciones, así como cartografía; las conclusiones se pueden resumir como sigue:

- Hay una variación muy grande en el tipo de materiales volcánicos, los cuales están constituidos por: lavas de composición andesítica y dacítica, con grado de fracturamiento moderado a bajo; tobas compactadas con matriz limo-arcillosa no fracturadas; tobas arenosas con grado moderado de compactación; lahares no fracturados (flujos de lodo muy compactados con granulometría muy heterogénea); tobas soldadas (ignimbritas) con grado de fracturamiento variable; productos piroclásticos con diferente grado de compactación; entre otros; muchos de estos traslapados y afectados por fallas, como lo menciona García et al. (2008).
- Estos materiales fueron expulsados a la superficie a través de una gran cantidad de puntos de emisión, que estuvieron distribuidos en toda la Sierra de Las Cruces; los materiales al salir de diferentes áreas geográficas y tener una continuidad limitada a pocos kilómetros, se mezclaron unos con otros; en consecuencia, se tienen variaciones muy frecuentes en la granulometría, porosidad y grado de fracturamiento de las rocas.
- Estas variaciones en porosidad y grado de fracturamiento, dieron como resultado cambios frecuentes en la permeabilidad y por tanto en el movimiento del agua; en consecuencia algunos de los materiales volcánicos forman barreras al flujo del agua y se ve favorecido el escurrimiento sobre la infiltración; cuando el agua se puede infiltrar en ocasiones forman acuíferos, ubicados en la zona serrana, de dimensiones reducidas, clasificados hidrogeológicamente como colgados, es decir acuíferos que están por encima del de la Cuenca de México.

- En resumen, los materiales volcánicos más permeables en la Sierra de Las Cruces tienen extensiones variables, por lo que su capacidad de recarga es muy irregular.
- En donde afloran rocas de muy baja permeabilidad el agua escurre hasta encontrar materiales permeables en los cuales se infiltra, este proceso se presenta en el talud oriental de la Sierra de Las Cruces y representa una forma de recarga.
- Lo anterior permite confirmar que, en la Sierra de Las Cruces, las zonas de recarga tienen potencialidades variables y hay áreas en las que son medias, otras en donde son medias o de flujo discontinuo, y otras más que son bajas o de flujo discontinuo; con menor extensión y ya en la vertiente occidental de la sierra, se presentan zonas de recarga de potencialidad alta.

Este tipo de funcionamiento geológico e hidrogeológico da como resultado un sistema de flujo local, lo cual está confirmado por las siguientes evidencias encontradas en el agua de pozos perforados en la Formación Tarango, próximos a la Sierra de Las Cruces: tiene una concentración de sólidos totales disueltos que siempre son menores a 400 ppm; investigadores como Edmunds et al. (2002), han realizado dataciones, indicando que se trata de agua moderna, sin especificar la cantidad de años que esto representa; las temperaturas del agua subterránea varían entre 17 y 19 °C. Lo antes expuesto confirma que el agua es de reciente infiltración y que no ha recorrido distancias grandes, ni ha profundizado bajo la superficie del terreno lo necesario como para incrementar su temperatura por gradiente geotérmico, con todo esto se confirma que se trata de un flujo local.

Este análisis se realizó para hacer notar, que aunque tradicionalmente se considera a la Sierra de Las Cruces como una importante zona de recarga para el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, (Birkle, et al., 1998; Edmunds et al. 2002; Ariel Consultores, S.A., 2007a; CONAGUA, 2018); Gobierno de la Ciudad de México, 2015), en los documentos de estos autores en ocasiones no se realizaron trabajos de campo, o bien retoman lo escrito en estudios previos, sin considerar las características geológicas de esta sierra, su heterogeneidad litológica, los frecuentes cambios en permeabilidad y la falta de continuidad hidráulica; adicionalmente no hacen intervenir la condición hidrológica del suelo, o las actividades de exploraciones más recientes, como es el caso del tren suburbano (ICA-COTRISA, 2016), en donde se midieron muy bajas conductividades hidráulicas, de entre 9.072×10^{-6} m/día a 0.371 m/día.

En algunas porciones de la Sierra Nevada pasa algo similar; en la cartografía del INEGI existen algunos manantiales que muestran la falta de continuidad hidráulica antes comentada; por otra parte, en esta sierra las cartas topográficas no muestran la existencia de afloramientos de agua, sin embargo, durante la recopilación de la información en la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), se comentó que las comunidades cercanas a la Sierra Nevada se abastecen a partir de manantiales; esto coincide con la variedad en el tipo de unidades volcánicas y con el hecho de que no se han perforado pozos profundos en estas unidades de roca (Arce et al., 2019).

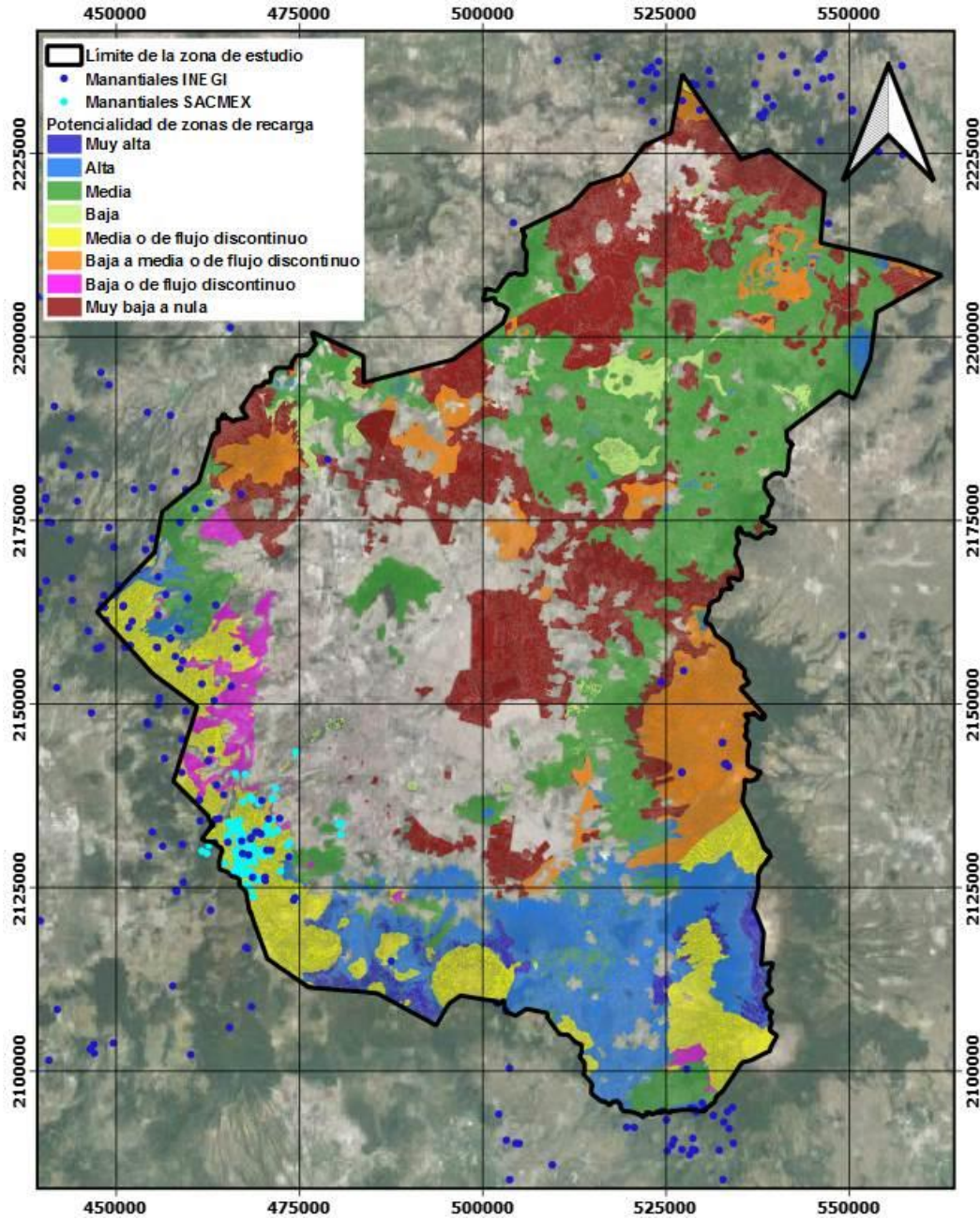


Figura 4.15. Localización de manantiales cartografiados por el INEGI y SACMEX con las zonas de recarga

4.3. Cambios esperados en la recarga por efecto del cambio climático

El planeta Tierra ha sufrido a lo largo de su historia un gran número de cambios climáticos (Viñas, 2012); actualmente la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales. (IPCC, 2013).

En este cambio climático, la civilización está sufriendo los embates de las variaciones de los procesos naturales que afectan a la producción de los recursos necesarios para desarrollar sus actividades y crecimiento; uno de estos cambios es la reducción de la precipitación pluvial; con relación al área de estudio, la información que se obtuvo de los modelos de cambio climático y de su resultado, estableció que impactará de diferentes formas, en algunas áreas aumentará la precipitación y en otras disminuirá, sin embargo la tendencia general de los modelos es la disminución generalizada de las precipitaciones anuales, que afectará la disponibilidad de los recursos hídricos y por tanto, modificarán la tasa de escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos.

Para establecer más concretamente las variaciones que se tendrán en el volumen de agua de lluvia disponible para infiltración a mediano (2015-2039) y largo plazo (2045-2069), se utilizaron los modelos de circulación general recomendados para México por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), con el escenario de trayectorias de conservaciones representativas (RPC por sus siglas en inglés) de 8.5 e información de las estaciones climatológicas ubicadas dentro y fuera del área de estudio.

A continuación, se presentan los resultados de correr los modelos descritos en el apartado 3.4; los análisis estadísticos sobre los cambios de agua de lluvia se realizaron sobre los polígonos de las zonas de recarga que cumplen con los siguientes criterios:

- Área del polígono superior o igual a 0.25 ha
- Capacidad de infiltración, muy alta, alta o media
- Cuadro comparativo de la superficie total de estudio contra las superficies ocupadas por los sitios con potenciales: muy alta, alta y media, seleccionados

Tabla 4.3. Superficies cubiertas por las zonas de recarga con superficie mayor a 0.25 ha

Potencial	Superficie (Ha)	% de la superficie
Alta	79,900.54	13.85
Baja	14,276.40	2.48
Baja a media o de flujo discontinuo	56,811.26	9.85
Baja o de flujo discontinuo	13,388.50	2.32
Media	181,269.28	31.43

Media o de flujo discontinuo	69,700.03	12.08
Muy alta	12,211.31	2.12
Muy baja a nula	149,208.81	25.87
Total general	576,766.13	100.00

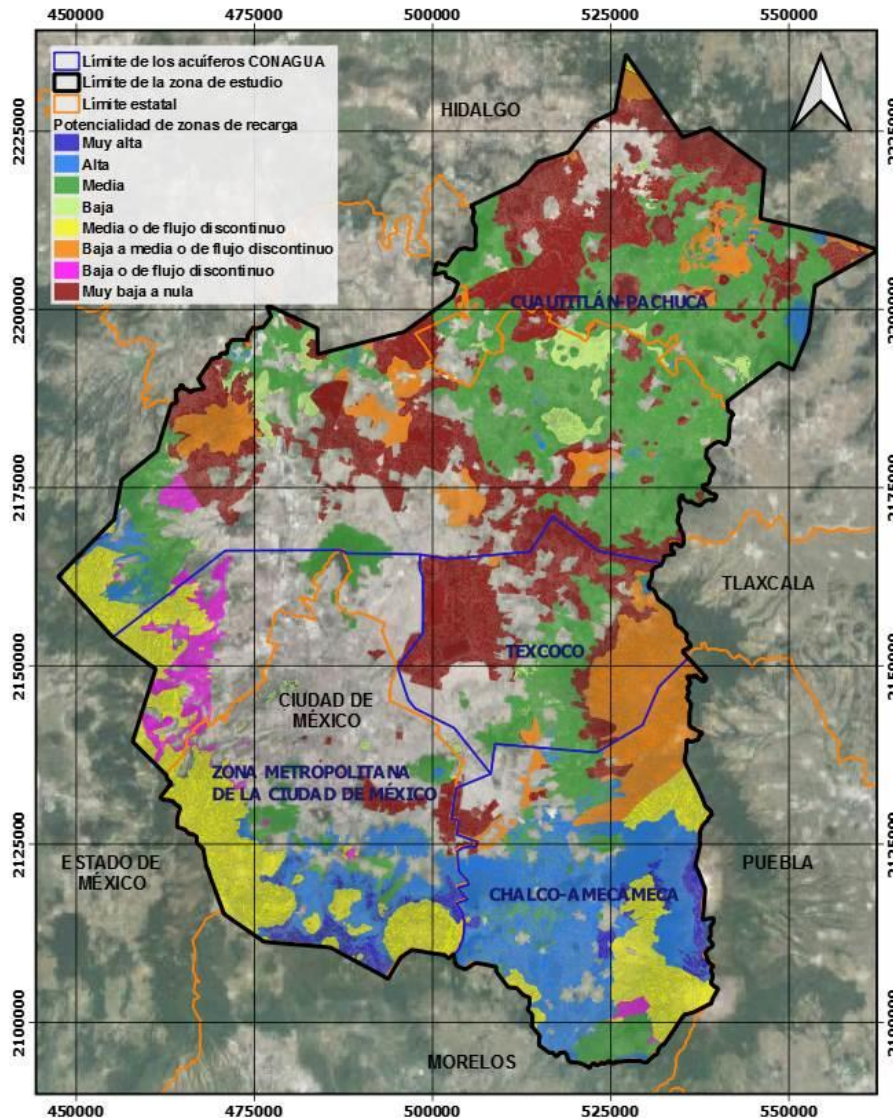


Figura 4.16. Distribución de las zonas de recarga con base en su potencial de recarga

Los sitios con capacidad de recarga muy alta, alta y media cubren el 36.86% del área de estudio, siendo mayor la superficie que tiene un potencial de recarga medio.

Considerando los datos de las estaciones meteorológicas y con los resultados de los modelos, en la tabla 4.5 se muestra un comparativo de los volúmenes susceptibles a ser infiltrados en las zonas de recarga con potencial muy alto, alto y medio.

Tabla 4.4. Cambio en la cantidad de agua disponible para infiltración por escenario

	Histórico	2015 - 2039	2045 - 2069
Agua de lluvia disponible (m ³ /año)	2,207,003,242	2,200,116,170	1,870,072,867
Porcentaje de cambio		0.31	15

Como puede observarse en la figura 4.30, la disponibilidad de agua para infiltración disminuye sensiblemente para el escenario 2045-2069 ya que las precipitaciones serán menores.

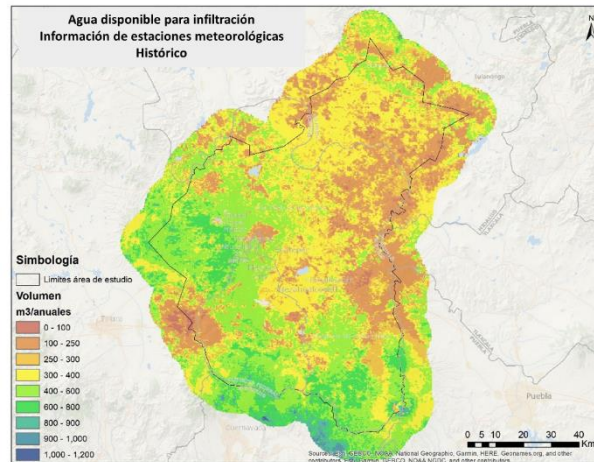


Figura 4.17. Disponibilidad de agua para infiltración a partir de los datos de las estaciones meteorológicas (histórico)

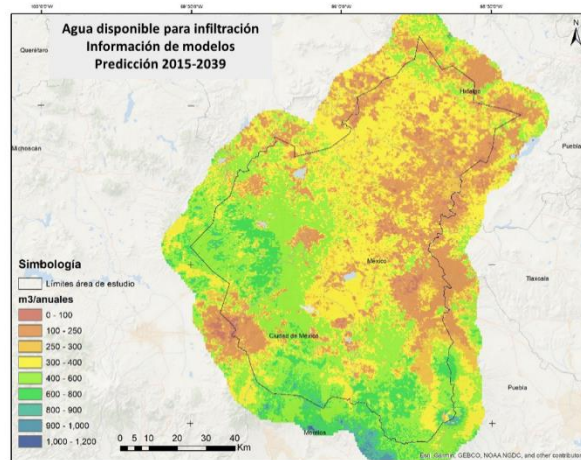


Figura 4.18. Agua disponible para infiltración derivados del modelo de cambio climático 2015-2039

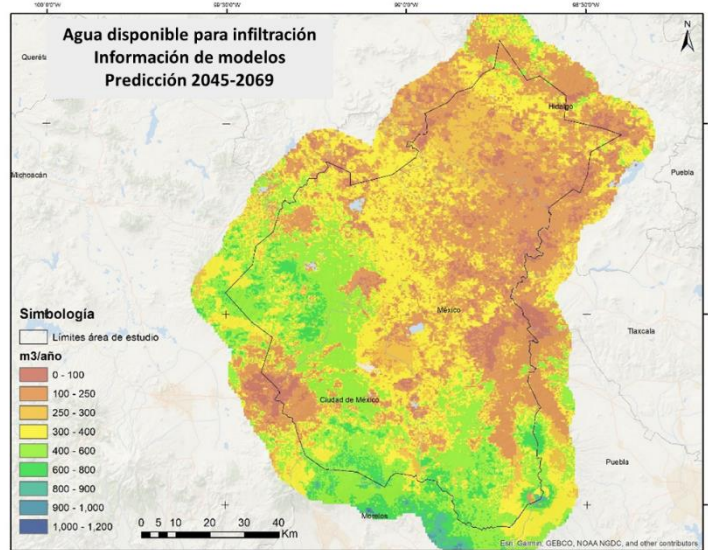


Figura 4.19. Agua disponible para infiltración derivados del modelo de cambio climático 2045-2069

En resumen, a partir de la precipitación histórica, en el primer periodo (2015-2039) los cambios no serán tan radicales, pero en el escenario 2045-2069, la parte norte y este del área de análisis, en donde se localiza el Acuífero Cuautitlán-Pachuca, sufrirá una gran disminución en la cantidad de agua que estará disponible para ser infiltrada.

Si se obtiene un promedio del agua disponible para infiltración, dependiendo de la categoría del potencial de recarga, utilizando la información de las estaciones meteorológicas se llega a los siguientes datos:

Tabla 4.5. Promedio anual de agua disponible para infiltración, histórico y en los dos escenarios

Potencial de recarga	Histórico m³/año	Promedio m³/ha	2015-2039 m³/año	Promedio m³/ha	2045-2069 m³/año	Promedio m³/ha
Muy alta	77,972,601	576.74	77,847,185	575.81	70,652,916	522.60
Alta	417,904,213	472.73	418,694,121	473.62	372,354,158	421.20
Media	622,806,107	309.52	620,358,213	308.30	514,746,729	255.82
Baja	48,100,941	303.19	47,800,527	301.30	39,520,296	249.11
Media o de flujo discontinuo	307,908,241	398.33	308,560,222	399.17	270,559,025	350.01
Baja a media o de flujo discontinuo	162,901,147	258.49	162,064,206	257.16	131,830,027	209.19
Baja o de flujo discontinuo	65,634,895	440.95	65,841,178	442.33	58,196,692	390.98
Muy baja a nula	503,775,097	308.43	498,950,518	305.48	412,213,024	252.37

De la tabla anterior, se observa que en algunos casos el agua disponible para ser infiltrada es mayor en zonas de menor potencialidad de recarga que, en otras zonas con mayor

potencial, esto debe estar relacionado con su posición geográfica dentro de la Cuenca de México, debido a que se localizan en zonas de topografía más elevada en donde las variaciones por efecto del cambio climático serán menores.

En resumen, las variaciones promedio que conforman a los escenarios, son reducidas en la frontera temporal 2015-2039, pero los resultados a mayor tiempo 2045-2069 muestran que la disminución en la precipitación afecta de manera importante a la cantidad de agua disponible para la recarga de los acuíferos en la zona de estudio.

De este análisis se obtuvo que para el periodo 2015-2039, algunos sitios tienen mayor cantidad de agua disponible para infiltración; los sitios con potencial bajo, bajo a medio o de flujo discontinuo, medio y muy bajo a nulo, se encuentran ubicados mayormente en sitios con menor disponibilidad de agua para ser infiltrada. Por el contrario, los sitios con potencial alto, bajo o de flujo discontinuo, medio o de flujo discontinuo y muy alto, están localizados en sitios donde existe mayor disponibilidad de agua. Sin embargo, para el período 2045-2069, en todas las zonas de recarga hay una reducción en el volumen de agua disponible para infiltración.

Con este análisis, se propone proteger y conservar las áreas que se encuentran dentro de sitios con mayor cantidad de agua disponible para infiltración y que tengan potenciales de infiltración altos y muy altos, para permitir que sigan funcionando de manera óptima.

Adicionalmente se analizó por acuíferos el cambio de agua disponible para los dos escenarios (ver tabla 4.6), los resultados muestran que para el periodo 2015-2045, los acuíferos Cuautitlán-Pachuca y Texcoco tienen una pequeña reducción en el volumen disponible para infiltración, en cambio los acuíferos de Chalco-Amecameca y Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) muestran un pequeño incremento; en cambio para el periodo 2045-2069 hay una disminución generalizada en el citado volumen (ver figura 4.23).

Tabla 4.6. Cambio en la cantidad de agua disponible para infiltración por escenario en los acuíferos de la zona de estudio

Acuífero	Histórico (m ³ /año)	2015 - 2039 (m ³ /año)	2045 - 2069 (m ³ /año)
ZMCM	433,086,043	434,587,082	381,267,386
Chalco-Amecameca	527,366,802	529,291,749	468,765,415
Cuautitlán-Pachuca	992,595,675	983,133,392	813,911,485
Texcoco	253,954,722	253,103,947	206,128,581
Total	2,207,003,242	2,200,116,170	1,870,072,867

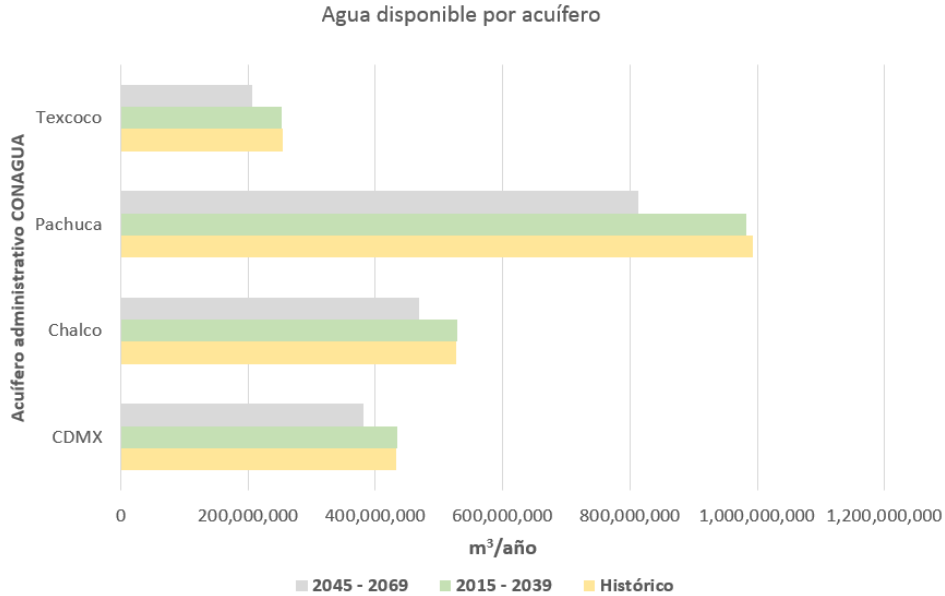


Figura 4.20. Cambio en el volumen de agua de lluvia disponible para infiltración, por acuífero, por efecto del cambio climático

Los modelos a escala mundial tienen una resolución espacial de aproximadamente 5 km en estas latitudes, y estos modelos consideran variaciones en precipitación de manera mensual por sitio, por lo cual hay valores de desviación positiva para algunos meses y sitios (mayor precipitación) y valores negativos para otros meses y sitios (menor precipitación). Esto presenta variaciones en la disponibilidad de agua para ser infiltrada por mes y por sitio, por lo cual se observa que estos valores tienen variaciones temporales y espaciales.

Con objeto de mostrar estos cambios en las desviaciones de la precipitación, se calculó el valor promedio anual de su variación, los resultados se muestran en la siguiente figura.

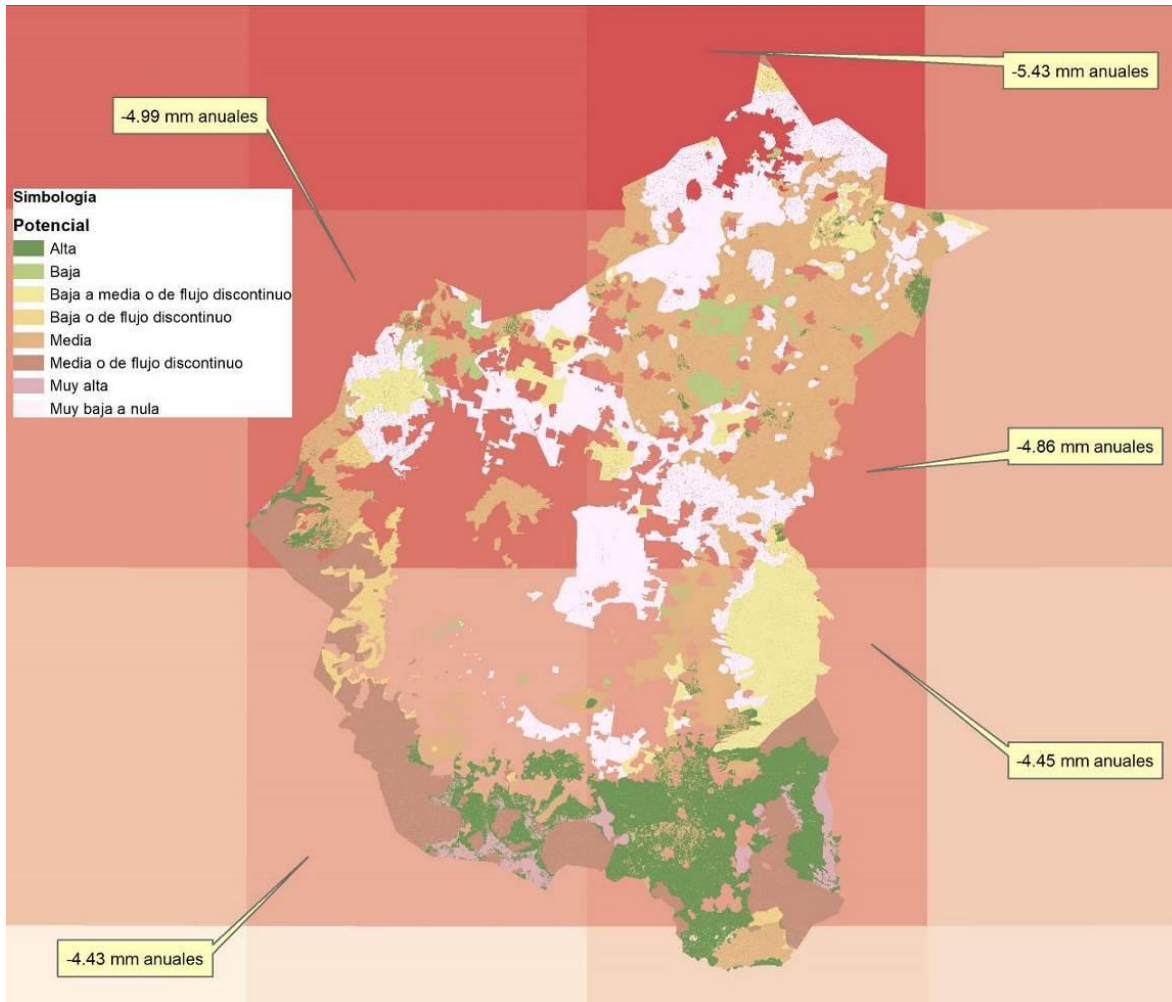


Figura 4.21. Valor promedio anual de variación en la precipitación para el escenario 2045-2069

Como puede observarse, en la parte norte del área de estudio, la precipitación anual promedio será menor que al sur, de igual forma el oriente será más seco que el occidente (considerando los cambios al escenario 2045-2069 que es el que presenta mayor cambio).

Para determinar el impacto de los cambios en precipitación en estos modelos, los datos de agua disponible para ser infiltrada se dividieron en deciles (los deciles son ciertos números que dividen la sucesión de datos ordenados en diez partes porcentualmente iguales), para conocer el comportamiento de los sitios conforme a su potencial de infiltración, dentro de la distribución geográfica del agua disponible para ser infiltrada.

Los rangos de los deciles fueron los siguientes:

Tabla 4.7. Rangos de precipitación por decil

Decil	Rango de valores (mm anuales)
1	0 - 183
2	183 - 250
3	250 - 297
4	297 - 334
5	334 - 365
6	365 - 398
7	398 - 441
8	441 - 508
9	508 - 599
10	599 - 1,104

De tal manera que los primeros deciles tienen menos disponibilidad de agua para ser infiltrada. Cuando se evaluaron estos deciles contra la ubicación de los sitios según su potencial de infiltración se llegó a lo siguiente:

Tabla 4.8. Disponibilidad de agua para infiltración según el decil

Decil	Alta (%)	Baja (%)	Baja a media o de flujo discontinuo (%)	Baja o de flujo discontinuo (%)	Media (%)	Media o de flujo discontinuo (%)	Muy alta (%)	Muy baja a nula (%)
1	3.0	16.5	25.8	3.9	14.2	11.4	0.0	13.8
2	4.3	13.6	25.9	6.7	16.8	5.7	0.1	13.5
3	7.8	12.8	13.7	7.8	16.9	10.5	3.6	13.1
4	6.1	17.3	10.0	6.8	13.9	6.6	4.9	15.6
5	5.8	18.0	7.8	7.3	10.7	6.4	2.7	16.3
6	5.9	7.0	7.8	7.7	9.6	8.3	3.2	12.5
7	8.4	6.5	5.7	10.3	6.4	11.9	6.9	7.9
8	13.8	5.2	2.2	15.4	4.9	17.1	11.1	4.5
9	21.8	1.4	0.9	18.1	4.0	11.8	20.1	2.7
10	23.2	1.6	0.1	16.0	2.5	10.4	47.6	0.2
	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Como se puede observar, dependiendo del potencial algunos sitios, tienen mayor cantidad de agua disponible para infiltración. Los sitios con potencial bajo, bajo a medio o de flujo discontinuo, medio y muy bajo a nulo, se encuentran ubicados mayormente en sitios con menor disponibilidad de agua para ser infiltrada. Por el contrario, los sitios con potencial alto, bajo o de flujo discontinuo, medio o de flujo discontinuo y muy alto, se encuentran ubicados en sitios donde existe mayor disponibilidad de agua.

Graficando estos resultados, para las zonas de recarga con potencial alto y bajo a medio o de flujo discontinuo, se puede apreciar mejor manera esta distribución.

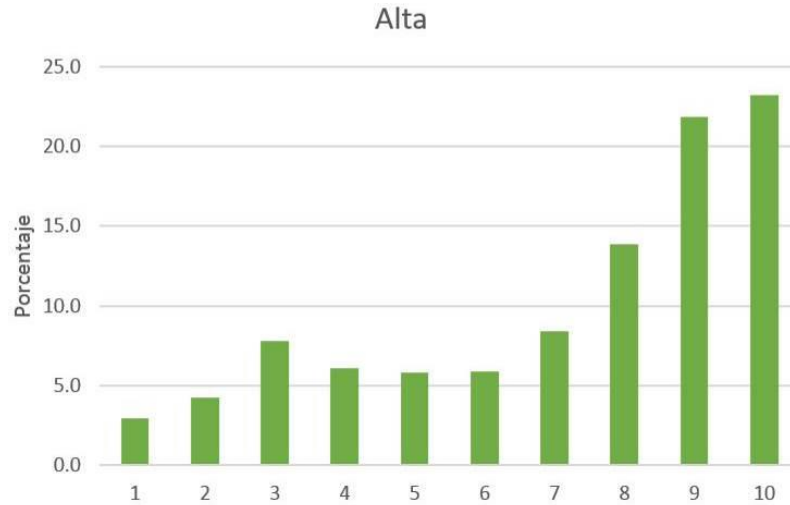


Figura 4.22. Disponibilidad de agua por decil en la zona de recarga de potencialidad alta

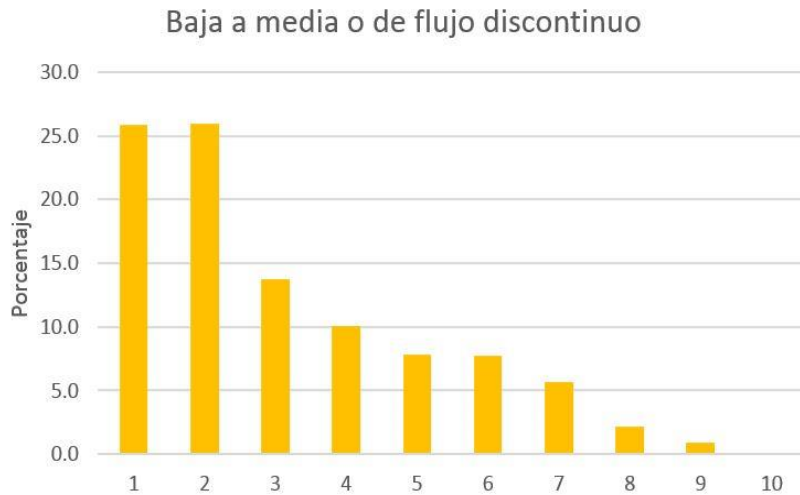


Figura 4.23. Disponibilidad de agua por decil en la zona de potencialidad baja o de flujo discontinuo

Conclusiones:

Los modelos de cambio climático utilizados indican una disminución en el volumen de agua disponible para infiltración dentro del área de estudio; este volumen se reduce en el primer escenario 2015-2039 un 0.31%, pero en el segundo de 2045-2069 hasta un 15%.

Independientemente de que existe un área extensa de infiltración en el área de estudio, 577,000 ha aproximadamente, los promedios de agua disponible para ser infiltrada disminuirán con el tiempo, afectando de forma importante la cantidad de agua que puede recargar a los acuíferos.

Las porciones norte, noreste y este del área de estudio, en el Acuífero de Cuautitlán-Pachuca, sufrirán una disminución mayor en el volumen de agua disponible para infiltración, esto es en los estados de Hidalgo y México, afectando de forma directa a las poblaciones ubicadas en estos sitios.

Las reducciones más importantes como se dijo serán del orden de un 15% menos para el periodo 2045-2069, si se considera que el agua que potencialmente está disponible para ser infiltrada por año en la zona es de 986 millones de metros cúbicos por año, esta disminuirá en 145 millones por año para el escenario 2045-2069.

Se propone proteger y conservar las áreas que se encuentran dentro de sitios con gran cantidad de agua disponible para infiltración (deciles 8 a 10) y que tengan potenciales de infiltración altos y muy altos, para permitir que sigan funcionando de manera óptima.

Es importante poner especial atención en los sitios con potenciales de infiltración altos y muy altos, ubicados en las zonas en las cuales disminuirá de manera drástica el agua disponible, para que el impacto sobre estos no afecte de manera severa la capacidad de estas áreas para proveer de agua subterránea a las localidades que ahí se ubiquen.

4.4. Análisis de la pérdida de potencial de recarga por cambios de suelo

El cambio de uso del suelo consiste en la transformación de la cubierta vegetal original para convertirla a otros usos o degradar la calidad de la vegetación modificando la densidad y la composición de las especies presentes, los factores que causan el cambio de uso de suelo y vegetación son la agricultura, ganadería y el crecimiento de la infraestructura. Lo cual tiene repercusiones directas en la prestación de servicios ambientales, entre otros, pérdidas en la capacidad de infiltración para la recarga de los acuíferos.

De acuerdo con la metodología descrita en el apartado 3.5, que permitió obtener la matriz de cambios y tasa de cambio para el uso de suelo, se obtuvieron los escenarios de uso de suelo actual, a 10 años (2030) y a 30 años (2050), de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.9. Resultados del modelo de cambio de uso de suelo

Clase	Serie 6 - 2014 (ha)	Superficie al 2030 (ha)	Superficie al 2050 (ha)
Agricultura	362,097.12	316,710.68	239,585.98
Asentamientos	184,583.97	237,764.67	322,514.38
Pastizal	72,600.91	65,111.12	57,471.88
Vegetación/Agua	214,657.88	214,349.34	214,363.49

Cambio de uso de suelo en escenarios

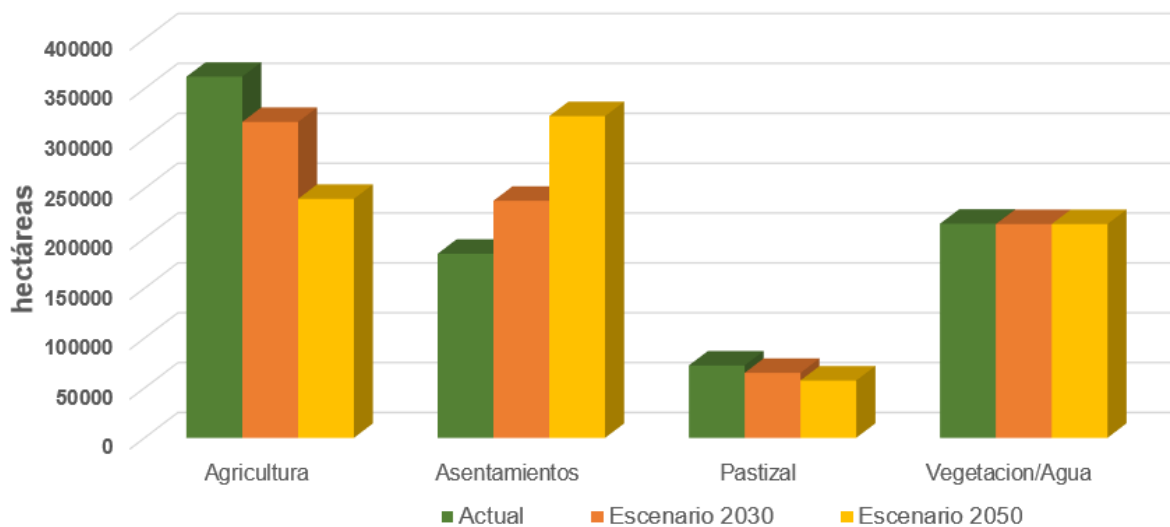


Figura 4.24. Resultado de los escenarios de cambio de uso del suelo

De acuerdo con los modelos realizados para los escenarios de cambio de uso de suelo para 2030 y 2050, el crecimiento de las áreas urbanas se dará alrededor de las actuales (ver figuras 4.25 y 4.26) y se va a llevar a cabo, principalmente en la porción norte de la Cuenca de México, en el Acuífero Cuautitlán-Pachuca; en este acuífero el crecimiento de la mancha urbana será en zonas de potencialidad media y muy bajas a nulas; cabe mencionar que en este acuífero toman una relevancia importante las zonas de potencialidad media, ya que son las de mayor potencialidad.

En las zonas de potencialidad alta, el crecimiento de la mancha urbana más importante será en las áreas que se encuentran en el Acuífero Chalco-Amecameca (ver figuras 4.18 y 4.19), mientras, en el Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, de acuerdo con el modelo, el crecimiento urbano será reducido y principalmente en zonas de potencialidad baja o de flujo discontinuo, medio y en algunas zonas de potencialidad alta.

En resumen, el resultado muestra que los asentamientos humanos incrementarán su extensión y que este proceso ocurrirá en detrimento de las superficies ocupadas por los terrenos agrícolas, lo cual representa una pérdida de la superficie por la que el agua se

puede infiltrar; otro hecho relevante es que de acuerdo a como históricamente se han dado los cambios de uso del suelo, el crecimiento de las áreas urbanas no se presentará sobre terrenos ocupados por vegetación; con relación al pastizal este se verá poco afectado pero también al reducirse su superficie, la cantidad de agua que se podría infiltrar se reducirá.

Lo antes expuesto lleva a concluir que es necesario adelantarse a estos hechos y vigilar el crecimiento de las zonas urbanas, con objeto de que no se pierdan superficies que están prestando servicios ambientales importantes, como es la infiltración y la recarga de acuíferos.

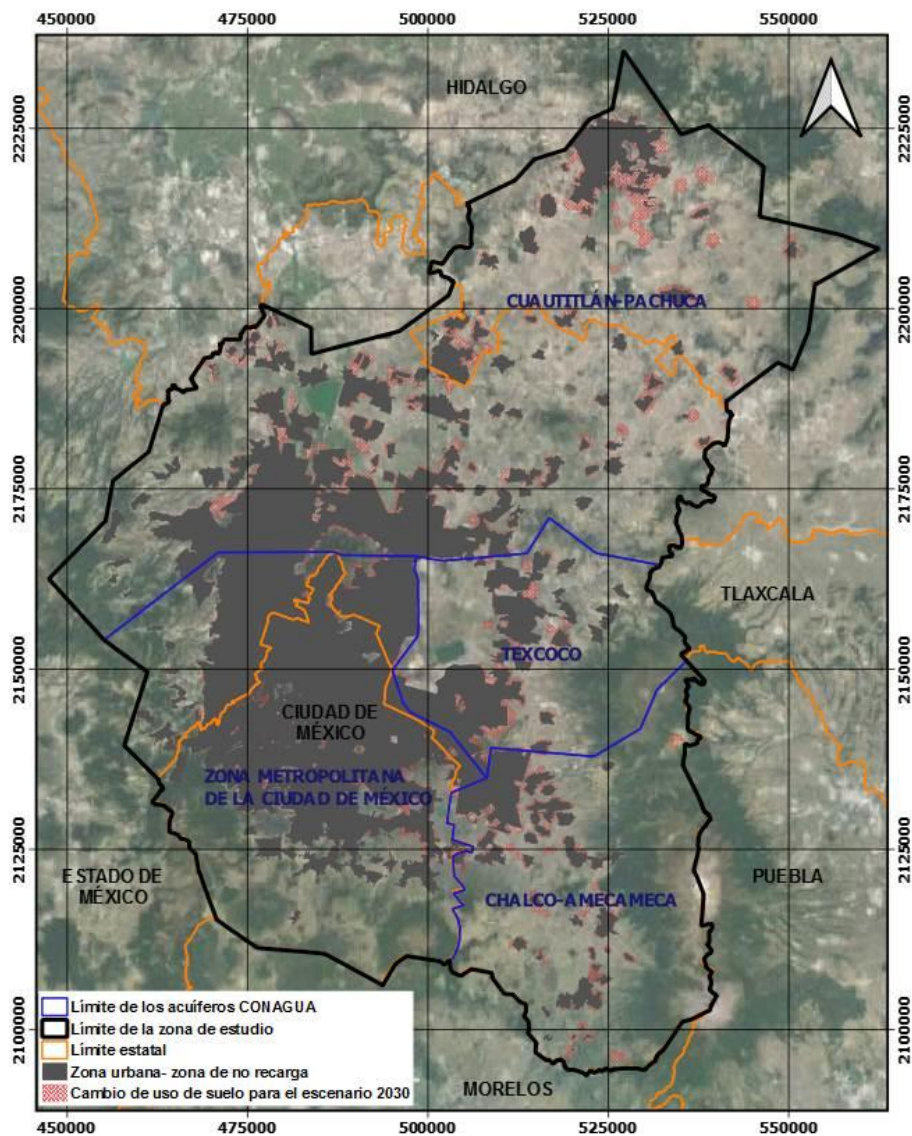


Figura 4.25. Uso de suelo para el escenario 2030

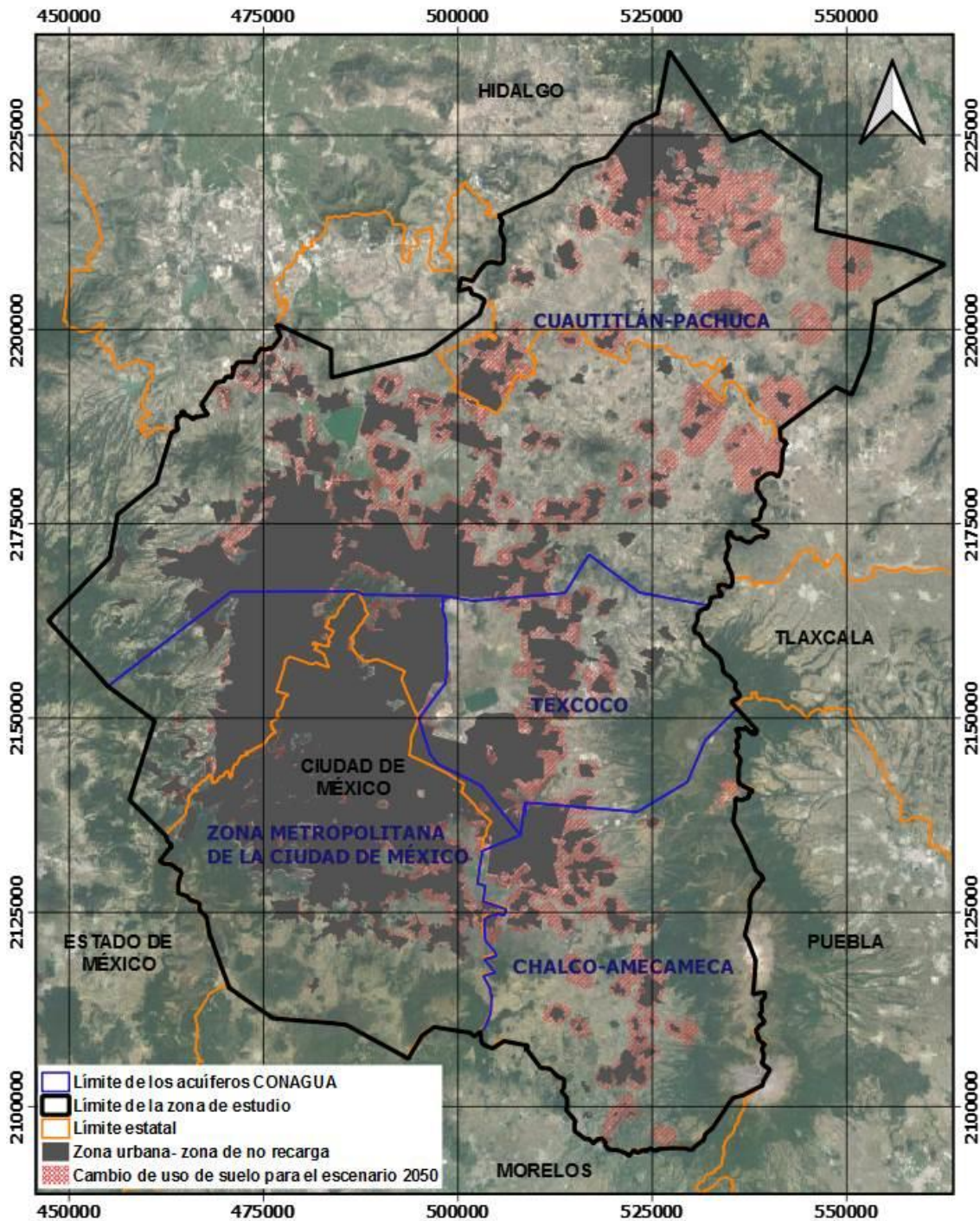


Figura 4.26. Uso de suelo para el escenario 2050

A partir de estos mapas y con los de agua disponible para infiltración derivados del modelo de cambio climático para los periodos 2015-2039 y 2045-2069, se calculó el agua disponible

para infiltración con estos escenarios de cambio de uso de suelo, considerando que las áreas con asentamientos humanos nuevos pierden la capacidad de infiltración por la construcción de la infraestructura urbana que cubren los suelos.

Tabla 4.10. Agua disponible por cambios de uso de suelo y cambio climático

Escenario climático	Actual m ³ /año	2030 m ³ /año	2050 m ³ /año
Clima histórico	2,207,003,242	2,095,802,123	1,898,297,045
2015 -2039	2,200,116,170	2,088,739,476	1,827,011,481
2045 - 2069	1,870,072,867	1,775,304,478	1,554,826,059

Tabla 4.11. Porcentaje de pérdida del volumen de agua disponible para infiltración por cambios de uso de suelo y cambio climático

Escenario climático	Uso de suelo actual	Uso del suelo para 2030	Uso del suelo para 2050
Clima Histórico	2,207,003,242 m ³	-5.04%	-13.99%
2015 -2039	-0.31%	-5.36%	-17.22%
2045 - 2069	-15.27%	-19.56%	-29.55%

Esta tabla muestra en porcentajes la reducción del volumen de agua disponible (VADI), a partir de las cifras de la tabla 4.10. Sus resultados muestran que la reducción más importante en toda la cuenca será del orden del 30% de reducción del VADI.

Adicionalmente, se analizó la relación que existe entre las zonas de recarga y las zonas hacia donde se pueden extender las zonas urbanas, que como ya se comentó son las que reducen la capacidad de infiltración de los suelos.

Para realizar esto fue necesario diferenciar las áreas que, teniendo un buen potencial de infiltración, serán bloqueadas por su transformación a infraestructura (asfaltos y cementos).

Conforme a los modelos de cambio de uso de suelo realizados, se observa que la infraestructura se ampliará básicamente sobre suelos agrícolas y pastizales, y de acuerdo con la siguiente tabla, esto impactará en mayor grado a los suelos agrícolas que se encuentran en las distintas zonas de recarga.

Tabla 4.12. Disminución de superficie agrícola conforme al potencial de recarga

Potencial	Actual (ha)	2030 (ha)	2050 (ha)
Muy alta	3,177.23	3,070.07	2,591.81
Alta	45,958.39	43,031.68	36,144.52
Media	125,381.98	117,699.45	90,062.82
Baja	9,330.08	8,946.70	7,438.18
Media o de flujo discontinuo	12,558.19	12,404.14	11,287.95
Baja a media o de flujo discontinuo	18,949.23	16,640.38	11,263.85

Baja o de flujo discontinuo	4,456.79	4,276.43	3,925.45
Muy baja a nula	84,290.81	74,434.21	54,498.20

Finalmente, se muestran las zonas que, mediante políticas, conservación y otros medios disponibles, deben tratar de conservarse ya que son las más vulnerables al crecimiento de la infraestructura.

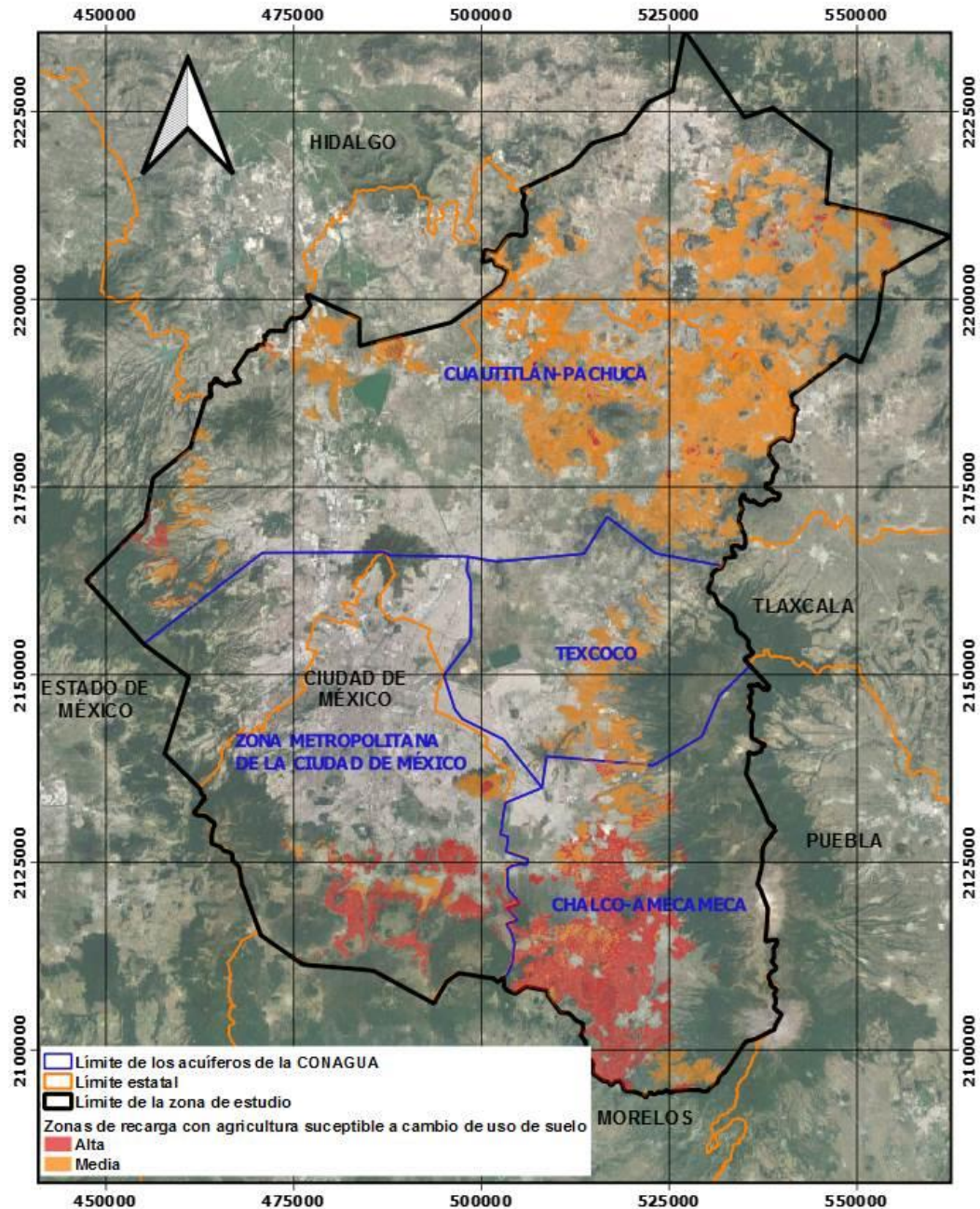


Figura 4.27. Zonas de recarga vulnerables al crecimiento de la infraestructura

5. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones resultantes de este estudio buscan contribuir en el tema de la seguridad hídrica de la Ciudad de México, así como de las principales poblaciones ubicadas en la zona de estudio.

Para proponer las recomendaciones se tomó como punto de partida la potencialidad de las zonas de recarga, así como su localización geográfica, con objeto de establecer las regiones donde invertir para mantener los procesos de recarga.

5.1. Áreas clave de actuación de Agua Capital para mantener y mejorar los procesos de recarga

Como áreas clave en donde Agua Capital dirigiría sus acciones para la conservación o restauración de los procesos hídricos e hidrogeológicos de los ecosistemas, están las zonas de recarga clasificadas con potencialidad: muy alta, alta, media y media o de flujo discontinuo.

En la figura 5.1 se observa que la mayor parte de las zonas de recarga de potencialidad muy alta y alta, se localizan al sur de los acuíferos Zona Metropolitana de la Ciudad de México y Chalco-Amecameca; en mucha menor proporción en los acuíferos Cuautitlán-Pachuca y Texcoco.

Las zonas de recarga con potencialidad media (figura 5.2) se ubican principalmente hacia el este del Acuífero Cuautitlán-Pachuca y al oeste en la zona de la Sierra de Las Cruces; así como hacia la zona centro entre los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca,

Con relación a las zonas de recarga de potencialidad media o de flujo discontinuo (figura 5.3), lo más importante es la existencia de acuíferos colgados y de manantiales; estos últimos por su abundancia particularmente en la Sierra de Las Cruces y en la Sierra Nevada, representan un volumen de agua importante que aunque no recarga directamente a los acuíferos de la Cuenca de México, si es utilizado por comunidades localizadas en las sierras, por lo que es necesario realizar acciones que los protejan para evitar la pérdida de agua o bien para evitar su contaminación, hecho que puede presentarse por la construcción de obras de ingeniería mal planificadas que no toman en cuenta su existencia.

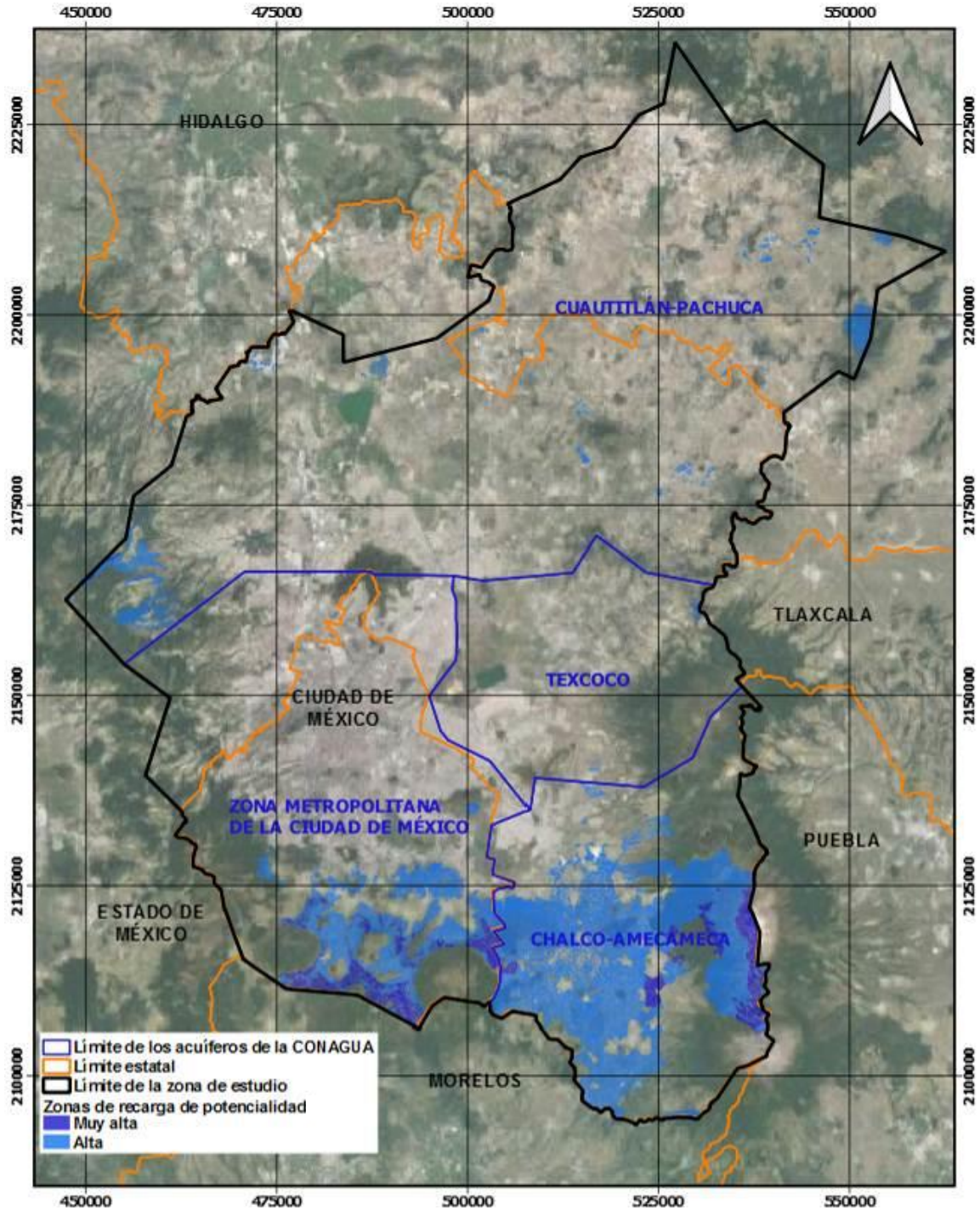


Figura 5.1. Distribución geográfica de las zonas de recarga con potencialidad muy alta y alta

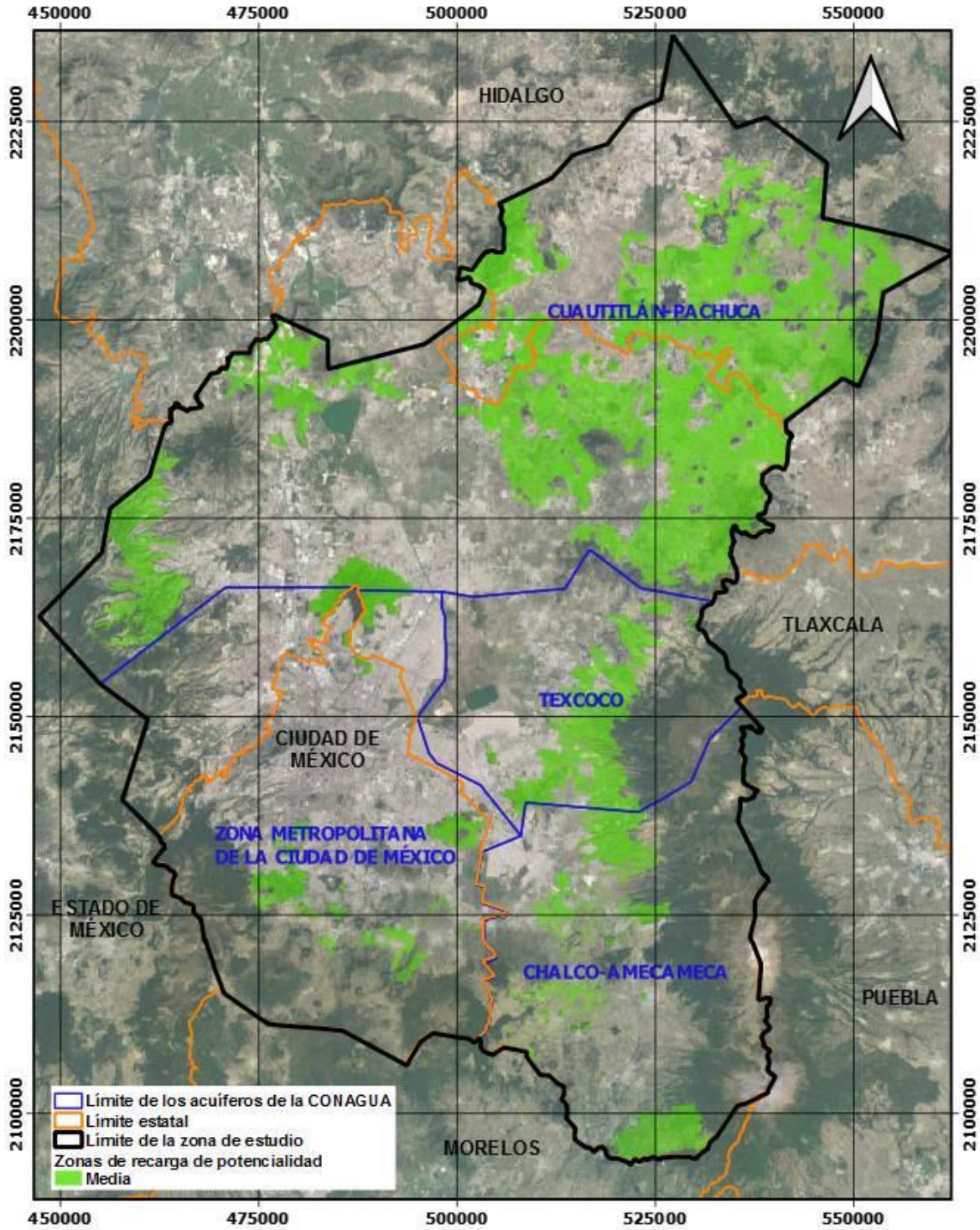


Figura 5.2. Distribución geográfica de las zonas de recarga con potencialidad media

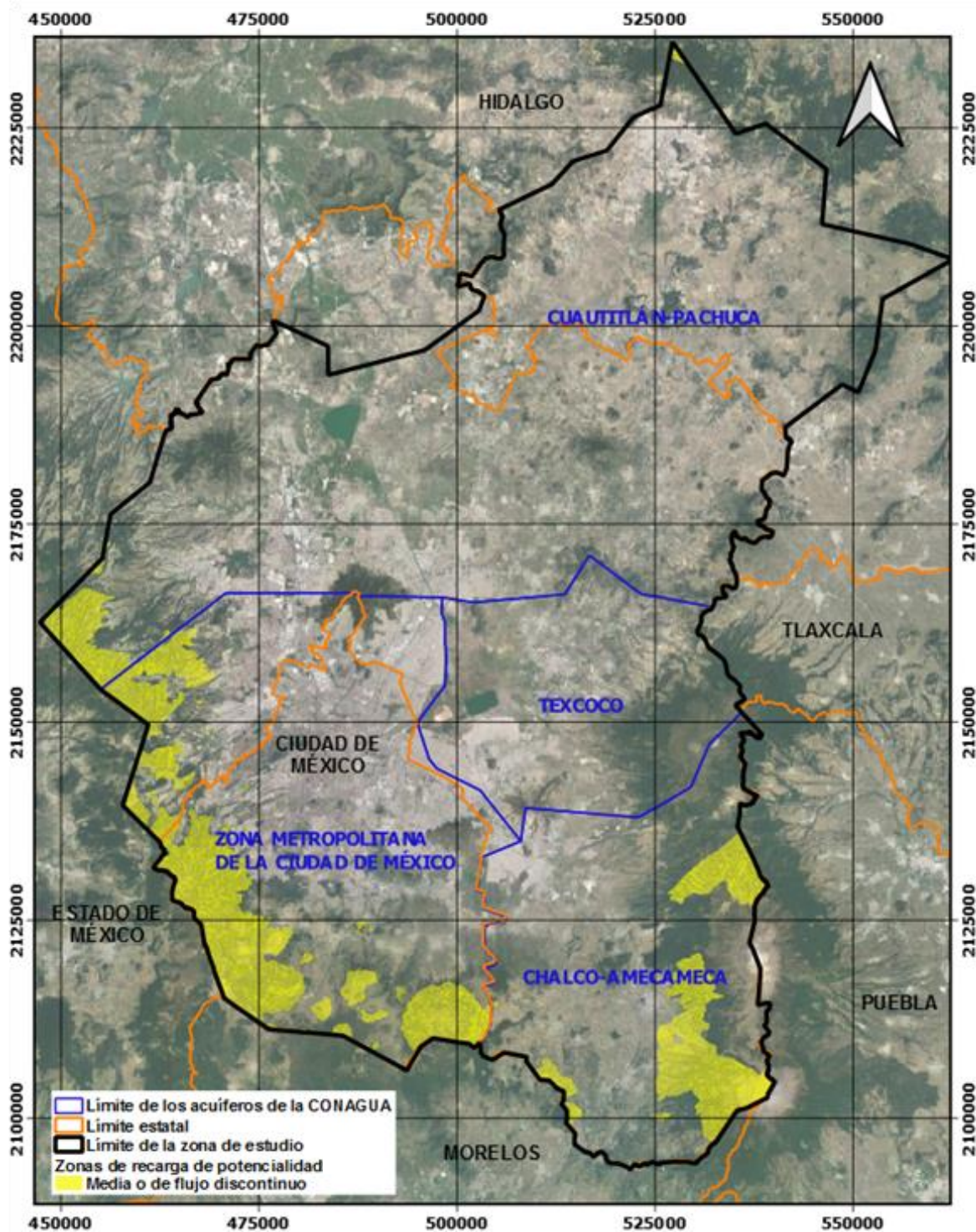


Figura 5.3. Distribución geográfica de las zonas de recarga con potencialidad media o de flujo discontinuo

5.2. Portafolio de acciones

Este portafolio de acciones tiene la finalidad de establecer las medidas para conservar, y/o mejorar, las condiciones en que se encuentran las zonas de recarga con mejor potencialidad; cabe mencionar que con el desarrollo del estudio se conoce su estado a través de información bibliográfica y lo analizado en mapas; las acciones que se recomiendan están basadas en este conocimiento y además se propondrán otras acciones que lo complementen.

Las actividades relacionadas con el portafolio están dirigidas hacia las zonas de recarga con la mejor potencialidad, que son las clasificadas como: **muy altas, altas, medias y medias o de flujo discontinuo**, ya que están relacionadas con variables naturales que permiten la infiltración del agua.

Estas cuatro zonas de recarga se distribuyen en todos los acuíferos analizados, particularmente las de potencialidad muy alta y alta predominan al sur de la zona de estudio, en los acuíferos de la Zona Metropolitana de Ciudad de México y en el de Chalco-Amecameca (figura 5.1). Las zonas de recarga con potencialidad media están distribuidas en los cuatro acuíferos estudiados, pero cubren una gran extensión del Acuífero Cuautitlán-Pachuca (figura 5.2); y las zonas de recarga media o de flujo discontinuo se ubican al oriente del Acuífero Chalco-Amecameca, sur y poniente del Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México y una pequeña porción al suroeste del Acuífero Cuautitlán Pachuca (figura 5.3).

Las medidas y acciones que se proponen para conservar o mejorar las condiciones en que se encuentran las zonas de recarga, tomaron en cuenta la precipitación y su variación en el tiempo, de acuerdo con los resultados del análisis del cambio climático realizado en el capítulo 4 de este estudio, particularmente en las regiones en donde se detectó que habrá un importante déficit de agua, debido a que se necesita desde ahora tomar las medidas necesarias para dar solución a los problemas de escasez que se tendrán. De igual forma se tomaron en cuenta los cambios en el uso del suelo que también pueden afectar a la infiltración de agua.

En la tabla 5.1 se presentan las medidas y acciones generales recomendadas y en la tabla 5.2 las medidas y acciones particulares para las zonas de recarga de potencialidad muy alta, alta, media y media o de flujo discontinuo, las cuales sería conveniente que fueran realizadas por las comisiones estatales de agua, por organismos municipales operadores de agua, así como por organismos no gubernamentales; posteriormente se describen con detalle las acciones y se incluyen figuras con la ubicación de las áreas en donde se propone se realicen. En la tabla 5.3, se incluyen otras medidas y acciones relacionadas con la participación del gobierno federal, como CONAGUA y SEMARNAT.

Tabla 5.1. Medidas y acciones de conservación generales para las zonas de recarga muy alta, alta, media y media o de flujo discontinuo

CONS.	MEDIDAS	ACCIONES GENERALES	ACUÍFEROS EN DONDE REALIZARLAS
1	Protección y/o recuperación de los suelos en áreas localizadas en las zonas de recarga relevantes	Realizar obras de conservación de suelos en zonas con alta capacidad de infiltración.	Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México y Chalco Amecameca
2	Reducción de la presión antropogénica en superficies con alto, medio a alto y medio vigor de la vegetación.	Proteger y conservar las áreas con vegetación de alto y medio a alto vigor, promoviendo ante autoridades y actores relevantes, la adecuación de instrumentos de regulación urbana y ambiental.	Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca
3	Fomentar acciones de control del crecimiento de las áreas urbanas, hacia superficies que brindan el servicio ecosistémico de captar agua de lluvia para las zonas de recarga relevantes.		
4	Reducir los riesgos de contaminación y degradación de la calidad del agua disponible para infiltración.	Construir y/o promover esquemas conjuntos con actores relevantes, para la implementación de infraestructura, obras o tecnologías, que limiten la infiltración de contaminantes.	Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Chalco-Amecameca, Cuautitlán-Pachuca y Texcoco
5		Promover y en su caso coadyuvar, a la implementación de acciones o programas de desarrollo y supervisión de sistemas u obras de tratamiento de aguas residuales, atendiendo al cumplimiento de la normatividad aplicable.	
6		Promover ante actores gubernamentales y sociales relevantes, mecanismos de recolección y disposición adecuada de los residuos sólidos urbanos en áreas sin servicios municipales.	

Tabla 5.1. Medidas y acciones de conservación generales para las zonas de recarga muy alta, alta, media y medio o de flujo discontinuo (continuación)

CONS.	MEDIDAS	ACCIONES GENERALES	ACUÍFEROS EN DONDE REALIZARLAS
7	Reducir los riesgos de contaminación y degradación de la calidad del agua disponible para infiltración.	Impedir el uso de barrancas y cuerpos de agua, para la disposición de residuos sólidos, a través de la participación y vigilancia de las comunidades.	Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Chalco-Amecameca, Cuautitlán-Pachuca y Texcoco
8	Adecuación o implementación de políticas y medidas de conservación y restauración de los instrumentos de regulación ambiental y urbana, en zonas que se encuentran afectadas por procesos antropogénicos.	Promover con actores gubernamentales la actualización y/o creación de instrumentos de regulación ambiental y urbana, que protejan y conserven las zonas de recarga.	Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Chalco-Amecameca y Cuautitlán-Pachuca
9		Implementar programas de reforestación, revegetación y conservación de suelos, en zonas estratégicas de áreas agrícolas, para coadyuvar a la conservación del servicio ecosistémico de recarga de acuíferos.	
10	Informar a los actores clave gubernamentales y a la sociedad, sobre la importancia de proteger las zonas de recarga identificadas en este estudio.	Compartir la información derivada de este estudio y convencer a los actores clave, sobre la importancia que tienen las zonas de recarga y los riesgos de reducir la disponibilidad de agua para la población, sino se realizan las acciones recomendadas.	Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Chalco-Amecameca, Cuautitlán-Pachuca y Texcoco

Tabla 5.2. Medidas y acciones de conservación particulares para las zonas de recarga muy alta, alta, media y medio o de flujo discontinuo

CONS.	MEDIDAS	ACCIONES	ACUÍFEROS EN DONDE REALIZARLAS
1	Protección y/o recuperación de los suelos en áreas con alta capacidad de infiltración	Implementar obras de conservación, en áreas con alta capacidad de infiltración, que presenten erosión de suelos, a través de esquemas de cooperación en los que participen la sociedad y entidades gubernamentales.	Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México y Chalco Amecameca

Tabla 5.2. Medidas y acciones de conservación particulares para las zonas de recarga muy alta, alta, media y medio o de flujo discontinuo (continuación)

CONS.	MEDIDAS	ACCIONES	ACUÍFEROS EN DONDE REALIZARLAS
2	Mantener el servicio ecosistémico de captación de agua, a través de la conservación de la cobertura vegetal.	Implementar acciones de reforestación y/o revegetación, en áreas de montaña con presencia de neblina, para interceptar la humedad y favorecer la infiltración y la recarga.	Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca
3	Evitar el crecimiento de las superficies agrícolas hacia áreas con vegetación con alto, medio a alto y medio vigor de la vegetación.	Desarrollar esquemas que estimulen a los agricultores para que no incrementen sus áreas agrícolas hacia estas áreas.	Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca
4		Iniciar a la brevedad posible, con acciones de concientización entre comunidades rurales y urbanas, respecto a la relevancia de la conservación y/o restauración de las zonas de recarga media, debido a la reducción en la disponibilidad de agua por efectos del cambio climático.	
5	Desarrollo de acciones de conservación de áreas de captación de agua y esquemas de uso eficiente de agua, en áreas urbanas y agrícolas, como medidas de atenuación de los efectos del cambio climático.	Promover con actores gubernamentales relevantes, el uso de sistemas, obras o tecnologías de uso del agua residual tratada, como medida atenuante a la reducción del volumen de agua disponible para infiltración, por efectos del crecimiento urbano y del cambio climático.	Cuautitlán-Pachuca
6		Realizar obras que mejoren la condición de los cuerpos de agua superficiales y efectuar investigaciones que promuevan el uso del agua de lluvia y el uso eficiente del agua subterránea.	
7	Incrementar el conocimiento geológico e hidrogeológico de las zonas de recarga identificadas en este estudio.	Realizar las acciones que se recomiendan en el tema 5.4 "Como mejorar el conocimiento de los procesos de recarga".	Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca

Tabla 5.3. Otras medidas y acciones de conservación de competencia gubernamental

CONS.	MEDIDAS	ACCIONES
1	Mejora de la articulación institucional de los tres niveles de gobierno, para el ordenamiento del uso del agua y la conservación de las áreas relevantes para la infiltración.	Mejora de los procesos administrativos de identificación de los usuarios y volúmenes de agua y la eficiencia con que se están usando.
2		Identificación de usuarios de fuentes de agua con regulación deficiente (p.ej. manantiales), para contar con información certera de volúmenes de uso de agua.
3	Diseño e implementación de mecanismos financieros enfocados a programas de conservación de zonas de recarga de acuíferos.	Desarrollar esquemas de cooperación o coadyuvancia con actores gubernamentales y privados, que puedan financiar las acciones recomendadas en este estudio.

A continuación, se describen con mayor detalle las medidas y acciones que se proponen las tablas anteriores:

1. Protección y/o recuperación de los suelos en las zonas de recarga con potencialidad muy alta y alta.

Con objeto de dirigir las inversiones relacionadas con esta medida, se seleccionaron las zonas de recarga con potencialidad muy alta y alta, en donde la pendiente es superior a seis grados y la precipitación mayor a 842 mm; estas dos variables en conjunto generan una elevada posibilidad de erosión de suelos, por lo que será necesario invertir en la construcción de obras, como: bordos, presas de gaviones, zanjas de infiltración, y terrazas, entre otras, con objeto de reducir la velocidad con que se mueve el agua superficial y su capacidad erosiva, permitiendo así que el agua tenga un mayor tiempo de contacto con los suelos y con las rocas, favoreciendo la infiltración; en la figura 5.4 se presentan la ubicación de las áreas donde se deberán construir estas obras.

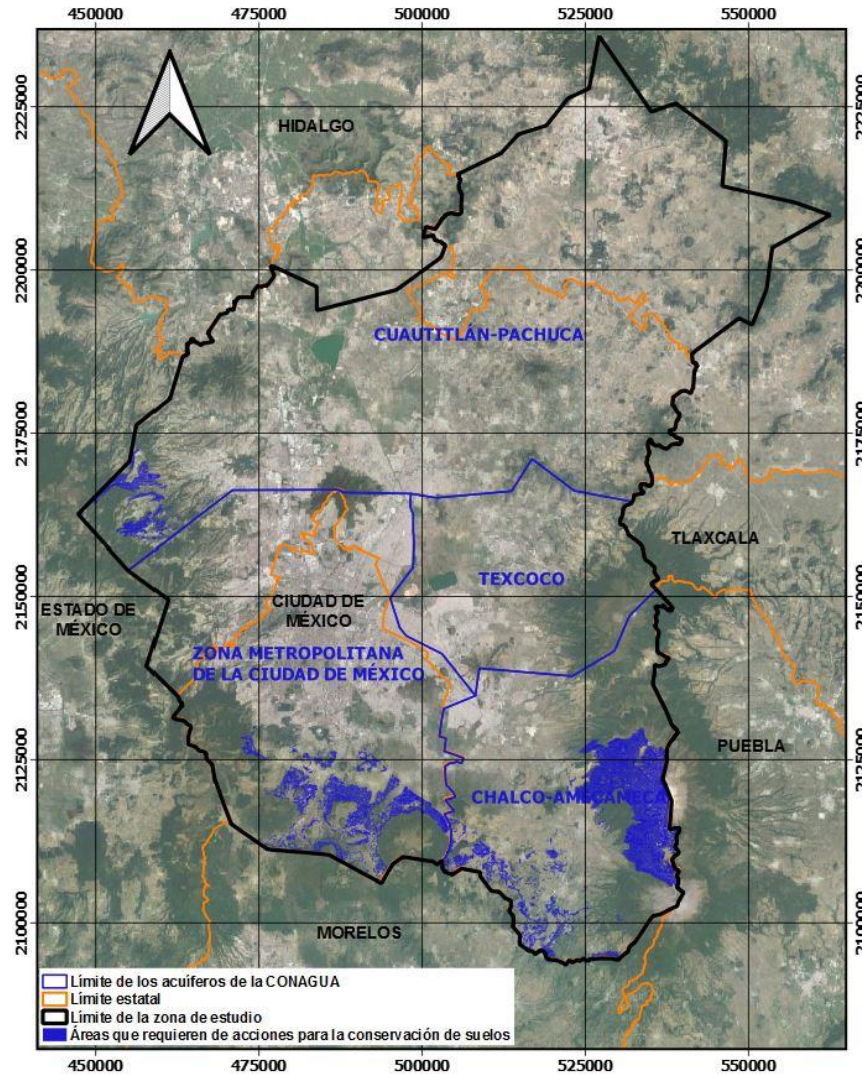


Figura 5.4. Áreas en donde son necesarias las acciones de conservación de los suelos

Algunas se deberán de construir sobre los cauces de los ríos y arroyos y otras sobre la superficie del terreno; esta práctica evitará además que los sedimentos erosionados cambien los servicios ecosistémicos relacionados con la calidad del paisaje, afecten a cuerpos de agua por azolve y reduzcan la capacidad de infiltración de rocas permeables ubicadas en áreas topográficamente más bajas.

Como se observa en la figura 5.4, estas áreas se localizan al sur de los acuíferos de Chalco-Amecameca y Zona Metropolitana de la Ciudad de México, así como en una pequeña porción al suroeste del Acuífero Cuautilán-Pachuca.

Para llevar a cabo estas acciones será necesario desarrollar esquemas de cooperación y/o coordinación con actores sociales y gubernamentales.

2. Mantenimiento del servicio ecosistémico de captación de agua de lluvia a través de la conservación de la cobertura vegetal.

La inversión para realizar las acciones relacionadas con la conservación de la cobertura vegetal se debe realizar en áreas donde la vegetación no tiene un vigor clasificado como alto, lo mejor es dirigir las inversiones hacia las áreas con vigor de la vegetación: medio a alto, medio y bajo, localizadas en zonas de recarga de potencialidad muy alta, alta, media y media o de flujo discontinuo.

En las áreas que se muestran en la figura 5.5, es importante implementar acciones de reforestación y revegetación; estas acciones pueden ser realizadas de forma directa o coordinándose con entidades sociales y gubernamentales. Cuando se realicen en zonas de montaña es conveniente identificar donde se presentan las zonas de neblina, para que de esta forma la vegetación reforestada o revegetada intercepte la humedad y favorezca los servicios ecosistémicos de infiltración y recarga.

Las áreas en donde se pueden llevar a cabo estas acciones están ampliamente distribuidas en los cuatro acuíferos (figura 5.5), por lo que es una actividad de gran beneficio ambiental.

3. Reducción de la presión antropogénica en superficies con alto, medio a alto y medio vigor de la vegetación.

En este caso las acciones deben estar enfocadas a la conservación de superficies en donde el vigor de la vegetación es alto, medio alto y medio; en particular a la preservación de áreas en donde la cobertura vegetal con las características de vigor citadas pueda ser afectada por efecto del crecimiento en extensión de las actividades antropogénicas, concretamente el desarrollo urbano y las actividades agrícolas.

Esta presión antropogénica además de afectar a la reducción del volumen de agua que puede infiltrarse en las zonas de recarga con potencialidad muy alta, alta, media y media o de flujo discontinuo, puede llevar a otro tipo de alteración de servicios ecosistémicos, como es la alteración del paisaje y la generación de CO₂, entre otros.

Como se puede ver en la figura 5.6 las áreas donde la cobertura vegetal está sometida a la presión de las actividades urbanas y la agricultura, se localizan en los cuatro acuíferos localizados en el área de estudio, pero los que están sometidos a un mayor riesgo son los acuíferos de Chalco-Amecameca y Zona Metropolitana de la Ciudad de México; en menor proporción en los acuíferos de Texcoco y Cuautitlán-Pachuca.

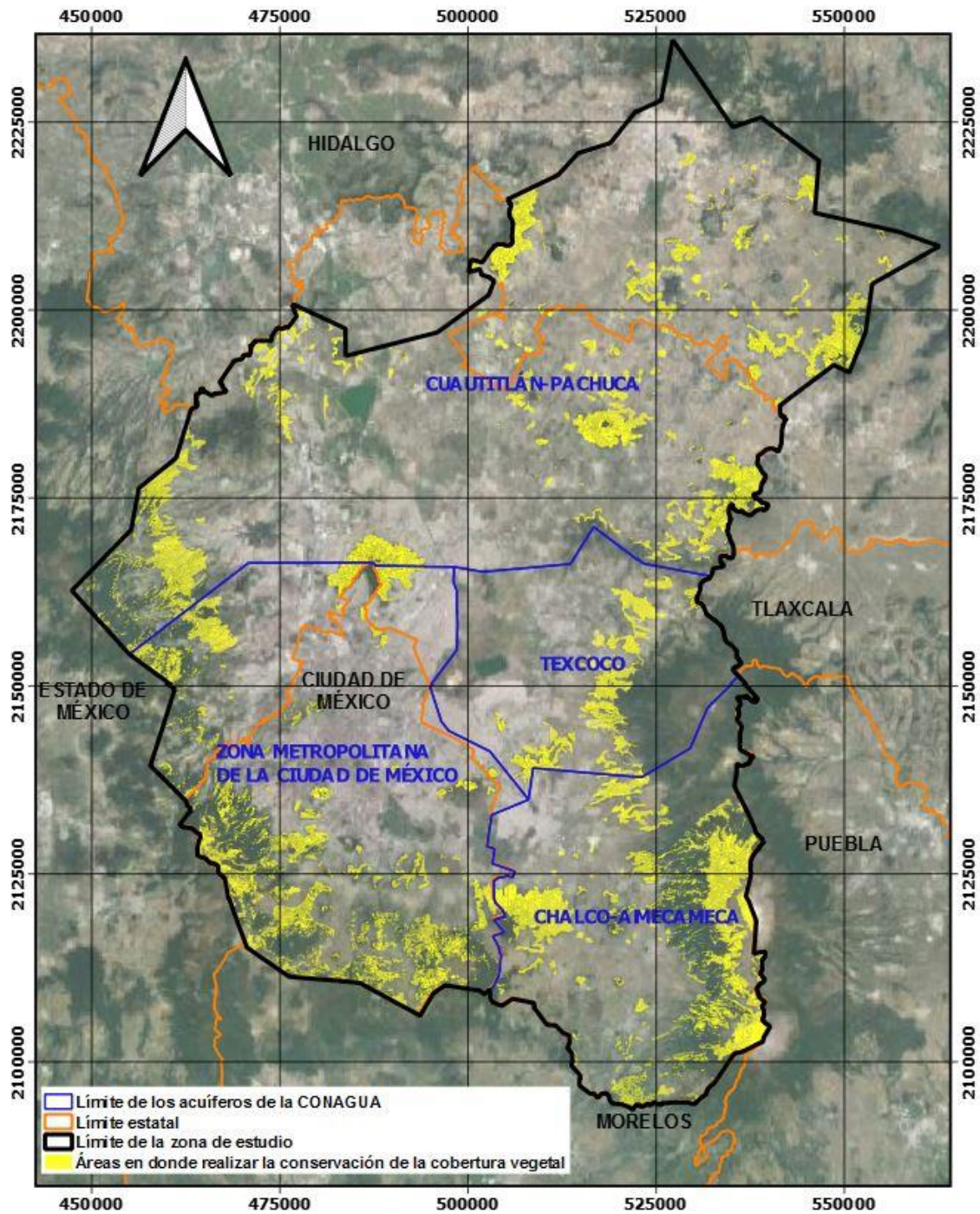


Figura 5.5. Áreas en donde se puede mantener el servicio ecosistémico de captación de agua por medio de la conservación de la cobertura vegetal

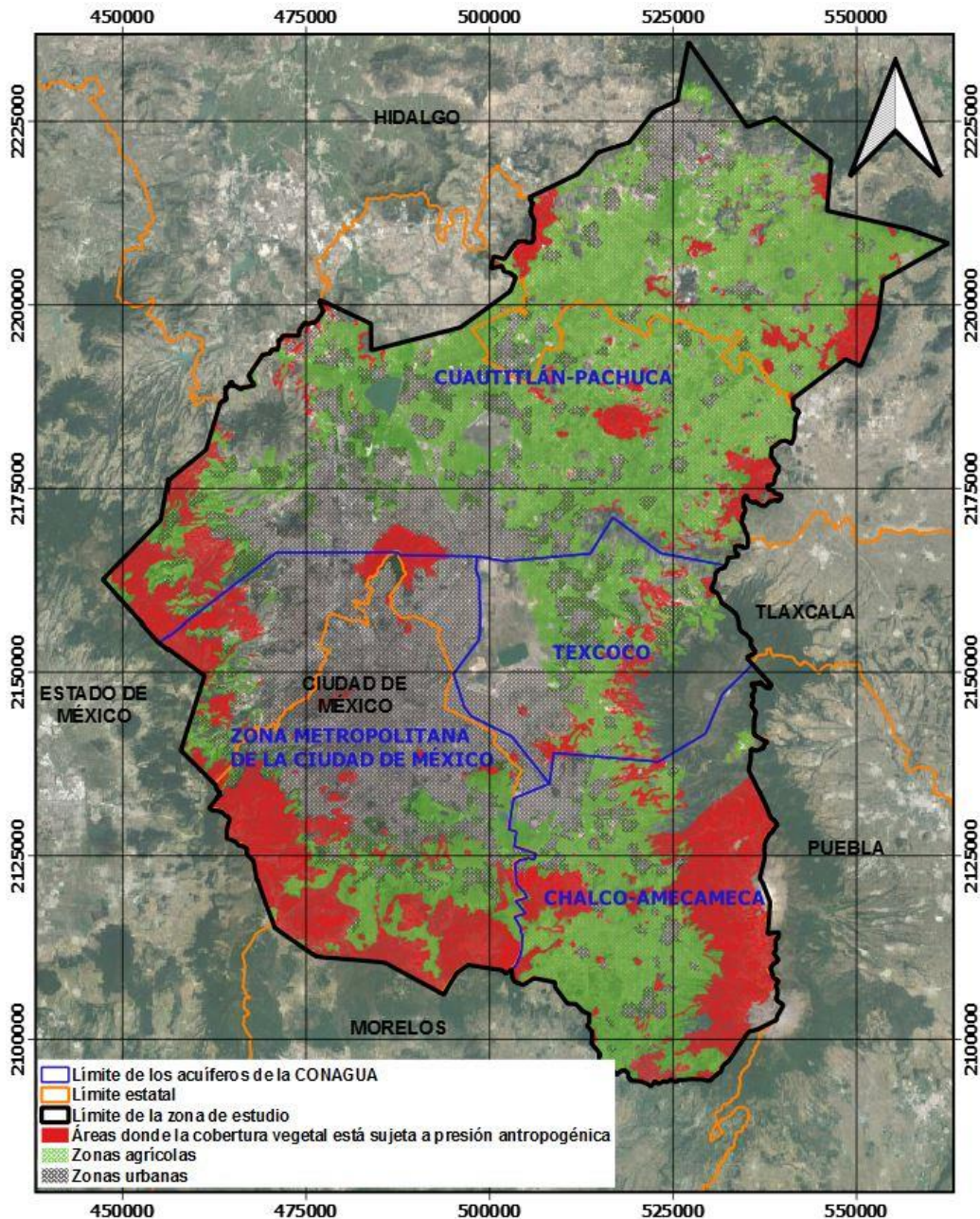


Figura 5.6. Áreas en donde la cobertura vegetal está sometida a la potencial afectación de las zonas urbanas y agrícolas

En estas áreas para conservar sus servicios ecosistémicos, es necesario desarrollar esquemas de estímulos a los agricultores para que no incrementen sus áreas de trabajo; de igual forma promover ante autoridades y actores relevantes, la adecuación de instrumentos de regulación urbana y ambiental, que garanticen la conservación de áreas con alto, medio a alto y medio vigor de la vegetación, en zonas relevantes de captación de agua disponible para infiltración.

4. Fomentar acciones de control del crecimiento de las áreas urbanas, hacia superficies que brindan el servicio ecosistémico de captar agua de lluvia para las zonas de recarga relevantes.

En el planteamiento de estas acciones se hicieron intervenir los resultados del análisis de cambio de uso del suelo para los años 2030 y 2050; esta situación es relevante porque muestra las áreas en donde se presentará el crecimiento de la mancha urbana y con ello la pérdida del servicio ecosistémico de captación, infiltración y recarga de acuíferos. En la figura 5.7 se muestra que los acuíferos más afectados serán Chalco-Amecameca, Texcoco y más aún el de Cuautitlán-Pachuca.

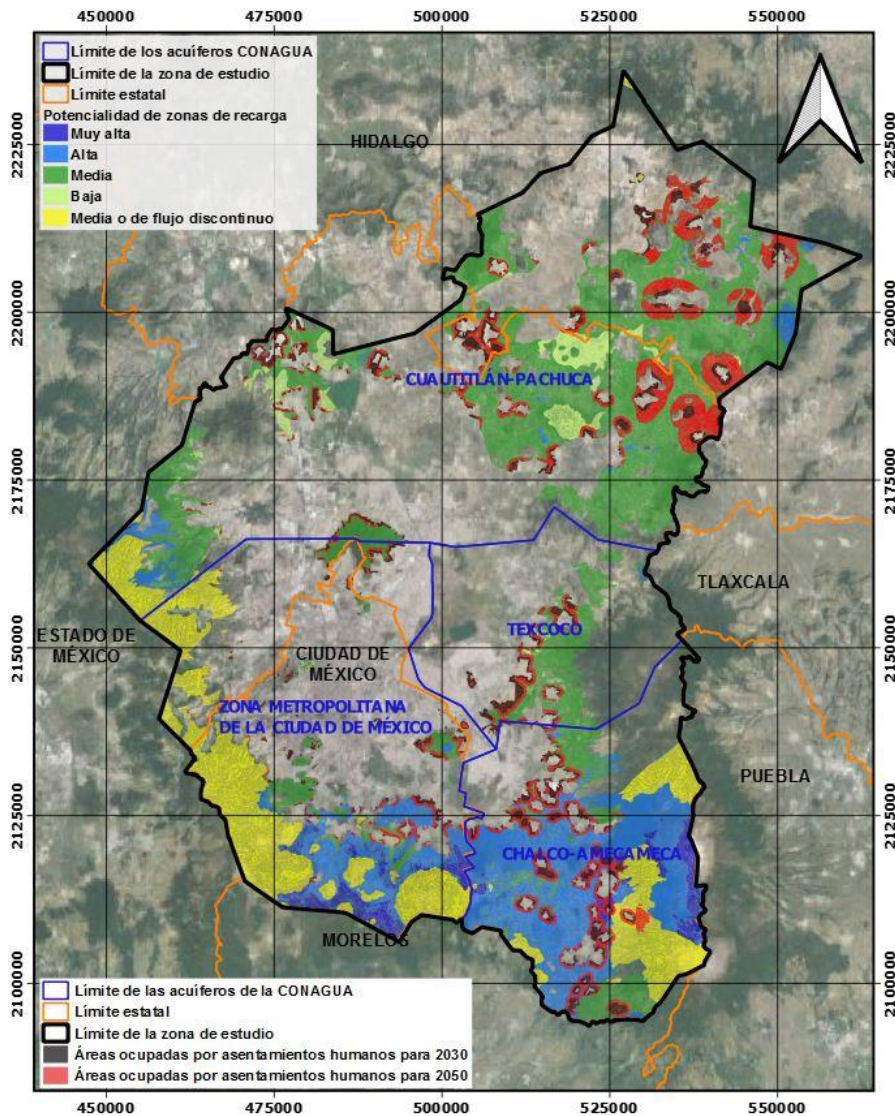


Figura 5.7. Zonas de recarga que serán afectadas por el crecimiento urbano

En este caso las acciones deberán estar dirigidas a compartir con actores clave gubernamentales y sociales, la información de la localización de las zonas de recarga de potencial muy alto, alto, medio y medio o de flujo discontinuo, y los riesgos en la reducción de estas por el crecimiento urbano, lo cual llevará a la pérdida del servicio ecosistémico de recarga de agua a los acuíferos.

Por esta razón es importante promover y coadyuvar en la adecuación de instrumentos y acciones de regulación urbana y ambiental, que garanticen la conservación de áreas de captación de agua.

Uno de estos instrumentos, sería el implementar un esquema de pago por servicios ambientales como una herramienta de política ambiental, para concientizar y ayudar a los propietarios para que mantengan los servicios ambientales de infiltración en sus tierras y evitar cambios en el uso del suelo, pastoreo y otras presiones.

En el caso de que este crecimiento sea a través de áreas urbanas irregulares, habrá que evitar la pérdida de los servicios ecosistémicos de infiltración de agua, por efecto de la degradación de su calidad; en este caso las acciones deberán estar dirigidas a realizar inversiones que permitan la construcción de infraestructura y obras, que limiten el ingreso al subsuelo de contaminantes y favorezcan la infiltración del agua de lluvia.

Se deberán también promover esquemas conjuntos con actores relevantes para la implementación de tecnologías que apoyen a la realización de las acciones y de programas de desarrollo y supervisión de sistemas u obras de tratamiento de aguas residuales, atendiendo al cumplimiento de la normatividad aplicable.

Otra acción importante será la de promover ante actores gubernamentales y sociales, mecanismos de disposición adecuada de los residuos sólidos urbanos en áreas sin servicios municipales de recolección. Esta acción es relevante por el servicio ecosistémico que brinda al evitar el deterioro de la calidad del paisaje y la contaminación de cuerpos de agua por la disposición de residuos sólidos en barrancas y terrenos localizados en zonas de infiltración de agua.

En este caso las acciones deben considerar la promoción o implementación de esquemas de cooperación comunitaria, para la recolección y disposición de los residuos sólidos fuera de áreas de captación de agua.

5. Desarrollo de acciones de conservación de áreas de captación de agua y esquemas de uso eficiente de agua en áreas urbanas y agrícolas, como medidas de atenuación de los efectos del cambio climático.

En este caso, las acciones deben estar enfocadas a promover la concientización entre comunidades rurales y urbanas respecto a la relevancia de la conservación y/o restauración, particularmente de las zonas de recarga de potencialidad media en el Acuífero Cuautitlán-Pachuca, debido a que son las que predominan en las áreas en donde impactará más la reducción del volumen disponible de agua para infiltración.

En las figuras 5.8, 5.9 y 5.10 se observa que, en el centro, norte y este de la Cuenca de México, en toda el área que cubre el Acuífero de Cuautitlán-Pachuca, actualmente es donde se tiene la menor cantidad de agua disponible para infiltración, adicionalmente por efectos del cambio climático en el escenario 2039 a 2069, la reducción más importante del agua disponible para este fin, se dará en este acuífero, lo cual afectará no sólo al servicio ecosistémico de la recarga de acuíferos, sino a las actividades urbanas y agrícolas; la distribución geográfica de estas últimas se pueden observar en la figura 5.6.

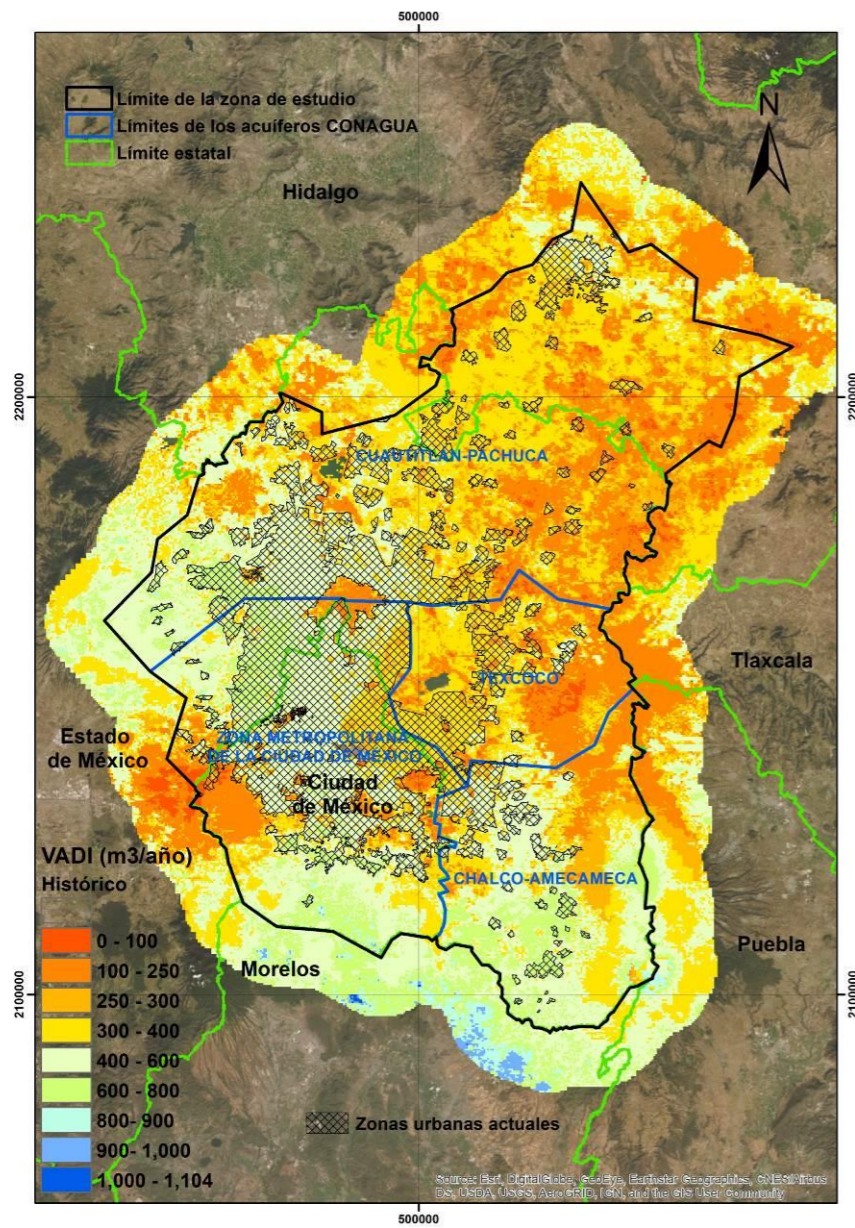


Figura 5.8. Condición actual del agua disponible para infiltración

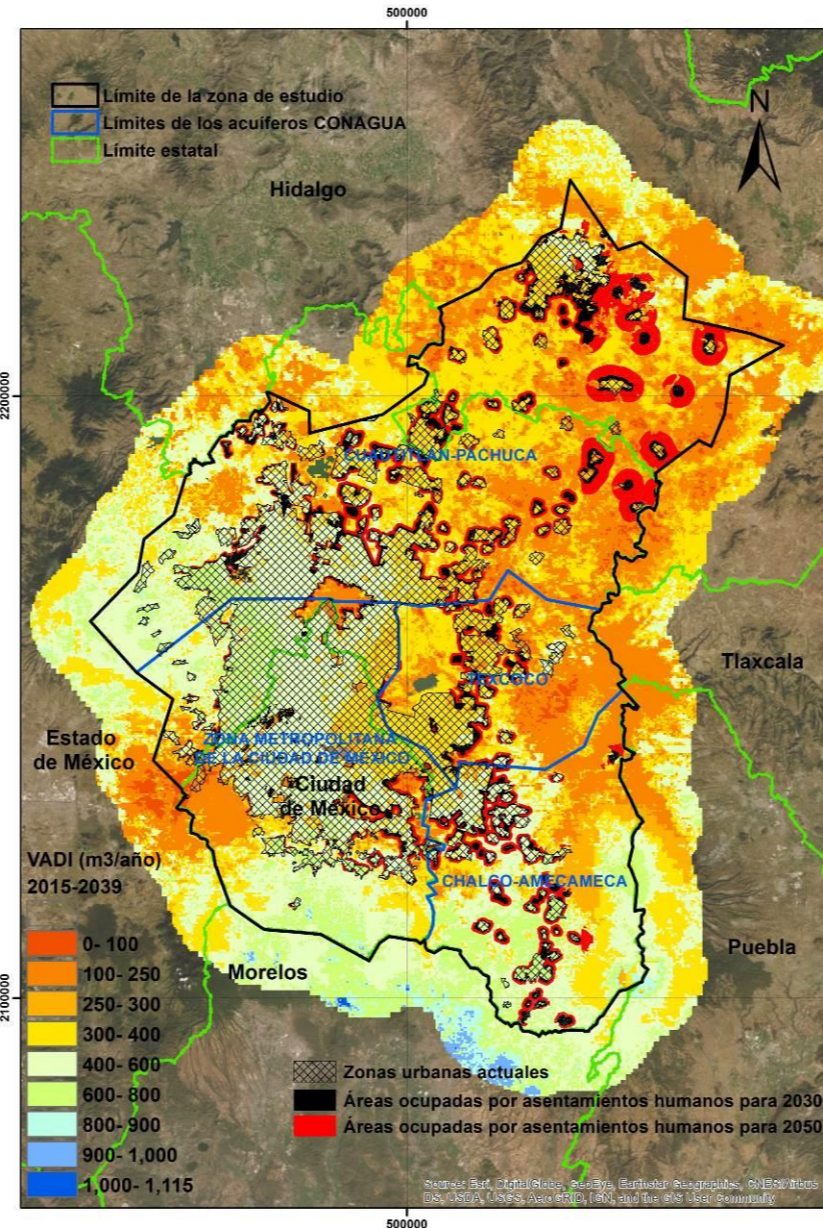


Figura 5.9. Agua disponible para infiltración escenario al año 2039 y con el crecimiento de las zonas urbanas a los años 2030 y 2050

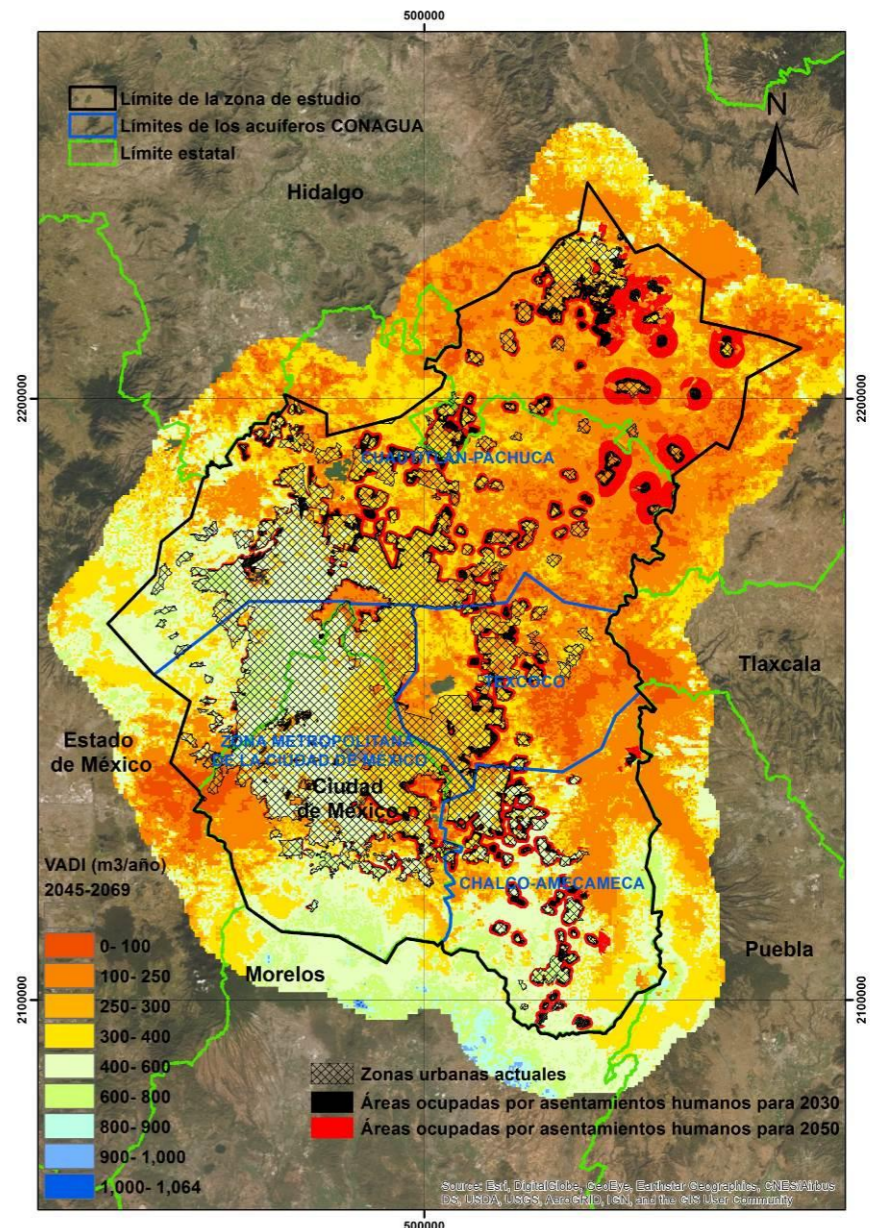


Figura 5.10. Agua disponible para infiltración escenario al año 2069 y con el crecimiento de las zonas urbanas a los años 2030 y 2050

VADI = Volumen de agua disponible para infiltración

Como se puede ver en estas figuras las inversiones deben dirigirse hacia acciones a través de las cuales se busque el uso eficiente del agua en las ciudades y que las actividades agrícolas sean cada más tecnificadas para reducir el volumen de agua requerido para obtener la misma cantidad de productos. Y aunque esta reducción del volumen de agua disponible se presentará en toda la Cuenca de México, se agudizará en el Acuífero de Cuautitlán-Pachuca, donde la superficie agrícola está ampliamente distribuida, sobre zonas de potencialidad de recarga media, que están prestando un servicio ecosistémico de recarga de acuíferos que hay que conservar.

Para llevar a cabo las acciones de conservación se debe promover con actores gubernamentales el uso de sistemas, obras o tecnología de uso del agua residual tratada, como medida atenuante a la reducción del volumen de agua disponible para infiltración por efectos del crecimiento urbano y de cambio climático.

6. Adecuación o implementación de políticas y medidas de conservación y restauración de los instrumentos de regulación ambiental y urbana, en zonas de recarga de potencialidad muy alta y alta, que se encuentren afectadas por procesos antropogénicos.

Las acciones en este caso tienen un amplio ámbito de áreas en donde deben ser aplicadas, por una parte, están los sitios que ya cuentan con algún tipo de protección (figura 5.11), como son las áreas naturales protegidas, los parques estatales, parques municipales, parques urbanos, etc., en donde es necesario promover con los actores gubernamentales la actualización y/o creación de instrumentos de regulación ambiental y urbana que protejan las zonas de recarga de potencialidad muy alta y alta.

Como se puede ver en la figura 5.11, en la parte sur del Acuífero Chalco-Amecameca en donde hay zonas de recarga de potencialidad alta, que no tienen ningún tipo de protección, sin embargo en estas zonas predominan las actividades agrícolas que en el párrafo siguiente se comentan; en los sitios con protección como se dijo, es necesario promover la actualización del uso del suelo y la creación de instrumentos que protejan a estas áreas de actividades que puedan limitar la infiltración del agua.

Por otra parte, en áreas en donde hay actividades agrícolas localizadas sobre zonas de recarga de potencialidad alta y media (figura 5.12); se deben desarrollar en zonas estratégicas, programas o acciones de reforestación y/o revegetación, conservación de suelos, etc., para coadyuvar a la conservación del servicio ecosistémico de la recarga de acuíferos.

Otra de las acciones consiste en promover entre los agricultores, la combinación de cultivos y árboles nativos, estos últimos podrían ser sembrados alrededor de los perímetros de los terrenos agrícolas o intercalados con el cultivo, lo cual ayudará a evitar o reducir la erosión del suelo por el agua y a protegerlo del viento en temporada de secas o cuando no esté sembrado.

Estas zonas agrícolas se presentan en toda la Cuenca de México, sin embargo, en los acuíferos de Chalco-Amecameca y Zona Metropolitana de Ciudad de México, están

sobre zonas de recarga de potencialidad alta y en menor proporción muy alta, por lo que es importante apoyar a los agricultores para que trabajen adecuadamente la tierra a fin de que la capacidad de infiltración del terreno no disminuya y los fertilizantes y pesticidas sean seleccionados y utilizados de forma correcta.

Por otra parte, en el Acuífero de Cuautitlán-Pachuca las zonas agrícolas son muy extensas y están localizadas sobre zonas de recarga de potencialidad media, que prestan un servicio ecosistémico de infiltración importante por las dimensiones de su superficie; de igual forma se debe invertir en apoyar a los agricultores con capacitación y tecnificación. En todos los casos se debe dar soporte a los usuarios de las tierras para que los terrenos agrícolas no cambien a uso de suelo urbano.

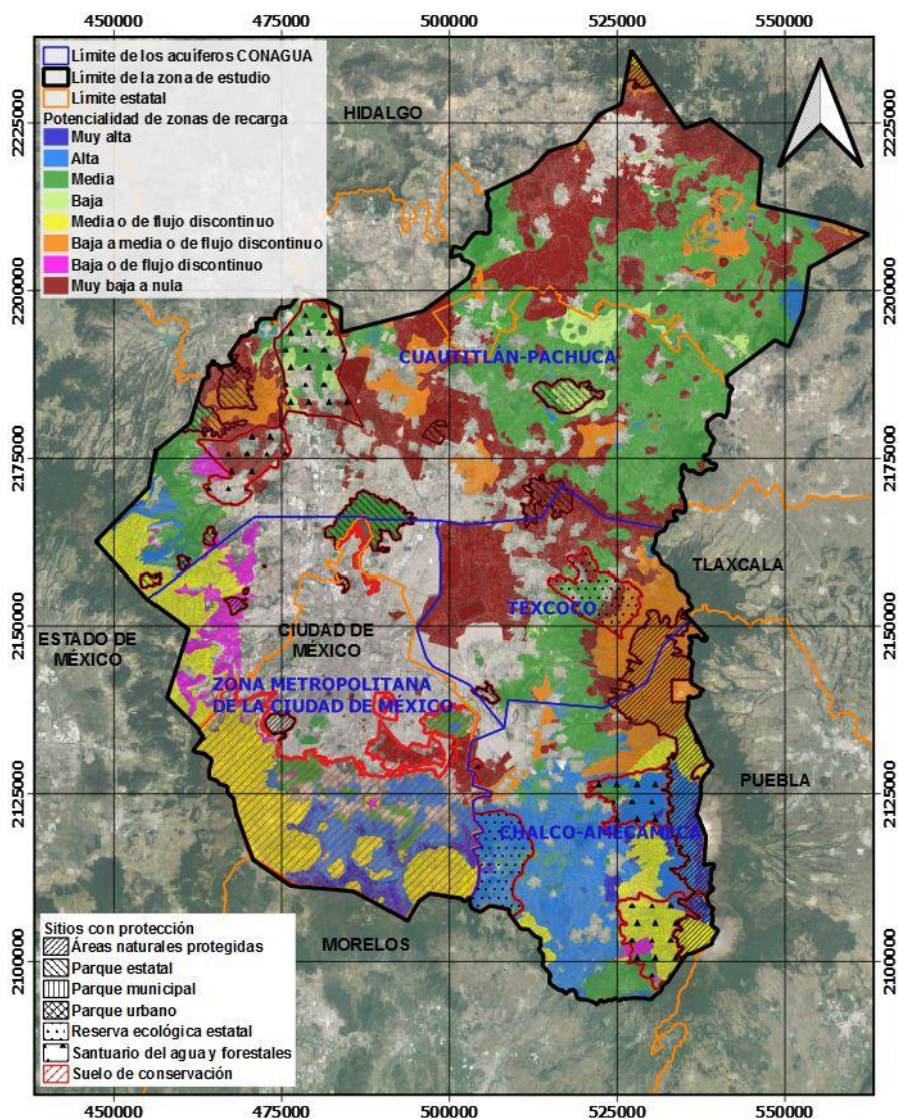


Figura 5.11. Sitios con protección en el área de estudio

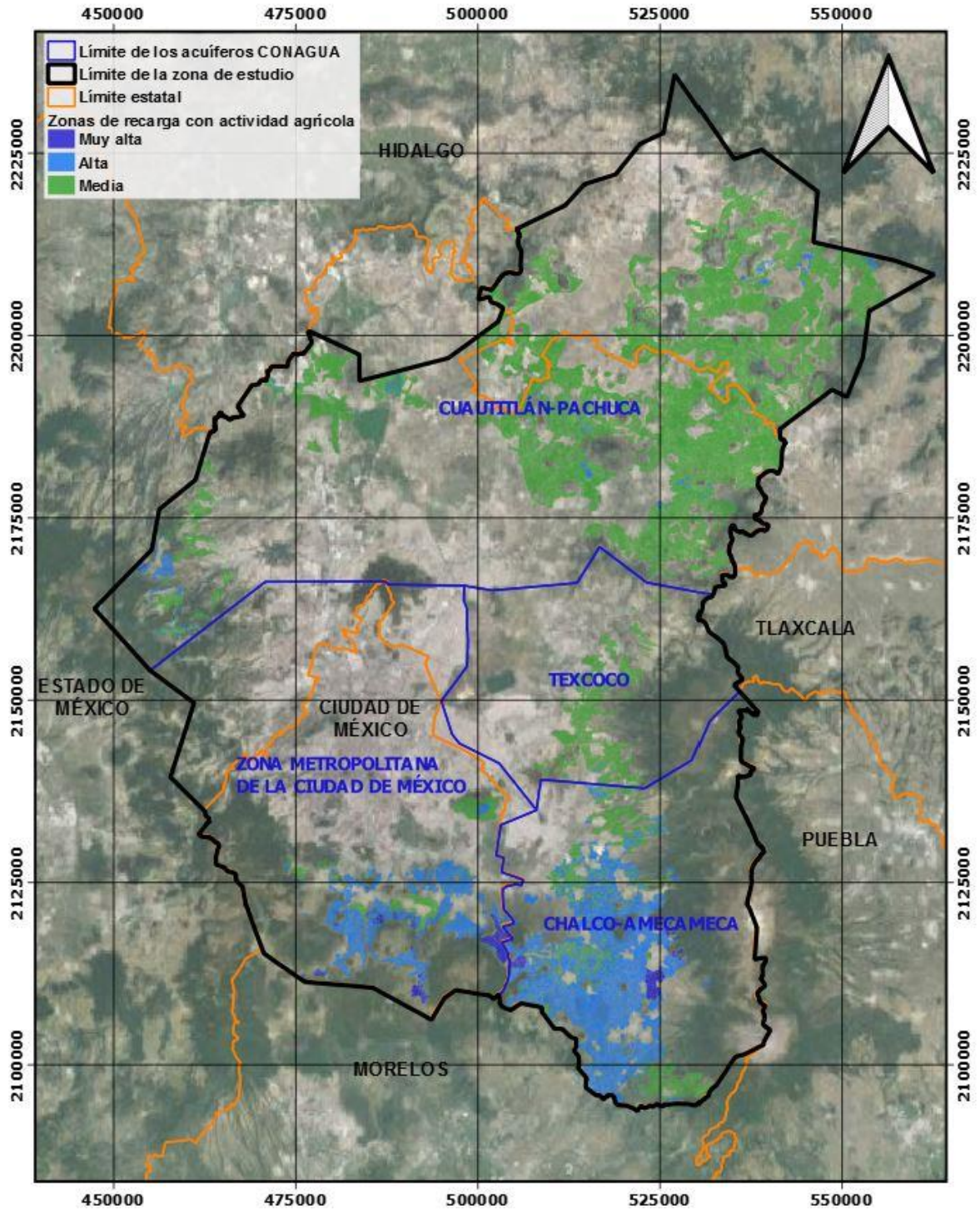


Figura 5.12. Zonas agrícolas localizadas sobre zonas de recarga muy alta, alta y media

Con base en los resultados del análisis de los modelos de cambio climático, en la zona norte, noreste y este, del Acuífero Cuautitlán-Pachuca, el agua de lluvia disponible para infiltrarse descenderá alrededor del 15% (ver figura 5.10), por tal motivo se debe desde ahora planificar acciones que permitan realizar intercambios de agua entre los diferentes usuarios, trabajar en el uso eficiente del agua en zonas agrícolas y urbanas, corregir fugas en las redes de distribución, y particularmente dar un mayor uso al agua residual, la cual puede hacerse intervenir en el intercambio de derechos de agua entre usuarios, así como en el proceso de recarga de acuíferos; esta última acción debe realizarse paralelamente con la construcción de nuevas PTAR.

7. Mejora de la articulación institucional de los tres niveles de gobierno, para el ordenamiento del uso del agua y la conservación de las áreas relevantes para la infiltración.

Esta es una medida que implica acciones de conservación de competencia gubernamental, por ejemplo en la mejora de los procesos administrativos para la identificación de los usuarios y volúmenes de agua que utilizan, el control de fugas, la eficiencia en sus redes de distribución, con objeto de impulsar el uso eficiente del agua; estas acciones pueden no tener una aplicación directa en las zonas de recarga, pero si impacta en la sobreexplotación del acuífero que es un bien ecosistémico, que a su vez requiere de servicios ambientales como es la infiltración y recarga de agua subterránea.

Por otra parte, es importante que se realicen acciones que permitan identificar a los usuarios de fuentes de agua con regulación deficiente, como es el caso de los usuarios de manantiales; esto permitirá contar con información certera sobre la forma en que se está utilizando el agua.

8. Diseño e implementación de mecanismos financieros enfocados a programas de conservación de zonas de recarga de acuíferos.

Esta medida también de competencia gubernamental requiere de desarrollar esquemas de cooperación o coadyuvancia con actores gubernamentales y privados, que puedan financiar las acciones recomendadas en este estudio.

5.3. Propuestas de monitoreo

El monitoreo es un complemento muy importante a las acciones propuestas, pues permiten por una parte establecer las condiciones en que actualmente se encuentran las variables que se van a monitorear y los cambios que tendrán una vez que se realicen las acciones propuestas.

Las propuestas de monitoreo se presentan en la tabla 5.4, en donde indica que es lo que se propone monitorear, la importancia de hacerlo, como llevarlo a cabo, en donde, la frecuencia en que se propone llevarlo a cabo y que actores deben intervenir.

Tabla 5.4. Propuestas de monitoreo

Variable a monitorear	Importancia del monitoreo	Que hacer para realizar el monitoreo	Indicadores a utilizar	En donde realizar el monitoreo	Frecuencia	Actores que deben participar
Suelos.	Sus cambios pueden producir pérdidas de bienes y servicios ecosistémicos relacionados con la degradación del paisaje, disminución en los recursos hídricos superficiales almacenados en cuerpos de agua naturales o artificiales y en particular por la reducción de áreas permeables localizadas aguas debajo de las áreas erosionadas.	<p>Análisis de imágenes de satélite recientes para establecer las condiciones actuales del suelo e identificar áreas sujetas a erosión.</p> <p>Evaluación de cambios a través del procesamiento de imágenes de satélite históricas.</p> <p>Trabajo de campo.</p>	Superficie en hectáreas o metros cuadrados, de las zonas sujetas a erosión.	<p>Porción este y suroeste del Acuífero de Chalco-Amecameca.</p> <p>Porción sur del Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México.</p> <p>Porción suroeste del Acuífero de Cuautitlán-Pachuca.</p> <p>Utilizar como punto de partida la figura 5.4, subtema 5.2.</p>	Anual después de la época de lluvias.	<p>Secretarías de medio ambiente de las entidades federativas.</p> <p>Secretarías de medio ambiente de los municipios.</p> <p>Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.</p> <p>Comisión Nacional Forestal.</p> <p>Organizaciones no gubernamentales.</p>
Vegetación.	<p>Identificar, conservar y mejorar el estado de las áreas en donde el flujo rápido del agua es detenido y se favorece la infiltración, debido a la existencia de vegetación.</p> <p>Identificar, conservar y mejorar el estado de las áreas en donde la erosión de suelos no se está presentando por la existencia de vegetación.</p> <p>Conservar y mejorar los ecosistemas que favorecen las condiciones para que exista precipitación pluvial.</p> <p>Conservar y mejorar el estado de las áreas en donde se favorece el proceso de retención del agua de lluvia.</p> <p>Conservar y mejorar el estado de las áreas en donde las raíces de la vegetación incrementan la permeabilidad del suelo y rocas.</p>	<p>Partir de las condiciones actuales ya evaluadas sobre el estado en que se encuentra el vigor de la vegetación, en mapas y shapes de este estudio.</p> <p>Continuar con la evaluación del estado del vigor de la vegetación y evaluar sus cambios, a través del procesamiento de imágenes de satélite.</p> <p>Trabajo de campo.</p>	<p>Medición de cambios en la calidad y cantidad de vegetación, por medio de la evaluación del vigor de la vegetación, a través del procesamiento de imágenes de satélite.</p> <p>Evaluación de las variaciones de los valores de cada clase del vigor de la vegetación.</p> <p>Superficie en hectáreas o metros cuadrados ocupados por las diferentes clases del vigor de la vegetación.</p>	<p>En los cuatro acuíferos estudiados.</p> <p>Utilizar como punto de partida la figura 5.5, subtema 5.2.</p>	<p>Bianual, al concluir la temporada de estiaje, en particular si hubo incendios forestales.</p> <p>Final de la temporada de lluvias, cuando se alcanza el máximo grado de verdor.</p>	<p>Comisión Nacional Forestal.</p> <p>Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.</p> <p>Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.</p> <p>Organizaciones no gubernamentales.</p>
Zonas urbanas.	Su crecimiento disminuye la capacidad del servicio ecosistémico de infiltración.	<p>Partir de las condiciones actuales ya identificadas en mapas y shapes de este estudio.</p> <p>Evaluación de cambios a través del análisis de imágenes de satélite.</p> <p>Vuelos con drones.</p>	Superficie cubierta por la mancha urbana.	<p>En los perímetros de las poblaciones y de las grandes ciudades.</p> <p>Utilizar como punto de partida la figura 4.5, subtema 4.1.</p>	Anual	<p>Gobierno de la Ciudad de México.</p> <p>Gobierno del Estado de México.</p> <p>Gobierno del Estado de Hidalgo.</p> <p>Gobiernos municipales y alcaldías.</p> <p>Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.</p>

Tabla 5.4. Propuestas de monitoreo (continuación)

Variable a monitorear	Importancia del monitoreo	Que hacer para realizar el monitoreo	Indicadores a utilizar	En donde realizar el monitoreo	Frecuencia	Actores que deben participar
Zonas agrícolas.	<p>Si se reducen por crecimiento de las zonas urbanas disminuyen los servicios ecosistémicos de recarga de acuíferos.</p> <p>El conocimiento de la variación de su superficie y los cambios hacia otros usos de suelo pueden significar cambios positivos o negativos en la capacidad de infiltración del terreno.</p> <p>La identificación de las superficies agrícolas abandonadas permitirá establecer áreas en donde se puede reducir la capacidad de infiltración.</p> <p>El conocimiento del tipo de fertilizantes, pesticidas y calidad del agua que se está usando para riego (en zonas agrícolas de riego), permitirá establecer las bases para seleccionar los parámetros a monitorear en los pozos cercanos a las zonas de recarga.</p>	<p>Partir de las condiciones actuales identificadas en los mapas y shapets de este estudio.</p> <p>Evaluación de cambios a través del análisis de imágenes de satélite.</p> <p>Vuelos con drones.</p> <p>Caracterizar la calidad del agua que se usa para riego, en particular si se trata de agua residual sin tratamiento o agua residual tratada.</p>	<p>Superficie en hectáreas o metros cuadrados de las zonas agrícolas.</p> <p>Parámetros de calidad del agua medidos en la caracterización del agua de riego.</p>	<p>En los perímetros de las áreas agrícolas establecidos en los mapas y shapets de este estudio.</p> <p>En las fuentes de agua usadas para el riego de las zonas agrícolas.</p>	Anual	<p>Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.</p> <p>Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.</p> <p>Agrupaciones de regantes.</p> <p>Distrito de Riego Chiconautla.</p> <p>Organizaciones no gubernamentales.</p>
Calidad del agua de los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y de reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA).	<p>Pueden ser fuentes potenciales de contaminación y reducir los servicios ecosistémicos que brindan las zonas de recarga.</p> <p>Conocer su localización y establecer y si están en zonas de recarga donde existan rocas fracturadas en el subsuelo.</p> <p>Identificar comunidades que no cuenten con este tipo de infraestructura y que estén descargando sus aguas residuales directamente en zonas de recarga con potencialidad de infiltración.</p>	<p>Caracterización fisicoquímica y bacteriológica de los efluentes de las PTAR y las RAFA, así como de las descargas de aguas residuales no tratadas.</p>	<p>Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos identificados en la caracterización y comparación contra la normatividad aplicable.</p>	<p>En las zonas urbanas irregulares y poblaciones con pocos habitantes localizados en las zonas de recarga con potencial de infiltración.</p>	<p>Dos veces por año; al inicio de la temporada lluvias y en la temporada de estiaje.</p>	<p>Sistema de Aguas de la Ciudad de México.</p> <p>Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo.</p> <p>Comisión de Agua del Estado de México.</p> <p>Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.</p> <p>Sistemas operadores de agua municipales.</p> <p>Organizaciones no gubernamentales.</p>
Monitoreo de las condiciones actuales y de los resultados de las acciones de la recarga a los acuíferos.	<p>Conocer las condiciones actuales en la recarga, antes de la realización de alguna de las acciones propuestas en este estudio.</p> <p>Conocer los resultados de las acciones que se realicen para mejorar la recarga de los acuíferos.</p>	<p>Seleccionar pozos para el monitoreo.</p> <p>Medir la posición actual de los niveles de agua en los pozos seleccionados.</p> <p>Medir la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua en los pozos seleccionados.</p>	<p>Profundidad del nivel del agua en los pozos.</p> <p>Sólidos totales disueltos.</p> <p>Elementos mayores y parámetros relacionados con procesos de contaminación antropogénica.</p> <p>Edad del agua.</p> <p>Volumen de agua que entra al acuífero por recarga horizontal.</p>	<p>En las áreas limítrofes del acuífero con relación a las zonas de recarga de potencialidad muy alta, alta y media.</p>	<p>Dos veces por año (con excepción de la datación del agua subterránea); al inicio de la temporada de lluvias y en la temporada de estiaje.</p>	<p>Sistema de Aguas de la Ciudad de México.</p> <p>Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo.</p> <p>Comisión de Agua del Estado de México.</p> <p>Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.</p> <p>Sistemas operadores de agua municipales.</p> <p>Organizaciones no gubernamentales.</p>

Tabla 5.5. Propuestas de monitoreo relacionadas con hidrogeología

Acción	Objetivo	Información previa necesaria	Indicadores a utilizar	Frecuencia
Realizar análisis químicos de aguas subterráneas, en pozos seleccionados.	Identificar con base en la salinidad y familia de agua si se tiene agua con poco tiempo de residencia en el acuífero. De igual forma identificar si se están infiltrando en las zonas de recarga sustancias contaminantes relacionadas con las actividades humanas que se desarrollan en estas.		Concentración de sólidos totales disueltos, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, nitritos, sodio, calcio, magnesio, potasio, amonio, fosfatos, pH de campo, conductividad eléctrica de campo, temperatura de campo.	Dos veces por año en los pozos seleccionados.
Realizar perfiles de calidad de aguas subterráneas, en pozos seleccionados.	Conocer si en sentido vertical, en los diferentes horizontes acuíferos hay variaciones en la calidad del agua, a fin de identificar si la comunicación hidráulica entre zonas de recarga y acuífero en variable con la profundidad.	Los pozos seleccionados deberán encontrarse lo más cerca posible de las zonas de recarga y deberán contar con la mayor información posible relacionada con: cortes litológicos, registros eléctricos, análisis químicos históricos, datos de evolución del nivel piezométrico, diseño constructivo, resultados de videograbaciones y trabajos de rehabilitación, entre otra.	Conductividad eléctrica, temperatura, pH, potencial óxido-reducción y oxígeno disuelto.	Una ocasión en cada pozo seleccionado.
Realizar análisis químicos de agua a diferentes profundidades y determinar la edad del agua	En las profundidades en donde se identificó con base en los perfiles de calidad del agua que hay variaciones, identificar si el tiempo de contacto entre agua y parte sólida es variable. Establecer de manera absoluta la edad del agua.		Concentración de los sólidos totales disueltos, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, nitritos, sodio, calcio, magnesio, potasio, amonio, fosfatos, pH de campo, conductividad eléctrica de campo, temperatura de campo. Para determinar la edad del agua: para aguas jóvenes $^3\text{He}/^3\text{H}$, tritio (^3H), deuterio (^2H) y oxígeno 18 (^{18}O) y/o carbono 14 (^{14}C) para aguas viejas.	Una vez en cada pozo seleccionado
Realizar censos detallados de pozos en las zonas próximas a las zonas de recarga con mayor capacidad de infiltración, para diseñar redes de monitoreo piezométrico más detalladas. Realización de pruebas de bombeo en pozos seleccionados., para tener información de conductividad hidráulica para cuantificar el volumen de agua que ingresa al acuífero.	Conocer con detalle el movimiento del agua en las áreas más próximas a las zonas de recarga. Identificar la orientación de donde proviene la recarga y calcular el volumen agua que está ingresando al acuífero y su variación en el tiempo, para conocer los resultados de las acciones que se realicen en las zonas de recarga.	Censos históricos de pozos; datos constructivos de todos los pozos posibles. Información histórica relacionada con la variación de los niveles piezométricos en los pozos.	Variación geográfica y temporal de la profundidad del nivel estático.	Dos veces por año, en el caso de las mediciones de los niveles piezométricos. En el caso de las pruebas de bombeo realización de solo una prueba para cada pozo seleccionado.

Nota: Estas acciones deberán ser realizadas por los diferentes organismos gubernamentales y no gubernamentales, a través de la participación de su personal o de estudios realizados por la iniciativa privada, en este último caso sería conveniente que los términos de referencia fueran revisados con detalle por expertos en temas hidrogeológicos.

En los pozos más próximos a las zonas de recarga se recomienda realizar una selección, particularmente de los que se localizan dentro de los recuadros amarillos de la figura 5.13; para seleccionar los que por su localización geográfica y por tener la información indicada enseguida, puedan ser seleccionados como pozos de monitoreo; la información que sería deseable que tuvieran es la siguiente: corte litológico, registro eléctrico, análisis químicos históricos, datos de nivel piezométrico medidos en diferente épocas, diseño constructivo (diámetro de tubería de ademe, profundidad total, tramos de tubería lisa y de tubería ranurada), trabajos de rehabilitación que se hayan realizado y videograbaciones, entre otra.

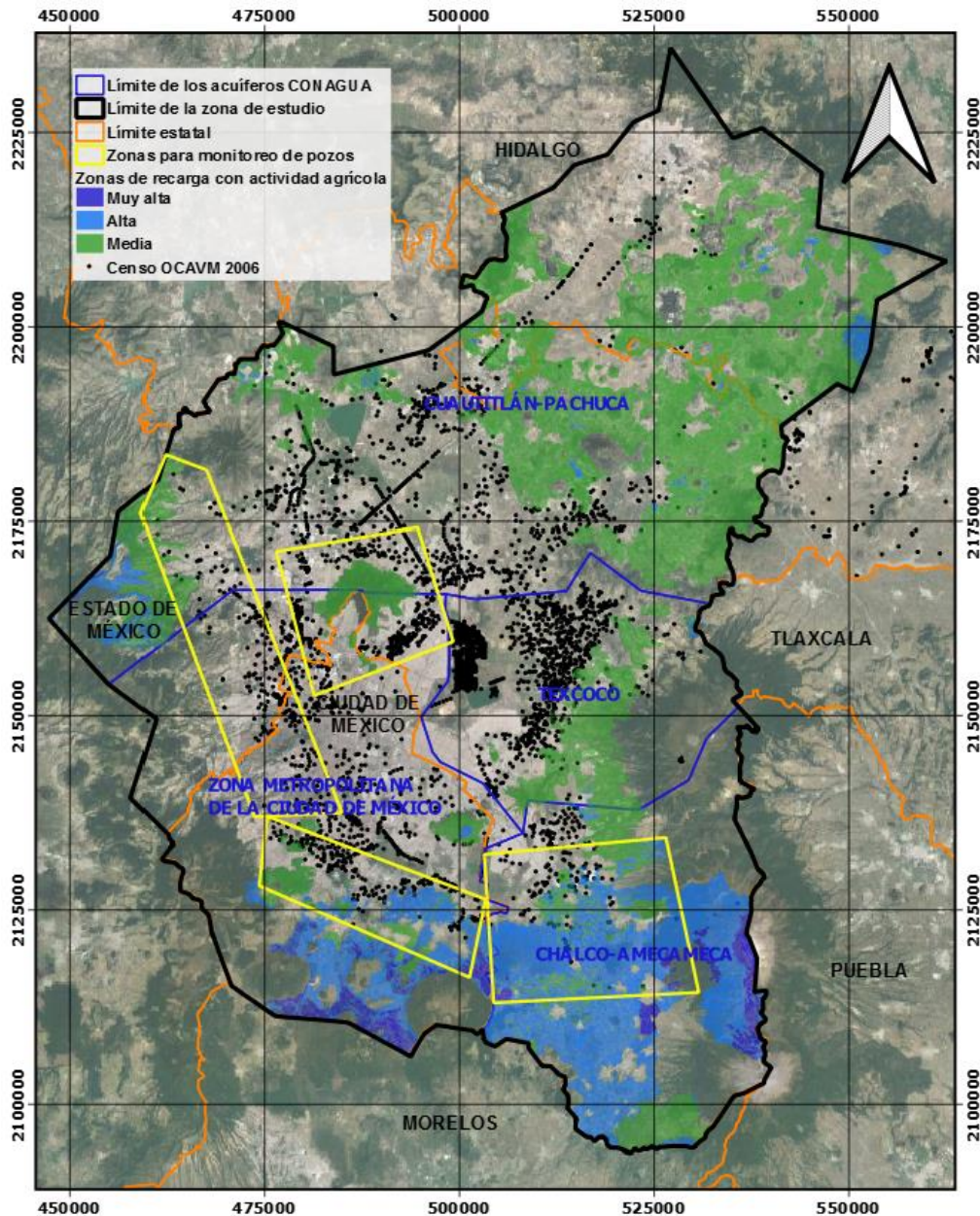


Figura 5.13. Ubicación de pozos para monitoreo aguas abajo de las zonas de recarga

Los pozos seleccionados deberían ser divididos con base en su profundidad total y posición del nivel piezométrico, con objeto de identificar los pozos que representarán el comportamiento del acuífero a diferentes profundidades; de igual forma una vez seleccionados los pozos en algunos de estos, ubicados estratégicamente, se deberían realizar pruebas de bombeo para determinar la conductividad hidráulica del medio acuífero.

Los pozos a utilizar es conveniente que pertenezcan a OCAVM, SACMEX, CAEM y CEA Hidalgo, para evitar problemas de autorización en la realización periódica de los trabajos de monitoreo; cuando los pozos pertenecen a la iniciativa privada puede resultar mucho más complicada la autorización.

Estos pozos deberán ser desequipados temporalmente a fin de realizar las siguientes acciones:

- Realizar videograbaciones con objeto de conocer su estado físico y determinar si está en buenas condiciones o si es conveniente cambiar por otro pozo para el monitoreo.
- Realizar un perfil de calidad del agua en el que se determinen a cada metro o menos, los valores de: conductividad eléctrica, temperatura, pH, potencial óxido-reducción y oxígeno disuelto.
- Con base en los resultados del perfil de calidad, seleccionar las profundidades en donde se tomarán muestras de agua con los siguientes objetivos: conocer la familia de agua a través de los iones mayoritarios; determinar la concentración de sólidos totales disueltos, nitratos y nitritos, entre otros parámetros; establecer los valores de los isótopos estables Deuterio y Oxígeno 18 y determinar la edad del agua, como se indica en la tabla 5.5.
- Este tipo de monitoreo se recomienda hacerlo en diferentes zonas y en cada zona en tres pozos que estén alineados y separados cuando menos a cada 500 m, hacia el interior del acuífero y de la forma más perpendicular posible a lo que indican las redes de flujo del agua subterránea que se diseñen, con la finalidad de establecer diferencias de la concentración de los parámetros conforme el agua se va alejando de su zona de infiltración.

5.4. Cómo mejorar el conocimiento sobre los procesos de recarga

Para mejorar el conocimiento sobre los procesos de recarga, es necesario profundizar más en las variables relacionadas con aspectos geológicos e hidrogeológicos, utilizadas durante el proceso de identificación de las zonas de recarga, en particular en las áreas donde se localizan las de potencialidad muy alta, alta y media.

Es importante tomar en cuenta, que las acciones que se describen para mejorar este conocimiento están basadas en el hecho de que este estudio fue de carácter regional, por lo que se recomienda llevar a cabo las siguientes actividades:

1. Generar nuevos mapas hidrogeológicos, a partir de la homogenización e integración de los mapas geológicos existentes, haciendo intervenir lo reportado en documentos bibliográficos; los mapas generados requerirán de trabajos de gabinete previos en los que se conjunte la información derivada de los documentos y cartografía existente, así como del uso de imágenes de satélite de alta resolución; con los resultados se deberán realizar trabajos de campo en áreas seleccionadas, para verificar su capacidad y potencialidad para permitir la infiltración. La escala a la que estos mapas deberían trabajarse se recomienda que sea de cuando menos 1:20,000 o de más detalle, lo cual estará en función de dos aspectos, las dimensiones de las áreas a estudiar y la existencia de material topográfico en donde se vaya a vaciar la información.

Estos mapas deberán ser complementados con informes en los que se detallen las características del tipo de rocas, suelos, estructuras geológicas y continuidad de los materiales que permitan la infiltración del agua.

Una de las regiones en donde es importante realizar las actividades antes citadas, es la porción oeste de la Sierra de Las Cruces, en donde se recomienda detallar en la cartografía geológica-hidrogeológica de las rocas volcánicas que están en contacto con la Formación Tarango, así como en las características físicas de esta última, que en estricto ya no forma parte de la citada sierra; en este caso el objetivo particular sería definir el origen del agua que llega y alimenta a los pozos localizados en la Formación Tarango y establecer si toda es subterránea o si una porción importante de esta es superficial y se infiltra al llegar al contacto con los materiales volcánicos y sedimentarios de la Tarango.

Lo antes expuesto será un importante aporte técnico-científico, para confirmar o no la supuesta importancia de la Sierra de Las Cruces como zona de recarga al acuífero de la Cuenca de México.

Otra región que es relevante trabajar con detalle es la Sierra de Chichinautzin, en donde se recomienda que la cartografía generada delimite las áreas en donde afloran coladas de roca fracturadas, sin cobertura de suelo y aquellas que están cubiertas por suelos poco compactos y de poco espesor. En estas áreas será muy importante realizar acciones de conservación a fin de impedir cambios en el uso del suelo.

2. Para mejorar el conocimiento de los procesos de recarga, se recomienda realizar censos de pozos de todos los existentes, próximos a las zonas de recarga potencialmente relevantes, para generar y analizar nuevas redes de monitoreo piezométrico, a fin de conocer con detalle la forma en que se mueve el agua subterránea y la procedencia de esta.

Una vez establecidas estas redes de monitoreo es conveniente realizar pruebas de bombeo en pozos ubicados estratégicamente, para evaluar la conductividad hidráulica (permeabilidad determinada de forma cuantitativa), con objeto de cuantificar los volúmenes de agua que están ingresando al acuífero; esta actividad permitirá confirmar los resultados de las acciones realizadas y conocer el grado de comunicación hidráulica que hay entre las zonas de infiltración y el acuífero.

3. Para conocer con más detalle la continuidad de los materiales volcánicos y sedimentarios permeables y con esto la relación que hay entre los procesos de infiltración y recarga, se requiere analizar los cortes litológicos y registros eléctricos que proporcionen SACMEX, CAEM, CEA Hidalgo y OCAVM, en las zonas más próximas a las zonas de recarga.
4. Mejorar el conocimiento que se tiene del agua que llega al acuífero (en las zonas del acuífero más cercanas a las zonas de recarga), por medio del análisis de información histórica relacionada con la calidad del agua y de los caudales que se extraen en los pozos que controlan los sistemas operadores de agua. Al comparar esta información, con la que se obtenga de las actividades de monitoreo propuestas, se podrá profundizar en el conocimiento de los procesos de recarga y posteriormente evaluar los resultados de las acciones propuestas en este estudio, así como el grado de comunicación hidráulica que hay entre las zonas de recarga y el acuífero.
5. Identificar si los contaminantes generados en las zonas habitadas o en las zonas agrícolas, localizadas sobre las zonas de recarga, están llegando hasta los pozos más próximos a estas o bien si la capacidad de autodepuración del terreno está atenuando el efecto de contaminación del agua subterránea.

En resumen, para mejorar el conocimiento sobre los procesos de recarga, es necesario dar continuidad a este estudio, a través las actividades recomendadas en el portafolio de acciones y a las actividades propuestas, para lo cual se considera fundamental integrar a todos los actores relacionados con la administración, manejo e investigación del agua subterránea en la Cuenca de México y con la búsqueda de fuentes de financiamiento para la ejecución de las acciones descritas.

6. REFERENCIAS

- Allen, R., Pereira, L. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Ed.) FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- Andreu Ibarra, B., Morales Escalante, R., Mariano, R. V., & Guzmán Aguirre, A. (1983). Estudio geohidrológico regional de la zona Chalco-Amecameca, Estado de México. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Arabameri, A., & Reza Pourghasemi, H. (2019). Spatial Modeling of Gully Erosion Using Linear and Quadratic Discriminant Analyses in GIS and R. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, 299-321. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00013-2>.
- Arce, J. L., W. Layer, P., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., Vásquez-Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 320-332.
- Arce, J., Layer, P., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Rangel, E., & Escolero, O. (2013). New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*(266), 34-49.
- Argaz, A., Ouahman, B., Darkaoui, A., Bikhtar, H., Yabsa, K., & Laghzal, A. (2019). Application of Remote Sensing Techniques and GIS-Multicriteria decision Analysis for Groundwater Potential Mapping in Souss Watershed, Morocco. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 411-421. Obtenido de <http://www.jmaterenvironsci.com>
- Ariel Consultores, S.A. (2007a). Apoyo técnico para la Actualización de la disponibilidad del Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (901). Ciudad de México: CONAGUA, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.
- Ariel Consultores, S.A. (2007b). Apoyo técnico para la actualización de la disponibilidad del Acuífero Chalco-Amecameca (1506). Ciudad de México: CONAGUA, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.
- Ariel Consultores, S.A. (2007c). Apoyo técnico para la actualización de la disponibilidad del Acuífero Texcoco (1507). Ciudad de México: CONAGUA, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.
- Ariel Consultores, S.A. (2007d). Apoyo técnico para la actualización de la disponibilidad del Acuífero Cuautitlán-Pachuca (1508). Ciudad de México: CONAGUA.
- Benton y Asociados, S. C. (2013). Proyecto para la verificación de la productividad y capacidad específica de pozos existentes en la zona sur en los basaltos de la formación Chichinautzin del Valle de México. Ciudad de México: SACMEX.
- Berg, Ch., Rogers, S., & Mineau, M. (2015). Building scenarios for ecosystem services tools: Developing a methodology for efficient engagement with expert stakeholders. *Futures*, 68-80. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2015.10.014>
- Birkle, P., Torres-Rodríguez, V., & González Partida, E. (1998). The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption. *Hydrogeology Journal*, 500-517.
- Cambell, J., & Wynne, R. (2013). Introduction to remote sensing. *Remote sens*(5), 282-283.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2013). Introduction to Remote Sensing. En K. P. Vadrevu, Introduction to Remote Sensing (págs. 117-118). New York, USA: Guilford Press. doi: <https://doi.org/10.1111/phor.12021>

- Cardona Benavides, A., & Hernández, N. (1995). Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el valle de México. *Ingeniería Hidráulica en México*(3), 71-90.
- CONAGUA. (2017). Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2018). CONAGUA, Aguas Subterráneas, Ciudad de México. Obtenido de Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México (0901), Distrito Federal:
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/cmdx/DR_0901.pdf
- CONAGUA. (2018). CONAGUA, Aguas Subterráneas, Estado de México. Obtenido de Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Texcoco (1507), Estado de México:
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1507.pdf
- Custodio-Gimena, E., & Llamas-Madurga, M. R. (1983). Hidrología subterránea (Segunda ed., Vol. I). Barcelona: OMEGA.
- DGCOH. (1992). Plano de localización de manantiales y corrientes superficiales. Ciudad de México: DGCOH.
- Division, C. E. (1986). National Engineering Handbook TR-55. United States: United States Department of Agriculture.
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & R., M. T. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 436-437.
- Edmunds, W., Carrillo-Rivera, J., & Cardona-Benavides, A. (2002). Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *Journal of Hydrology*, 1-24. Recuperado el 2019
- Escolero-Fuentes, O., Gutiérrez Ojeda, C., & Mendoza Cazares, E. Y. (2017). Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia latinoamérica. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Fu, B. P. (1981). On the calculation of the evaporation from land surface (in Chinese). *Sci. Atmos. Sin.*, 23-31.
- García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 158-178.
- Gerencia de Aguas Subterráneas, (2018). sigagis.conagua. Obtenido de
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1507.pdf
- Gil González, W. j., Mora Flórez, J. J., & Pérez Londoño, S. M. (2014). Análisis del procesamiento de los datos de entrada para un localizador de fallas en sistemas de distribución. *Tecnura*, 64-75. Obtenido de
<http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v18n41/v18n41a06.pdf>
- González Torres, E., Moran Zenteno, D. J., Mori, L., & Martiny, B. M. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la sierra madre del sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 285-297. Obtenido de
<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2015v67n2a11>
- Hernández Jiménez, F. (2014). Obtención del número de curva (NC) para la República Mexicana mediante el uso de sistemas de información geográfica, aplicando la metodología del TR-55. México <D.F.
- ICA- COTRISA. (2016). Túnel Tren Interurbano México-Toluca. Túnel Tren Interurbano México-Toluca (pág. 41). México: Secretaría de comunicaciones y trnsportes.

- IKTANCORP. (2020). Todo Lo Que Debes Saber Sobre Uso de Suelo en CDMX. Recuperado en 2020, de <https://iktancorp.com/>: <https://iktancorp.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-uso-de-suelo-en-cdmx/>
- Indigo, I. A. (2017). Indigo inteligencia agrícola. Obtenido de <https://www.indigoia.com/aquiare-vigor>.
- INEGI. (2017). gob.mx. Obtenido de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geoestadistica-urbana-y-rural-amanzanada-planeacion-de-la-encuesta-intercensal-2015>
- ININSA, S.A. (1986). Manual Técnico de Diseño, construcción, operación y mantenimiento de pozos en las cuencas de México y del Alto Lerma, México. México: SARH.
- IPCC. (2013). Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge: Cambridge University Press. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- Le Maitre, D. C., Scott, D. F., & Colvin, C. (1999). A review of information on interactions between vegetation and groundwater. *Water SA*, 2(25), 137-152. Obtenido de https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/524/Le%20maitre%20_1999.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lesser y Asociados S.A. de C.V. (2008). Estudio geohidrológico del acuífero Cuautitlán-Pachuca. Pachuca, Hidalgo: Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo.
- Lugo-Hubp, J., & Salinas-Montes, A. (1996). Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 240-251.
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII(3), 379-424.
- Martínez de Azagra Paredes, A. (2019). Particularización al método de los coeficientes de escorrentía. Obtenido de <http://www.oasification.com/archivos/Coefficientes%20de%20escorrent%C3%ADa.pdf>
- Meneses-Tovar, C. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación. *Unasyva* 238, Vol. 62, , 39.
- Morales-Casique, E., Escolero, O. A., & Arce, J. L. (2014). Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 64-75. Recuperado en 2019
- Moreno-Jiménez, J. M. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 28-77. Obtenido de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32914865/02t.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DEL_PROCESO_ANALITICO_JERARQUICO_AHP_FU.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=ASIAIUSB6BAOXFDU6VO%2F20200325%2Fus-east-1
- Natural Resources Conservation Service. (2009). Hydrologic Soil Groups. En N. R. Service, *National Engineering Handbook*. United States: United States Department of Agriculture.
- OCAVM. (2011). Procesamiento de información de niveles piezométricos de la Cuenca del Valle de México, Años 2011. Ciudad de México: OCAVM, CONAGUA.

- OCAVM. (2018). Estudios técnicos, factibilidad y proyecto ejecutivo-piloto de recarga artificial en el Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Ciudad de México: OCAVM, CONAGUA.
- OIMT, O. I. (2002). O Guidelines for the restoration, of degraded and secondary tropical forests. Development, ITTO Policy.
- Pacheco, J. F., & Contreras, E. (2008). Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos. Santiago de Chile: Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social, Publicación de las Naciones Unidas.
- PEMEX. (2010). Provincias Geológicas de México. Ciudad de México: Pemex Exploración y Producción, Subdirección Técnica de Exploración.
- Peña, L. C. (2002). Estudio geológico de la zona poniente del Valle de México e interpretación estratigráfica de los pozos de agua a cargo de la DGCOH localizados en las delegaciones Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Alvaro Obregon, Magdalena Contreras y Cuajimalpa, México, D.F. Ciudad de México: Secretaria de Obras y Servicios, Gobierno del Distrito Federal.
- Peña, M. (2007). Sensores hiperespectrales: . Ecoamerica, 68. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/259850980_Sensores_hiperespectrales_Los_ul_timos_avances_en_teledeteccion
- Saaty, T. L., & Kulakowski, K. (1986). Axioms of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and its Generalization to Dependence and Feedback: The Analytic Network Process (ANP). Management Science, 841-855.
- SGM. (2009). Léxico Estratigráfico de México. Obtenido de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Pachuca.pdf>
- SGM. (2008). Geología y petrogénesis de los prismas basálticos, Santa María Regla, Hgo. geocienciasgm, 5-24.
- SGM. (2009). Léxico Estratigráfico de México. Obtenido de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Tarango.pdf>
- SGM. (2009). Léxico Estratigráfico de México. Obtenido de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/DonGuinyo.pdf>
- SGM. (2014). Léxico Estratigráfico de México. Obtenido de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Zempoala.pdf>
- SGM. (2014). Léxico Estratigráfico de México. Obtenido de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Xochitepec.pdf>
- SGM. (2014). Léxico Estratigráfico de México, Llano grande. Obtenido de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/LlanoGrande.pdf>
- SGM. (2014). Léxico Estratigráfico de México. El Pino. Obtenido de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/EIPino.pdf>
- Tarbut, E., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la Tierra, Una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Viñas Rubio, J. M. (2012). El clima de la tierra a lo largo de la historia. (J. M. Viñas, Ed.) Recuperado en 2020, de <http://www.divulgameteo.es/>: <http://www.divulgameteo.es/uploads/Clima-Tierra-historia-JMV.pdf>
- Zarandian, A., Baral, H., Stork, N., & M., L. (2017). Modeling of ecosystem services informs spatial planning in lands adjacent to the Sarvelat and Javaherdasht protected area in northern Iran. Land Use Policy, 487-500. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/311582431_Modeling_of_ecosystem_services_informs_spatial_planning_in_lands_adjacent_to_the_Sarvelat_and_Javaherdasht_protected_area_in_northern_Iran

Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W. R., Chiew, F. H., Western, A. W., & Briggs, P. R. (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 40.

Zúñiga Arista, A. R. (2003). Análisis de la secuencia estratigráfica y construcción de secciones en la zona entre el Pedregal de San Angel y el Cerro de la Caldera con base en la correlación física y en la interpretación estratigráfica de 75 pozos de las delegaciones Coyoacán e Iztapalapa. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal.