

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO**

FACULTAD DE GEOGRAFÍA

**Análisis de cambio de uso del suelo e impacto en la
recarga de acuíferos en Calimaya, Estado de México**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN ANÁLISIS ESPACIAL Y GEOINFORMÁTICA**

Presenta:

Guadarrama Martínez Sergio

No. de cuenta: 0925491

Tutor Académico (Director de tesis):

Dr. José Isabel Juan Pérez

Tutora Adjunta (Co directora):

Dra. Xanat Antonio Némiga

Tutor adjunto (Co director):

Dr. José Luis Montesillo Cedillo

19 de octubre, 2023

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
3.	PREGUNTAS QUE GUÍAN LA INVESTIGACIÓN	7
4.	HIPÓTESIS	8
5.	OBJETIVOS	14
5.1.	Objetivo general.....	14
5.2.	Objetivos específicos.....	14
6.	JUSTIFICACIÓN.....	15
6.1.	Justificación geográfica - ambiental	15
6.2.	Justificación socio - económica	16
6.3.	Justificación política	17
6.4.	Justificación académica – metodológica.....	18
6.5.	Justificación Socio-Cultural.....	19
7.	ANTECEDENTES	22
8.	MARCO LEGAL	28
8.1.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	28
8.2.	Ley Minera.....	29
8.3.	Ley Federal de Responsabilidad Ambiental	31
8.4.	Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano 32	
8.5.	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	34
8.6.	Ley de aguas nacionales	35
8.7.	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable	36
8.8.	Ley General de Vida Silvestre	38
8.9.	Ley General de Cambio Climático	39
8.10.	Ley Agraria.....	40
8.11.	Norma Técnica Estatal Ambiental bajo la denominación NTEA-017-SeMAGEM-DS-2016 40	
9.	MARCO TEÓRICO.....	46

9.1.	Geografía cuantitativa.....	49
9.2.	Geografía automatizada.....	52
9.3.	Geografía del paisaje.....	53
9.4.	Geografía ambiental.....	56
9.5.	Ecología cultural.....	57
10.	MÉTODOLOGÍA.....	60
10.1.	Trabajo de gabinete.....	60
10.2.	Trabajo de Campo.....	62
10.3.	Fotointerpretación.....	63
10.4.	Clasificación supervisada.....	64
10.5.	Método de Prevert (1998) y Moll (2013).....	67
11.	ESPACIO FÍSICO Y UNIVERSO DE ESTUDIO.....	72
11.1.	Geología.....	73
11.2.	Geomorfología.....	75
11.3.	Edafología.....	78
11.4.	Hidrología.....	80
11.5.	Clima.....	82
11.6.	Población.....	85
12.	RESULTADOS.....	87
12.1.	Análisis del uso de suelo y vegetación.....	87
12.2.	Coeficiente de escorrentía superficial modificando el método de Prevert.....	100
12.3.	Resultados del trabajo de campo.....	115
13.	DISCUSIÓN.....	128
14.	CONCLUSIONES.....	135
15.	RECOMENDACIONES.....	139
16.	BIBLIOGRAFÍA.....	146
17.	ANEXO I. DATOS RESULTANTES DE LAS CAPAS VECTORIALES CON EL MÉTODO DE PREVERT Y MOLL.....	155
18.	ANEXO II. TRABAJO DE CAMPO PARA IDENTIFICAR CAMBIOS DE USO DE SUELO Y POSIBLES IMPACTOS ACTUALES.....	162
19.	ANEXO III. TRABAJO DE CAMPO PARA REALIZAR MUESTREOS DE FILTRACIÓN DE AGUA.....	192

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se realizó en el municipio de Calimaya, Estado de México, México, territorio caracterizado por procesos socioambientales relacionados con el cambio de uso del suelo, principalmente, extracción de recursos pétreos, agricultura convencional en espacios con vocación forestal y construcción de conjuntos habitacionales; situación que trae consigo afectaciones al ambiente, fragmentación y transformación del paisaje e impacto en el bienestar social. La investigación se realizó entre 2021 y 2023.

En esta investigación se realizó la evaluación del cambio de uso de suelo en el territorio del municipio de Calimaya, enfocada principalmente a las zonas de bosque, pastizal, agricultura, extracción de recursos pétreos (minas) y espacios habitacionales, ya que en la actualidad estos lugares representan factores de cambio e impacto, toda vez que afectan de manera crítica a los componentes del ambiente, a los procesos ecológicos y, por consiguiente, al desarrollo humano en los distintos entornos del territorio. La situación anterior está asociada con múltiples causas, por ejemplo, el desarrollo de actividades humanas no sustentables - minería y agricultura-, manejo inadecuado de recursos naturales y mínima aplicación de los instrumentos de la política ambiental y de planeación urbana.

El objetivo de la investigación fue determinar y evaluar los procesos socioambientales de cambio de uso de suelo en el territorio de Calimaya, Estado de México en el periodo comprendido de 1997 hasta 2022, esto mediante la aplicación de diversos métodos y herramientas de sistemas de información geográfica, teledetección y técnicas de trabajo de campo, esto en asociación con fundamentos teóricos de geografía ambiental, geografía rural, geografía económica y ecología cultural, los cuales estuvieron inmersos en el contexto de la teoría de la complejidad y la teoría general de sistemas, teniendo como ejes principales de análisis los procesos de cambio de uso del suelo y su impacto en la recarga de los mantos acuíferos. Con los resultados obtenidos se demuestra que los factores vinculados con las actividades humanas no sustentables provocan cambios de uso de suelo y, por consiguiente, impactos en la recarga de acuíferos, los cuales están representados en mapas, tablas y gráficas. Se concluye que durante el periodo de estudio (25 años) si existe incremento en la escorrentía superficial derivado de los procesos de cambio de uso de suelo, lo cual provoca

afectaciones a los acuíferos, así mismo, se ha registrado mayores volúmenes de precipitación en la porción centro – sur del municipio.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los espacios geográficos urbanos y rurales del territorio mexicano cuentan con amplia diversidad topográfica, de climas, de tipos de rocas, suelos, vegetación y de formación de paisajes, situación asociada con la variedad de ecosistemas presentes en el territorio de México, además, de estar en constantes procesos de cambio por diferentes circunstancias, fenómenos y manifestaciones, principalmente por actividades humanas no sustentables que generan impactos al bienestar social de la población.

El Municipio de Calimaya, Estado de México, debido a su ubicación geográfica, en el contexto de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y en la porción de recarga del Acuífero del Valle de Toluca, no está exento de la problemática nacional, pues se encuentra en proceso de transición, entre el ámbito rural y el ámbito urbano, además, por sus características fisiográficas, está sujeto a fuertes presiones demográficas, económicas y ambientales, lo cual incide en procesos socioambientales asociados con el cambio de uso del suelo y consecuentemente, afecta a la recarga de acuíferos.

Las condiciones fisiográficas del Municipio de Calimaya inciden en la generación de múltiples problemas, como es el caso de la intensidad y frecuencia de los procesos de cambio de uso del suelo, es decir, de uso forestal y uso agropecuario a uso urbano o para la extracción de recursos pétreos. La agricultura en sus diversas modalidades -riego, temporal-, así como la extracción de recursos pétreos y el establecimiento masivo de asentamientos humanos (fraccionamientos urbanos para atender necesidades de vivienda) en zonas agrícolas llevan implícitas diversas alteraciones, por ejemplo, disminución de la vegetación natural, remoción de suelo arable, transformación del paisaje, contaminación ambiental, disposición inadecuada de residuos sólidos, disminución de la recarga de acuíferos, entre otras.

Los procesos de cambio de uso de suelo están vinculados con múltiples factores, siendo significativos los de tipo ambiental y socioeconómico, también están influyendo en la disminución de especies vegetales, así como afectación y desaparición del hábitat de algunas especies animales, principalmente en las porciones del municipio ubicadas en las pendientes

del volcán Xinantecátl, declarado desde 1936 como Área Natural Protegida a partir de la cota 3 000 m.s.n.m hacia las porciones de mayor altitud, primero decretado como Parque Nacional, y modificado en el año 2013 con la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna.

Debido a las condiciones geológicas, la extracción de materiales pétreos es una de las actividades que se practican con más mayor frecuencia e intensidad en el territorio municipal de Calimaya, además de ser de las menos sustentables y controladas por las dependencias gubernamentales. Las actividades extractivas hacen uso de los recursos del suelo y del subsuelo en forma permanente, además, generan movimientos de material rocoso y edáfico y la eliminación de la cubierta vegetal, provocando procesos de cambio de uso del suelo, los cuales están asociados de manera directa e indirecta con daños a la calidad del agua, modificación de cauces de ríos y arroyos, disminución y pérdida de cubierta vegetal, procesos erosivos, modificación del relieve, fragmentación y transformación del paisaje y afectación en la recarga de acuíferos, afectando con esto, las condiciones de vida de la población.

3. PREGUNTAS QUE GUÍAN LA INVESTIGACIÓN

Con base en lo expuesto en los párrafos anteriores enseguida se enuncian las preguntas que guiaron el desarrollo de la investigación:

- a) ¿Qué factores y procesos han ocasionado el cambio de uso de suelo en el municipio de Calimaya, Estado de México durante el periodo de 1997 hasta 2022?
- b) ¿Por qué ocurren procesos de cambios de uso de suelo en el Municipio de Calimaya, Estado de México?
- c) ¿Qué impactos provocan los cambios de uso de suelo en la recarga del acuífero en el municipio?

4. HIPÓTESIS

A manera de hipótesis, las respuestas a las preguntas anteriores y de acuerdo con el orden con el que fueron planteadas, se expone lo siguiente: existen diferentes factores, procesos y actividades humanas no sustentables que ocasionan cambios de uso de suelo en el territorio del municipio de Calimaya, Estado de México, y que se reflejan en las condiciones ambientales actuales.

Los principales factores son los siguientes:

- Factor geográfico. Las características geográficas del municipio de Calimaya inciden en la problemática ambiental afectando su grado de vulnerabilidad, la topografía local, es decir, el tipo de relieve y la intensidad de las pendientes.
- Factor geológico. Las condiciones geológicas del lugar inciden a través de la presencia de numerosas fallas y fracturas del sustrato rocoso y que influyen en las propiedades físicas del suelo. Y por las diferentes etapas de erupciones que ha tenido el volcán Chicnautécatl (Xinantécatl), donde los materiales expulsados han sido la base de los diferentes tipos de roca y materiales que se encuentran en el territorio de Calimaya, entre ellos, basaltos, areniscas, y las rocas pómez (tepojal). Geológicamente el municipio se encuentra situado sobre dos tipos de unidades litológicas (toba de origen volcánico y aluvial de origen lacustre), que si bien, no presentan por si solas factores limitantes para el desarrollo urbano, sí es necesario establecer medidas pertinentes para que se constituyan en un elemento potencial a desarrollar tanto en términos de uso del suelo y asentamientos humanos, como de su explotación económica, pero tratando de conservar las actividades agropecuarias practicadas desde hace varias décadas. En Calimaya existen yacimientos de arena, grava y pumitas, que tienen cotización en el mercado de la construcción; situación preocupante ya que la suma de la superficie de éstas representa una tercera parte del total de las zonas urbanas del municipio. A esta velocidad, las áreas utilizadas para la extracción de materiales pétreos, será aún mayor que las zonas destinadas a la población (Atlas de riesgo, Calimaya, 2012).
- Factor climático. La influencia del clima se refleja a través del régimen pluviométrico (Galdámez, 2000). El clima en el municipio de Calimaya se

clasifica como templado lluvioso (Cwbg), con lluvias predominantes en verano. La temperatura del mes más cálido es inferior a 22 °C y se registra antes del 21 de junio. Suelen presentarse heladas en los meses de noviembre a enero y ocasionalmente en mayo (heladas tardías) y en septiembre (heladas tempranas). Éstas últimas son altamente perjudiciales para la agricultura. La sequía comprende de noviembre a marzo. El periodo de lluvia es de mayo a agosto, así entre junio y septiembre se gestan las condiciones atmosféricas más húmedas, con precipitaciones máximas de 190 mm en el mes de julio. Anualmente la precipitación oscila entre 800 y 900 mm. La temperatura media anual varía entre 12 °C y 14 °C (Ayuntamiento de Calimaya, 2023).

- Factor hidrológico. El sistema hidrográfico del municipio de Calimaya está determinado por las condiciones geográficas, topográficas, geomorfológicas y climáticas. Los elementos hidrológicos más importantes son los arroyos Las Cruces, Los Temascales, Las Palmas, Ojo de Agua, Zacango y escurrimientos que incrementan su caudal durante la temporada de lluvias, como es el caso del Río Grande. El municipio no tiene cuerpos de agua superficiales permanentes, sin embargo, durante el período de lluvias, en algunas zonas planas se forman depósitos de agua que posteriormente son utilizados como bebederos para los animales domésticos mayores, además es una fuente potencial significativa para la recarga de los mantos acuíferos. En la porción oriente del municipio existe una zona inundable (cerca de la Concepción Coatipac y el Fraccionamiento Valle del Nevado), la cual es importante para la recarga de la Ciénaga del Río Lerma (GEM-UAEM, 1995).
- Factor económico. La economía tiene influencia principal en las actividades que realiza la sociedad sobre el territorio en sus diferentes niveles, desde lo local, regional, estatal, nacional y en ocasiones, lo internacional. Sin embargo, cada una de las acciones que se realizan para obtener una ganancia, que casi siempre es económica, suele tener consecuencias, algunas mayores que otras. Cuando una actividad no es económicamente viable -ni sustentable-, también trae consecuencias, como la migración, crecimiento urbano, abandono de áreas rurales, vulnerabilidad y degradación ambiental, deterioro de los recursos

naturales, así como la ocupación de terrenos inadecuados para la construcción de viviendas, esto como producto de la creciente demanda de un lugar para vivir.

- Factor sociocultural. La tradición por la siembra de maíz y papa continua desde hace más de 200 años en el territorio municipal, sin embargo, las técnicas de siembra han cambiado y evolucionado, principalmente en la parte mecánica que, aunque ha optimizado el tiempo que se tarda en sembrar y cosechar, así como diferentes trabajos que antes representaban esfuerzo y tiempo (fumigar o aplicar abono), ha olvidado otros temas como las técnicas de siembra tradicionales para evitar procesos erosivos. Aunado a esto, el crecimiento de las zonas habitacionales en la porción baja del territorio de Calimaya, ha traído como consecuencia que muchos de los campesinos que sembraban en esas zonas que ahora son concreto, tengan ocupar terrenos para la agricultura en partes altas, trayendo consigo otros impactos como la deforestación y el aumento de la erosión. En el municipio, derivado del establecimiento de fraccionamientos -conjuntos residenciales- con casas que sólo pueden adquirir personas de nivel económico alto, y que, por esto, la mayoría de quienes las adquieren son de la Ciudad de México, de Toluca y Metepec, situación que ha favorecido grupos con diferentes condiciones socioculturales y económicas.

Los principales procesos son los siguientes:

El municipio de Calimaya tiene factores que comparte o que son similares a varios municipios del Estado de México, por lo que, sus problemas -principalmente ambientales- en parte, también son similares, sin embargo, el factor detonante de éstos suele ser las actividades económicas en interacción con otros factores ya mencionados.

Todo el territorio del municipio de Calimaya tiene propietario o es administrado por algunas asociaciones como los bienes comunales, bienes ejidales, propiedades particulares, empresas, y el ayuntamiento; todos pretendiendo obtener alguna retribución de sus terrenos, aprovechando los recursos disponibles: forestales, agrícolas, pastizales, mineros.

El cambio de uso de suelo siempre ha existido en el territorio municipal, sin embargo ha sido más notorio en procesos como la tala desmesurada que ocurrió en la década de 1980 con

permisos otorgados por PROTINBOS (actualmente PROBOSQUE), aunque todavía son significativos estos cambios, principalmente por el crecimiento urbano exponencial que ha tenido en los últimos 10 años y que continúa principalmente en las zonas forestales, donde siempre han existido procesos de deforestación a escala local y con fines de subsistencia familiar, y después por la deforestación industrial ya sea con permisos o sin permisos (ilegal), la cual, además se hace de forma inadecuada; también existe la deforestación para la apertura de espacios destinados a la agricultura, incrementado así la frontera agrícola. Algunos agricultores hacen esto mediante la provocación de incendios forestales, para el establecimiento de cultivos de maíz, papa, haba, chícharo y avena. Muchos de los terrenos agrícolas -parcelas-, se localizan en zonas de laderas o pendientes altas, donde realizan inadecuadas prácticas agrícolas, utilizando agroquímicos que generan contaminación de agua y suelo, y por la forma de la siembra, provocan erosión e incluso pueden generar movimientos de remoción en masa que tienen como consecuencia la pérdida de los suelos y afectaciones a la integridad de la población e infraestructura urbana.

La deforestación y los incendios afectan directamente a las especies de flora, y en el caso de los animales silvestres, migran a lugares de difícil acceso o se extinguen, y al perder estos servicios ecológicos, como en el caso de la vegetación que sirve de contención de suelo y de los estratos geológicos, entonces se incrementan los procesos erosivos y se pueden provocar movimientos de remoción en masa, esto por no haber raíces que detengan el suelo.

La agricultura y el comercio -recursos pétreos, productos agrícolas, artesanías- han sido las actividades humanas más importante del municipio de Calimaya, aunque por sus condiciones geológicas, existe un proceso de transición a la minería (extracción de materiales pétreos), en la porción centro-poniente del municipio se extrae roca pómez, mientras en el centro-oriente se extrae roca pómez, arena y basaltos (que mediante la trituración y molienda se obtiene grava), ocasionando disminución del recurso agua en los manantiales superficiales, esto asociado con el movimiento y remoción de los estratos, remoción de suelo y la vegetación. En estas zonas de extracción de materiales pétreos no hay control ni vigilancia, por lo que, los materiales se extraen de forma rápida para evitar el pago de permisos e impuestos, además de pagar a un menor número de empleados, obteniendo así más ganancias

para el propietario. Al extraer mayores volúmenes de materiales, no interesan los límites, por lo que invaden espacios donde hay especies vegetales y en ocasiones a otros terrenos.

Algunas de las zonas de extracción de materiales pétreos remueven el suelo arable, extraen el material pétreo, y después disponen en ese mismo lugar el suelo que han quitado, aunque este ya no contenga la misma cantidad -volumen y nutrientes-, disminuyendo así la producción agrícola. Durante el proceso de extracción y transporte se genera polvo, afectando a la población y vegetación adyacente. Los camiones de carga y maquinaria pesada generan contaminación ambiental¹ -al aire, agua, suelo- y desde luego, ruidos y vibraciones.

Algunas zonas de extracción de roca pómez (tepojal) están ubicadas en el pie de monte de las formaciones volcánicas, que por su pendiente, pueden generar procesos erosivos, cárcavas e incluso movimientos de remoción en masa, procesos que representan riesgo para los asentamientos humanos cercanos.

Las minas ubicadas en las zonas centro, norte y oriente del municipio -por su profundidad son llamados socavones-, al terminar de extraer el material pétreo no se realizan medidas de recuperación ni mitigación de impacto ambiental y generalmente suelen ser abandonadas, convirtiéndose en tiraderos de basura clandestinos (a cielo abierto). En estos tiraderos se generan lixiviados y olores desagradables (contaminación olfativa) y posibles afectaciones al agua subterránea, situación que también puede incidir en la salud de la población.

Con la construcción de fraccionamientos residenciales ha ocurrido un aumento de población y las vías de acceso y salida del municipio ya no son suficientes. En estos lugares se colocan placas de concreto que provocan impactos a las propiedades físicas del suelo -disminuyen la permeabilidad e infiltración hacia el subsuelo-, incluso aunque existan áreas verdes.

Aunado a la situación anterior, el aumento de población hace que exista mayor demanda de servicios públicos, como agua potable, y en virtud de no cumplir con la normatividad

¹ La contaminación ambiental en el municipio de Calimaya se vincula de manera directa e indirecta con la extracción, procesamiento y transporte de materiales pétreos, actividades que generan residuos peligrosos como hidrocarburos y neumáticos. El paisaje (condiciones geológico-geomorfológicas) también es afectado por las actividades extractivas.

ambiental, se desechan las aguas negras en los cauces de ríos más cercanos a los conjuntos residenciales, provocando contaminación ambiental y afectaciones a la salud.

Los procesos de cambio de uso de suelo en el Municipio de Calimaya, Estado de México han estado vinculados a múltiples procesos, pero sobre todo para satisfacer necesidades básicas como la vivienda y la alimentación, además de estar vinculados con otras condiciones socioeconómicas como el empleo, movilidad, tiempo, costos de suelo, pago de servicios públicos, accesibilidad, disposición de yacimientos geológicos, entre otros.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Aplicar herramientas geotecnológicas para determinar y evaluar los procesos de cambio de uso del suelo y los impactos que provocan en la recarga de mantos acuíferos superficiales y el acuífero subterráneo del municipio de Calimaya, Estado de México.

5.2. Objetivos específicos

- Identificar los factores que ocasionan los procesos de cambio de uso de suelo en el municipio de Calimaya, Estado de México.
- Determinar y evaluar el cambio de uso de suelo en el municipio de Calimaya, Estado de México en el periodo comprendido de 1997 hasta 2022.
- Aplicar herramientas geotecnológicas para asociar los cambios de uso de suelo, el nivel de escorrentía superficial y la precipitación, y su impacto en la recarga de los mantos acuíferos en el territorio del municipio de Calimaya, Estado de México.

6. JUSTIFICACIÓN

Estudiar los procesos y actividades que provocan el cambio de uso de suelo y su impacto en la recarga de los mantos acuíferos tiene múltiples justificaciones, para el caso de la investigación que se realizó en el espacio geográfico que comprende el municipio de Calimaya, Estado de México, se expone lo siguiente:

6.1. Justificación geográfica - ambiental

En el contexto geográfico es importante analizar los procesos asociados con el cambio de uso de suelo que ocurren en los espacios geográficos donde se realizan actividades humanas no sustentables, como es el caso de la minería y la agricultura. Los principios de la ciencia geográfica (localización, descripción, causalidad, actividad, conexión) son importantes para explicar y analizar lo que ocurre en la superficie terrestre, por lo que, el análisis espacial de hechos, procesos y fenómenos debe ser considerado en diversos estudios e investigaciones que ocurren en determinado tiempo y espacio. En esta investigación el análisis espacial permitió el análisis de problemas y procesos complejos relacionados con la ubicación, buscar patrones, evaluar tendencias y proponer algunas recomendaciones. El análisis espacial va más allá de la representación cartográfica y permite estudiar las características de los lugares y las relaciones entre ellos.

Las investigaciones ambientales se relacionan con múltiples factores: sociales, económicos, políticos y culturales, además, la mayoría están vinculados con las actividades no sustentables que se realizan a distintas escalas. El territorio municipal de Calimaya está sujeto a fuertes presiones demográficas, económicas y ambientales, lo cual se manifiesta en procesos que provocan un sinnúmero de impactos ambientales, por lo que es urgente realizar investigaciones como esta con la finalidad de determinar y evaluar los procesos de cambio de uso de suelo y su impacto en la recarga de los acuíferos, y proponer algunas estrategias que coadyuven a la solución de problemas ambientales.

Los problemas ambientales se han presentado desde tiempos remotos, sin embargo, la preocupación del hombre por solucionarlos es reciente. El crecimiento urbano y los acelerados cambios en el ambiente están modificando profundamente las relaciones entre los seres humanos y los ecosistemas en los que habitan, trayendo con ello pérdida de recursos

biológicos, genéticos y socioculturales, destrucción de los ecosistemas asociados con el desarrollo industrial y comercial, cambios en el clima en el ámbito local y global, urbanización y una agricultura altamente tecnificada. Tales cambios han provocado interrupciones en la integridad del medio ambiente, afectando patrones de la salud y alimentación y cambios generales en las condiciones y la calidad de vida de la población.

6.2. Justificación socio - económica

En la actualidad en el espacio geográfico del municipio de Calimaya, Estado de México, han existido usos de suelo no acordes con su aptitud y vocación, situación que provoca afectaciones sociales, económicas y ambientales. La utilización inadecuada de los socavones abandonados después de extraer los materiales pétreos provoca el establecimiento de basureros clandestinos, antes de considerar algún método adecuado para la implementación de esta actividad, así como las condiciones físicas de la zona, esta situación trae consigo impactos negativos al ambiente y al bienestar social.

La importancia de analizar los procesos de cambio de uso de suelo y su vinculación con las actividades humanas, es una justificación relevante, esto en virtud de que los procesos de cambio de uso de suelo están asociados con intereses de tipo económico, ya que todas estas actividades se realizan con el fin de obtener ganancias, que en la mayoría de las veces están encaminadas a satisfacer las necesidades básicas de la población, como lo es el caso de la alimentación y la vivienda. Las actividades económicas que se realizan en el municipio de Calimaya no son sustentables, pues provocan múltiples impactos ambientales, como es el caso de disminución del suelo fértil, impactos a la recarga de acuíferos y por consiguiente al bienestar social, por lo que, una parte importante de esta investigación fue la integración de algunas sugerencias para la mitigación de impactos y que pueda favorecer la transición hacia el desarrollo local sostenible.

Las actividades económicas son parte esencial de la existencia y dinámica de las sociedades, pues, están vinculadas al bienestar humano. La crisis revela que no es posible pensar en soluciones económicas de los individuos y su bienestar, sin tomar en cuenta al ambiente, tampoco es posible continuar tomando decisiones económicas y financieras al margen de los costos que implica la salud de los ecosistemas y su impacto en la salud de los individuos. Si

bien las nuevas tecnologías verdes, aparecen como una oportunidad para disminuir la sobrecarga de los ecosistemas, estas se presentan como una solución para el corto plazo (Ehrlich, 2010); las tendencias ambientales apuntan hacia un deterioro ecológico y del medio natural y social cuyos alcances todavía son impredecibles e inimaginados por la sociedad.

6.3. Justificación política

En el contexto de la política ambiental y de planeación territorial en el municipio de Calimaya, es importante que sus instrumentos sean acordes con la situación real y actual del territorio, pues la mayoría de las veces existe discordancia entre las condiciones ambientales, sociales y políticas. Ante esta situación se pretende que a través de estudios como este se pueden empatar las ideas y realizar propuestas que mejoren las decisiones, teniendo como finalidad el manejo sustentable y preservación de los recursos naturales.

El espacio, unido e inseparable con el tiempo, expresa y exhibe a cada momento las relaciones políticas, económicas y sociales que han forjado su heterogéneo origen, la diferenciación funcional y jerárquica que distintos actores sociales, instituciones gubernamentales y no gubernamentales impulsan, promueven o imponen; el espacio estructura y refleja las relaciones de poder.

En el contexto actual el espacio tiende a erigirse como un centro de producción, circulación, consumo y acumulación irrestricta de capital; por lo que reducir la fricción de la distancia y las barreras a la circulación de mercancías es apremiante (Harvey, 2012).

La geografía política se adentra en el examen de estrategias de distintos actores (instituciones, empresas, organizaciones civiles o políticas, etc.), tanto locales como nacionales o incluso mundiales; en los acuerdos y negociaciones que pasan por la política de organismos internacionales, así como por la de los gobiernos nacionales, los partidos políticos, las asambleas legislativas, los cabildos municipales, las organizaciones gremiales, etcétera, y la forma de organización política de las diferentes instituciones de los Estados (Talledos, 2014).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definen prioridades de desarrollo sostenible a nivel mundial y las aspiraciones para el 2030 y buscan movilizar los esfuerzos a nivel global en torno a un conjunto de objetivos y metas comunes. Nuestro país es parte de los 193 países

que en 2015 se comprometieron con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que plantea la Agenda 2030, la cual busca un planeta más inclusivo, sostenible y próspero, centrado en la formación de alianzas, en donde, nosotros, los seres humanos, seamos el centro del desarrollo sostenible.

Esta investigación tiene relación con los siguientes Objetivos del Desarrollo Sostenible:

- 3o. Salud y bienestar.
- 6to. Agua limpia y saneamiento.
- 8vo. Trabajo decente y crecimiento económico.
- 9no. Industria, innovación e infraestructura.
- 10mo. Reducción de las desigualdades.
- 11vo. Ciudades y comunidades sostenibles,
- 12vo. Producción y consumo responsable.
- 13vo. Acción por el clima, y
- 15vo. Vida de ecosistemas terrestres.

6.4. Justificación académica – metodológica

Como justificación académica se expone que los profesionales especializados en análisis espacial y Geoinformática tienen la capacidad de aplicar fundamentos teóricos y metodológicos para analizar procesos, hechos y fenómenos que ocurren a distintas escalas y coadyuvar en la elaboración de propuestas de acción o mejoramiento en apoyo a los instrumentos de la política ambiental y de planeación territorial como estrategia de mitigación a los impactos que ocasionan los cambios de uso de suelo. La aplicación de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección en asociación con fundamentos de análisis espacial son útiles para este tipo de estudios de la problemática ambiental.

Los especialistas en análisis espacial y geoinformática disponen de diversas geotecnologías que permiten hacer diferentes procedimientos y sistematizaciones que conducen a una capacidad de análisis mucho mejor y óptima, pudiendo realizar análisis y comparaciones cuantitativas y cualitativas, así como plantear estrategias de solución basadas en los resultados.

Un sistema de información geográfica (SIG) es un marco de trabajo para reunir, gestionar y analizar datos. Arraigado en la ciencia geográfica, un SIG integra diversos tipos de datos, analiza la ubicación espacial y organiza capas de información para su visualización, utilizando mapas y escenas 3D. Con esta capacidad única, un SIG revela información más profunda escondida en los datos, como patrones, relaciones y situaciones, ayudando a nosotros como usuarios a tomar decisiones más inteligentes (Aeroterra, 2022).

A través de los SIG se pueden aplicar diferentes técnicas de trabajo como lo es la Teledetección (o percepción remota), el empleo de esta es cada vez más extendido para el análisis y gestión de los recursos naturales, sin embargo, se encuentra condicionado por las limitaciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes disponibles.

6.5. Justificación Socio-Cultural

El municipio de Calimaya ha pasado por diferentes transiciones culturales en su proceso histórico. Calimaya y Tepemaxalco, como parte de un mismo territorio, tuvieron una población indígena mayoritariamente matlatzinca y coexistía con mexicas, otomíes y mazahuas. Esta convivencia de grupos indígenas dentro del territorio municipal fue importante y se reflejó en las manifestaciones culturales como en la vida cotidiana en la diversidad lingüística, los sistemas de almacenamiento de granos y los sistemas de cultivo. Gonzalo de Sandoval fue quien en 1521 logró pacificar y conquistar la región. En su lugar se impuso la autoridad española. En 1528 ordenó el rey de España que los indios de Calimaya y Tepemaxalco pagaran un tributo a Hernán Cortés en trabajo y en productos cultivados, es decir, bajo encomienda. Desde el siglo XVI el pueblo contaba ya con un cabildo que gobernaba su república indígena y su población era numéricamente suficiente para alcanzar los requisitos que la ley del nuevo Estado de México imponía para que se erigiera en municipio. Por ello, no fue necesario esperar una concesión estatal en este sentido. Calimaya, al nacer el Estado de México, pasó de facto a la categoría de municipio (Calimaya, 2022).

Por su importancia en la región a Calimaya se le asignó un día para el tianguis semanal, que desde 1560 empezó a funcionar los jueves, oficialmente. Esta tradición continua hasta a la fecha, sin embargo, algunos de los cambios que se han tenido son que, la mayoría de las

localidades pertenecientes al municipio, al ir creciendo tanto en territorio como en población, han tenido que crear su propio mercado local, que se instala cierto día de la semana, respetando los días en los establece el del municipio. Además de que, con la entrada de supermercados como Walmart, Sam's Club, Costco, Bodega Ahurrera, entre otros, cada vez es menos gente la que visita estos mercados locales.

Los santos patronos y sus iglesias continúan como parte de la organización en la vida social y religiosa como se hacía en la época prehispánica, es decir, alrededor de las deidades particulares de cada barrio. Cosas que han perdurado en el barrio, que seguiría siendo la célula básica de organización y la religión, el eje del universo calimayense (Calimaya, 2022).

Las labores del campo se delegaban a los hombres, principalmente, aunque ellos siempre contaban con la ayuda de los demás miembros de la familia, inclusive de las mujeres, en las faenas más pesadas. Antes se sembraba maíz criollo para hacer tortillas, habas, frijol, calabaza y avena, esta última para alimento del ganado, ya que la mayoría de las familias contaban con animales para venta y/o consumo, como borregos, vacas, burros. A la fecha estos sistemas han cambiado, para empezar las nuevas generaciones ya no les interesa trabajar en el campo debido a que existen más oportunidades de estudiar una carrera; los sistemas de producción y el mercado han cambiado, por lo que ahora los que continúan sembrando, siembran maíz cacahuazintle y papa, generando con esto los llamados monocultivos. Otros campesinos han vendido sus terrenos para extracción de materiales pétreos, o para construcción de nuevas casas, negocios o fraccionamientos habitacionales.

Con la globalización y el crecimiento de la población, ha habido cambios que han traído como consecuencia en cadena la modificación de otras costumbres, por ejemplo, antes la mayoría de las casas tenían terrenos que se ocupaban como huertos, donde había principalmente árboles de ciruelos (*Prunus domestica*), capulines (*Prunus virginiana*), manzanas (*Malus domestica*), nogales (*Juglans regia*), duraznos (*Prunus pérsica*), que se han ido perdiendo al ampliar las casas. Algunas milpas se han abandonado ya que se rentaron para explotación de tepojal, y al no realizar medidas de protección de los suelos, quedan inservibles para sembrarse nuevamente, además de aumentar los procesos erosivos.

En general las costumbres han ido cambiando, moldeándose a lo que exige la modernidad, incluyendo que, con el aumento exponencial que ha habido de fraccionamientos habitacionales, la gente que llega a estos vienen principalmente de otras ciudades, trayendo consigo otras ideas y costumbres diferentes a las de los habitantes nativos.

7. ANTECEDENTES

Los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones, la mayoría debido a la conversión de la cobertura del terreno y a la degradación e intensificación del uso del suelo (Lambin, 1997). Estos procesos usualmente englobados en lo que se conoce como deforestación o degradación forestal, se asocian a impactos ecológicos importantes en casi todas las escalas (Bocco, *et al.*, 2001). Los cambios de uso del suelo ya sean legales o ilegales son cada día más frecuentes, según Orozco, *et al.*, (2004) el avance de la frontera agrícola hacia superficies forestales ha traído como consecuencia la aparición de superficies de labor frágil y con alta susceptibilidad a los procesos erosivos y, por ende, con baja productividad.

Diversos estudios e investigaciones sobre los procesos de cambio de uso del suelo y otras temáticas semejantes han sido realizadas en el contexto internacional, nacional, regional y local, todas con diversos enfoques teóricos y metodológicos, pero la mayoría con un propósito común: conocer los factores (impulsores) y consecuencias relacionadas con las actividades que inciden en el cambio de uso de suelo y sus impactos. Enseguida se expone de manera general algunos estudios vinculados con el cambio de uso del suelo.

A nivel internacional hay estudios importantes, como el realizado por Hernández, *et al.*, (2013) titulado *Cambios en el uso del suelo asociados a la expansión urbana y la planeación en el corregimiento de Pasquilla, zona rural de Bogotá (Colombia)*, en esta investigación se evaluaron los cambios de uso del suelo del corregimiento de Pasquilla mediante un análisis multitemporal donde se encontró como resultado que el suelo de este lugar cambió de uso agrícola a uso pecuario, sin tomarse las medidas necesarias para la mitigación de los impactos de otras actividades como la potrerización y la tala.

Otro estudio importante en el contexto internacional es el elaborado por Fernández (2017) titulado *Cambios en los usos de suelo en la Península Ibérica: un meta-análisis para el período 1985-2015*, donde hace una descripción con basta bibliografía sobre la evolución de los estudios de cambio de uso de suelo, principalmente desde el año 2000, al mencionar que estos comenzaron a considerar las interacciones entre el sistema físico, biológico y las actividades humanas, recibiendo la denominación de ciencia de los sistemas terrestres. El documento hace un análisis de 47 estudios de cambio de uso de suelo que se han realizado

en la Península Ibérica. De estos estudios, solamente ocho se encuentran dentro del territorio portugués, los 39 restantes, se ubican en el territorio español. Según la tipología de uso, 36% de estos trabajos analizan las cubiertas agrícolas, no obstante, 38% analizan todos los usos, seguidos del 15% que estudian masas forestales, y por último el seguimiento de las superficies artificiales, 11%. Los procesos estudiados son la intensificación, extensificación o eventual abandono de la actividad agrícola y ganadera, los incendios forestales, la expansión urbana, o la degradación del suelo. En general, casi todos los procesos asociados al cambio de uso del suelo están presentes en diferentes áreas del territorio peninsular.

El estudio titulado *Land-Use/Land-Cover Changes and Their Influence on the Ecosystem in Chengdu City, China during the Period of 1992–2018*, elaborado por Xiaojuan, *et al.*, (2018), donde con base en datos de cambio de uso de suelo obtenidos de la interpretación de sensores remotos, calcularon los cambios de valor de los servicios ecosistémicos asociados con la dinámica de cambio de uso de suelo utilizando el método de transferencia de beneficios y las tecnologías del sistema de información geográfica (GIS) durante el período de 1992 a 2018.

A nivel nacional también se encuentran diferentes estudios, como el de *Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago*, elaborado por Pineda (2011) y realizado en el municipio de Valle de Santiago, Guanajuato, y tuvo por objeto analizar el cambio de uso de suelo mediante imágenes satelitales y técnicas de percepción remota, cuantificando los cambios ocurridos durante tres décadas, analizando seis periodos de tiempo. En el análisis de cambio se utilizó el método de comparación de imágenes post-clasificación. Los resultados obtenidos describen los cambios que ha sufrido el municipio a través de mapas y tablas donde se visualizan datos significativos de cambio.

En el contexto estatal un estudio relevante es el titulado *Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí*, por López (2013), el trabajo está enfocado a evaluar el impacto que ha generado la actividad antropogénica sobre el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí desde inicios de la fundación de la ciudad hasta la actualidad, utilizando la calidad del agua como herramienta de análisis. En los tres usos de suelo en la zona estudiada fueron detectados niveles altos de nitratos, sulfatos, cloruros, conductividad eléctrica, coliformes totales y fecales; sin embargo,

en la zona urbana existen anomalías puntuales de metales pesados principalmente de mercurio, bario, estroncio, cadmio, plomo, fósforo y plata. Mientras que, en la zona agrícola, la presencia de metales está asociada a los canales a cielo abierto que también reciben agua del Tanque Tenorio y éste a su vez de la zona industrial, en la cual se detectaron anomalías de tipo puntual en casi todos los metales pesados analizados; la principal fuente de estos contaminantes corresponde a un terreno industrial activo.

El estudio *Diversidad y valor de importancia como herramientas para fundamentar un cambio de uso del suelo en Zacatecas, México*, elaborado por Enríquez, *et al.*, (2016) explica una forma de realizar una justificación ecológica de cambio de uso del suelo en una región árida, y utiliza el método de intercepción en línea, modificado por el Observatorio Nacional de la Degradación de Tierras y Desertificación (Argentina).

En el estudio *Precipitación y Recarga en la Cuenca de La Paz, BCS, México*, elaborado por Cruz, *et al.*, (2011) se estudia la sobreexplotación del acuífero de la cuenca y su relación con los cambios de uso de suelo y el crecimiento de la población; se deduce que el manejo del recurso es inadecuado ya que se ha extraído más agua que la que proporciona la recarga natural por lluvias. Con el fin de calcular los volúmenes manejados por los componentes clave del sistema hidrológico de la cuenca, se empleó una ecuación general de balance hidrológico en un sistema de información geográfica (SIG). A través de este enfoque, se crearon modelos digitales de precipitación, temperatura, evapotranspiración, escurrimiento y recarga, utilizando datos climáticos recopilados durante un período de 25 años, desde 1980 hasta 2004.

Un documento elaborado por el Gobierno del Estado de México a través de la Secretaría del Medio Ambiente (2008) se titula *Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México*. En este estudio se menciona que las zonas donde se incrementan los procesos erosivos y de degradación, es precisamente en aquellas zonas donde se realizan actividades en las que sus procesos ocasionan de cambio de uso de suelo.

A nivel regional también se han realizado estudios de cambio de uso de suelo, uno de estos es *Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano*, elaborado por López, *et al.*, (2014). Los autores analizaron los cambios

de uso del suelo entre 2000 y 2010 teniendo como sustento teórico la geografía socioeconómica de Bonfil (1996), los procesos de cambio de uso del suelo de Fernández y Prados (2010) y técnicas de trabajo de campo. Los resultados demuestran que los cambios pueden deberse al crecimiento poblacional, en los modos de vida y su consecuente demanda de alimentos y viviendas, en el periodo de estudio han ocurrido cambios en 49.39 % del área. Los procesos de cambio originados por la actividad humana son de bosque a pastizales, de pastizal a agricultura de riego o agricultura de temporal, donde se tiene una ganancia de zona agrícola, y el cambio de agricultura de riego y temporal al de asentamientos humanos.

Ortiz, *et al.* (2010) en el artículo *Estimación de la recarga en el acuífero del Valle de Toluca y su distribución espacial*, estimaron la recarga vertical debida a precipitación, tomando en cuenta las características topográficas, climatológicas, de tipo y uso de suelo; también se evaluó la contribución de origen antrópico y las de los cuerpos de agua en el acuífero del Valle de Toluca, mediante el uso del Sistema de Información Geográfica IDRISI. Se estudiaron las condiciones fisiográficas de la cuenca y después se hizo el análisis histórico mensual de las condiciones climatológicas tomado en cuenta la precipitación, temperatura y evapotranspiración, esta última calculada por el método de Hargreaves Samani. Con el método de percolación de Thornthwaite modificado se obtuvo la recarga debida a la precipitación. Se estimaron los volúmenes de flujo que ingresan al acuífero, y se obtuvo un mapa de recarga y las áreas sujetas a protección para preservar el ingreso de flujo al acuífero.

Juan (2021) en el libro titulado *Estudio de los procesos de cambio de uso del suelo en México. Fundamentos teóricos y metodológicos*, expone de manera general los métodos técnicas y teorías que pueden ser utilizados en la elaboración de estudios e investigaciones sobre cambio de uso de suelo. Se seleccionó como estudio de caso al Ejido Agua Bendita, municipio de Amanalco, Estado de México, en donde se determina que el grado de cobertura arbolada se debe a diversos factores, principalmente de tipo económico, y que el cambio de uso de suelo es diferente a lo que ocurre en otros territorios de México, es decir, en este ejido no hay pérdida de bosque, sino recuperación de la cubierta forestal.

Camacho, *et al.*, (2015) en el estudio *Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña* presentan el análisis de los cambios de

cobertura y uso del suelo ocurridos entre 1989 y 2009 en la Porción Surponiente del Estado de México, a través de la interpretación de imágenes de satélite (Landsat TM), que en complemento con la aplicación del algoritmo máxima verosimilitud permitieron la construcción de mapas temáticos de uso de suelo y vegetación, los cuales fueron evaluados para conocer su confiabilidad temática. Los resultados obtenidos demuestran que la cobertura del bosque disminuyó considerablemente, es decir, se eliminaron 19,262 ha, las cuales fueron ocupadas por las categorías cuerpos de agua (105 ha), agropecuario (19,113 ha), asentamientos humanos (39 ha) y agricultura tecnificada controlada (5 ha). La superficie deforestada es resultado del establecimiento y la práctica de actividades relacionadas con la agricultura y ganadería.

Por último, Camacho, *et al.*, (2017) en el documento *Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México*, analizan los cambios de cobertura y uso de suelo para los periodos 2000-2007 y 2007-2015, mediante mapas de uso de suelo y vegetación, resultado de la interpretación visual interdependiente de insumos cartográficos, para comprender los procesos de cambio y la dinámica de uso de suelo que determina a la zona. Se demuestra que hay cambios de cobertura forestal a agrícola, y sobre todo hubo un crecimiento de invernaderos.

En el municipio de Calimaya no existen estudios de cambio de uso de suelo, sólo en algunos documentos como el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Calimaya (PMDU), se hace referencia a esta situación, aunque no existen datos ni cartografía acerca de los cambios. En lo referente con la cubierta forestal, el municipio de Calimaya tenía en el año 2010 una superficie forestal de 1,920 hectáreas, cifra que recientemente ha disminuido por los procesos de cambio de uso del suelo, asociados con la apertura de nuevos espacios para la agricultura, pastoreo sin control, incendios forestales, extracción de materiales pétreos, establecimiento de viviendas y extracción de recursos maderables (PMDU, 2019).

El artículo vinculado al estudio de cambio de uso de suelo en la zona es el de *Evolución de los conjuntos urbanos y su influencia en el crecimiento poblacional y el desarrollo de los espacios periurbanos en Calimaya, Estado de México, de 1990 a 2015*, elaborado por García (2017), donde se analiza la evolución e influencia de la producción habitacional del sector

privado en la expansión de la urbanización y crecimiento de la población en Calimaya, Estado de México. Los datos estadísticos, cartográficos, la observación y análisis del proceso de producción habitacional a través de conjuntos urbanos muestran, por un lado, su tendencia a extenderse sin control en las localidades de Calimaya de Díaz González, San Andrés Ocotlán y la Concepción Coatipac, sobre las áreas de vocación agrícola que las circundan, conformando un espacio periurbano residencial desordenado y disperso, y por otro, el crecimiento acelerado de la población y sus posibles impactos sociales y ambientales.

Un documento más reciente es el de Homem de Abreu, *et al.*, (2021) “*Risco de contaminação do solo e da água por substâncias ativas de pesticidas associadas aos cultivos agrícolas de Calimaya, México Central*”. Se estudió la contaminación de aguas, el uso de suelo agrícola y el uso de fertilizantes y pesticidas, determinando que existe contaminación de agua potable, por lo que, este documento apoya el sustento de crear políticas ambientales y de planeación territorial que mejoren la calidad de vida de la población de Calimaya.

8. MARCO LEGAL

Dentro del municipio de Calimaya se aplican diversas leyes y normas que regulan las actividades y sus consecuencias. Sin embargo, en la práctica se ha evidenciado que la mayoría de las dependencias en materia ecológica y ambiental no están desempeñando su trabajo de manera satisfactoria. Si las leyes y normas se aplicaran de manera rigurosa, se reducirían considerablemente los problemas, ya que, la falta de eficacia en la aplicación de estas normas y leyes contribuye al aumento de los problemas.

Durante mucho tiempo, ha existido un conflicto entre los intereses económicos impulsados por el cambio de uso de suelo y los lineamientos del Ordenamiento Ecológico del Territorio (OET). La concurrencia ambiental y urbana, así como la sustentabilidad, son facultades concurrentes en materia de asentamientos humanos, protección ambiental y preservación y restauración del equilibrio ecológico. Los programas de desarrollo urbano municipal deben ser coherentes con los programas de ordenamiento ecológico a nivel federal y estatal (Tesis P./J. 38, 2011)². En esta tesis se establece que, si bien los municipios tienen la facultad de formular, aprobar y administrar la zonificación y los planes de desarrollo urbano municipal, así como de autorizar, controlar y vigilar el uso del suelo en su ámbito de competencia, estas facultades deben entenderse dentro de los lineamientos y formalidades establecidos por las leyes federales y estatales. No deben considerarse como un ámbito exclusivo y aislado del municipio. Enseguida se refieren las leyes, reglamentos y normas que regulan las actividades relacionadas con el cambio de uso de suelo en el municipio de Calimaya:

8.1. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

Esta ley, cuya última reforma publicada en el DOF el 08 de mayo del 2023, refiere la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección del medio ambiente en todo el territorio nacional y las zonas bajo la soberanía y jurisdicción de la nación. Su objetivo es prevenir y controlar la contaminación generada por el aprovechamiento de sustancias no reservadas a la federación, así como formular y dirigir acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y el uso sustentable del suelo y sus recursos. Los artículos relevantes son el 15 (fracción VIII), 28 (fracción III), 50

² Tesis de Suprema Corte de Justicia, Pleno, 1 de Octubre de 2011 (Tesis num. P./J. 38/2011 (9a.) de Suprema Corte de Justicia, Pleno, 01-10-2011 (Controversia Constitucional))

(fracción XIV), 64, 70 (fracciones X y XIV), 108 (fracciones I, II y III), 109 y 120 (fracción IV). Tiene como propósito regular y promover el desarrollo sustentable del país, protegiendo el equilibrio ecológico y el medio ambiente. Establece medidas y directrices para la conservación, protección y restauración de los ecosistemas y los recursos naturales, incluyendo el agua y los acuíferos.

En relación con el cambio de uso de suelo y su impacto en la recarga de los acuíferos, la LGEEPA establece disposiciones para regular y controlar las actividades que puedan afectar negativamente los ecosistemas y los recursos naturales. Establece que las autoridades competentes deben realizar estudios previos de impacto ambiental para evaluar los efectos que las actividades humanas, como el cambio de uso de suelo, puedan tener sobre el medio ambiente y los recursos naturales. Además, la ley establece lineamientos para prevenir, mitigar y compensar los impactos ambientales, incluyendo la pérdida de capacidad de los suelos para infiltrar agua y la disminución de la recarga de los acuíferos. También promueve la restauración de los ecosistemas y la recuperación de los recursos naturales afectados por las actividades humanas.

8.2. Ley Minera

Los artículos 4 y 5 de la Ley Minera (2023) hacen referencia a la clasificación y excepciones de las concesiones mineras contempladas en esta ley. El artículo 4 establece que los minerales o sustancias que constituyen depósitos distintos de los componentes de los terrenos se dividen en las siguientes categorías:

I. Minerales o sustancias de los cuales se extraen antimonio, arsénico, bario, berilio, bismuto, boro, bromo, cadmio, cesio, cobalto, cobre, cromo, escandio, estaño, estroncio, flúor, fósforo, galio, germanio, hafnio, hierro, indio, iridio, itrio, lantánidos, litio, magnesio, entre otros.

II. Minerales o grupos de minerales de uso industrial, como actinolita, alumbre, alunita, amosita, andalucita, anhidrita, antofilita, azufre, barita, bauxita, biotita, bloedita, boemita, boratos, brucita, carnalita, celestita, cianita, cordierita, corindón, crisotilo, crocidolita, cromita, cuarzo, dolomita, epsomita, estaurolita, flogopita, fosfatos, fluorita, glaserita, glauberita, grafito, granates, halita, hidromagnesita, kainita,

kieserita, langbeinita, magnesita, micas, mirabilita, mulita, muscovita, nitratina, olivinos, palygorskita, pirofilita, polihalita, sepiolita, silimanita, silvita, talco, taquidrita, tenardita, tremolita, trona, vermiculita, witherita, wollastonita, yeso, zeolitas y zircón.

VI. Productos derivados de la descomposición de las rocas que requieren trabajos subterráneos, como arcillas en todas sus variedades (caolín y montmorillonitas) y arenas de cuarzo, feldespatos y plagioclasas.

VII. Materias minerales u orgánicas susceptibles de utilizarse como fertilizantes, como apatita, colófano, fosfosiderita, francolita, variscita, wavelita y guano.

VIII. Carbón mineral en todas sus formas y gas asociado a los yacimientos de carbón.

IX. Otros minerales determinados por el Ejecutivo Federal mediante decreto, considerando su uso industrial debido al desarrollo de nuevas tecnologías, su cotización en los mercados internacionales o la necesidad de promover la explotación racional y la preservación de los recursos no renovables en beneficio de la sociedad.

Aquellas personas que realicen exploración o explotación de minerales o sustancias mencionados en la fracción anterior, de acuerdo con las disposiciones del derecho común, tendrán derecho preferente para obtener la concesión minera correspondiente, siempre que cumplan con los términos establecidos en esta ley y su reglamento.

El artículo 5 establece las siguientes excepciones a la aplicación de esta ley:

1. Petróleo y carburos de hidrógeno sólidos, líquidos o gaseosos, excepto el gas asociado a los yacimientos de carbón mineral.
2. Minerales radiactivos.
3. Sustancias contenidas en suspensión o disolución por aguas subterráneas, siempre que no provengan de un depósito mineral distinto de los componentes de los terrenos.

4. Rocas o productos de su descomposición que solo se utilicen para la fabricación de materiales de construcción.
5. Productos derivados de la descomposición de las rocas cuando la explotación se realice a cielo abierto.
6. Sal proveniente de salinas formadas en cuencas endorreicas.

Es evidente que, en el caso de México, los responsables de hacer cumplir la Ley consideran como "minería" únicamente aquellos materiales que poseen brillo, como metales o piedras preciosas. El análisis de esta Ley pone de manifiesto que los daños ambientales, sociales y económicos derivados de la explotación minera sin regulación no sólo son resultado del pensamiento irracional de las empresas dedicadas a la minería de materiales no metálicos, sino también de las negligencias políticas y de la falta de conciencia social sobre los impactos medioambientales causados por esta actividad. Como se muestra en el artículo 5, Punto 4, el poder legislativo federal se deslinda de los permisos y de todos los daños que la minería de extracción no metálica pueda ocasionar al medio natural y social en toda la federación mexicana (Valencia, 2017).

8.3. Ley Federal de Responsabilidad Ambiental

La Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (2021) tiene como objetivo principal la protección, preservación y restauración del ambiente y el equilibrio ecológico, con el fin de garantizar los derechos humanos a un medio ambiente saludable para el desarrollo y bienestar de todas las personas, así como establecer la responsabilidad generada por el daño y deterioro ambiental (Artículo 1). En el artículo 10 se establece que cualquier persona física o jurídica que, mediante su acción u omisión, cause directa o indirectamente daños al ambiente, será considerada responsable y estará obligada a reparar dichos daños. En caso de que la reparación no sea factible, se requerirá la compensación ambiental correspondiente, de acuerdo con los términos establecidos en esta ley. Además, se exigirá que se realicen las acciones necesarias para prevenir el aumento del daño ambiental ocasionado (DOF, 2021).

En el Artículo 13 se establece que la reparación de los daños ambientales consistirá en restituir los hábitats, ecosistemas, elementos y recursos naturales a su estado base, incluyendo

sus condiciones químicas, físicas y biológicas, así como las interacciones que existen entre ellos. Además, se deberá garantizar la restauración, restablecimiento, tratamiento, recuperación o remediación de los servicios ambientales proporcionados. La reparación deberá llevarse a cabo en el lugar donde se produjo el daño.

En el caso de Calimaya, hasta donde se ha observado, no se ha aplicado de manera efectiva esta ley. Específicamente, en las áreas de extracción de materiales pétreos se encuentran socavones abandonados sin evidencia de ningún tipo de proyecto de recuperación ambiental del terreno. Por el contrario, se han convertido en vertederos clandestinos de residuos sólidos y se utilizan como depósitos de aguas residuales, lo que ocasiona daños ambientales debido a la filtración de estos residuos. La mayoría de estas áreas no reciben trabajos de recuperación debido a que las personas que las explotaron solo arrendaron los terrenos.

8.4. Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano

La Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (2021) autoriza el uso del suelo y establece las normas básicas para la explotación de bancos de materiales de construcción. Se hace referencia a estos aspectos en los artículos 122, fracción IV, y 127, fracciones I a VIII.

En el caso de Calimaya, por ejemplo, para iniciar la explotación de materiales pétreos utilizados en la construcción, como arena, grava y tepojal, se requiere que los permisionarios presenten un informe previo ante la Secretaría del Medio Ambiente si el área de explotación es menor a tres hectáreas. En caso de que el área sea mayor a tres hectáreas, se solicita un estudio de manifestación de impacto ambiental. Las evaluaciones de impacto ambiental son requeridas en México principalmente por dos razones: como requisito para acceder a financiamiento de programas de mejora ambiental por parte de organismos internacionales u ONG, y como procedimiento legal para obtener licencias de uso de suelo y extracción de recursos pétreos.

Con el fin de presentar los informes previos y las manifestaciones de impacto ambiental, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, a nivel federal, ha diseñado una serie de formularios y formatos que sirven como guía para la elaboración y aprobación de nuevos

proyectos de extracción. En este contexto, los permisionarios deben complementar e ilustrar los formatos para proceder con la explotación del material pétreo, aunque no están obligados a cumplir todos y cada uno de los lineamientos establecidos en estos informes. Algunos de los lineamientos solicitados para la elaboración de un informe previo son los siguientes:

1. Información general (responsable de la obra): nombre de la empresa, particular u organismo.

2. Detalles del proyecto:

a) Plano de localización.

b) Superficie del terreno que ya ha sido explotada.

c) Superficie del terreno que se pretende explotar.

d) Estimación del volumen explotado y a explotar.

e) Uso potencial del suelo y uso actual.

f) Situación legal del predio.

g) Actividades que se llevan a cabo en las áreas colindantes al predio.

3. Características generales del entorno natural:

a) Condiciones generales del relieve y características litológicas de los terrenos propuestos para la explotación (incluyendo un plano topográfico y una columna estratigráfica).

b) Identificación de áreas para el almacenamiento de tierra fértil.

c) Indicación de la presencia de cuerpos de agua superficiales, ya sean permanentes o intermitentes, en el predio o en el área de influencia (en un radio de al menos 2 km).

d) En caso de haber vegetación arbórea en el sitio, especificar el número de individuos y especies en un plano.

4. Programa de restauración (rehabilitación del predio):

a) Propuesta de medidas para la estabilización de taludes, considerando el ángulo natural de reposo de los materiales presentes en el predio.

b) Detalles de las medidas propuestas para la rehabilitación de la capa del suelo afectada.

c) Indicación de las medidas que se tomarán para la restitución de las capas vegetales afectadas, incluyendo técnicas y especies a utilizar.

d) Inclusión de un cronograma tentativo de las acciones a realizar para la rehabilitación.

e) Especificación de cualquier uso previsto o contemplado para el predio una vez finalizada la rehabilitación.

8.5. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

Uno de los problemas más evidentes al ingresar al territorio municipal de Calimaya, desde cualquier acceso, es la presencia de residuos sólidos depositados en los socavones generados por las minas de extracción de materiales pétreos. Estas zonas clandestinas de vertido de residuos no cuentan con vigilancia ni sanciones para detener a los responsables, a pesar de que las personas llevan a cabo esta actividad en cualquier momento del día. El Ayuntamiento ha utilizado estos socavones durante años para desechar la basura doméstica recolectada por los camiones municipales, sin implementar medidas de protección contra la contaminación, como se requiere oficialmente en los rellenos sanitarios.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2015) es importante en el contexto de esta investigación. En su Artículo 1, Sección I, se establece que los principios de valorización, responsabilidad compartida y manejo integral de residuos deben aplicarse, considerando criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social en el diseño de instrumentos, programas y planes de política ambiental para la gestión de residuos. En la misma sección del artículo, se menciona la necesidad de establecer mecanismos de coordinación entre la Federación, las entidades federativas y los municipios en relación con la prevención de la generación, valorización y gestión integral de residuos, bajo el principio de concurrencia establecido en el artículo 73, fracción XXIX-G de la

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En la Sección VI, se hace hincapié en la importancia de definir las responsabilidades de los productores, importadores, exportadores, comerciantes, consumidores y autoridades de los distintos niveles de gobierno, así como de los proveedores de servicios en el manejo integral de los residuos. En las Secciones X y XI se subraya la necesidad de prevenir la contaminación de los sitios debido al manejo de materiales y residuos, y se establecen criterios para su remediación, así como regulaciones para la importación y exportación de residuos.

En el Artículo 2, Sección I, se reconoce el derecho de toda persona a vivir en un entorno adecuado para su desarrollo y bienestar. En la Sección IV se establece que corresponde a quienes generan residuos asumir los costos derivados de su manejo integral y, en su caso, reparar los daños causados. A partir de lo observado en el trabajo de campo es muy probable que el Ayuntamiento, a lo largo de sus distintas administraciones, ni siquiera esté familiarizado con esta ley.

8.6. Ley de aguas nacionales

La Ley de Aguas Nacionales (2023) tiene como objetivo regular la explotación, uso y aprovechamiento de todas las aguas que se encuentren dentro del territorio nacional, ya sean superficiales o subterráneas, así como su distribución, control y preservación de cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable.

En el Artículo 6, Sección I, se establece que corresponde al Ejecutivo Federal reglamentar el control de la extracción, explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales del subsuelo, incluyendo las que hayan sido libremente alumbradas, y las aguas superficiales, por cuenca hidrológica y acuífero. Se faculta para emitir decretos que establezcan, modifiquen o supriman zonas reglamentadas que requieran un manejo específico para garantizar la sustentabilidad hidrológica o cuando se comprometa la sustentabilidad de los ecosistemas vitales en determinados acuíferos, cuencas o regiones hidrológicas.

En el Artículo 7, Sección II, se declara de utilidad pública la protección, mejoramiento, conservación y restauración de cuencas hidrológicas, acuíferos, cauces, vasos y demás depósitos de agua de propiedad nacional, zonas de captación de fuentes de abastecimiento y zonas federales, así como la infiltración natural o artificial de aguas para reabastecer los

acuíferos de acuerdo con las normas oficiales mexicanas y la derivación de aguas de una cuenca o región hidrológica hacia otras. Asimismo, se establece que es de interés público el restablecimiento del equilibrio de los ecosistemas vitales vinculados con el agua. En la Sección VII se expone que es de interés público el mejoramiento de la calidad de las aguas residuales, la prevención y control de su contaminación, el recirculado y reúso de dichas aguas, así como la construcción y operación de obras de prevención, control y mitigación de la contaminación del agua, incluyendo plantas de tratamiento de aguas residuales.

En el Capítulo 3, Artículo 9, Sección XLIX se establece que es facultad de la Comisión Nacional del Agua presentar las denuncias correspondientes ante las autoridades competentes cuando, en el ejercicio de sus atribuciones, tenga conocimiento de actos u omisiones que constituyan violaciones a la legislación administrativa en materia de aguas o a las leyes penales.

En el municipio de Calimaya, no existen emisores ni colectores, y todas las redes de alcantarillado descargan en canales de cielo abierto que desembocan en varios ríos y arroyos, y finalmente en el río Lerma como aguas residuales, ya que la única planta de tratamiento existente no se encuentra en funcionamiento.

Debido a las actividades de extracción de materiales pétreos, algunos cauces de los ríos en la región han sido modificados. Las empresas que realizan las extracciones utilizan maquinaria pesada que abre paso a través de los cauces, afectando o destruyendo la vegetación secundaria y forestal adyacente a los cauces. Algunas de estas empresas extraen los materiales que se han depositado en los cauces para obtener mayores ganancias en la venta de productos. Lamentablemente, como se ha mencionado anteriormente, no se realiza una supervisión ni se aplica adecuadamente las leyes que se supone deben regir estas actividades.

8.7. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2022) tiene como objetivo regular y promover el manejo integral y sustentable de los territorios forestales, incluyendo la conservación, protección, restauración, producción, ordenación, cultivo, manejo y aprovechamiento de los ecosistemas forestales del país y sus recursos. También establece la distribución de competencias en materia forestal entre la Federación, las Entidades

Federativas, Municipios y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México, de acuerdo con el principio de concurrencia previsto en el artículo 73, fracción XXIX-G de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, con el propósito de fomentar el desarrollo forestal sustentable.

En el municipio de Calimaya, la única área forestal conservada forma parte del Área Natural Protegida (ANP) denominada Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT). Esta ANP ocupa 2968.32 hectáreas del territorio municipal, de las cuales alrededor de 1,600 hectáreas corresponden a superficie forestal, según el mapa de Uso de Suelo y Vegetación 2022 elaborado en esta investigación. La mayor parte de esta cobertura forestal se encuentra dentro de los Bienes Comunes de Calimaya.

Durante el trabajo de campo se observó tala selectiva, que combina actividades clandestinas con aquellas permitidas por los programas de manejo forestal aprobados por PROBOSQUE y CONAFOR desde el cambio de categoría de Parque Nacional a Área de Protección de Flora y Fauna en el año 2013. Estos programas han llevado a la remoción progresiva y sin supervisión, ni vigilancia, principalmente de especies como Aile (*Alnus acuminata* y *Alnus jorullensis*), Cedro blanco (*Cupressus lusitánica*), Oyamel (*Abies religiosa*) y diferentes tipos de Pinos, destacando el *Pinus hartwegii* y el *Pinus montezumae*, comúnmente conocidos como "ocotes". Esta vegetación desempeña funciones importantes en el mantenimiento del equilibrio climático de la región, ya que genera servicios ecológicos como producción de oxígeno, purificación del aire, formación de suelos fértiles, prevención de la erosión, protección de los cuerpos de agua, refugio para la fauna, reducción de la temperatura del suelo, facilitación del establecimiento de otras especies, regeneración de nutrientes del suelo, mejora del paisaje y, sobre todo, la captación de agua para recargar los acuíferos.

Si bien algunos programas de manejo forestal son necesarios, como en el caso del Cedro blanco, que no es endémico de la región y se busca restaurar su estatus natural, es imprescindible que se apliquen las normas y reglamentos adecuados, y se realice una supervisión constante que no se vea influenciada por la corrupción.

8.8. Ley General de Vida Silvestre

La Ley General de Vida Silvestre (2021) tiene como objetivo establecer la concurrencia de competencias entre el Gobierno Federal, los gobiernos estatales y los municipios en lo que respecta a la conservación y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre y su hábitat en todo el territorio de la República Mexicana y en las zonas bajo la jurisdicción nacional. El Artículo 4 establece que es responsabilidad de todos los habitantes del país conservar la vida silvestre, prohibiendo cualquier acto que implique su destrucción, daño o perturbación en detrimento de los intereses de la Nación.

En el Artículo 5 se menciona que el objetivo de la política nacional en materia de vida silvestre y su hábitat es lograr su conservación a través de la protección y el fomento de un aprovechamiento sustentable óptimo, con el fin de mantener y promover la restauración de su diversidad e integridad, al tiempo que se incrementa el bienestar de los habitantes del país.

El Artículo 6 establece que el diseño y la implementación de la política nacional en materia de vida silvestre y su hábitat corresponde, en sus respectivas competencias, a las entidades federativas, los municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, así como al Gobierno Federal.

En el municipio de Calimaya se ha observado una disminución gradual de ciertas especies que solían habitar en las zonas de alta montaña y bosques, que actualmente se encuentran dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT). Mamíferos, anfibios, reptiles, aves e insectos han desaparecido debido a la caza furtiva e ilegal, la captura de ejemplares para uso como mascotas (que finalmente terminan muriendo), incendios forestales provocados, tala indiscriminada, actividades de extracción de materiales pétreos y conversión de suelos forestales en terrenos agrícolas. Estas acciones provocado la disminución o desplazamiento de la fauna hacia otras áreas con un mejor estado de conservación y/o de difícil acceso. Algunas especies que han desaparecido son el halcón peregrino (*Falco peregrinus*), el gato montés (*Lynx rufus*), el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el conejo de campo (*Sylvilagus cunicularius*), la gallina de monte (*Dendrortyx macroura*) y la lagartija cornuda (*Phrynosoma orbiculare*), comúnmente conocida como camaleón), entre otros. Es importante conocer estas leyes para ejercer presión en su

implementación y lograr una mayor protección de las especies de flora y fauna que aún persisten en el territorio municipal de Calimaya.

8.9. Ley General de Cambio Climático

La Ley General de Cambio Climático (2022) tiene como objetivo garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades entre el Gobierno Federal, los gobiernos estatales y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Según el artículo 9, en su fracción dos, corresponde a los municipios formular e implementar políticas y acciones para enfrentar el cambio climático, en congruencia con el Plan Nacional de Desarrollo, la Estrategia Nacional, el Programa estatal en materia de cambio climático y las leyes aplicables. Esto incluye las áreas de prestación del servicio de agua potable y saneamiento, ordenamiento ecológico local y desarrollo urbano, recursos naturales y protección al ambiente, protección civil, manejo de residuos sólidos municipales y transporte público eficiente y sustentable en su jurisdicción.

En el municipio de Calimaya, se cuenta únicamente con el Plan de Desarrollo Municipal y el Bando Municipal, mientras que el Atlas de Riesgo ya no está disponible para su consulta, lo que sugiere que podría estar siendo modificado o no está vigente. Estos documentos se basan en el Plan de Desarrollo del Estado de México 2017-2023, que a su vez considera los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. El ODS número 7, "Energía asequible y no contaminante", busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para toda la población, incluyendo la mejora de la eficiencia energética y el aumento de la participación de fuentes de energía renovable.

Por otro lado, el ODS número 13, "Acción por el clima", busca incorporar el cambio climático como una prioridad en las políticas, estrategias y planes de países, empresas y sociedad civil, fomentando la respuesta efectiva a los desafíos que genera e impulsando la educación y la concienciación en relación con el fenómeno. Todo esto con el objetivo de lograr un mundo más limpio y reducir las emisiones de CO₂.

8.10. Ley Agraria

La Ley Agraria (2023) es una normativa que regula el ejercicio de los derechos de propiedad establecidos en el Artículo 27 de la Constitución en relación con asuntos agrarios. En lo referente al aprovechamiento urbano y al equilibrio ecológico, se ajusta a lo dispuesto en la Ley General de Asentamientos Humanos, la Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, y otras leyes aplicables. En el Artículo 87 de esta ley se establece que, si los terrenos de un ejido se encuentran ubicados en un área de crecimiento de un centro de población, los núcleos de población ejidal podrán beneficiarse de la urbanización de sus tierras. No obstante, dicha incorporación de las tierras ejidales al desarrollo urbano debe estar sujeta a las leyes, reglamentos y planes vigentes en materia de asentamientos humanos.

Por otro lado, el Artículo 88 prohíbe la urbanización de las tierras ejidales que se ubiquen en áreas naturales protegidas, incluyendo las zonas de preservación ecológica de los centros de población, cuando esto vaya en contra de lo establecido en la declaratoria correspondiente.

Por último, el Artículo 89 expone que, en cualquier enajenación de terrenos ejidales ubicados en áreas declaradas reservadas para el crecimiento de un centro de población, de acuerdo con los planes de desarrollo urbano municipal, y a favor de personas externas al ejido, se debe respetar el derecho de preferencia de los gobiernos estatales y municipales, según lo establecido en la Ley General de Asentamientos Humanos.

8.11. Norma Técnica Estatal Ambiental bajo la denominación NTEA-017- SeMAGEM-DS-2016

La Norma Técnica Estatal Ambiental (NTEA) con la denominación NTEA-017-SeMAGEM-DS-2016 (2017) regula las actividades de exploración, explotación y transporte de materiales pétreos en el Estado de México. Esta norma establece las condiciones que deben cumplirse en los sitios y actividades relacionadas con la explotación de materiales pétreos, con el objetivo principal de proteger el medio ambiente. Se considera que su acción atiende fundamentalmente al interés social y su carácter es de orden público.

La NTEA establece especificaciones de protección ambiental para llevar a cabo las actividades de exploración, extracción y transporte de materiales pétreos que no son concesibles por el Gobierno federal. Es de cumplimiento obligatorio para aquellos que tienen

la responsabilidad de la propiedad o posesión del sitio de extracción o transporte de materiales pétreos, así como para el titular de la autorización de explotación de materiales pétreos en relación con el impacto ambiental. Además, aplica a los responsables de los depósitos de materiales pétreos en el territorio del Estado de México. Para cumplir con las diferentes especificaciones de ubicación requeridas para la exploración y extracción de materiales pétreos, se deben respetar las condiciones mínimas que un sitio debe cumplir.

De acuerdo con el Manual de Derecho Ambiental Mexicano elaborado en 2021 por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), los instrumentos de política pública para la protección del medio ambiente se clasifican en diversas categorías. En términos generales, los instrumentos de política ambiental se dividen en cuatro grupos principales:

- Regulación directa: conocidos como "comando y control", dependen de la promulgación de normas y su cumplimiento se basa en mecanismos de coerción y sanción.
- Administrativos: consisten en la emisión de licencias, permisos y otros instrumentos que otorgan el derecho de utilizar los recursos naturales de acuerdo con la normativa aplicable.
- Económicos: dirigidos a utilizar las fuerzas del mercado como medio para lograr el cumplimiento de metas ambientales.
- Educativos: se basan en acciones de educación, investigación y asistencia técnica e informativa, siendo determinantes para la participación social.

En el caso de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), se consideran instrumentos de mercado las concesiones, autorizaciones, licencias y permisos que establecen volúmenes preestablecidos de emisiones de contaminantes en el aire, agua o suelo. También incluyen límites para el aprovechamiento de los recursos naturales y restricciones para la construcción en áreas naturales protegidas o en zonas cuya preservación y protección sean consideradas relevantes desde el punto de vista ambiental (artículo 22).

De acuerdo con la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (LOAPF, 2022), corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

formular y conducir la política ambiental a nivel federal (artículo 32 bis, fracción II). Para realizar esta tarea, la SEMARNAT tiene organismos desconcentrados y descentralizados, cada uno con mandatos específicos, los desconcentrados son los siguientes:

a. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA): órgano administrativo con autonomía técnica y operativa. Su principal tarea es incrementar los niveles de cumplimiento de la normatividad ambiental para contribuir al desarrollo sustentable y hacer cumplir las leyes ambientales.

b. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP): órgano administrativo encargado de la conservación del patrimonio natural de México a través de las áreas naturales protegidas (ANP) y la promoción de una cultura de conservación y desarrollo sustentable en las comunidades asentadas en su entorno.

c. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA): órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo cuya misión es administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes para lograr su uso sustentable. Esto se lleva a cabo con la corresponsabilidad de los tres niveles de gobierno y la sociedad en general.

d. Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos (ASEA): órgano administrativo encargado de regular y supervisar la seguridad industrial, la seguridad operativa y la protección al ambiente en las actividades del sector hidrocarburos.

Los organismos descentralizados y sus mandatos son los siguientes:

a. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA): organismo responsable de enfrentar los desafíos nacionales y regionales asociados con la gestión del agua, así como de desarrollar nuevos enfoques en investigación y desarrollo tecnológico para proteger este recurso y asignarlo de manera eficiente y equitativa entre los distintos usuarios. Sus objetivos incluyen contribuir a la gestión sustentable del agua a través del conocimiento, la tecnología, la formación de recursos humanos y la innovación, incorporar el sector hídrico en la sociedad del conocimiento, generar valor agregado para las instituciones del sector mediante la creación y adaptación de tecnologías, y

promover el desarrollo de la ciencia y tecnología del agua mediante la formación de personal altamente capacitado a nivel de especialización y posgrado.

b. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC): organismo con personalidad jurídica y patrimonio propios, con autonomía de gestión, su objetivo es coordinar y realizar estudios y proyectos de investigación científica o tecnológica en materia de cambio climático, protección ambiental y preservación y restauración del equilibrio ecológico. También brinda apoyo técnico y científico a la SEMARNAT en la formulación, implementación y evaluación de la política nacional en estas áreas.

c. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR): organismo cuyo objetivo es desarrollar, fomentar e impulsar actividades productivas, de conservación y restauración en materia forestal, así como participar en la formulación de planes, programas y la implementación de políticas de desarrollo forestal sustentable.

Aunque la política ambiental es una materia concurrente según lo establecido en la Constitución, en los ámbitos estatal y municipal existen importantes obstáculos institucionales en términos de eficiencia y coordinación. Además, la duración en el cargo de los presidentes municipales, en su mayoría de tres años sin posibilidad de reelección inmediata, contribuye a una débil planificación ambiental y a un bajo desempeño en materia ambiental de los municipios (OCDE, 2013).

En México, la política ambiental surge a partir de la modificación al artículo 25 constitucional del 3 de febrero de 1983, en el cual se estableció: "Bajo criterios de equidad social y productividad se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente". En concordancia con este mandato, el Plan Nacional de Desarrollo 1983-1988 (DOF, 1983) incluyó, por primera vez, la preservación del medio ambiente y el fortalecimiento del potencial de los recursos naturales, haciendo énfasis en un aprovechamiento racional de los mismos, como parte de la estrategia económica y social para el desarrollo del país.

La incorporación de la planeación ambiental en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, mediante las reformas al artículo 17 (DOF, 1996), establece que todas las dependencias y entidades de la administración pública federal (APF) deben observar e incidir, en su ámbito de competencia, en la aplicación de los lineamientos de política ambiental establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo y los programas correspondientes.

Durante muchos años, el desarrollo del país careció de consideraciones ambientales, lo cual resultó en un deterioro ecológico y evidenció la necesidad de orientar las actividades productivas hacia la sustentabilidad. El artículo 17 de la LGEEPA enfatiza la incorporación de la política ambiental y el ordenamiento ecológico del territorio (OET) en la planeación nacional del desarrollo. La evaluación del estado del medio ambiente es crucial para identificar problemas relacionados con la gestión de los recursos naturales y evitar la pérdida de recursos, hábitats ecológicos, diversidad biológica, así como la degradación del suelo, salinización, acidez y desertificación, entre otros. Para lograr esto, es necesario coordinar las acciones entre los tres niveles de gobierno para identificar la aptitud y el potencial productivo de las diferentes regiones del territorio nacional.

La participación de los tres órdenes de gobierno en la formulación, expedición y ejecución de los programas de OET se regula en la sección II, capítulo IV de la LGEEPA, que establece cuatro niveles de ejecución:

- a. Ordenamiento ecológico general del territorio (OEGT): competencia federal y de carácter indicativo para los particulares, pero obligatorio para la APF.
- b. Ordenamiento ecológico regional: competencia estatal y aplicable a dos o más estados, dos o más municipios o al estado completo.
- c. Ordenamiento ecológico local (OEL): competencia municipal y aplicable a un municipio completo o a una parte de este.
- d. Ordenamientos ecológicos marinos: competencia federal e incluyen las zonas marinas y las zonas federales adyacentes.

En la formulación del OET se deben considerar los criterios establecidos en el artículo 19 de la LGEEPA, que abarcan la naturaleza y características de los ecosistemas en el territorio nacional y en las zonas bajo soberanía y jurisdicción de la nación, la vocación de cada zona o región en función de sus recursos naturales, distribución de la población y actividades económicas predominantes, los desequilibrios existentes en los ecosistemas debido a los asentamientos humanos, actividades económicas u otros fenómenos, el equilibrio entre los asentamientos humanos y las condiciones ambientales, el impacto ambiental de nuevos asentamientos humanos, vías de comunicación y otras obras o actividades, y las modalidades establecidas en decretos que constituyan áreas naturales protegidas, así como otras disposiciones del programa de manejo respectivo.

La gestión del territorio en el OET se realiza a través de un sistema de información geográfica, mediante el cual se identifican las unidades de gestión ambiental y sus lineamientos ecológicos correspondientes, con el objetivo de orientar un patrón de ocupación territorial que maximice el consenso y minimice los conflictos entre los sectores involucrados, en un contexto de dinámica social y ambiental compleja respecto al uso del territorio (Anglés, 2021).

Si bien cada sector tiene sus propias prioridades y metas, al formular e implementar programas y acciones, deben comprometerse a orientarlos hacia el desarrollo sustentable de cada región del territorio mexicano, en congruencia con las prioridades establecidas en el programa, sin afectar el cumplimiento de los programas de ordenamiento ecológico locales o regionales vigentes.

Según datos de la SEMARNAT hasta 2016, de los 2,456 municipios existentes en el país, sólo 79 (3.2%) contaban con un programa de OEL decretado (SEMARNAT, 2016), lo cual es preocupante considerando que la expedición de los programas de OET es fundamental para diseñar e implementar políticas y acciones para hacer frente al cambio climático (artículo 9o., LGCC).

9. MARCO TEÓRICO

La investigación tiene sustento teórico principios y fundamentos de distintas disciplinas, los cuales tienen como eje transversal de análisis a la Teoría de la Complejidad (Morín, 2003), ya que ésta trata de explicar al universo como un todo, es decir, analiza más allá de la suma de los componentes y la forma de como éstos se unen para integrar o producir nuevas formas. Este esfuerzo por descubrir el orden en un cosmos caótico es lo que se conoce como la nueva ciencia de la complejidad o del caos. Este nuevo paradigma científico está dedicado a buscar conexiones entre muchos y variados esfuerzos de investigadores que trabajan en las fronteras de una cantidad asombrosa de disciplinas (Hayles, 1998).

Morín (2003) define la complejidad como un tejido; un tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares que conforman el mundo de lo fenoménico, y sus rasgos son los de ordenar lo inextricable, el desorden, la ambigüedad y la incertidumbre, estrategias para lograr la inteligibilidad. Para Morín la complejidad es un fenómeno cuantitativo, una cantidad de interacciones e interferencias entre un número de unidades y también determinaciones, incertidumbres y fenómenos aleatorios. La complejidad es la incertidumbre en los sistemas organizados, esto es, que la complejidad está permeada por una mezcla de orden y desorden y esa dirección está relacionado con el azar (Acevedo, 2013).

En las ciencias, la complejidad es el término utilizado para connotar una nueva forma de pensar sobre el comportamiento colectivo de muchas unidades básicas que interactúan entre sí, sean átomos, moléculas, neuronas, bits de una computadora o grupos humanos, para mencionar algunos. Para las teorías reduccionistas la magnitud de una causa se corresponde con su efecto, por el contrario, en las ciencias de la complejidad, las funciones no lineales implican una incongruencia frecuentemente sorprendente entre la causa y su efecto (Cárdenas, 2004). Es así como cada ser tiene una multiplicidad de identidades, por lo que fue importante estudiar al municipio de Calimaya y su dinámica de cambio de uso de suelo desde este paradigma, esto con la finalidad de identificar las causas y los efectos que provocan estos cambios.

La teoría de la complejidad es un campo interdisciplinario que se enfoca en el estudio de los sistemas complejos. Estos sistemas pueden ser encontrados en una variedad de disciplinas, incluyendo la física, la biología, la informática y la economía. Esta teoría se preocupa por entender cómo estos sistemas emergen a partir de interacciones entre sus partes constituyentes, y cómo sus propiedades globales pueden ser explicadas a partir de la dinámica local de sus componentes. Uno de los conceptos más importantes en la teoría de la complejidad es el de la autoorganización. Este término se refiere al fenómeno por el cual los sistemas complejos pueden organizar sus propias partes en patrones y estructuras que no están explícitamente programados en su diseño. La autoorganización es importante porque permite que los sistemas complejos sean adaptables y resilientes frente a cambios en su ambiente. Por ejemplo, los sistemas ecológicos pueden ajustar la densidad de las poblaciones de diferentes especies a través de mecanismos de retroalimentación, sin que haya un control centralizado que dicte cómo deben hacerlo.

Otro concepto importante en la teoría de la complejidad es el de la computabilidad. Este término se refiere a la capacidad de un sistema para realizar cálculos y procesar información. La computabilidad es importante porque permite entender cuáles son los límites fundamentales de la computación. Por ejemplo, se ha demostrado que hay problemas para los cuales no existe un algoritmo que pueda resolverlos de manera eficiente, y que estos problemas son intrínsecamente difíciles de resolver. Estos resultados tienen implicaciones importantes para la seguridad informática y la criptografía.

La teoría de la complejidad de Morin (2003) se enfoca en la comprensión de la complejidad de los sistemas y cómo éstos interactúan e influyen entre sí. En el caso del municipio de Calimaya y de manera específica en el proceso de cambio de uso de suelo y su impacto en la recarga de acuíferos, se puede aplicar esta teoría para entender la complejidad de los sistemas involucrados.

El cambio de uso de suelo, como la deforestación, la urbanización o la agricultura, puede afectar la capacidad de los suelos para infiltrar y recarga de los acuíferos. Esta alteración puede ser influenciada por diversos factores como la topografía, el clima, la geología, entre otros. La teoría de la complejidad permite entender cómo estos factores interactúan e influyen

entre sí, creando un sistema complejo en el que pequeños cambios pueden tener grandes consecuencias. Por ejemplo, la urbanización en una zona de recarga de un acuífero puede provocar la eliminación de la vegetación natural y la compactación del suelo, lo que disminuye la capacidad del suelo para infiltrar agua y disminuye la recarga del acuífero. Además, la urbanización puede aumentar la cantidad de superficies impermeables, como carreteras y edificios, lo que disminuye la cantidad de agua que se infiltra en el suelo. En resumen, la teoría de la complejidad puede ser aplicada para entender cómo el cambio de uso de suelo afecta la recarga de acuíferos, considerando los múltiples factores y variables involucrados en este proceso complejo.

Con base en los fundamentos de la Teoría de la Complejidad, esta investigación permeó otros fundamentos teóricos, los cuales no son independientes, sino complementarios entre sí. En este caso fue importante la Teoría General de Sistemas (Bertalanffy, 1976), Geografía Cuantitativa (Buzai, *et al.*, 2015), Geografía Económica (Segrelles, 2013; Vivó, 1991), Geografía Automatizada (Buzai, *et al.*, 2012), Geografía del Paisaje (Troll, 1973), Geografía Ambiental (Bocco, *et al.* 2013) y Ecología Cultural (1955).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Fuenzalida, *et al.*, 2015) sintetizan una larga evolución del pensamiento teórico-metodológico de la Geografía como ciencia. Con el uso de SIG, los objetos geográficos del territorio del municipio de Calimaya, Estado de México, son digitalmente representados, esto mediante el manejo de bases de datos geográficos y alfanuméricos vinculando su forma, la cual corresponde a la representación geométrica por punto, línea, polígono, siendo números incorporados como atributos en una tabla asociada al gráfico, mediante los softwares Idrisi, Arcgis, QGis, y SNAP.

El análisis de la relación ambiente - sociedad - cultura se realizó con los fundamentos de la Ecología Cultural (Steward, 1955). Esta teoría estudia los procesos a través de los cuales una sociedad se adapta socioculturalmente a su ambiente; es decir, explica el proceso de retroalimentación entre cultura, tecnología y entorno, pero dentro del estrecho marco constituido por el núcleo cultural (Stora, 1994). Esta teoría explica de forma amplia y consistente, el desarrollo general de la cultura o, más específicamente, el largo camino de las colectividades humanas, desde las formas organizativas más simples hasta las más complejas

(Sánchez, 2002). Esto, a través del estudio de las relaciones que establece el hombre con su medio físico, por medio de niveles de integración que van de lo local a lo regional, nacional o internacional (Steward, 1955, mencionado en Juan, 2021). La ecología cultural es una serie de principios, metodologías y conceptos que se aplican en diferentes condiciones espaciales y temporales para el estudio del hombre, la sociedad y su cultura, menciona cómo el hombre crea una relación con su ambiente, en donde sus patrones de comportamiento cultural permiten la adaptación de éste a las condiciones del ambiente, involucra el estudio de los recursos naturales disponibles en una comunidad (Juan, 2021).

Otros fundamentos teóricos que sustentaron el desarrollo de esta investigación fueron el impacto ambiental, procesos socioambientales, cambio de uso de suelo, economía circular y responsabilidad ambiental.

9.1. Geografía cuantitativa

La Geografía Cuantitativa, como paradigma de la Geografía de mediados del siglo veinte, ha surgido en estrecha relación con una ciencia aplicada que tuvo por objetivo encontrar soluciones a las problemáticas concretas de naturaleza socioespacial (Buzai, 2005). La cuantificación aplicada en las ciencias humanas en general y en los estudios geográficos en particular fueron producto de la situación contextual (historia externa de la ciencia) en la cual la finalización de la segunda guerra mundial, la guerra fría y la carrera espacial cumplieron un papel de suma importancia.

La Geografía Cuantitativa tuvo utilidad para la reconstrucción de espacios regionales y urbanos buscando su máxima eficiencia en cuanto a la disposición de sus entidades sobre el territorio y la realización de modelos que posibilitaban brindar alternativas a futuro. Constituyó un avance necesario ante el comienzo de los grandes avances tecnológicos que impactarían notablemente en la organización social y en los impactos territoriales de la era de la modernidad.

De acuerdo con Buzai (2005) los inicios de la geografía tienen sus bases en la metodología matemática, que fue el mecanismo ideal para lograrlo pues era considerado el lenguaje de la ciencia y junto con él, la geometría fue considerada el lenguaje de las formas espaciales. Aparece, de esta manera, la llamada revolución cuantitativa que llevó a la aparición de una

Nueva Geografía, también llamada Geografía Teórica por su alto grado de abstracción, Geografía Estadística o Macro Geografía, aunque el término Geografía Cuantitativa sería el que perdurara. La matriz de datos geográfica ha sido fundamental para el desarrollo de las aplicaciones cuantitativas a lo largo de todo el período analizado. Según Buzai (2005), los fundamentos iniciales de la Geografía Automatizada se desarrollaron en una etapa inicial de veinte años (1953-1973), durante la cual se formularon siete características principales para los estudios geográficos basados en la Geografía Cuantitativa:

1. Enfoque espacial predominante: para la Geografía Cuantitativa, los estudios geográficos deben estar fundamentados en el espacio geográfico, ya que no es posible llevar a cabo análisis geográficos sin tener en cuenta esta dimensión.
2. Construcción de regiones: la delimitación de áreas en la superficie terrestre se realiza en función de los objetivos y el marco teórico de la investigación.
3. Metodología de construcción regional cuantitativa: a diferencia de la construcción cualitativa clásica basada en la superposición de mapas, la Geografía Cuantitativa utiliza métodos matemáticos para definir espacios regionales.
4. Búsqueda de la construcción de modelos: como una ciencia nomotética, la Geografía Cuantitativa se centra en la creación de modelos espaciales, que son representaciones simplificadas de la realidad geográfica. Estos modelos permiten comprender los aspectos fundamentales del espacio y también pueden servir como guía para la planificación territorial. El uso de modelos proporciona una base sólida para el avance en la construcción y transmisión del conocimiento geográfico.
5. Rechazo del excepcionalismo: la Geografía no se considera una ciencia excepcional en el sentido de la clasificación de E. Kant, por lo tanto, no debe centrarse exclusivamente en el estudio de fenómenos únicos e irrepetibles.
6. Fomento de la capacidad interdisciplinaria: al utilizar el lenguaje matemático como un lenguaje común, la Geografía Cuantitativa tiene la capacidad de establecer vínculos interdisciplinarios con otras ciencias. Esto facilita el intercambio y la colaboración en la aplicación práctica del conocimiento geográfico.

7. Mayor objetividad en la investigación: aunque se reconoce que la investigación científica nunca es completamente objetiva y que existen niveles variables de subjetividad en las decisiones del investigador, la Geografía Cuantitativa busca obtener un mayor grado de objetividad en sus estudios.

Es importante tener en cuenta que estas características reflejan los principios fundamentales de la Geografía Cuantitativa en su etapa inicial y que, con el tiempo, han surgido otras corrientes y enfoques en la disciplina geográfica (Buzai, 2005).

La Geografía cuantitativa y los procesos de cambio de uso del suelo están relacionados en la medida en que la Geografía cuantitativa puede ser utilizada para comprender y predecir patrones y tendencias del cambio de uso del suelo a través de técnicas cuantitativas y análisis estadístico. La Geografía cuantitativa se enfoca en el uso de herramientas y técnicas cuantitativas para analizar y comprender patrones y procesos geográficos. A través del análisis de datos y el uso de técnicas estadísticas, la Geografía cuantitativa permite identificar patrones espaciales y tendencias a lo largo del tiempo (Buzai, 2005).

El cambio de uso del suelo es un proceso que involucra la transformación de áreas naturales a usos humanos como la agricultura, la minería o la urbanización. La Geografía cuantitativa puede ser utilizada para analizar datos y detectar patrones de cambio de uso del suelo, y predecir su posible evolución en el futuro.

Además, la Geografía cuantitativa puede ser utilizada para desarrollar modelos que permitan entender cómo los cambios en el uso del suelo pueden afectar el ambiente natural, la recarga a los acuíferos, y por ende a las comunidades humanas. Por ejemplo, se pueden utilizar modelos que permitan entender cómo la expansión urbana o la conversión de bosques a áreas de cultivo pueden afectar la biodiversidad, la calidad del aire y del agua y la calidad de vida de las personas. En resumen, la Geografía cuantitativa es una herramienta clave para comprender el cambio de uso del suelo y predecir su evolución futura. La aplicación de herramientas de Geografía cuantitativa puede ayudar a los gestores y planificadores a tomar decisiones informadas basadas en datos precisos y actualizados, y a desarrollar estrategias de manejo del suelo que promuevan la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas naturales y sociales.

9.2. Geografía automatizada

El Canadian Geographical Information System (CGIS) de 1964 se considera el primer Sistema de Información Geográfica. Durante las siguientes dos décadas, surgieron diversas reflexiones motivadas por el impacto de las tecnologías digitales en la Geografía como ciencia. Sin embargo, fue J.E. Dobson en 1983 quien propuso el surgimiento de una nueva especialidad: la Geografía Automatizada. Esta propuesta generó una década de debates y discusiones en la disciplina. El aporte de J.E. Dobson se basa en su reconocimiento de los significativos avances computacionales que han permitido la automatización de la mayoría de los métodos utilizados en la resolución de problemas geográficos. En este contexto, Dobson plantea la Geografía Automatizada como un campo de aplicación eminentemente técnico que presenta ventajas en comparación con los métodos de trabajo tradicionales.

La Geografía Automatizada representa un marco de investigación geográfica basado en el conjunto de software componente de la Geoinformática. Sin embargo, el impacto ha sido muy importante en un nivel interdisciplinario, y verificando la relación que la Geografía establece con otras ciencias a partir de las tecnologías digitales han aparecido dos nuevos campos de aplicación. La geografía automatizada y el cambio de uso del suelo están relacionados en la medida en que la geografía automatizada, que se refiere al uso de herramientas y técnicas computacionales para el análisis y la visualización de datos geográficos, puede ser utilizada para entender y monitorear el cambio de uso del suelo.

La geografía automatizada es una disciplina que se ha desarrollado en las últimas décadas gracias a los avances en la tecnología y en los sistemas de información geográfica (SIG). Los SIG permiten recopilar y analizar grandes cantidades de datos geográficos, y aplicar técnicas de análisis espacial para comprender patrones y tendencias. El cambio de uso del suelo es uno de los principales impulsores del cambio ambiental, y puede ser monitoreado y analizado utilizando herramientas de geografía automatizada. Los SIG pueden utilizarse para recopilar y analizar datos de imágenes satelitales y otros datos geográficos, lo que permite detectar cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo y en diferentes áreas geográficas.

La geografía automatizada también puede ser utilizada para desarrollar modelos predictivos que permitan entender cómo el cambio de uso del suelo puede afectar el ambiente natural y

las comunidades humanas. Por ejemplo, se pueden desarrollar modelos que permitan entender cómo la expansión urbana o la conversión de bosques a áreas de cultivo pueden afectar el clima, la calidad del aire y del agua, y la biodiversidad. Es una herramienta clave para entender y monitorear el cambio de uso del suelo, y para desarrollar estrategias de manejo del suelo que promuevan la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas naturales y sociales. La aplicación de herramientas de geografía automatizada puede ayudar a los gestores y planificadores a tomar decisiones informadas basadas en datos geográficos precisos y actualizados.

9.3. Geografía del paisaje

El término ciencia del paisaje apareció por primera vez en 1884 para desiertos absolutos o lugares de influencia glacial, de los cuales interesaban exclusivamente los procesos físicos (Troll, 1966, mencionado en González, 2006). Los estudios del paisaje tienen sus inicios desde Alexander von Humboldt, y se ha aplicado en la escuela alemana como una profunda tradición. Troll (1950) define el paisaje geográfico como una parte de la superficie terrestre definida por una configuración espacial determinada, resultante de su aspecto exterior, del conjunto de sus elementos y de sus relaciones externas e internas, que queda enmarcada por los límites geográficos naturales de otros paisajes de distinto carácter. Por su sustancia geográfica, los componentes del paisaje pertenecen a tres ámbitos fundamentales: el mundo abiótico, el mundo viviente y el derivado de la acción del hombre (Troll, 1966, mencionado en González, 2006).

Es necesario identificar las interrelaciones e interacciones existentes para comprender su expresión espacial mediante un cierto esquema de distribución, lo que permite establecer una estructura de unidades espaciales de distintos tamaños, morfológica y funcionalmente diferenciables. Conceptos como el de unidad de paisaje, mosaico de paisaje o cinturones geocológicos, tienen su fundamento en esta consideración (Neef, 1972, 1974; Sochava, 1972; Leser, 1976, mencionados en González, 2006).

La aplicación de la Teoría General de Sistemas (Bertalanffy, 1951, 1968) al estudio del paisaje, supone la consideración de éste como un sistema territorial natural, compuesto por

toda una serie de elementos interrelacionados e interactuantes, y cuyo resultado se plasma en una estructura morfológica y una dinámica propia y diferenciable.

La Geografía en su relación con el paisaje distingue las múltiples relaciones que se establecen entre las manifestaciones de la naturaleza viva y la no viva, así como de las comunidades humanas, social y económicamente activas; relaciones que en el transcurso de los acontecimientos históricos han sido constantemente modificadas, incluso durante el corto plazo de una vida humana. La geografía abordó el concepto científico de paisaje, con el objetivo de investigar los detalles que se encuentran detrás de las apariencias. Carl Sauer introdujo en 1925 el término paisaje (landscape) en la geografía americana y la definió como “la unidad areal de fenómenos interdependientes”.

Dentro del contexto geográfico, podemos distinguir diversas escalas de unidades paisajísticas, que varían desde las extensas franjas de paisajes continentales, como la taiga, pradera, Sahel y desierto, hasta unidades más pequeñas y detalladas. Estas últimas, similares a teselas de un mosaico, se unen para conformar el sistema espacial de un paisaje específico. K.H. Paffen (1953, mencionado en González, 2006), en su estudio metodológico sobre la investigación del paisaje ha diferenciado 7 niveles: cinturón de paisaje, zona de paisaje, región de paisaje, grupo de paisaje, gran paisaje, pequeño paisaje y célula de paisaje.

Troll (1950, mencionado en González, 2006) ha definido como paisaje geográfico: una parte de la superficie terrestre definida por una configuración espacial determinada, resultante de su aspecto exterior, del conjunto de sus elementos y de sus relaciones externas e internas, que queda enmarcada por los límites geográficos naturales de otros paisajes de distinto carácter.

Bodek, H. & Schmithüsen (1949, mencionado en González, 2006) mencionan que, por su sustancia geográfica, los objetos de un paisaje geográfico pertenecen a tres ámbitos que los sitúan bajo leyes muy diferentes:

1. Los abióticos, el mundo puramente físico - químico, que depende del proceso físico de causa y efecto. El medio abiótico no puede explicarse solamente mediante los métodos de la Geofísica, puesto que el complejo abiótico es el resultado de períodos pasados de la historia terrestre, como se puede ver en las formas terrestres resultado de diferentes morfogénesis.

2. Los bióticos, el mundo viviente, sujeto a leyes propias de la vida como son el crecimiento, la multiplicación, la expansión, la adaptación o la herencia. Estos fenómenos derivan en todas las demás manifestaciones del paisaje natural, en el sentido de la causalidad biológica.

3. El mundo concebido por el hombre, que depende de las puras comprensiones causales y motivaciones de los individuos o grupos sociales, y por lo tanto, de principios de orden socioeconómico, los cuales interfieren con los naturales.

La geografía del paisaje y los procesos de cambio de uso del suelo están estrechamente relacionados, ya que el paisaje es el resultado de la interacción entre los seres humanos y el ambiente natural, y el cambio de uso del suelo (por acción de la sociedad) puede modificar significativamente la estructura y la función de los paisajes.

La geografía del paisaje se enfoca en el estudio de la estructura y función de los paisajes, incluyendo su origen, formación y transformación. Los paisajes son una combinación de elementos naturales y culturales, incluyendo la topografía, el clima, la vegetación, los cuerpos de agua y los patrones culturales, como los asentamientos humanos y las áreas de uso agrícola y forestal.

El cambio de uso del suelo, como la conversión de bosques a campos agrícolas o la expansión urbana, puede alterar significativamente la estructura y la función de los paisajes, lo que puede provocar implicaciones ambientales y sociales. Por ejemplo, la conversión de bosques a campos agrícolas provoca impacto significativo en la biodiversidad y en la calidad del suelo, mientras que la expansión urbana puede llevar a la fragmentación del hábitat y la pérdida de la conectividad ecológica. Los geógrafos del paisaje trabajan en colaboración con otros profesionales, como biólogos, ecólogos y urbanistas, para desarrollar estrategias de manejo del suelo considerando aspectos culturales y ecológicos de los paisajes. Estas estrategias pueden incluir la conservación de áreas naturales, el desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles y la planificación urbana que promueva la conectividad ecológica. En resumen, la geografía del paisaje es una disciplina clave para entender los impactos del cambio de uso del suelo en la estructura y función de los paisajes.

9.4. Geografía ambiental

Desde sus orígenes como disciplina, la geografía ha mantenido una estrecha relación, tanto conceptual como práctica, con el concepto de ambiente, específicamente en su dimensión territorial (Bocco, 2013). Tanto a nivel internacional, nacional, estatal como local, se destacan temas como riesgos, vulnerabilidad, biodiversidad en relación con la distribución espacial, planificación y uso del suelo, análisis del paisaje, tenencia y acceso a los recursos, manejo de cuencas y cambio en la cobertura del suelo, entre otros.

La geografía ambiental busca establecer un esfuerzo interdisciplinario para reorientar el rumbo, superando las diferencias entre los campos socioculturales y biofísicos. En el contexto actual, en el que existen numerosos estudios ambientales enfocados en el análisis del espacio, como la ciencia sustentable, la ciencia del cambio terrestre y la sociología ambiental, la geografía adquiere una relevancia especial. La geografía ambiental, como enfoque integrador, debe contribuir a la organización de los diferentes componentes de la investigación, superando los desafíos lingüísticos y metodológicos que surgen de la pretensión holística (Demeritt, 2009, citado en Bocco, 2013). La dimensión territorial y paisajística ofrecida por la geografía, en sus aspectos espaciales y humano-ambientales, brinda una especificidad única a su contribución al estudio ambiental, tanto como una dimensión de análisis como una práctica concreta en la investigación aplicada (ibid).

La geografía ambiental y los procesos de cambio de uso del suelo están estrechamente relacionados, ya que la forma en que los seres humanos utilizan la tierra puede tener un impacto significativo en los sistemas naturales y en el medio ambiente en general. La geografía ambiental se enfoca en el estudio de las interacciones entre los seres humanos y el ambiente natural, y cómo estas interacciones pueden afectar la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas naturales. El cambio de uso del suelo, que se refiere a la conversión de una forma de uso del suelo a otra, es uno de los principales impulsores del cambio ambiental. La expansión de la agricultura, la urbanización y la explotación de recursos naturales son algunos de los factores que impulsan el cambio de uso del suelo. Estos cambios pueden tener implicaciones ambientales, como la deforestación, procesos erosivos, la pérdida de biodiversidad y la emisión de gases de efecto invernadero.

La geografía ambiental busca entender cómo los seres humanos interactúan con el ambiente y cómo estas interacciones pueden ser manejadas de manera sostenible y resiliente. Los geógrafos ambientales estudian los patrones de cambio de uso del suelo a nivel regional y global, así como las implicaciones ambientales de estos cambios. Además, trabajan en colaboración con comunidades locales y gobiernos para desarrollar estrategias de manejo del suelo y conservación de la biodiversidad que tomen en cuenta tanto las necesidades materiales como culturales de las sociedades humanas. Es una disciplina clave para entender los impactos ambientales del cambio de uso del suelo y para desarrollar estrategias de manejo del suelo que promuevan la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas naturales y sociales.

Las condiciones ambientales en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (espacio geográfico en donde está ubicado el Municipio de Calimaya) son resultado de las relaciones intrínsecas y extrínsecas de factores físicos, químicos, biológicos, sociales, políticos, económicos y culturales que influyen de manera directa e indirecta en la generación de riesgos, deterioro de las condiciones del ambiente (impacto ambiental) y por consiguiente, en el bienestar de los pobladores (Valencia, *et al.*, 2016). La situación geográfica del Municipio de Calimaya en el contexto estatal y su cercanía con la Ciudad de Toluca y la Ciudad de México, su importancia económica y la amplia diversidad de recursos naturales, aún existentes (materiales pétreos), son otros factores que están influyendo en los procesos de cambio de ocupación de uso del suelo; pues como lo señalan algunos especialistas en la materia (Juan, 2013).

9.5. Ecología cultural

Para Steward (1972) la ecología cultural es un método encaminado a comprobar cómo la adaptación de una cultura a su entorno puede provocar el cambio ecológico. Con esta nueva propuesta, este autor aportó un enfoque moderno de la evolución cultural en la antropología. Afirma que la adaptación se da por la cultura y que hay que considerar el desarrollo de las tecnologías culturales. La comparación se convirtió en su método principal para encontrar regularidades de desarrollo y funcionamiento en los elementos que componen a la cultura.

La ecología cultural es un enfoque interdisciplinario que estudia las interacciones entre los seres humanos y su ambiente natural y cultural. Esta disciplina se preocupa por entender

cómo las prácticas y creencias culturales de una sociedad se adaptan y transforman en respuesta a cambios en su entorno, y cómo estas prácticas y creencias a su vez afectan el ambiente. Esta teoría se basa en la idea de que los seres humanos son parte integral de los sistemas ecológicos, y que su supervivencia y bienestar dependen de una comprensión profunda de la relación cultura - naturaleza. Se enfoca en el estudio de las prácticas y creencias de las sociedades humanas desde una perspectiva holística, considerando tanto los aspectos materiales como simbólicos de la cultura. La ecología cultural es una herramienta para la conservación y revitalización de las culturas y prácticas tradicionales.

La ecología cultural es una disciplina en constante evolución, que busca integrar conocimientos y perspectivas de múltiples campos. Algunos de los enfoques interdisciplinarios más comunes en la ecología cultural son la antropología, la biología, la geografía y la ecología. Los ecólogos culturales también trabajan en colaboración con comunidades locales, organizaciones no gubernamentales y gobiernos para desarrollar estrategias de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales y culturales.

La ecología cultural está estrechamente relacionada con el cambio de uso del suelo, ya que los seres humanos utilizan la tierra para satisfacer sus necesidades materiales y culturales. Los procesos de cambio de uso del suelo pueden tener importantes implicaciones ecológicas y culturales, y pueden afectar la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas naturales y culturales. Por ejemplo, cuando las sociedades humanas adoptan prácticas agrícolas intensivas, como la tala y quema de bosques para la agricultura, pueden tener un impacto significativo en la biodiversidad y en la calidad del suelo. Si estas prácticas no son manejadas de manera sostenible, pueden llevar a la desertificación del suelo y la pérdida de hábitats naturales. Además, los cambios en el uso del suelo pueden tener implicaciones culturales, como la pérdida de tradiciones y conocimientos ancestrales asociados con prácticas agrícolas tradicionales (Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2022).

La ecología cultural busca entender cómo los seres humanos interactúan con el ambiente y cómo estas interacciones pueden ser manejadas de manera sostenible y resiliente. Los ecólogos culturales trabajan en colaboración con comunidades locales para desarrollar estrategias de manejo del suelo y conservación de la biodiversidad que tomen en cuenta tanto

las necesidades materiales como culturales de las sociedades humanas. En este sentido, la ecología cultural es una herramienta valiosa para promover un desarrollo sostenible que sea respetuoso con la diversidad cultural y ecológica.

10. MÉTODOLÓGÍA

El desarrollo de la investigación se realizó en dos dimensiones: a) trabajo de gabinete y b) trabajo de campo, utilizando como enfoque metodológico transversal a las herramientas de sistemas de información geográfica y la teledetección (figura 1). A continuación, se presenta de manera general las actividades, métodos y técnicas utilizadas en esta investigación:

10.1. Trabajo de gabinete

En esta etapa se realizó la búsqueda, selección y análisis de información relevante para el tema de estudio, así como la planificación de las actividades desarrolladas en el área de estudio durante el trabajo de campo. Se realizaron revisiones de libros, artículos científicos y publicaciones en Internet relacionadas con procesos de cambio de uso de suelo, impacto ambiental, degradación ambiental, actividades de extracción de materiales pétreos, condiciones geográficas del municipio y actividades económicas. Se recopiló información de las condiciones de los mantos acuíferos. También se llevó a cabo la recopilación de información en dependencias gubernamentales federales sobre la actividad legal e ilegal de las minas que realizan la extracción de recursos pétreos.

Para caracterizar el área de estudio, se utilizó cartografía digital proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se delimitó el área de estudio y se elaboró una descripción fisiográfica y sociocultural del municipio, con el objetivo de tener una visión amplia de las relaciones entre el ambiente, la sociedad, la cultura y la gestión de los recursos naturales, así como de procesos de cambio de uso de suelo.

Utilizando el software ERIC III y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se obtuvo información relacionada con las precipitaciones y temperaturas históricas en el municipio, proveniente de estaciones climatológicas ubicadas dentro y áreas adyacentes a los límites municipales. Esta información se utilizó para crear mapas que sirvieron como base para desarrollar un modelo en los sistemas de información geográfica, que permitió visualizar los cambios en los acuíferos y determinar los impactos causados por el cambio de uso de suelo.

Con el método geográfico, se realizó la caracterización del espacio geográfico del municipio de Calimaya. Se estudiaron las condiciones socioambientales y culturales de los habitantes,

así como las condiciones actuales de las minas activas y abandonadas, así mismo, de las zonas agrícolas.

Con el método estadístico, se determinaron las proporciones de los datos obtenidos en el trabajo de campo, se integraron bases de datos y se diseñaron tablas, cuadros y gráficas para interpretar y analizar los resultados obtenidos. Este método fue importante para el manejo de todos los datos, tanto de campo como de gabinete.

Con el método cartográfico, se determinó y representó gráficamente el espacio físico de la investigación. Se elaboraron mapas temáticos específicos y se desarrollaron mapas de cambio de uso de suelo (1997, 2002, 2007, 2012,2017, 2022). Estos mapas se crearon siguiendo los principios técnicos cartográficos y utilizando los softwares QGIS y ArcGIS.

El análisis de las imágenes satelitales se realizó de la siguiente manera:

1. Búsqueda y descarga de ortofotos e imágenes satelitales.
2. Remuestreo de las imágenes satelitales.
3. Delimitación y recorte del área de estudio.
4. Aplicación de las metodologías de clasificación supervisada y no supervisada utilizando el software ENVI. Las variables identificadas fueron: agricultura, zona forestal, pastizal inducido/natural, zona urbana y minas (activas y abandonadas).
5. En la clasificación supervisada se utilizaron puntos de control.
6. Verificación y aceptación de los resultados.
7. Conversión de los resultados en archivos vectoriales (shape), eliminando los polígonos de menor tamaño.
8. Mejoramiento de la calidad de los polígonos utilizando ArcGIS y/o QGIS para evitar errores.
9. Corrección de errores topológicos.
10. Asignación de valores y descripciones a cada campo resultante.
11. Obtención de los datos necesarios, como superficies y porcentajes.

Utilizando los softwares mencionados, junto con el manejo de imágenes satelitales y ortofotos, se crearon, analizaron y describieron diferentes mapas de uso de suelo y vegetación en los cuales se representa la dinámica de los cambios ocurridos en el municipio de Calimaya en el período de 1997 a 2022.

10.2. Trabajo de Campo

Durante esta etapa se realizaron múltiples recorridos de campo en áreas accesibles y seguras con el propósito de realizar observaciones directas y evaluar las condiciones del territorio. Se identificaron zonas de extracción de materiales pétreos, tanto activas como inactivas, así como áreas agrícolas, procesos erosivos, asentamientos humanos, corrientes superficiales y cambios en el uso del suelo. Las observaciones directas durante trabajo de campo permitieron establecer comparaciones con la información teórica obtenida en trabajo de gabinete. Durante el trabajo de campo se estableció comunicación con las autoridades municipales y los habitantes de las comunidades, incluyendo propietarios o arrendatarios de terrenos y áreas agrícolas que habían sido utilizadas anteriormente para la extracción de recursos pétreos, esto con la finalidad de analizar los impactos ambientales generados.

Los recorridos de campo también se utilizaron para hacer muestreos de filtración (Anexo 1) con un infiltrómetro casero “convencional” donde se registró el tiempo de filtración en los diferentes usos de suelo del territorio municipal; además, se tomaron puntos de control utilizando un sistema de posicionamiento global (GPS), lo cual fue útil para registrar las coordenadas geográficas y algunas características de las unidades de análisis: minas, áreas agrícolas, zonas urbanas, bosques, pastizales, cuerpos de agua, para su posterior procesamiento con las imágenes satelitales. Otra actividad importante en trabajo de campo fue la toma fotográfica de los sitios que representaban actividades relacionadas con el cambio de uso del suelo y sus impactos.

Es importante destacar que las actividades realizadas en gabinete y en campo no fueron independientes, sino complementarias entre sí. Se verificaron las observaciones realizadas en gabinete a través de la información obtenida en el campo, y a su vez, las situaciones y categorías observadas en campo fueron representadas en los mapas. El uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección y manejo del GPS

Para generar mapas de uso de suelo utilizando ortofotos del INEGI, se realiza un proceso de fotointerpretación visual. Esto implica identificar y delimitar las áreas correspondientes a los diferentes tipos de uso de suelo presentes en las imágenes. Es importante tener conocimientos especializados en la interpretación de características visuales, como la forma, el tamaño, la textura y el color, esto con el propósito de realizar una interpretación precisa de las ortofotos y asignar las categorías de uso de suelo de manera adecuada.

La comparación de ortofotos de diferentes años, como en el caso de esta investigación en donde se realizaron dos mapas de uso de suelo y que corresponden a los años 1997 y 2002, esto permitió analizar los cambios en el uso de suelo. En estos mapas es posible identificar áreas que han experimentado transformaciones, como la conversión de áreas agrícolas en áreas urbanas o la deforestación de zonas forestales.

10.4. Clasificación supervisada

La clasificación supervisada es un proceso propuesto por Ignacio Alonso Fernández-Coppel (2011) y consiste en lo siguiente:

1. - Localizar zonas representativas de cada tipo de cubierta que puedan ser identificadas en la imagen (denominadas zonas de entrenamiento).
2. - Digitalizar polígonos alrededor de cada zona de entrenamiento, asignando un único identificador a cada tipo de cubierta.
3. - Analizar los píxeles dentro de cada zona de entrenamiento y crear curvas de respuesta espectral (firma espectral) para cada tipo de cubierta.
4. - Clasificar la imagen entera comparando la firma de cada uno de los píxeles con cada una de las curvas de respuesta espectral conocidas (figura 2), y asignando ese píxel al tipo de cubierta que tiene una firma espectral similar.

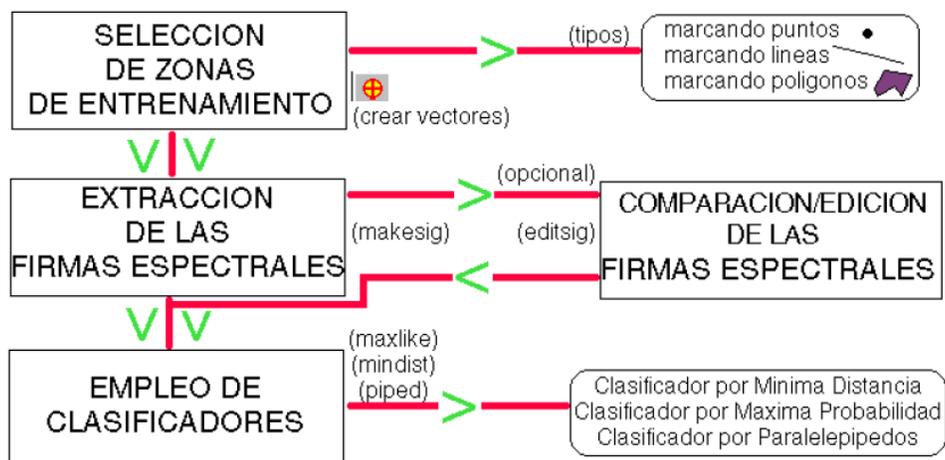


Figura 2. Diagrama del método de clasificación supervisada. Fuente: Fernández, 2011.

El cuarto y último paso del proceso consiste en comparar el valor de cada píxel de la imagen en las siete bandas con los archivos de firmas creados previamente. Cada píxel se asigna al tipo de cobertura que tiene una firma similar. Las técnicas estadísticas utilizadas en este proceso se conocen como clasificadores. En este caso, se crearon imágenes clasificadas utilizando el clasificador de máxima probabilidad (Maxlike), uno de los clasificadores disponibles en IDRISI (figura 3).

Este clasificador evalúa la probabilidad de que un píxel dado pertenezca a una categoría en función de la teoría estadística de Bayes. Luego clasifica el píxel en la categoría con la mayor probabilidad de pertenencia. Se utiliza el módulo MAXLIKE, se especifican las firmas espectrales que se clasificarán y se les asignan nombres. Se elige clasificar todos los píxeles y se asigna un valor igual a cada clase para obtener una probabilidad igual. El resultado se nombra MAX.

A continuación, se realiza el compuesto de la imagen utilizando el comando COMPOSITE. Además, de utilizar la herramienta SEGMENTATION para segmentar la imagen. Luego se usa el comando SEGTRAIN para digitalizar los polígonos que se analizarán, teniendo en cuenta las variables editadas, como minas, suelo, zona urbana, entre otros, y se les asigna una categoría. En la siguiente figura se muestra el ejemplo con una imagen satelital SPOT 6 del año 2012:

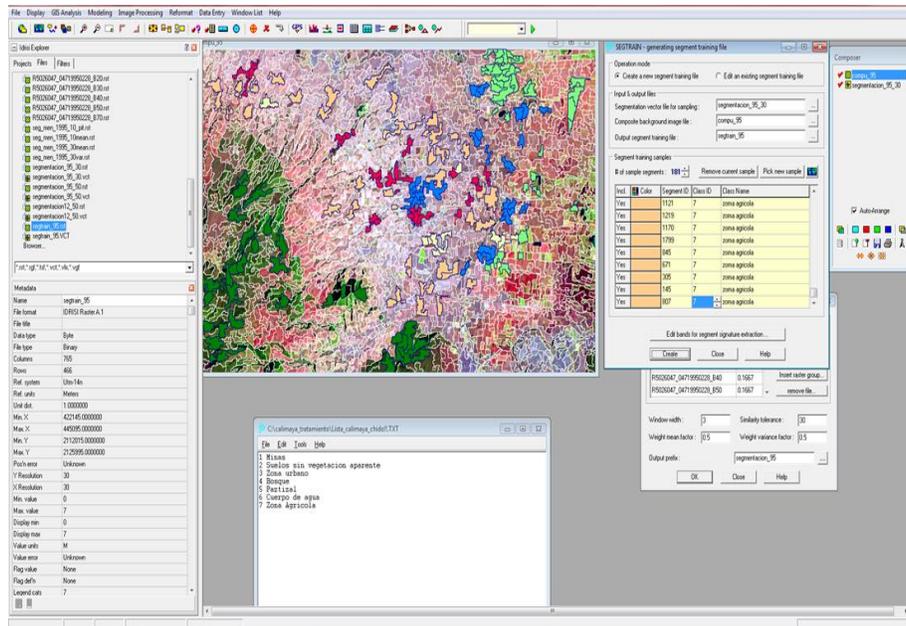


Figura 3. Digitalización de polígonos donde se dan las muestras de píxel. Fuente: elaboración propia.

Después de haber digitalizado los polígonos se utiliza el comando MAXLIKE para identificar las áreas de la zona (figura 4).

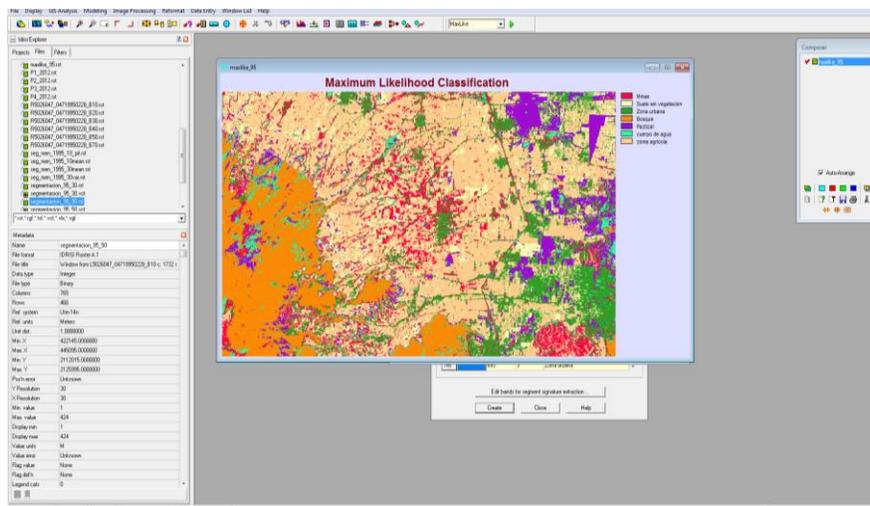


Figura 4. Aplicación del comando MAXLIKE. Fuente elaboración propia.

Utilizando la herramienta de RASTER-VECTOR, se convierte el archivo generado para realizar una conversión a SHP, y de este mismo se transfiere al programa ARC MAP, cortando el polígono del municipio y se le proporciona la proyección UTM zona14 para después hacer el mapa y/o análisis con el método de Prevert (figura 5).

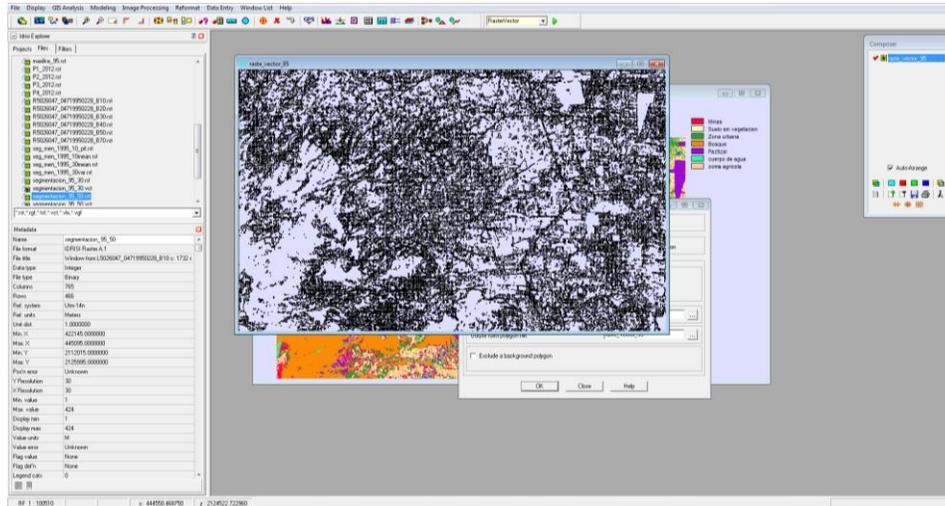


Figura 5. Conversión de formato ráster a formato vector en IDRISI. Fuente: elaboración propia.

La utilización de nuevas tecnologías y metodologías de análisis como la teledetección, son parte fundamental en el estudio de problemas vinculados con procesos ambientales y generación de escenarios futuros. Es una herramienta excepcional en la toma de decisiones o en la gestión de estos espacios naturales, de los cuales depende en gran forma el desarrollo económico en muchas ciudades y que si no se tratan de manera adecuada, pueden convertirse en un problema más serio a futuro.

10.5. Método de Prevert (1998) y Moll (2013)

La metodología de Prevert (1998) citado en *Íbáñez et al.*, (2007) es una técnica ampliamente utilizada en la planificación territorial y la gestión de riesgos naturales. Fue desarrollada por el geógrafo francés Georges Prevert en la década de 1970 y se centra en la identificación y mitigación de riesgos naturales, especialmente aquellos relacionados con la erosión, la sedimentación y la inundación. Se basa en un enfoque participativo que involucra a los residentes locales y a expertos en la identificación de los riesgos naturales presentes en la zona de estudio. Se lleva a cabo en tres etapas principales:

1. Análisis de la vulnerabilidad: en esta etapa se identifican los factores que contribuyen a la vulnerabilidad de la zona, como la topografía, la geología, el clima, la actividad humana y la infraestructura. También se consideran los elementos de valor en la zona, como la población, la infraestructura, el medio ambiente y los recursos naturales.

2. Análisis de los riesgos: se identifican los riesgos naturales presentes en la zona, como la erosión, la sedimentación, la inundación y la avalancha. Se evalúa la probabilidad y la magnitud de los riesgos, y se identifican las áreas de mayor riesgo.

3. Medidas de prevención y mitigación: se identifican y se implementan medidas de prevención y mitigación de los riesgos identificados en la etapa anterior. Esto puede incluir la construcción de infraestructuras de ingeniería, como diques y muros de contención, reforestación de áreas afectadas y la implementación de medidas de gestión del suelo y del agua.

En el contexto de esta investigación, se utilizó principalmente la metodología de Coeficientes de escorrentía de Prevert. Este método se enfoca en la gestión de cuencas hidrográficas y la planificación territorial, y se utiliza para estimar la escorrentía superficial en una cuenca o cualquier otra zona con diferentes usos de suelo y procesos. Es una extensión de la metodología de Prevert que se centra en la gestión de riesgos relacionados con la erosión y la sedimentación.

La escorrentía superficial se refiere al flujo de agua que se desplaza por la superficie del suelo en una cuenca hidrográfica. El método de coeficientes de escorrentía de Prevert se basa en la identificación y análisis de los factores que influyen en este flujo, como la topografía, la geología, el uso del suelo y las características del suelo.

Este método se utiliza para determinar los coeficientes de escorrentía en función de las características de la cuenca y el uso del suelo. Se establecen coeficientes de escorrentía específicos para diferentes tipos de suelo y uso del suelo, como bosques, pastizales, zonas urbanas y zonas industriales. Estos coeficientes permiten estimar de manera más precisa el volumen y la dirección de la escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica (figura 6).

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenos-limoso Limoso-arenoso	Limoso Limoso-arcilloso	Arcilloso
Bosque	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,25	0,35	0,50
	10 – 30	0,30	0,40	0,60
	> 30	0,32	0,42	0,63
Pastizal	0 – 5	0,15	0,35	0,45
	5 – 10	0,30	0,40	0,55
	10 – 30	0,35	0,45	0,65
	>30	0,37	0,47	0,68
Cultivo agrícola	0 – 5	0,30	0,50	0,60
	5 – 10	0,40	0,66	0,70
	10 – 30	0,50	0,70	0,80
	> 30	0,53	0,74	0,84

Figura 6. Coeficiente de escorrentía de Prevert de acuerdo con los diferentes usos de suelo y sus características. Fuente: Prevert (1998)

Como se observa en la figura 6, el método de Prevert está diseñado solo para los usos de suelo de bosque, pastizal y agricultura. Por lo que se complementó con información de Marcos Moll Barber (2013) quien estudio el método de Prevert y complementó los demás usos de suelo y plantea una metodología centrada en elaborar una cartografía que sirva para evaluar las diferentes superficies de escorrentía que se encuentran en una cuenca o de un territorio.

Moll (2013) entiende la escorrentía como la parte del agua precipitada que no se evapora, no se evapotranspira ni se intercepta, ni se almacena ni se infiltra; el coeficiente de escorrentía (Ce) es la porción de agua que circula en superficie en relación con el agua total precipitada, expresándose en tanto por uno. Éste es fundamental y muy útil para calcular el caudal de una cuenca y, de este modo, poder adaptar cualquier obra de ingeniería al caudal esperado, o bien, para tomar medidas en ordenación y planificación del territorio que ayuden a mitigar el riesgo de inundación y de pérdida de filtración. Por lo que genera una aportación metodológica (tabla 1) que pretende ser genérica y, además, abierta a modificaciones con el propósito de perfeccionar el método y aplicarlo a otras cuencas o territorios.

Tabla 1. Valoración del coeficiente de escorrentía según los usos del suelo y la vegetación (Ce). Fuente; Moll (2013).

Ce	Uso de suelo	Ce	Uso de suelo
0,35	Terrazas abandonadas (primeras colonizaciones)	0,37	Jardines urbanos
0,15	Terrazas en abono avanzado (cubierta vegetal densa)	0,50	No edificado
0,30	Terrazas en cultivo	0,85	Red de comunicaciones
0,32	Cultivos con regadío (trabajados)	0,45	Vertedero
0,36	Cultivos con regadío (abandonados)	0,95	Rambla (hormigonada)
0,00	Balsa	0,00	Costa acumulación
0,75	Urbano concentrado	0,08	Espacio forestal
0,60	Urbanizaciones ex-novo	0,10	Maquia
0,55	Zonas suburbanas	0,51	Afloramiento rocoso
0,52	Áreas deportivas	0,60	Rambla
0,80	Zona industrial		

Después de determinar los coeficientes de escorrentía, se pueden utilizar modelos hidrológicos para estimar la cantidad de agua que fluye por la superficie del suelo en la cuenca hidrográfica. Esta información es esencial para la gestión de los recursos hídricos y para la planificación territorial en áreas vulnerables a la erosión y la sedimentación. La información utilizada para calcular el volumen de los escurrimientos superficiales en Calimaya incluyó el marco geoestadístico municipal, los límites de las regiones hidrológicas, cuencas y subcuencas, la ubicación de los cuerpos de agua, la distribución de la vegetación, las unidades edáficas, la información contenida en los modelos digitales de elevación y los valores de precipitación media anual obtenidos de las estaciones climáticas. Esta actividad se realizó con el programa ArcGis® en versión para computadora personal.

Para estimar el volumen de agua producido en una cuenca, es necesario el análisis de los factores que intervienen en la producción del líquido. Ya que estos factores se distribuyen espacialmente y favorece su evaluación a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los SIG proveen diversas funciones de análisis que permiten manipular las diferentes variables utilizadas en los procesos de estimación de parámetros hidrológicos, básicamente, el empleo adecuado de dichas funcionalidades hace posible la implementación de mecanismos efectivos para la estimación de aquellos parámetros de uso frecuente en la clasificación de cuencas hidrográficas (Treviño, *et al.*, 2015).

Los principales factores que determinan el volumen de agua captado por una cuenca son en su mayoría de carácter agroclimático e involucran la cantidad, intensidad y duración de la lluvia, la distribución de la precipitación respecto al territorio estudiado, las condiciones de humedad del suelo, la intercepción causada por la cubierta vegetal, así como el valor de la evapotranspiración y la humedad atmosférica. De la misma manera existen otros factores de carácter fisiográfico, como son la extensión, la forma y la pendiente media de la zona de recepción, así como la densidad de la red hidrográfica y la capacidad de evacuación de ésta (Treviño, *et al.*, 2015).

A partir del conocimiento de las variables anteriores, y de acuerdo con la fórmula racional, se deriva un coeficiente de escurrimiento ponderado para la cuenca, obtenido éste a partir de coeficientes de esorrentía generados para cada condición de vegetación, suelo, pendiente y superficie por tipo de condición. Una vez obtenido el coeficiente, se relaciona con la superficie de la zona estudiada y la precipitación, y de esta manera se estima el volumen medio escurrido (Treviño, *et al.*, 2015).

Para calcular la esorrentía fue necesario trabajar con información en formato vector (polígonos), pues bajo este formato fue posible realizar procesos de intersección de mapas. En primer lugar, del modelo de elevación digital con resolución de cinco metros (INEGI, 2018) se derivó el modelo de pendientes del terreno con la misma resolución. Posteriormente se realizó la digitalización de las coberturas vectoriales de uso de suelo y vegetación para cada año de estudio, y la capa de texturas (cartas edafológicas E14A47 y E14A48 del INEGI, 1976). Estas tres coberturas ya transformadas fueron reclasificadas para obtener un mapa con las combinaciones asignadas con el correspondiente coeficiente de Prevert complementado con el de Moll, las tablas (12, 13, 14, 15, 16 y 17) con la información resultante se pueden observar en el anexo I.

11. ESPACIO FÍSICO Y UNIVERSO DE ESTUDIO

El término Calimaya es de origen náhuatl y significa “lugar en donde se construyen casas”. El Municipio se localiza en la porción central del territorio del Estado de México y forma parte de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Geográficamente se localiza entre las coordenadas 19° 07' 02" y 19° 13 '25" latitud norte, y 99° 32' 10" y 99° 44' 02" longitud oeste (IGECEM, 2014). El territorio presenta diferentes altitudes, la mínima es de 2,500 metros sobre el nivel del mar (msnm) y la máxima de 4 200 msnm (figura 7).

La cabecera municipal tiene una altitud media de 2,680 msnm. La superficie del Municipio de Calimaya es de 10,425.80 has., y representa el 0.45% de la superficie total del territorio del Estado de México.

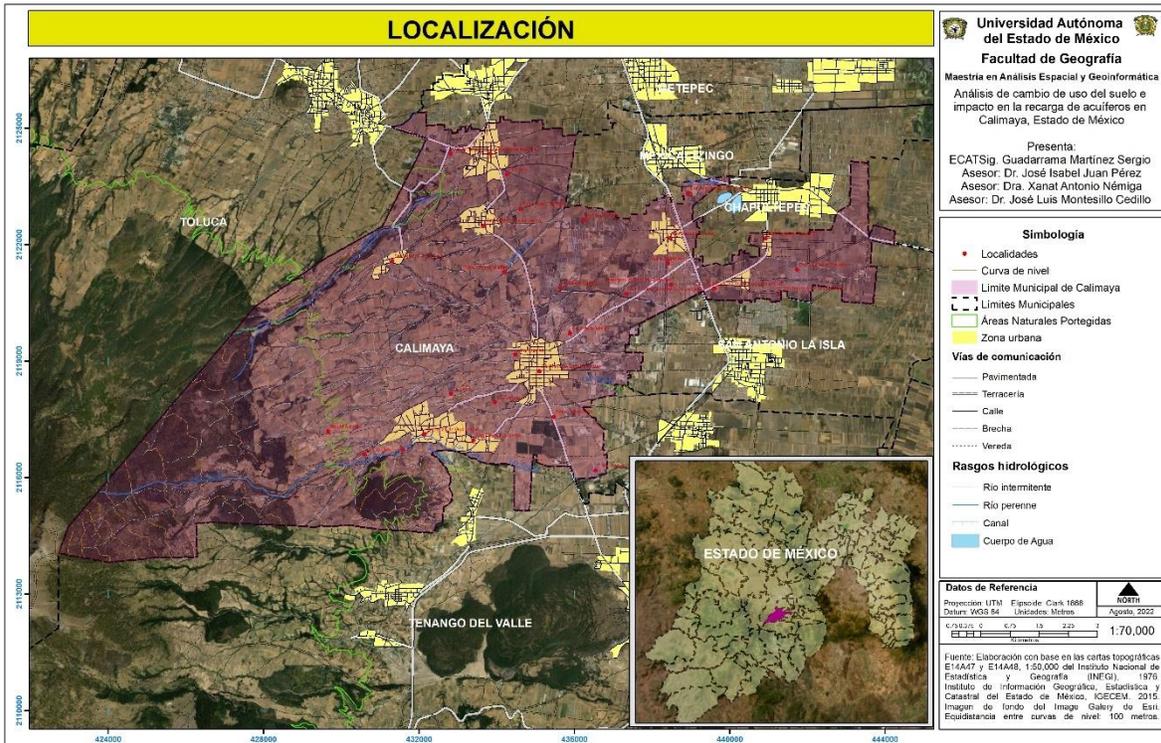


Figura 7. Mapa topográfico y de localización del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información del INEGI.

El municipio de Calimaya colinda al norte con los municipios de Toluca, Metepec y Mexicaltzingo; al este tiene límites con los municipios de Mexicaltzingo, Chapultepec, Tlanguistenco, San Antonio la Isla y Rayón; al sur limita con los municipios de Rayón y

Tenango del Valle; y al oeste con los municipios de Tenango del Valle y Toluca. El municipio de Calimaya cuenta con una superficie de 103.11 kilómetros cuadrados, ocupa el 6.11 % respecto de la región y el 0.45 % de la superficie del estado.

El universo de estudio de esta investigación estuvo enfocado en los acuíferos que se encuentran en el territorio del municipio de Calimaya, y el impacto que han tenido en su recarga, esto en asociación con los procesos de cambio de uso de suelo.

Las características del territorio del municipio son resultado de la interacción de las divisiones geográficas naturales y las divisiones de gestión político-administrativas en vinculación con las condiciones fisiográficas, ambientales y ecológicas de los diversos ambientes y zonas que lo integran. Su situación geográfica en el contexto estatal y regional, sus relaciones económicas, demográficas y socioculturales influyen en la generación de diversos problemas ambientales que a corto y mediano plazo inciden en la calidad de vida y el bienestar de los habitantes (Juan, *et al.*, 2015).

11.1. Geología

De acuerdo con el Plan Municipal de Desarrollo Urbano (2022) y con base en el origen de la porción poniente del municipio, en ésta se encuentran rocas andesitas depositadas sobre rocas sedimentarias del período Cretácico. El material geológico del territorio municipal tiene la siguiente composición: rocas ígneas extrusivas volcanoclásticas (64.66%), rocas andesitas (4.87%), brechas sedimentarias (6.52%), suelo de material aluvial (18.01%) y suelo de origen lacustre (0.04%). Al asociar estas características geológicas con las geoformas y ambientes del territorio, el 41.49% de la superficie corresponde a llanuras aluviales, el 30.85% está conformado por las pendientes del Volcán Xinantécatl, el 22.65% lo constituye sistemas de lomerío de basaltos, y el 5.01% forma parte de ambientes lacustres.

Las condiciones geológicas del municipio hacen referencia a los periodos neógeno y cuaternario, situándose sobre dos tipos de unidades litológicas; ígnea y suelo aluvial de tipo lacustre, de las ígneas derivan las rocas de tipo extrusiva intermedia y toba volcánica (figura 8). Que si bien, no presentan problemas para el desarrollo urbano es necesario establecer las medidas pertinentes para que se constituyan como un elemento potencial a desarrollar tanto

en términos de uso del suelo y asentamientos humanos, como de su explotación económica, en el sentido de conservar las actividades agropecuarias que se efectúan:

- Toba de origen volcánico: En esta unidad geológica se asientan las localidades de La Concepción Coatipac, San Bartolito Tlatelulco, San Lorenzo Cuauhténcó, Santa María Nativitas, Rancho La Esperanza, Rancho San Cristóbal, Rancho Vistahermosa, Rancho El Mesón, Colonia Santa Cruz Tecuantitlán, El Arenal, Colonia Arboledas y San Agustín.
- Aluvial de origen lacustre: En este tipo de roca, se localizan las localidades de; Calimaya de Díaz González, San Andrés Ocotlán, San Marcos de la Cruz, Zaragoza de Guadalupe, Rancho El Jaral, Rancho Chimalhuacán, Rancho El Colorado, Colonia Francisco Villa, Las Jarillas, La Loma, Rancho La Loma, El Calvario, Colonia El Tarimoro, Barrio Cruz de la Misión, Rancho Villa Verde, El Baldío Amarillo.

En el caso de la colonia Las Jarillas y La Colonia Francisco Villa ubicadas al oeste de la localidad de Zaragoza, se detecta que están expuestas a riesgo de remoción en masa por el tipo de materiales de origen volcánico.

Los suelos con potencial para el crecimiento urbano están principalmente en las localidades de Santa María Nativitas, San Andrés Ocotlán, San Bartolito Tlatelolco y la Cabecera Municipal, puesto que son los suelos con pendientes menores a 15%, y con bajos niveles de material pétreo. Los suelos no aptos se localizan en Zaragoza de Guadalupe, San Diego la Huerta y San Lorenzo Cuauhténcó, ya que sus pendientes son mayores al 15% y con grandes yacimientos de materiales pétreos.

En términos de explotación económica a través de la extracción de materiales pétreos, en Calimaya existen yacimientos de arena, grava y cantera, los cuales tienen cotización en el mercado de los materiales para la construcción.

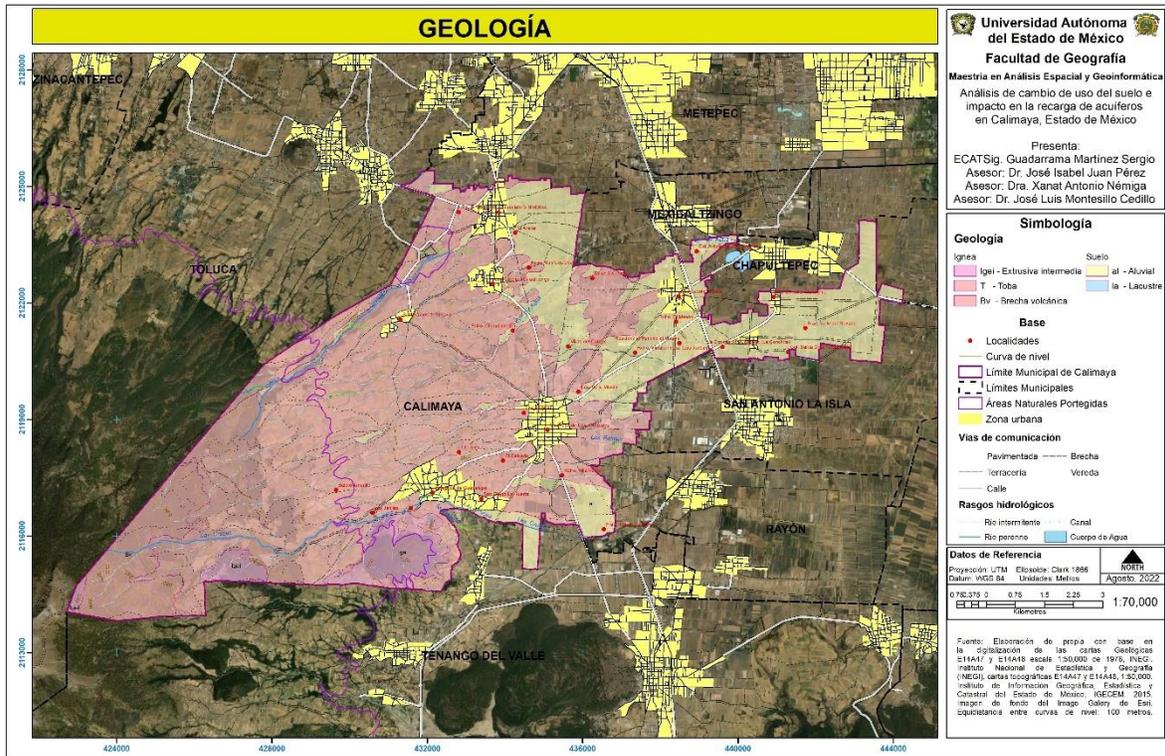


Figura 8. Mapa de la geología del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información del INEGI.

11.2. Geomorfología

Calimaya se caracteriza por localizarse en una zona de laderas con pendientes de 35° (figura 10), que impacta en su relieve, es decir, éstos se ubican en la zona alta del municipio, en la porción que corresponde al Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, y principalmente durante la época de lluvia ocurren deslaves por la precipitación y al asociar con la deforestación, entonces el riesgo ambiental es mayor. En el territorio municipal se presentan tres tipos de morfología (figura 9):

- **Volcánica y Tectónica:** conformado por laderas con características inclinadas de la superficie terrestre, escalonada en su perfil, se presentan varias rupturas de pendiente que forman numerosos escalones; por otro lado, las laderas compuestas, crean combinaciones de las anteriores; cada una de estas puede causar riesgo a las zonas urbanas, por posible remoción en masa, es decir, desprendimientos de materiales. Derivado de la presión que ejercen, dan como resultado la conformación de planicies, que se caracterizan como una porción de la superficie terrestre con cualquier

dimensión, equivalente a un plano horizontal o con pendiente. Caracterizados por su composición en depósitos exógenos de tipo aluvial o lacustre.

- Glaciar y Preglaciar: Se presentan en los límites de las nieves permanentes y depósitos de rocas transportados por glaciares, en épocas pasadas existían en el Nevado de Toluca y en la actualidad se observan vestigios de ese pasado hostil.
- Fluvial: Esta morfología es producto de los procesos de las lluvias y que afecta a últimas fechas al territorio municipal, un ejemplo claro de ello es la remodelación del relieve de manera dinámica y relativamente rápida, especialmente en los barrancos y las depresiones existentes, fomentando procesos de erosión asociados con la precipitación, esto debido a que son resultado del encuentro entre las fuerzas del agua y la tierra, generando riesgos ambientales y urbanos que impactan directamente a las localidades del municipio, lo que condiciona al desarrollo urbano, ya que estos procesos se presentan desde las zonas altas hasta las bajas y de manera general caracteriza al territorio por el fluido de agua de los manantiales. Su perfil longitudinal presenta un modelado incipiente a causa de la poca cantidad de agua; muestra pendientes fuertes. Se deposita un aluvión temporal que durante una crecida puede ser transportado en el cauce profundizado, y ya en un nuevo nivel se deposita otro aluvión. El aluvión se define como la porción superior de un valle donde predomina la erosión profunda, con un modelado incipiente del cauce, a menudo con escollos rocosos y débil desarrollo de terrazas.

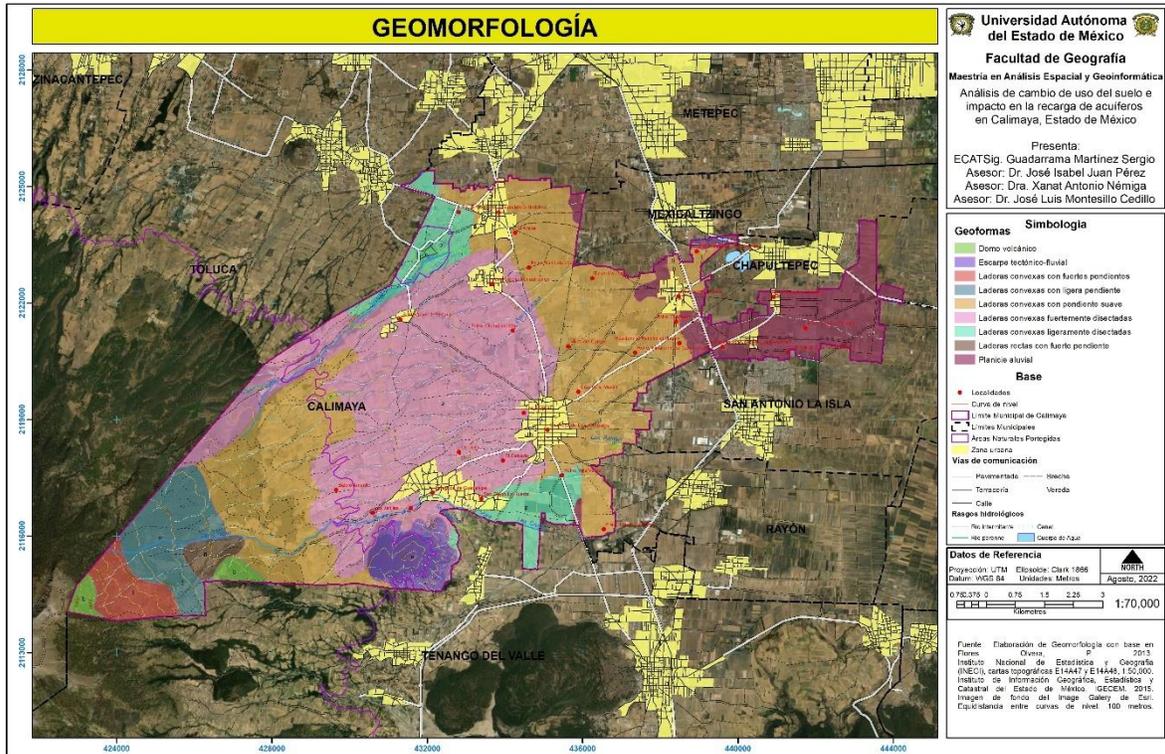


Figura 9. Mapa de la geomorfología del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información de Flores, 2008.

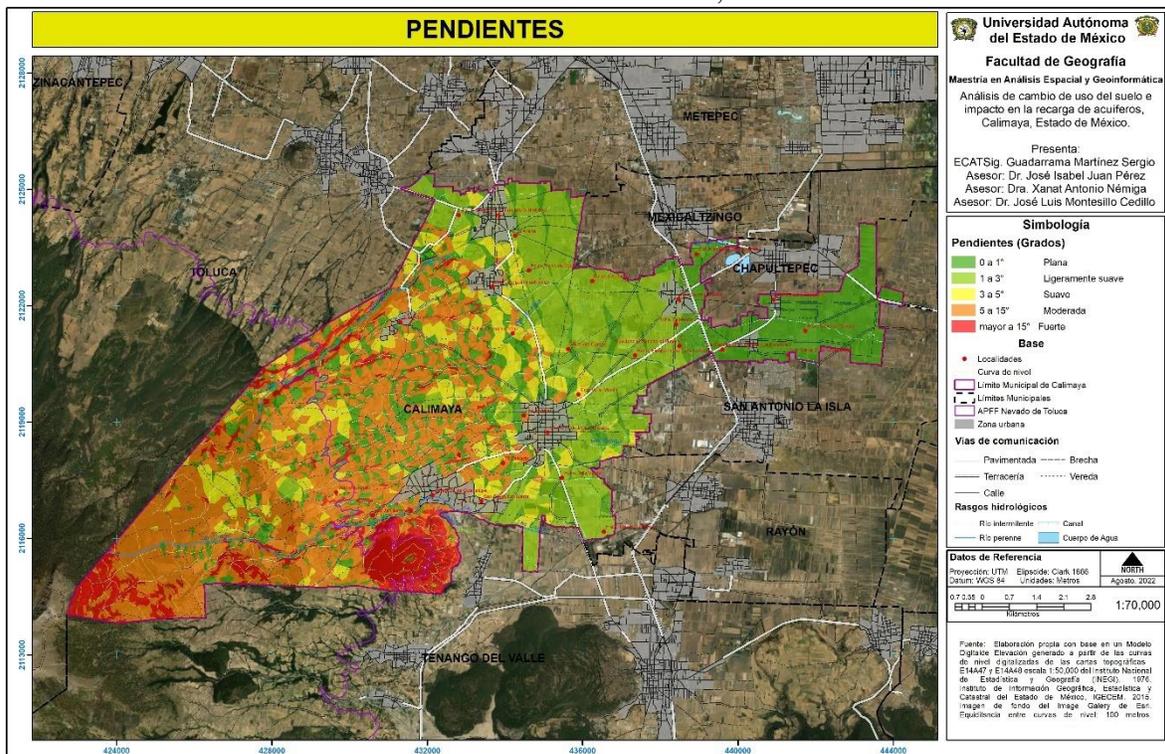


Figura 10. Mapa de pendientes del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información Lidar del INEGI.

11.3. Edafología

La edafología es la ciencia que estudia los suelos, su formación, propiedades y distribución. En el caso del municipio de Calimaya, la mayor parte de su superficie tiene suelos derivados de materiales volcánicos, como cenizas y pumita, y de materiales sedimentarios, como limo y arcilla. Los tipos de suelo (figura 11) están asociados con el origen del territorio y con las condiciones geomorfológicas, hidrológicas y climáticas, pues en su mayoría, han tenido una formación in situ, los más importantes son: pheozem 53.35%, andosol (26.34%), regosol (10.58%), cambisol (7.39%), litosol 1.24% y vertisol (1.08%). De acuerdo con el Plan Municipal de Desarrollo Urbano (2022) y con la clasificación de la FAO (2015), los suelos predominantes son los siguientes:

a) Pheozem. Estos suelos se forman sobre material no consolidado. Se encuentran en climas templados y húmedos con vegetación natural de pastos altos o bosques, son oscuros y ricos en materia orgánica, por lo que son utilizados en la agricultura. Las sequías periódicas y los procesos erosivos son factores limitantes. Se utilizan para la producción de gramíneas y hortalizas y para el establecimiento de zonas de agostadero, principalmente cuando están ocupados con pastos. Este suelo se localiza al norte y nororiente del municipio, principalmente en Santa María Nativitas, San Bartolito Tlatelolco, La Concepción Coatipac, porciones de la cabecera municipal y en menor proporción en Zaragoza de Guadalupe.

b) Andosol. Por el origen geológico del sur del municipio, este tipo de suelo es de origen volcánico, constituido principalmente de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad. En condiciones naturales presentan vegetación de bosque o selva, tiene generalmente bajos rendimientos agrícolas debido a que retiene considerablemente el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas. Otro uso es el pecuario, sin embargo, su mayor aptitud es forestal, es susceptible a los procesos erosivos eólicos, se localiza en las porciones limítrofes con el Volcán Xinantecatl.

c) Regosol. Este suelo es muy joven y se desarrolla sobre material no consolidado. Es de color claro y pobre en materia orgánica. Se le encuentra en la mayor parte de climas, con excepción de zonas de permafrost y en lugares muy altos, es común en las regiones áridas,

semiáridas y montañosas. Está presente en áreas adyacentes a la Cabecera Municipal de Calimaya.

d) Cambisol. Este suelo es joven, poco desarrollado, se le encuentra en cualquier tipo de vegetación o de clima, con excepción de las zonas áridas. Se caracteriza por presentar en el subsuelo una capa con terrones y contiene vestigios del tipo de roca subyacente. Es susceptible a los procesos erosivos. Se observan en porciones del norte del municipio, principalmente en la Delegación de San Andrés Ocotlán.

e) Litosol. Es un tipo de suelo poco desarrollado que se encuentra en áreas donde la roca madre está muy cerca de la superficie del suelo, lo que limita la formación de horizontes del suelo. Debido a su cercanía con la roca madre, el litosol puede presentar una gran variedad de formas, desde suelos poco profundos hasta suelos muy profundos, y puede tener diferentes texturas, composiciones y coloraciones. Generalmente tienen una capa superficial muy delgada de material orgánico, y pueden contener fragmentos de roca y minerales que se han desgastado y acumulado en la superficie. En algunos casos, los litosoles pueden presentar una capa endurecida de arcilla o limo “caliche”, que se forma por la acumulación de sales y minerales disueltos en el agua y que se filtra a través del suelo. Su capacidad para sostener la vida vegetal es limitada, con baja fertilidad y poca retención de agua, sin embargo, algunas plantas, como cactus y otras especies adaptadas a la sequedad, pueden crecer en estos suelos.

f) Vertisol. Es un suelo característico de zonas con clima semiárido, subhúmedos y de tipo mediterráneo, con marcada estacionalidad de sequía y lluvias, existe en ambientes lacustres, en las riberas de los ríos o en sitios con inundaciones, se caracteriza por su alto contenido de arcillas que se expande en presencia de humedad, es pegajoso durante la época de lluvias. En la temporada de estiaje se agrieta fácilmente y por consiguiente no es fácil de trabajar debido a su dureza, está presente en porciones del noreste del municipio.

Otros tipos de suelos presentes en el municipio son los aluviales y coluviales, los primeros se caracterizan por formarse a partir de materiales transportados de los terrenos altos hacia terrenos planos y valles interiores, se forman por acumulación de materiales de diferentes dimensiones, por la alteración y desintegraciones in situ de las rocas ubicadas en las laderas superiores y por la acción de la gravedad. Son aluviones estratificados de textura variable y

de reciente deposición, generalmente se localizan en áreas en donde los mantos freáticos están cerca de la superficie. Estos suelos son muy productivos, es factible el uso de riego, además permiten agricultura intensiva y mecanizada. Contienen gravas, limo, arena y arcilla, y se localizan en zonas planas, fangosas y muy cercanas a ambientes lacustres del municipio.

La mayor parte de los suelos del municipio son aptos para la agricultura, y se utilizan principalmente para el cultivo de maíz, frijol, alfalfa, papa y hortalizas. Sin embargo, la actividad agrícola en el municipio se ha visto limitada por la urbanización y la falta de agua para riego.

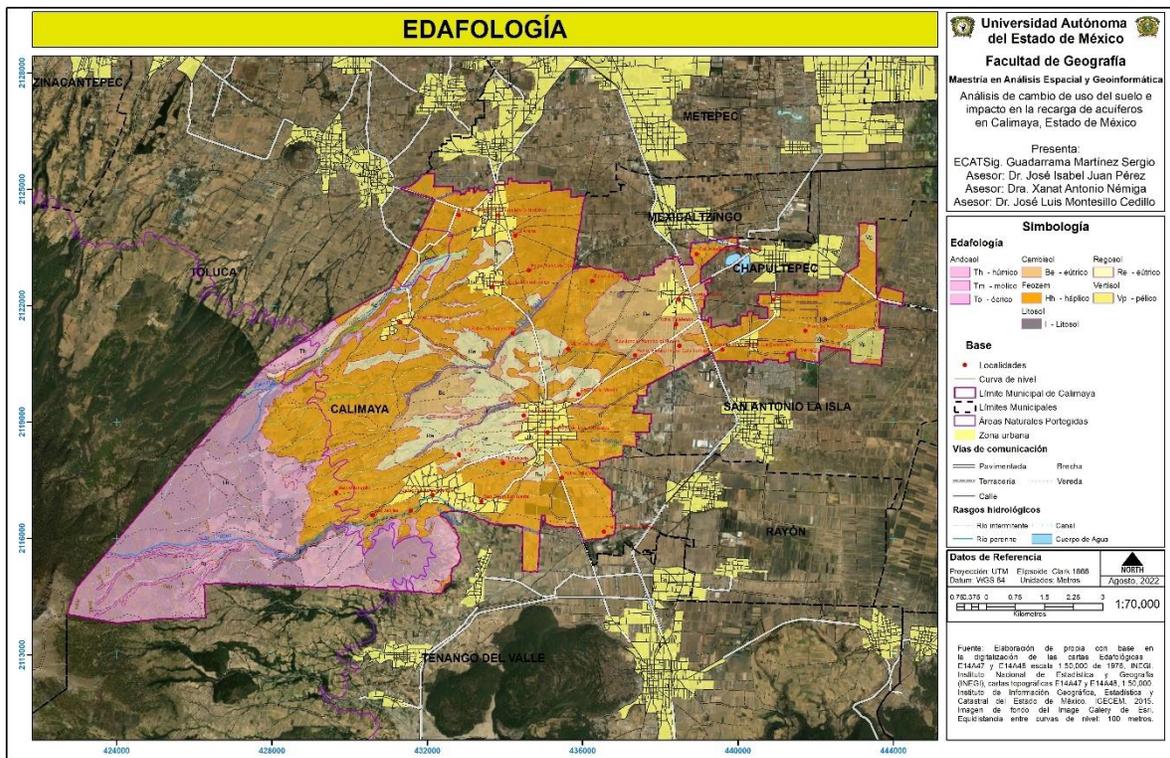


Figura 11. Mapa de edafología del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información del INEGI.

11.4. Hidrología

En el Plan Municipal de Desarrollo Urbano (2022) se menciona que los elementos hidrológicos más importantes son los arroyos Las Cruces, Los Temascales, Las Palmas, Ojo de Agua, Zacango y escurrimientos que incrementan su caudal durante la temporada de lluvias, como es el caso del Río Grande (figura 12). El Municipio no tiene cuerpos de agua permanentes, sin embargo, durante el período de lluvias, ésta representa una fuente potencial

significativa para la recarga de acuíferos. En el municipio se localizan mantos freáticos a 80 centímetros de profundidad, observándose esta situación en las localidades de San Andrés Ocotlán, San Bartolito y la Concepción Coatipac. El suministro de agua se realiza por medio de pozos profundos, principalmente en las localidades de La Concepción Coatipac, San Bartolito y San Andrés Ocotlán. En el caso de Santa María Nativitas, la Cabecera Municipal y San Lorenzo Cuauhténco se cuenta con tanques de almacenamiento que captan el líquido de los manantiales de La Ciénega, Ojo de la Virgen y Las Piñatitas. Las comunidades de San Marcos, Zaragoza y San Diego se abastecen de los manantiales Ojo de la Virgen y Los Temascales.

En la porción oriente del municipio existe una zona inundable (cerca de la Concepción Coatipac y el Fraccionamiento Valle del Nevado), la cual es importante para la recarga de la Ciénega del Río Lerma. Tanto los ríos de régimen permanente como los intermitentes que se forman durante la época de lluvias son importantes para los asentamientos humanos, en las actividades agrícolas, para la cría de animales domésticos y en la fabricación de materiales para construcción. Durante el período de lluvias, éstos representan riesgos, pues incrementan su caudal, además al descender por las pendientes del Volcán Xinantecátl, y al pasar cerca de los asentamientos humanos, entonces se incrementa la vulnerabilidad de riesgo.

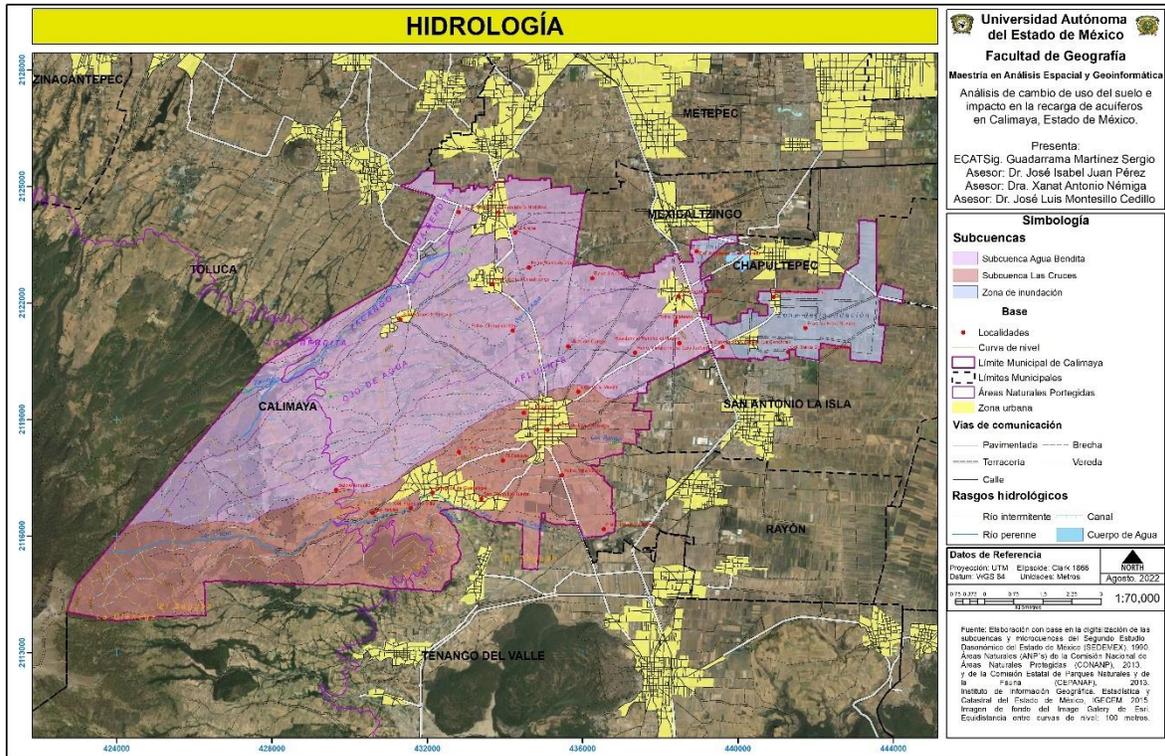


Figura 12. Mapa hidrológico del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información del INEGI y de la CONABIO.

11.5. Clima

En el territorio del municipio, el clima está estrechamente relacionado con las condiciones geográficas y topográficas. Según la clasificación de Köppen, el clima predominante es templado lluvioso (Cwbg), con una predominancia de lluvias en verano (figura 13). De acuerdo con la información proporcionada por el INAFED, la temperatura del mes más cálido es inferior a 22 °C y se registra antes del 21 de junio. Se suelen experimentar heladas entre los meses de noviembre y enero, y ocasionalmente en mayo (heladas tardías) y septiembre (heladas tempranas). Estas últimas son especialmente perjudiciales para la agricultura. La sequía abarca los meses de noviembre a marzo. La lluvia se presenta de mayo a septiembre, con precipitaciones máximas de 190 mm en julio. La precipitación anual oscila entre los 800 y 900 mm (figura 14). La temperatura media anual varía entre los 12 °C y 14 °C (INAFED, 2022) (figura 15).

De acuerdo con datos de los planes de desarrollo municipal, los vientos que afectan al Valle de Toluca son alisios (intensos en primavera y verano). Estos flujos predominan con

dirección del oriente y nororiente, pero se debilitan en otoño e invierno y pueden provenir del suroriente o del sur. A medida que se acerca el invierno, los vientos del poniente y los polares comienzan a dominar, llegando principalmente desde el norte y el poniente. La circulación de los vientos es influenciada por el Volcán Xinantécatl. Los vientos que llegan desde el sur son desviados, lo que provoca que aparezcan posteriormente desde el suroriente y surponiente en el Valle de Toluca, con una velocidad promedio de 2.5 m/seg (PMDU, 2022).

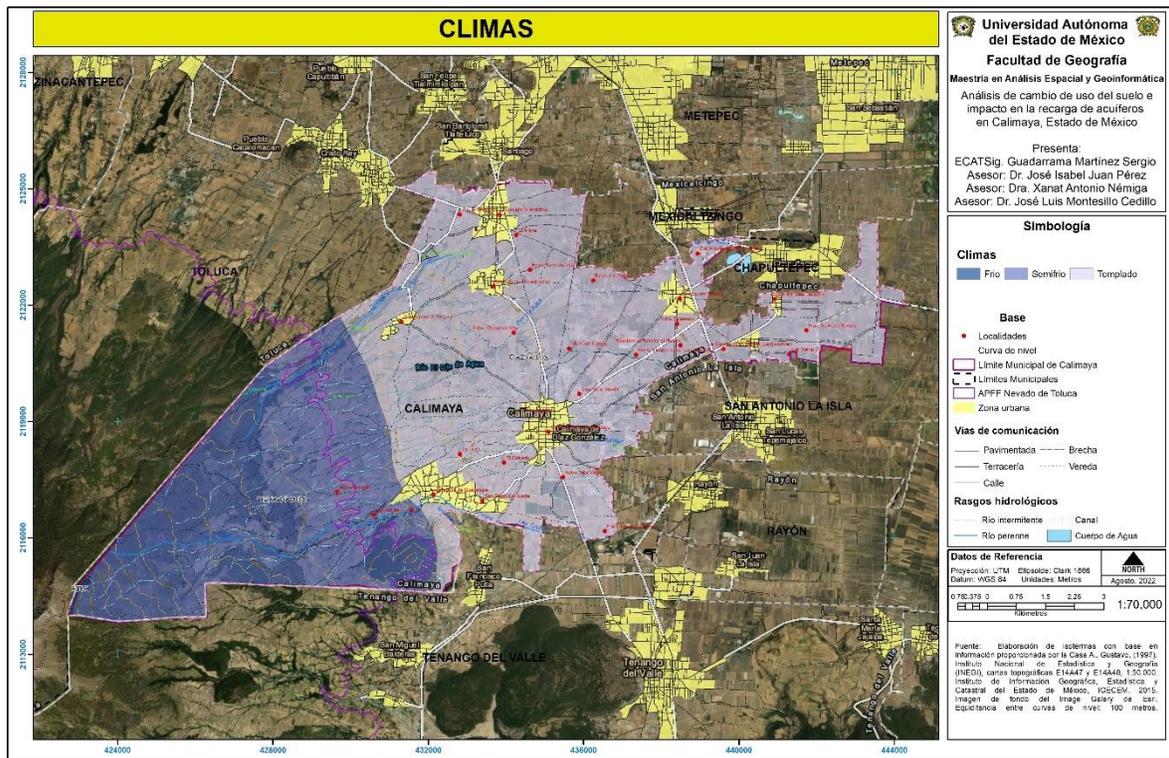


Figura 13. Mapa de climas del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información del INEGI y de la CONABIO.

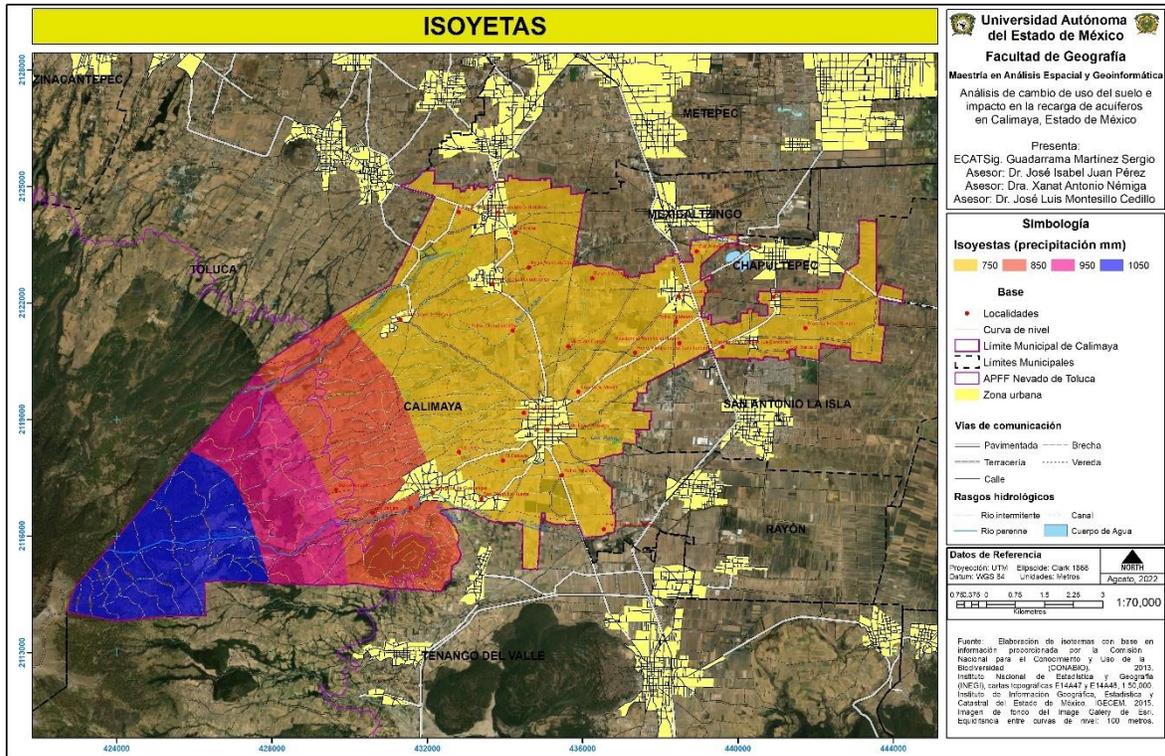


Figura 14. Mapa de precipitaciones (isoyetas) del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información del INEGI y de la CONABIO.

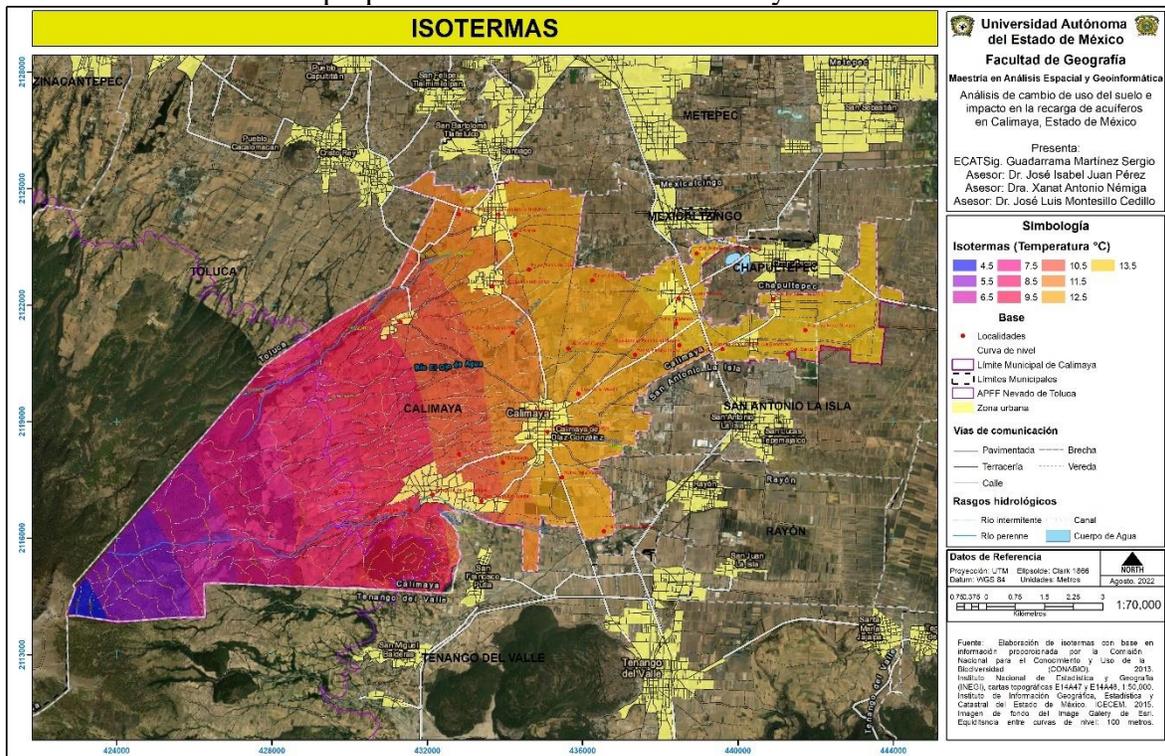


Figura 15. Mapa de temperaturas (isotermas) del municipio de Calimaya. Fuente; elaboración propia con información del INEGI y de la CONABIO.

11.6. Población

De acuerdo con el PMDU (2019) en el Municipio de Calimaya, el 72.2% de la población vive en ambientes urbanos y el 27.8% en ambientes rurales. El territorio presenta heterogeneidad de condiciones: ecotonos, bosques de coníferas, bosques de encinos, pastizales y paisajes agrícolas. Es un espacio sociocultural construido con varios asentamientos humanos urbanos. Son peculiares los espacios en donde se extraen recursos pétreos, las parcelas agrícolas y los pastizales, y en su entorno inmediato se encuentran los asentamientos humanos urbanos y rurales.

De acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), el municipio de Calimaya cuenta con una población total de aproximadamente 74,945 habitantes. La población está compuesta en su mayoría por mujeres, representando el 52.3% del total, mientras que los hombres representan el 47.7%. La edad promedio de la población es de 26.8 años, y la esperanza de vida al nacer es de 75.9 años. En cuanto a la estructura por edades, el 28.7% de la población tiene entre 0 y 14 años, el 62.5% se encuentra en el rango de 15 a 64 años, y el 8.8% tiene 65 años o más.

La tasa de alfabetización es del 99.1%, esto indica que la gran mayoría de la población sabe leer y escribir. La mayoría de la población de Calimaya habla español como lengua materna, pero también hay presencia de otras lenguas indígenas como el náhuatl.

Entre los años de 1950 al 2005 la evolución de la población en Calimaya presentó un aumento natural, situación que cambió a partir del 2010. Las estadísticas distinguen un incremento poblacional considerable, alcanzando una tasa de crecimiento media anual de 3.96 (2015); 8,263 nuevos habitantes (en cinco años). El territorio calimayense presenta crecimiento poblacional de tipo social o sea que inmigra al municipio población de otras regiones. El incremento de población del 2010 al 2015 fue de 9,541 nuevos habitantes, generando presión para el suelo ya que entre el período comprendido de 1995 a 2000 fueron incorporadas 104.98 hectáreas para el uso urbano (PMDUC, 2019-2022).

En los últimos años, el municipio de Calimaya ha experimentado un importante crecimiento demográfico. Según datos del INEGI, la población del municipio ha aumentado en un 18.3% en los últimos 10 años, pasando de 63,268 habitantes en el año 2010 a 74,945 habitantes en

el año 2020. Este incremento puede ser explicado por varios factores, entre los que se encuentran el crecimiento económico y el desarrollo de la zona, que han atraído a personas de otras regiones en busca de oportunidades laborales y mejores condiciones de vida, además, Calimaya se encuentra muy cerca de la Ciudad de México, lo que lo hace atractivo para las personas que buscan vivir en un lugar tranquilo y seguro, pero al mismo tiempo estar cerca de la ciudad. Por supuesto, que el incremento de la población también ha traído consigo retos y desafíos para el municipio, como mayor demanda de servicios públicos y de infraestructura, y la necesidad de planificar adecuadamente el desarrollo urbano para evitar problemas como la congestión vial y la falta de espacios verdes.

12. RESULTADOS

De acuerdo con el método de Prevert (1998) complementada con información de Marcos Moll Barber (2013), se realizaron los mapas de Uso de suelo y vegetación para el municipio de Calimaya correspondientes a los años 1997, 2002, 2007, 2012, 2017 y 2022 (figuras 17, 18, 19, 20, 21 y 22 respectivamente), los cuales se ponderaron con el mapa de pendientes elaborado con el modelo digital de elevación tipo terreno obtenido del INEGI obtenido de imágenes Lidar del año 2018 con una resolución de 5 metros. También se descargaron las cartas edafológicas E14A48 y E14A49, escala 1:50,000 del INEGI, las cuales se digitalizaron para representar el tipo de suelo y su textura, y de esta manera estimar el nivel de escorrentía.

Para cada uno de los años con cartografía de uso de suelo y vegetación, se obtuvo información de las precipitaciones mensuales (CONAGUA) para hacer el promedio de precipitación total anual de cada año de estudio, y con esto realizar una comparación de la información del nivel de escorrentía con la precipitación perdida por cada año.

12.1. Análisis del uso de suelo y vegetación

A través de las tecnologías de información geográfica se realizaron los mapas de uso de suelo y vegetación. Los mapas de los años 1997 y 2002 se realizaron con ortofotos (INEGI), aplicando el método de fotointerpretación, y para los mapas de los años restantes se aplicó el método de clasificación supervisada, aunque por la disponibilidad de imágenes se utilizaron Landsat (2007), SPOT 6 (2012), y Sentinel 2 (2017 y 2022). De los mapas se obtuvo las superficies de uso de suelo y se realizó el análisis de los cambios que han sufrido las superficies forestales, agrícolas, de minas, pastizales inducidos/naturales, y las zonas urbanas (tabla 2 y figura 17).

Tabla 2. Datos de uso de suelo y vegetación en el municipio de Calimaya (superficie en ha) con relación a la superficie total del municipio (porcentaje). Fuente: elaboración propia con base en los mapas de uso de suelo.

Uso de suelo y vegetación	1997	%	2002	%	2007	%	2012	%	2017	%	2022	%
Agricultura	7,709.03	73.95	7,622.97	73.12	6,996.86	67.12	6,809.06	65.31	6,918.82	66.37	6,621.07	63.51
Forestal	1,706.79	16.37	1,701.33	16.32	1,690.86	16.22	1,703.75	16.34	1,689.11	16.20	1,643.74	15.77
Mina	256.64	2.46	280.86	2.69	560.60	5.38	641.72	6.16	473.85	4.55	691.59	6.63
Pastizal natural/inducido	305.21	2.93	148.87	1.43	290.34	2.79	216.50	2.08	225.04	2.16	195.71	1.88
Zona urbana	447.38	4.29	671.01	6.44	886.39	8.50	1,054.02	10.11	1,118.22	10.73	1,272.96	12.21
Total	10,425.05	100	10,425.05	100	10,425.05	100	10,425.05	100	10,425.05	100	10,425.05	100

Analizando los resultados obtenidos de los diferentes usos de suelo y la superficie ocupante, se observa que la superficie de agricultura disminuyó (1,087.96 ha) de 1997 a 2022. Los factores que posiblemente causaron estos cambios son: la expansión urbana debido a que el crecimiento pudo haber ocurrido por la conversión de tierras agrícolas a zonas residenciales, comerciales e industriales. La demanda de espacio para viviendas y actividades urbanas ha llevado a la disminución de la superficie agrícola.

Los cambios en las políticas agrícolas son otro factor que pudo haber detonado la disminución de superficies agrícolas, situación asociada con la disminución de los subsidios agrícolas, la falta de apoyo gubernamental o la implementación de políticas que promueven otros sectores económicos. Otro factor que puede entrar en este cambio de superficie son los cambios en las condiciones económicas, las fluctuaciones económicas y las variaciones en los precios de los productos agrícolas que afectan la rentabilidad de la agricultura. Si los agricultores enfrentan dificultades económicas podrían verse obligados a abandonar o reducir sus actividades agrícolas.

Así mismo el cambio en la demanda de productos agrícolas es otro factor desencadenante, ya que la demanda de ciertos productos agrícolas puede haber disminuido, lo que lleva a una disminución en la superficie destinada a la agricultura. Esto podría estar relacionado con

cambios en los patrones de consumo, la importación de alimentos o la competencia con otros municipios o estados.

En cuanto al impacto de estos cambios en la recarga de acuíferos, es importante destacar que la agricultura puede tener efectos significativos en los recursos hídricos ya que requiere grandes cantidades de agua para el riego de cultivos. Si la superficie agrícola disminuye, es posible que disminuya la extracción de agua de los acuíferos subterráneos y superficiales, lo que podría tener un impacto positivo en la recarga. Sin embargo, la agricultura intensiva a menudo implica el uso de agroquímicos, que pueden contaminar las aguas subterráneas y superficiales si no se utilizan de manera adecuada. Al disminuir la superficie agrícola entonces, es posible que la cantidad de agroquímicos utilizados también disminuya, lo que podría mejorar la calidad del agua subterránea y superficial.

Se observa que la superficie de área forestal ha experimentado fluctuaciones a lo largo del tiempo: en 1997, la superficie de área forestal era de 1,706.79 ha y disminuyó ligeramente a 1,701.33 ha en 2002. Posteriormente, se registró una disminución continua en 2007, con 1,690.86 ha. Sin embargo, en 2012 hubo un ligero aumento a 1,703.75 ha, seguido de una ligera disminución en 2017 (1,689.11 ha). Finalmente, en 2022, la superficie de área forestal registró un valor de 1,643.74 ha, disminuyendo 63 ha, esto a pesar de los diferentes esfuerzos y programas de reforestación que se han llevado a cabo en el municipio. Los cambios en la superficie de área forestal pueden ser atribuidos a los siguientes factores:

1. Deforestación: es un factor significativo que afecta la disminución de la superficie de área forestal. Las actividades humanas, como la tala indiscriminada de árboles para la obtención de madera, la expansión de la agricultura, la ganadería y la urbanización también contribuyen a la disminución de la cubierta forestal.

2. Cambio en las políticas forestales: la falta de regulación adecuada o la implementación de políticas que no favorecen la conservación y el manejo sostenible de los bosques, pueden conducir a una disminución de la superficie forestal.

3. Presión demográfica y crecimiento urbano: el crecimiento de la población y la expansión urbana ejercen presión sobre los recursos naturales, incluidos todos los componentes de los

bosques. El incremento de la demanda de espacios para viviendas, infraestructuras y actividades humanas conlleva a la conversión de áreas forestales por zonas urbanas.

Estos procesos de cambio en el uso de suelo en el área forestal ocurren debido a la interacción de factores humanos y factores naturales. En este sentido, las actividades humanas como la explotación insostenible de recursos naturales y las escasas prácticas adecuadas de manejo forestal contribuyen a la deforestación y el decremento de la superficie forestal. Por otro lado, los eventos naturales, como incendios forestales, plagas y enfermedades, también pueden influir en los cambios del área forestal.

El impacto en la recarga de acuíferos por disminución de la superficie forestal es significativo, ya que los bosques desempeñan funciones en la regulación del ciclo del agua y la recarga de los acuíferos. Los árboles actúan como esponjas naturales, absorbiendo y almacenando agua en el suelo, y liberándola gradualmente, lo que contribuye a la recarga de los acuíferos subterráneos. Cuando ocurre disminución en la superficie de área forestal, se reduce la capacidad de los bosques para retener agua y, por lo tanto, la cantidad de agua disponible para recargar los acuíferos se ve comprometida. Además, la deforestación puede aumentar los procesos erosivos, lo cual puede provocar sedimentación de los cuerpos de agua, afectando la calidad y disponibilidad de agua subterránea y superficial. Es fundamental promover prácticas de conservación forestal y manejo sostenible de los bosques para preservar la recarga de los acuíferos y mantener un equilibrio hídrico adecuado.

El cambio de uso de suelo en las áreas de minas de extracción de recursos pétreos y con base en los datos contenidos en la tabla 2 se observa que las superficies de estas áreas también han experimentado fluctuaciones a lo largo del tiempo, en 1997, la superficie de áreas de minas de extracción de recursos pétreos era de 256.64 ha, e incrementó a 280.86 ha en 2002, posteriormente, hubo un incremento significativo en 2007, con 560.6 ha, seguido de otro incremento en 2012 (641.72 ha). Pero en 2017, se registró una disminución considerable (473.85 ha). Para el año 2022, la superficie de las minas alcanzó 691.59 ha (435 ha más que en 1997).

Los cambios en la superficie de áreas de minas de extracción de recursos pétreos pueden ser atribuidos a diversos factores, posiblemente al aumento de la demanda de materiales de

construcción como arena, grava y pumita, y puede influir en la expansión de las áreas de extracción. El crecimiento de la construcción de viviendas en nuevas zonas urbanas y la infraestructura puede provocar un aumento en la superficie de minas. Así mismo, la presencia y accesibilidad a recursos pétreos en determinadas áreas puede determinar la ubicación de nuevas minas. Al encontrar depósitos de materiales en un lugar determinado, es probable que se establezcan más minas en esa área. Los factores económicos, como el valor y la rentabilidad de los recursos pétreos, pueden influir en la expansión o disminución de las áreas de extracción, situación vinculada con los precios de mercado y condiciones económicas.

Los procesos de cambio en el uso de suelo en áreas de minas de extracción de recursos pétreos están vinculados con una combinación de factores económicos, geográficos, geológicos y de demanda. La demanda de materiales de construcción, la disponibilidad de recursos y las condiciones económicas influyen en la expansión o decremento de las áreas de extracción.

En cuanto al impacto en la recarga de acuíferos, la extracción de recursos pétreos tiene consecuencias significativas. La extracción de minerales altera las condiciones topográficas, geológico-geomorfológicas y edafológicas de los espacios geográficos, afectando la infiltración y la capacidad de recarga de los acuíferos. Además, las operaciones de extracción pueden requerir la explotación de acuíferos subterráneos para actividades de lavado y procesamiento, lo que puede incidir en los recursos hídricos disponibles.

La remoción de capas de suelo y vegetación en las áreas de extracción puede provocar procesos erosivos y afectar la esorrentía superficial, lo que puede llevar a la sedimentación de cuerpos de agua y afectar la calidad del agua. Por lo tanto, es esencial que las operaciones y manejo de extracción de recursos pétreos se realicen con un enfoque responsable y sostenible, teniendo en cuenta los impactos que provocan a los acuíferos y aplicando medidas de mitigación adecuadas, como la restauración del paisaje y la implementación de técnicas de conservación de suelo y agua para disminuir la afectación a la recarga de los acuíferos.

En los pastizales naturales o inducidos se observa el mismo patrón de aumento y disminución de superficies (Tabla 2). Los cambios en la superficie de los pastizales pueden ser atribuidos a varios factores como la expansión de la agricultura y la ganadería, ya que pueden conducir a la conversión de pastizales por tierras de cultivo o pastizales inducidos para la cría de

ganado. El aumento de la demanda de alimentos y la intensificación de la producción agropecuaria provocan la expansión de estas actividades y por consiguiente, disminuye la superficie ocupada con pastizales naturales. Las prácticas de manejo inadecuadas, como el sobrepastoreo³ o la escasa rotación de cultivos también degradan los pastizales naturales. La sobreexplotación de los pastizales puede agotar los recursos naturales y disminuir en superficie.

Los cambios en el clima y las condiciones ambientales pueden influir en las condiciones fitosanitarias y productividad de los pastizales. Factores como la sequía, el aumento de la temperatura o la presencia de plagas y enfermedades pueden causar la degradación de los pastizales naturales. Los procesos de cambio en el uso de suelo en áreas de pastizales ocurren por la interacción de múltiples factores. Las actividades agrícolas y ganaderas intensivas en asociación con prácticas de manejo inadecuadas contribuyen a la disminución de los pastizales naturales, además, las variaciones en el clima y las condiciones ambientales pueden agravar estos procesos y afectar las condiciones de los pastizales.

En cuanto al impacto en la recarga de acuíferos, los pastizales desempeñan funciones importantes en la retención y filtración del agua. Los pastizales naturales actúan como esponjas que absorben el agua de lluvia y permiten que se infiltre gradualmente en el suelo, recargando así los acuíferos, sin embargo, cuando las áreas de pastizales se degradan o son sustituidas por áreas de cultivo intensivo o pastizales inducidos, entonces la capacidad de retención y filtración del agua se ve afectada por la compactación del suelo, la pérdida de la cobertura vegetal y la alteración de la estructura del suelo, situación que puede generar mayor escorrentía superficial y una reducción en la infiltración del agua. Esto puede disminuir la recarga de los acuíferos e incrementar el riesgo de inundaciones y procesos erosivos.

En el contexto urbano, se observa incremento constante en la superficie de estas áreas a lo largo del tiempo de estudio: en 1997, la superficie de áreas urbanas era de 447.38 ha, incrementándose a 671.01 ha en 2002. Posteriormente, hubo un incremento significativo en

³Durante el trabajo de campo se realizó la observación de diversos tipos de ganado presentes en pastizales, tanto natural como inducido. Se observó que la presencia de ganado no estaba regulada y se encontraba en una alta densidad en áreas de superficie reducida. Adicionalmente, se observó la presencia de ganado en zonas restringidas, como el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

2007, con 886.39 ha, seguido de un aumento continuo en 2012, con 1054.02 ha. Para el año 2017, la superficie de áreas urbanas registró 1118.22 ha, mientras que para el año 2022, fue notorio un nuevo aumento (1272.96 ha).

Algunas posibles causas de estos cambios en la superficie de áreas urbanas pueden ser el crecimiento de la población y la migración desde áreas rurales hacia áreas urbanas, que impulsan la expansión de las ciudades, a medida que más personas se trasladan a áreas urbanas en busca de empleo y mejores condiciones de vida, se requiere más espacio para viviendas, infraestructura y servicios. El desarrollo de infraestructuras como carreteras, edificios comerciales, centros educativos y áreas industriales conlleva a la transformación de terrenos rurales o áreas verdes en áreas urbanas. La necesidad de proporcionar servicios y comodidades a una población en crecimiento conduce a la urbanización de terrenos previamente no urbanizados.

Las decisiones de planificación y políticas gubernamentales también pueden influir en la expansión de las áreas urbanas. La zonificación y los planes de desarrollo urbano determinan qué áreas pueden ser utilizadas para fines urbanos y cómo se distribuye la expansión urbana.

Estos procesos de cambio en el uso de suelo en áreas urbanas ocurren en respuesta a la demanda de viviendas, servicios e infraestructuras generada por el crecimiento demográfico y los cambios en las necesidades de la sociedad. La expansión de las áreas urbanas se produce a expensas de áreas rurales, terrenos agrícolas o áreas verdes.

En cuanto al impacto en la recarga de acuíferos, la urbanización tiene consecuencias significativas. A medida que se pavimentan las superficies en áreas urbanas, se reduce la capacidad de infiltración del agua en el suelo. Los pavimentos y edificios impiden que el agua de lluvia se filtre y recargue los acuíferos de manera natural.

Además, el desarrollo de infraestructuras urbanas puede modificar el flujo del agua, desviándolo hacia sistemas de drenaje y evitando que se infiltre en el suelo. Esto puede resultar en una disminución de la recarga de los acuíferos y un aumento de la escorrentía superficial, lo que puede llevar a problemas de inundaciones y la pérdida de agua dulce. Ante esta situación, es fundamental adoptar prácticas de planificación urbana sostenible que

consideren la conservación de áreas verdes, la gestión del agua de lluvia y la protección de los recursos hídricos subterráneos. La implementación de técnicas de infraestructura verde, la creación de espacios abiertos e implementación de drenaje sostenible pueden mitigar los impactos negativos de la urbanización hacia la recarga de acuíferos.

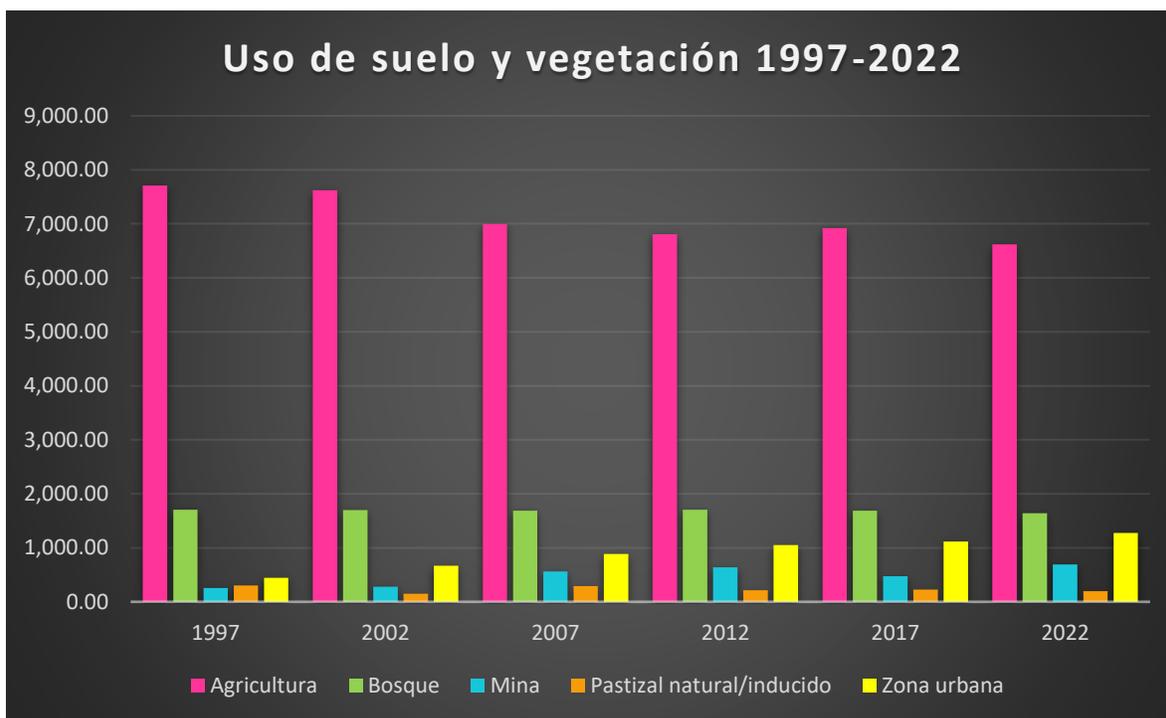


Figura 16: Cambios en superficie del uso de suelo. Periodo 1997 a 2022. Fuente elaboración propia con base en los mapas elaborados.

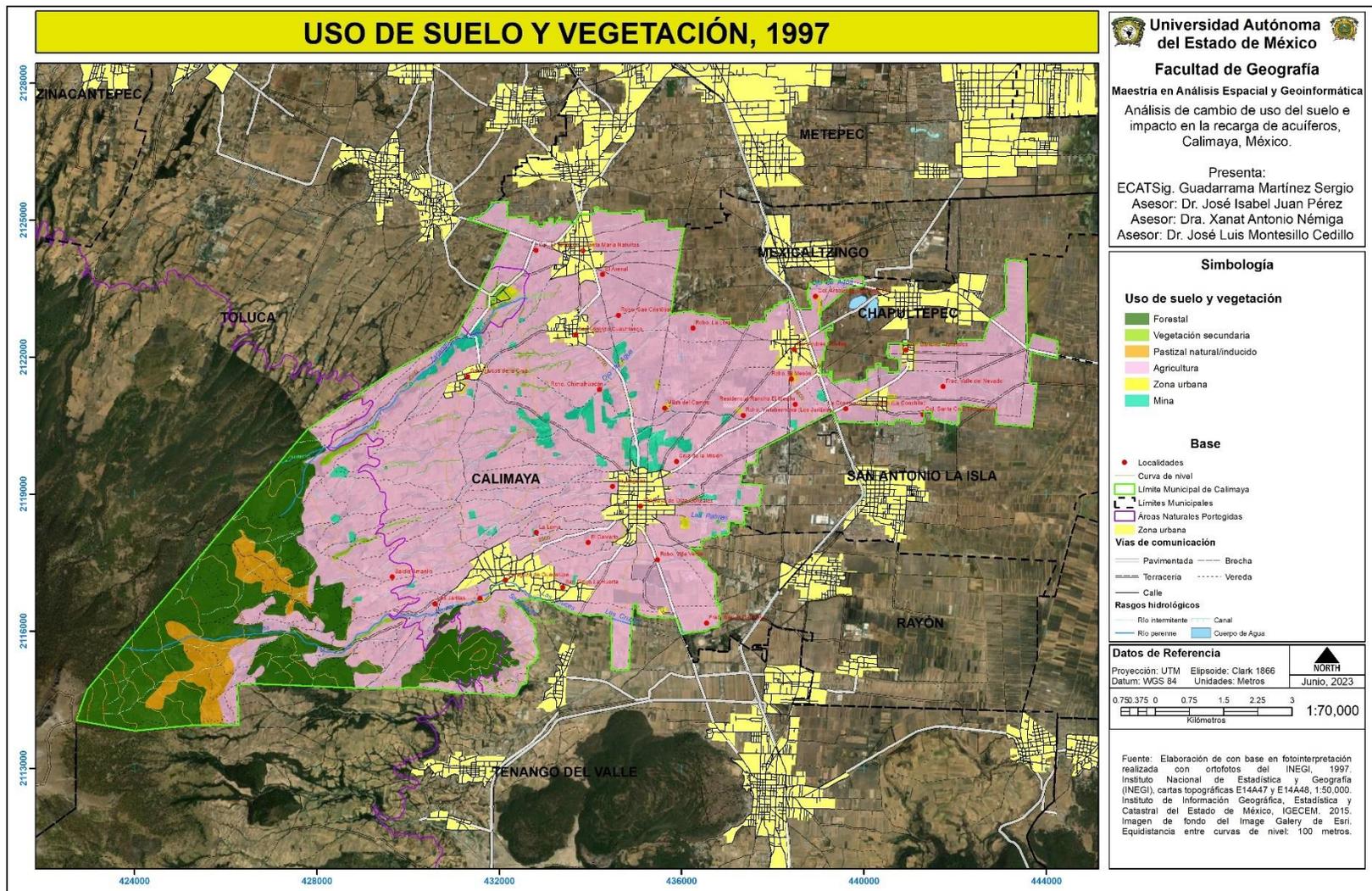


Figura 17: Mapa de uso de suelo y vegetación del año 1997. Fuente elaboración propia con base en ortofotos del INEGI (1997).

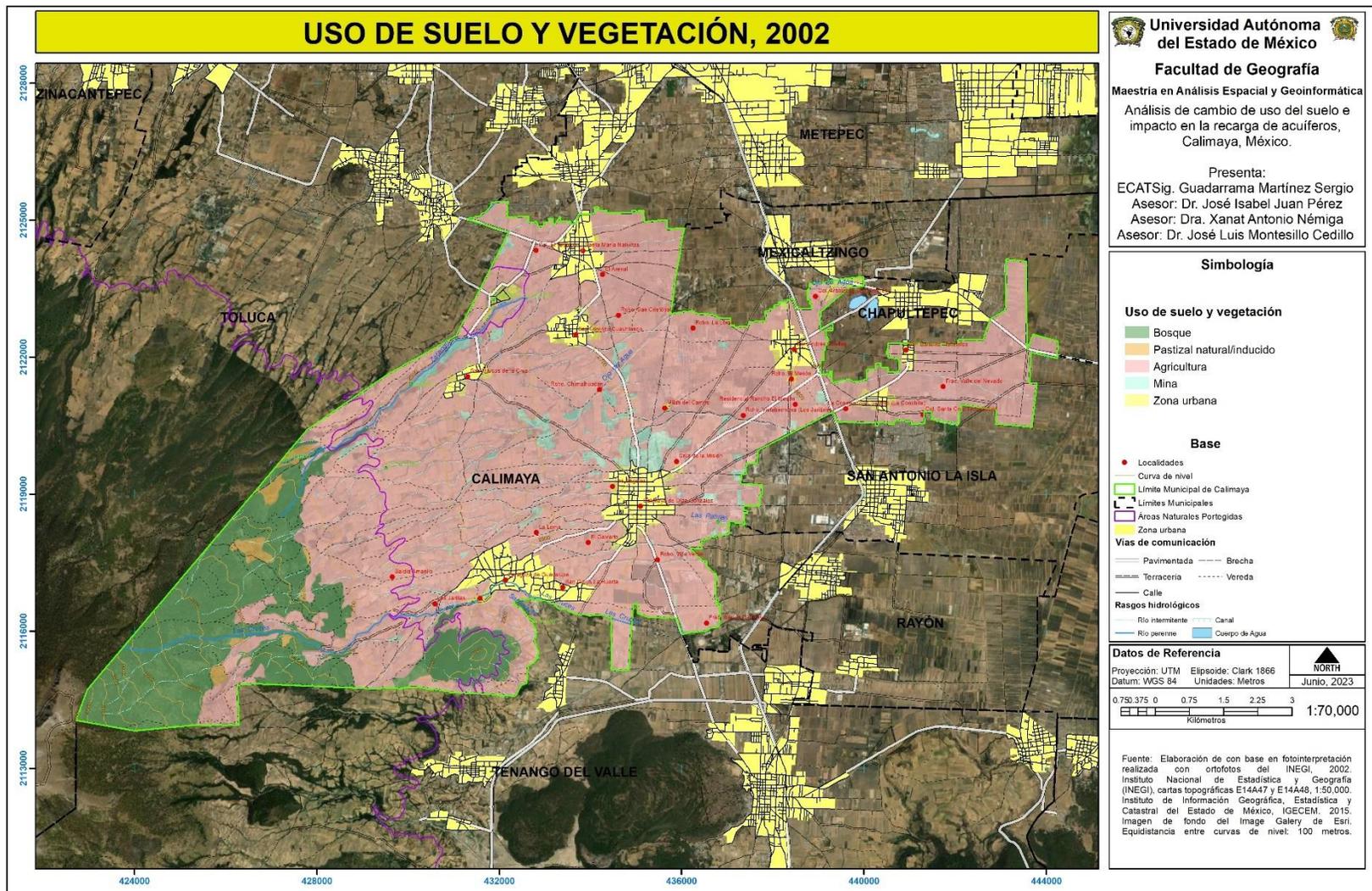


Figura 18: Mapa de uso de suelo y vegetación del año 2002. Fuente elaboración propia con base en ortofotos del INEGI (2002).

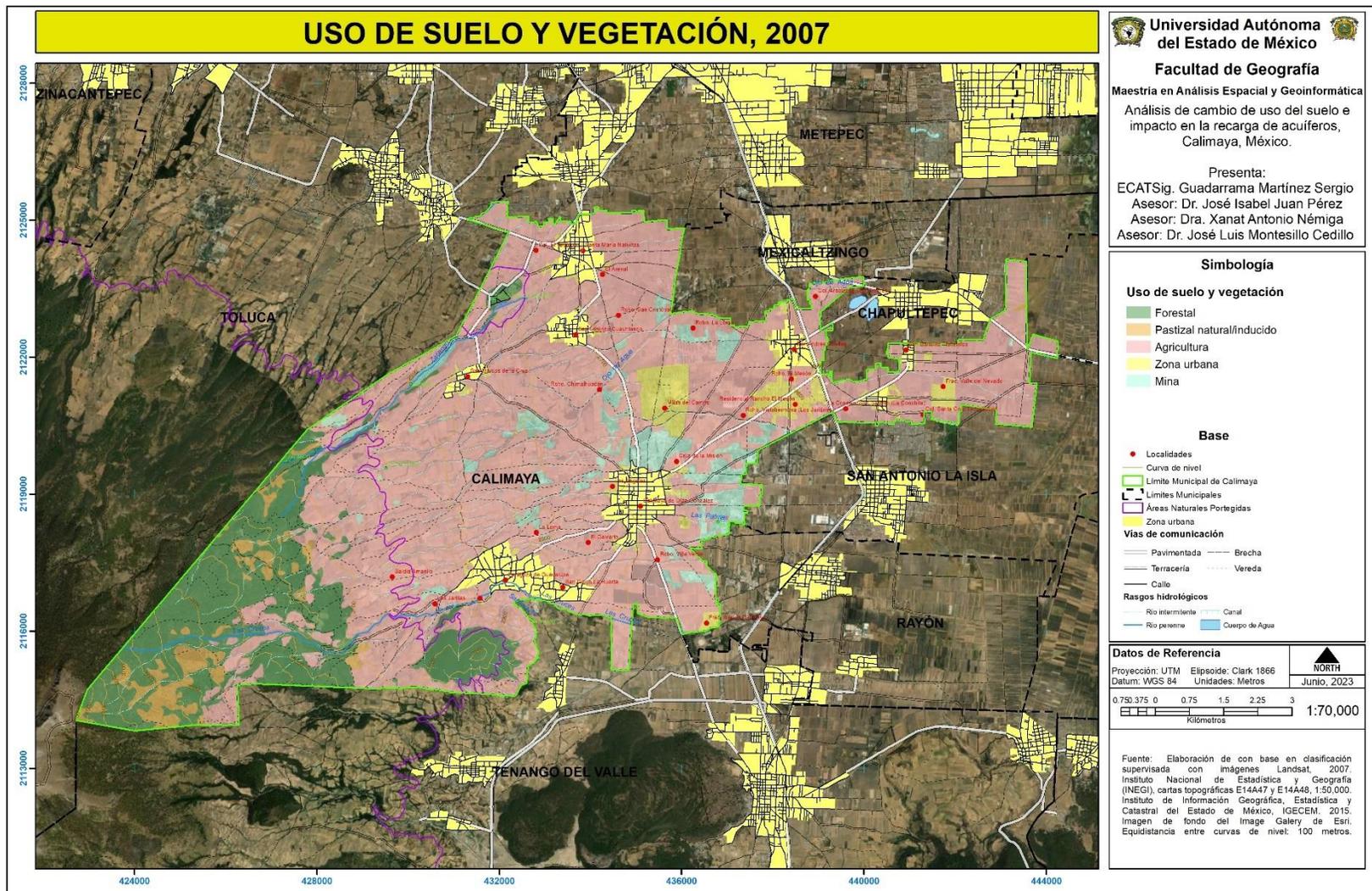


Figura 19: Mapa de uso de suelo y vegetación del año 2007. Fuente elaboración propia con base en imágenes Landsat 7 (2007).

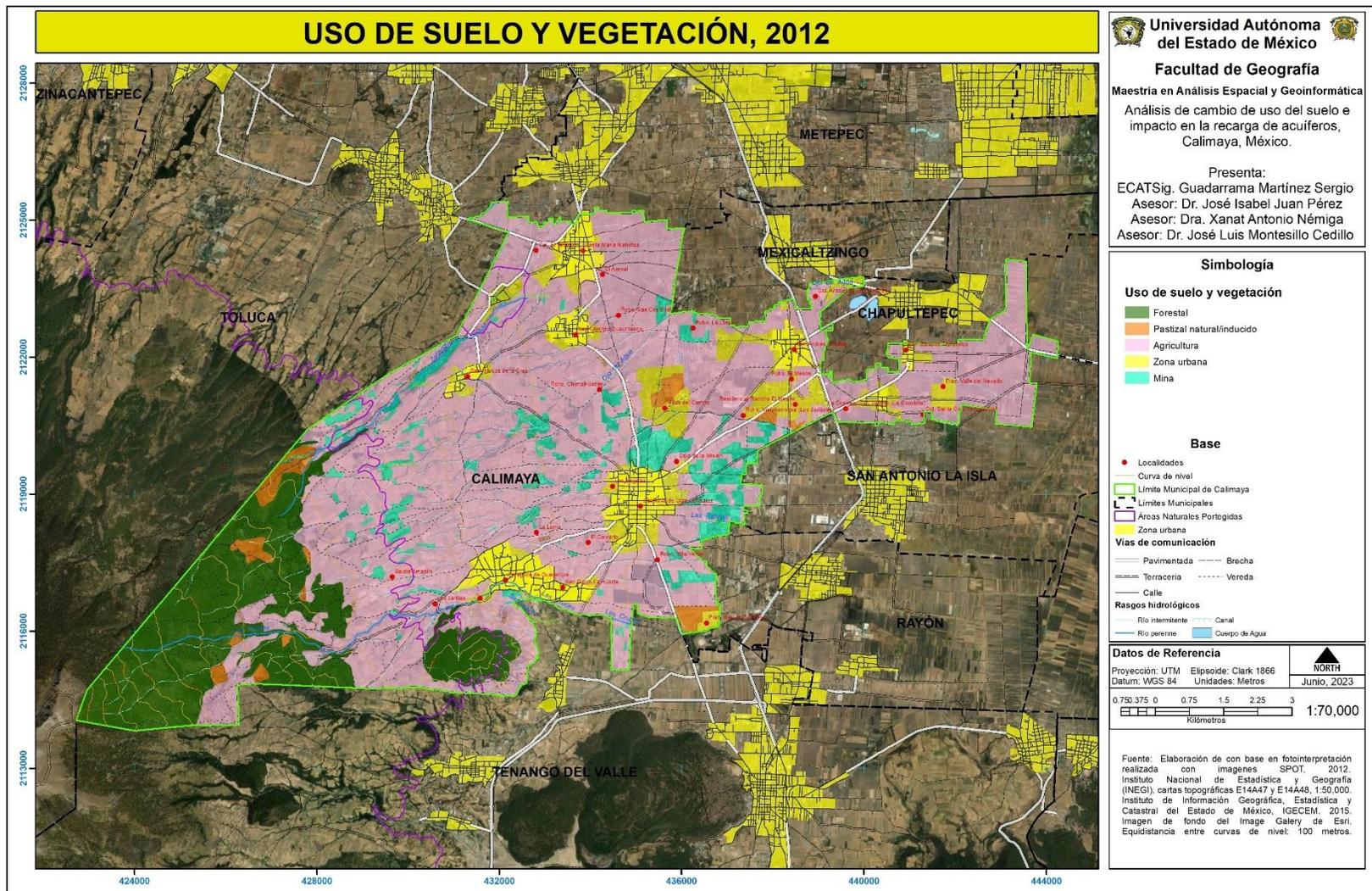


Figura 20: Mapa de uso de suelo y vegetación del año 2012. Fuente elaboración propia con base en imágenes Spot 6 (2012).

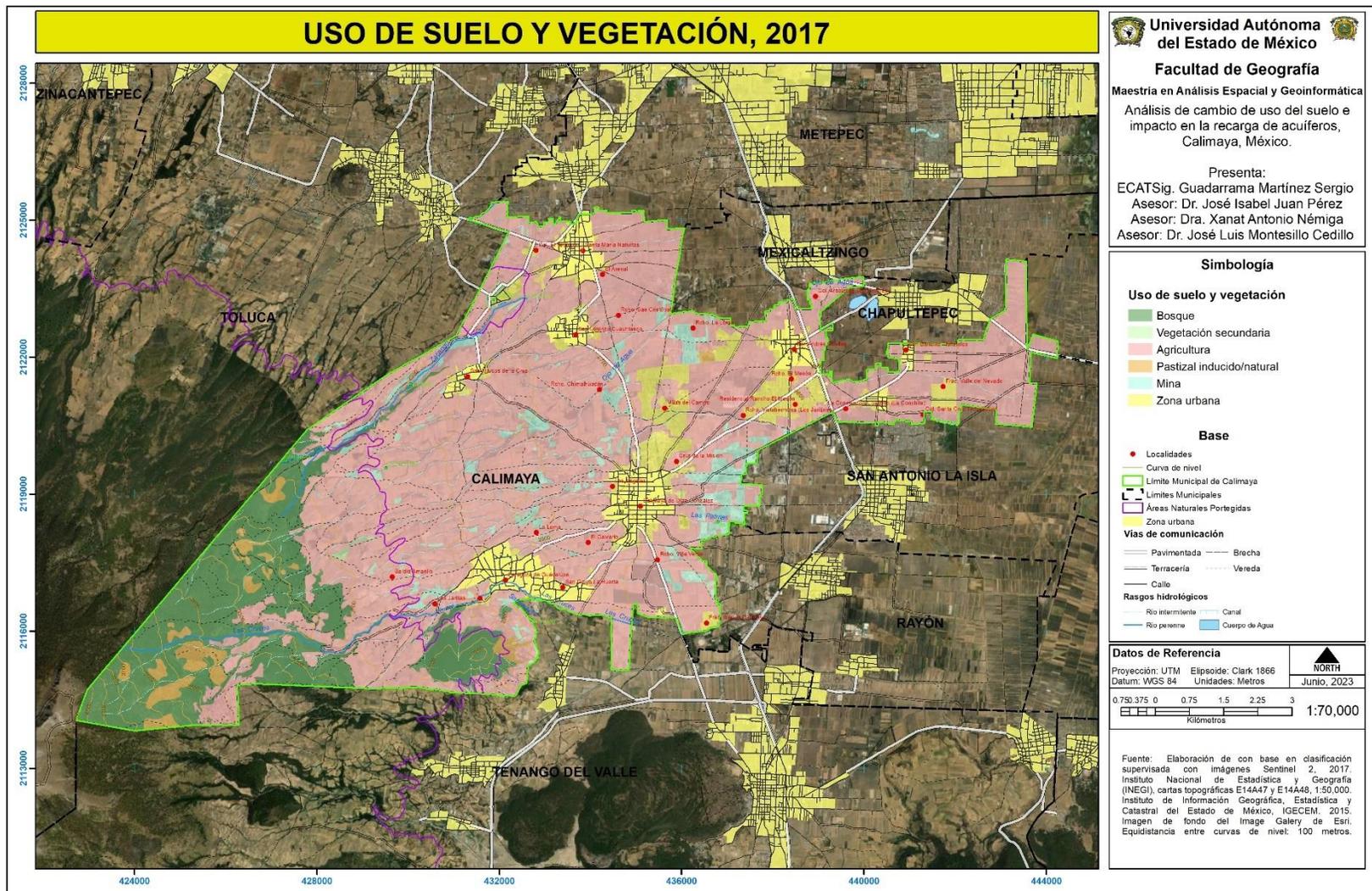


Figura 21: Mapa de uso de suelo y vegetación del año 2017. Fuente elaboración propia con base en imágenes Sentinel 2 (2017).

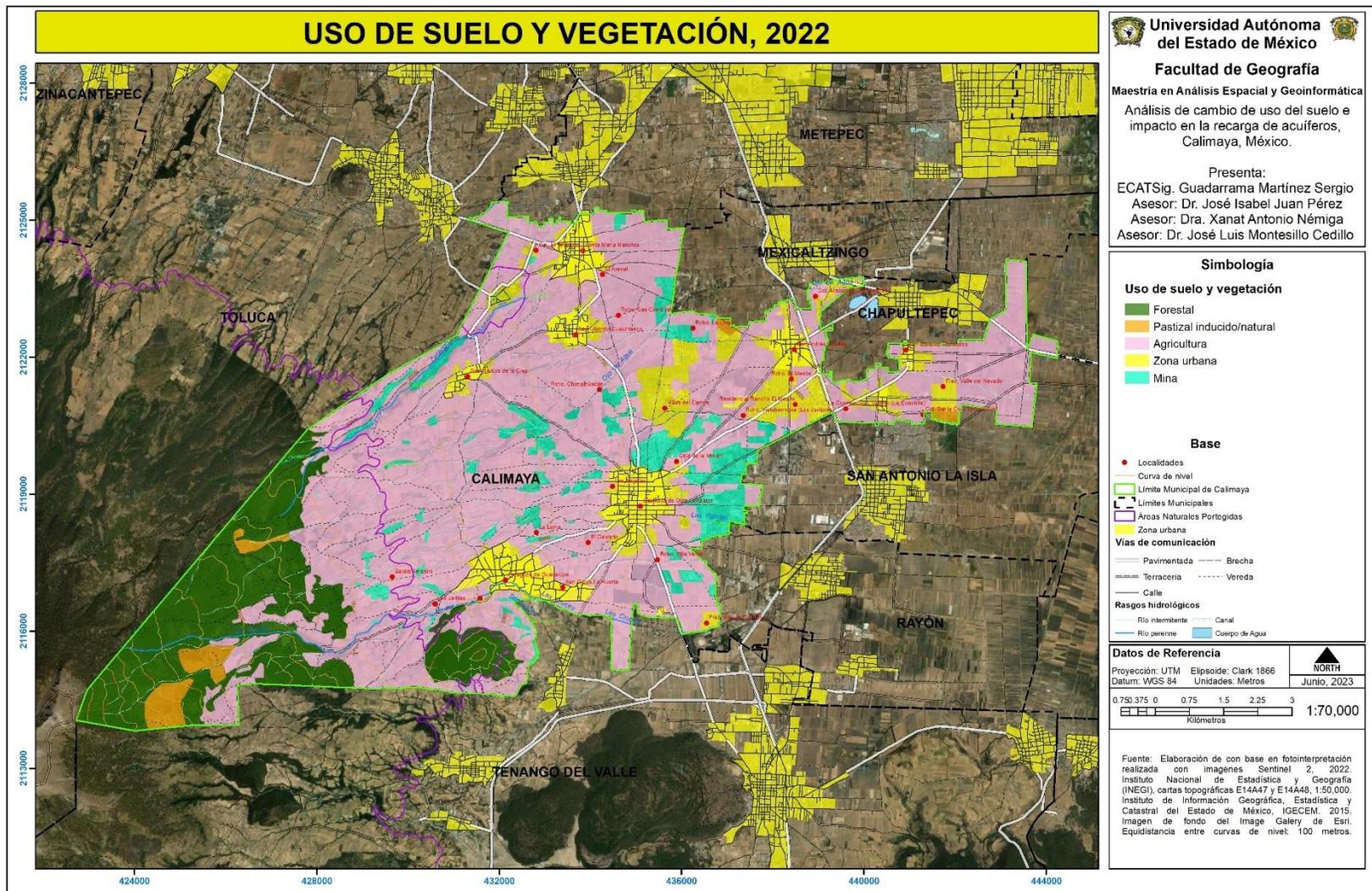


Figura 22: Mapa de uso de suelo y vegetación del año 2022. Fuente elaboración propia con base en imágenes Sentinel 2 (2022).

12.2. Coeficiente de escorrentía superficial modificando el método de Prevert

Después de haber determinado el porcentaje de escorrentía superficial para los años 1997, 2002, 2007, 2012, 2017 y 2022 y con el propósito de realizar un mejor análisis de la información obtenida después de la ponderación de capas, se realizó una síntesis del coeficiente de escorrentía (tabla 3), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. Modificación de los datos de Prevert (1998) y Moll (2013) para representación y análisis cartográfico del coeficiente de escorrentía.

Coeficiente de escorrentía	
Prevert y Moll	Modificado
0.01 – 0.20	Muy bajo
0.21 – 0.40	Bajo
0.41 – 0.60	Medio
0.61 – 0.80	Alto
0.81 – 0.99	Muy alto

Después de realizar el cambio de la información espacial obtenida con el método de Prevert (1998) y Moll (2013) se integraron y graficaron los datos de escorrentía por año (tabla 4, figura 23), así mismo, se realizó la identificación y representación de las zonas de escurrimiento superficial (figuras 25, 26, 27, 28, 29 y 30).

Tabla 4. Coeficiente de escorrentía en el periodo 1997 a 2022. Fuente elaboración propia con base en los resultados obtenidos en la cartografía.

Coeficiente de escorrentía superficial												
	1997		2002		2007		2012		2017		2022	
Categoría	Superficie (ha)	%										
Muy bajo	3.55	0.03	3.55	0.03	18.28	0.18	77.80	0.75	15.75	0.15	28.94	0.28
Bajo	3538.98	33.96	3477.63	33.37	3171.73	30.43	2984.13	28.64	3069.27	29.45	2844.15	27.29
Medio	5481.67	52.60	5217.09	50.06	5087.14	48.81	4781.49	45.88	4990.59	47.89	4808.90	46.14
Alto	950.57	9.12	1129.36	10.84	1309.97	12.57	1610.86	15.46	1454.50	13.96	1619.22	15.54
Muy alto	447.04	4.29	593.42	5.69	835.54	8.02	966.87	9.28	891.63	8.56	1120.94	10.76

En las categorías de *muy bajo* y *bajo*, se observa un menor índice de escurrimiento superficial, lo que implica una mayor infiltración de agua pluvial hacia los acuíferos. Por otro

lado, en las categorías de *medio* a *muy alto*, se pierde entre el 50% y el 100% del agua pluvial debido al aumento del escurrimiento superficial. Las zonas clasificadas como *alto* y *muy alto* exhiben los porcentajes más elevados de escurrimiento superficial, lo que a su vez resulta en un impacto más significativo en el proceso de recarga de los acuíferos.

Como se observa en la tabla 4 y en la figura 23, en un periodo de 25 años, es decir de 1997 a 2022, la superficie con coeficiente de escorrentía en la categoría *muy alto* se incrementó en 673.9 ha (6.47%), esto significa que a mayor superficie de coeficiente de escorrentía es mayor la pérdida de agua pluvial, por lo que, este proceso impacta de manera negativa la recarga de los acuíferos. En contraposición a este comportamiento, y en el mismo intervalo de tiempo, el coeficiente de escorrentía superficial ubicado en la categoría *muy bajo* sólo registró un incremento de 25.39 ha (0.25%), lo cual no es representativo en comparación el coeficiente de escorrentía *muy alto*.

Con relación a los niveles de escorrentía ubicados en las categorías *bajo* y *medio* se observa que la superficie de escurrimiento ha disminuido de manera gradual, con excepción del año 2017 en las que ambas categorías muestran un ligero incremento. Este comportamiento indica que la superficie de captación de agua pluvial ha disminuido, lo que también influye en la disminución de la recarga de acuíferos.

Otro dato relevante entre las categorías se muestra en los años 1997 y 2002, en donde los cambios de escorrentía son similares, es decir en un lapso de cinco años, no se han manifestado cambios significativos en la superficie de coeficiente de escorrentía.

En el año 2007, se observa un cambio más pronunciado en las superficies de escorrentía, en este caso, la categoría *muy bajo* muestra un incremento significativo en comparación con el año 2002, mientras que las categorías *bajo* y *medio* registraron disminuciones importantes. Las categorías *alto* y *muy alto* registraron tendencias a incrementos en la superficie de escorrentía.

Para el año 2012, se registra un incremento notable en todas las categorías de escorrentía. La categoría *muy bajo* experimenta un cambio significativo incrementando de 18.28 ha a 77.80 ha (0.57%) esto en comparación con el año 2007. Para este mismo año, las categorías *alto* y

muy alto, los cambios ocurridos indican un incremento notable en la cantidad de agua que fluye sobre la superficie, es decir, no ocurre el proceso de infiltración ni recarga de acuíferos.

Al comparar los datos del año 2012 con los del año 2017 se observa que los cambios en el coeficiente de escorrentía muestran una disminución, en este caso, la categoría *muy bajo* disminuye, mientras que las categorías *bajo* y *medio* experimentan incrementos poco significativos. Respecto a las categorías *alto* y *muy alto* se observan decrementos de 156.36 ha (1.5 %) y 75.24 ha (0.72 %) respectivamente.

Finalmente, para el año 2022, la categoría *muy bajo* registra un incremento de 13.19 ha (0.13%) en comparación con el año 2017, mientras que las categorías *bajo* y *medio* disminuyen 225.12 ha (2.16%) y 181.69 ha (1.75%) respectivamente. Las categorías *alto* y *muy alto* incrementan la superficie de coeficiente de escorrentía superficial 164.72 ha (1.58%) y 229.34 ha (2.2%) respectivamente, mostrando una tendencia de incremento constante.

Con base en el análisis anterior se observan variaciones en todas las categorías en los cambios de índice de superficie de escorrentía, desde la categoría *muy bajo* hasta *muy alto* a lo largo de todos los años. En el año 1997, el cambio de escorrentía de *muy bajo* a *muy alto* muestra incrementos graduales, esto a medida que se transita de una categoría a otra. La mayor variación se encuentra entre las categorías *bajo* y *medio* con tendencias hacia la disminución de superficie. Es notorio el incremento de la superficie donde la escorrentía superficial es mayor, mientras que la superficie donde se infiltran mayores volúmenes de agua es menor, observándose que cada año se pierde más agua pluvial, esto debido a los frecuentes procesos de cambios de uso de suelo.

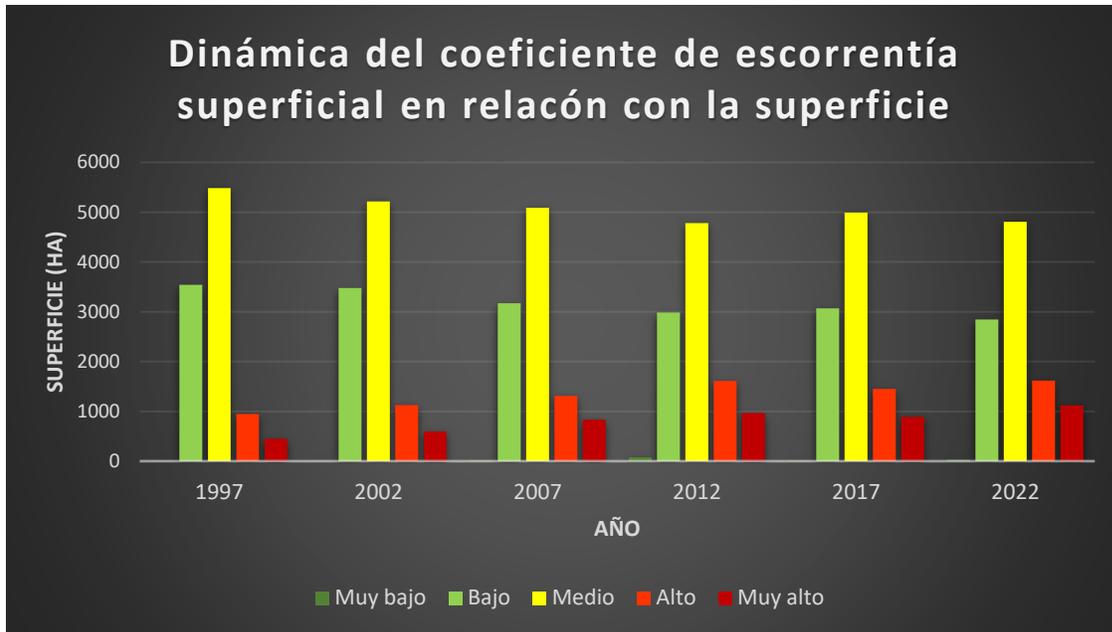


Figura 23. Comportamiento de los cambios en el coeficiente de escorrentía superficial: 1997 - 2022. Fuente: elaboración propia con base en los datos obtenidos de escorrentía superficial.

El análisis de los resultados obtenidos mediante el método de escorrentía de Prevert en el municipio de Calimaya, Estado de México, muestra una clara relación entre el coeficiente de escorrentía y el cambio de uso de suelo en la recarga de los mantos acuíferos del Valle de Toluca. A lo largo de los años estudiados (1997-2022), se observa un aumento en el porcentaje de superficie con niveles de escorrentía *medio*, *alto* y *muy alto*, lo que sugiere un impacto negativo en la capacidad de recarga de los acuíferos.

En cuanto a los usos de suelo, se observa que las zonas con niveles de escorrentía *muy bajo* y *bajo* corresponden principalmente a áreas agrícolas con pendiente muy baja y algunos bosques. En cambio, el nivel de escorrentía aumenta a medida que aumenta la pendiente y se cambia el uso de suelo, alcanzando su punto máximo en zonas urbanas y minas.

En este sentido, es importante destacar la necesidad de promover prácticas de manejo del suelo sostenibles y la conservación de los bosques y las áreas verdes para minimizar el impacto negativo del cambio de uso de suelo en la recarga de los acuíferos. Además, es importante tener en cuenta que la distribución de las lluvias en el territorio municipal es variable, lo que puede influir en los niveles de escorrentía, por lo que, es necesario considerar

la variabilidad y el cambio climáticos al analizar la relación entre el coeficiente de escorrentía y la recarga de los acuíferos.

Es importante destacar que la utilización del método de escorrentía de Prevert en este análisis permitió una aproximación al estudio de la relación entre el coeficiente de escorrentía y la recarga de los acuíferos, pero no es suficiente para establecer una relación causal. Sería necesario realizar estudios más detallados y complejos que consideren otros factores, como la calidad del suelo y la vegetación, y así, establecer una relación más clara y precisa.

En cualquier caso, los resultados de este análisis muestran la importancia de seguir monitoreando el cambio de uso de suelo y los niveles de escorrentía en el municipio de Calimaya y en la región del Valle de Toluca, así como promover prácticas de manejo del suelo sostenibles para garantizar la recarga de los acuíferos y la disponibilidad de agua para las generaciones futuras.

En la figura 24 se observa la pérdida de agua pluvial, estos resultados se obtuvieron mediante la ponderación de los datos de precipitación obtenidos por CONAGUA y los datos espaciales resultantes del método de Prevert (1998) y Moll (2013). Con los datos de la cantidad de lluvia anual registrada en las estaciones climatológicas del municipio y algunas de las adyacentes permitieron la realización de capas (shapes) de isoyetas y se sumaron a las capas (shapes) de escorrentía superficial. Con el dato de porcentaje de pérdida de agua y la cantidad de agua precipitada registrada para cada uno de los años de estudio, se obtuvo el porcentaje de agua perdida para cada uno de los años.

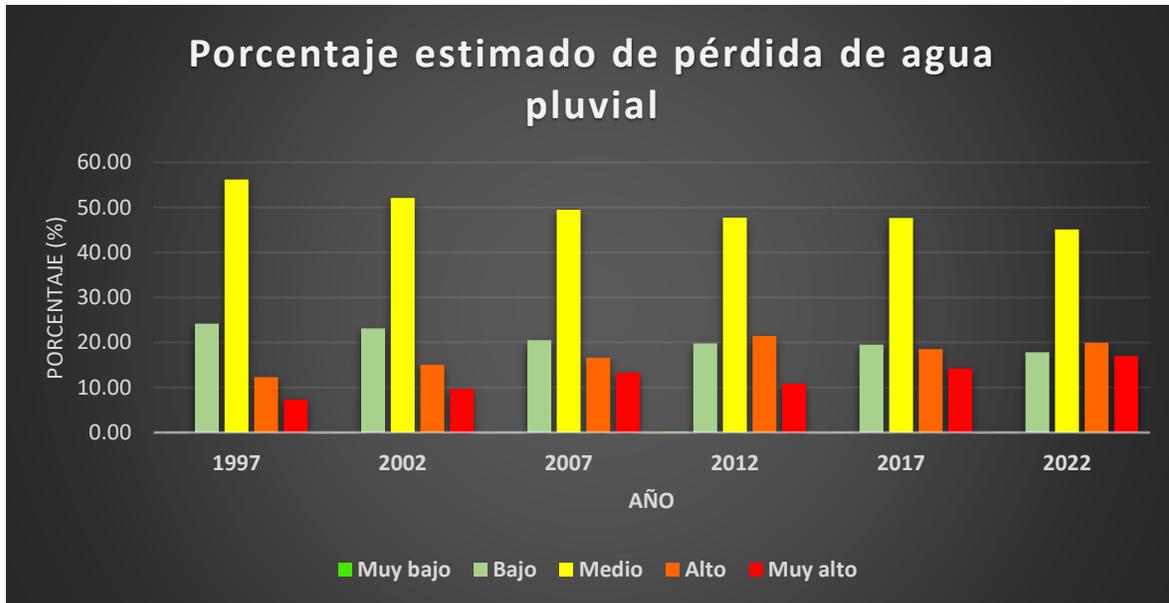


Figura 24. Pérdida de agua de acuerdo con los datos de precipitación anuales (1997 - 2022).

Fuente: elaboración propia con base en los datos de precipitación de CONAGUA y los datos obtenidos de Prevert (1998) y Moll (2013).

En las Tablas 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se presenta la cuantificación de la precipitación pluvial registrada en el municipio, de acuerdo con los datos recopilados por las estaciones meteorológicas y proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se observa que a lo largo de los años de estudio, la cantidad de precipitación varía significativamente. No obstante, se identifica una tendencia que indica un incremento en los niveles de precipitación en las regiones central y sur del municipio, las cuales, a su vez, albergan una mayor proporción de escorrentía superficial. En contraste, la zona poniente del municipio exhibe una disminución en la precipitación y, por consiguiente, presenta un menor porcentaje de escorrentía superficial.

Estos resultados sugieren que el aumento de la superficie con coeficiente de escorrentía superficial más elevado no es el único factor contribuyente a la pérdida de agua en el área. También se destaca el efecto de un incremento en los patrones de precipitación en dichas regiones. En este contexto, se vuelve relevante analizar de manera más profunda los mecanismos que están conduciendo a estos cambios en la distribución de la precipitación, considerando posibles influencias climáticas y geográficas.

Es importante señalar que la comprensión detallada de estas variaciones en la distribución de la precipitación es crucial para la gestión adecuada de los recursos hídricos en el municipio.

Tabla 5. Agua pluvial perdida mediante escorrentía superficial en el año de 1997. Fuente: elaboración propia con base en la ponderación de la precipitación y el coeficiente de escorrentía superficial obtenido.

Escorrentía	Precipitación acumulada (mm)	Pérdida de agua (mm/m ²)	Superficie (m ²)	Pérdida de agua total	%
Muy bajo	964	192.8	59,663.45	11,503,112.63	0.02
Bajo	1209	483.6	35,369,063.23	17,104,478,978.86	24.17
Medio	1209	725.4	54,805,332.80	39,755,788,409.72	56.18
Alto	1147	917.6	9,522,725.58	8,738,052,989.40	12.35
Muy alto	1147	1147	4,493,762.32	5,154,345,378.50	7.28
Total	5676	3466.4	104,250,547.37	70,764,168,869.10	100.00

Tabla 6. Agua pluvial perdida de acuerdo con el porcentaje de escorrentía superficial para el año 2002. Fuente: elaboración propia con base en la ponderación de la precipitación y el coeficiente de escorrentía superficial obtenido.

Escorrentía	Precipitación acumulada (mm)	Pérdida de agua (mm/m ²)	Superficie (m ²)	Pérdida de agua total	%
Muy bajo	941	188.2	35,054.93	6,597,337.77	0.01
Bajo	968	387.2	34,735,855.54	13,449,723,266.91	23.14
Medio	968	580.8	52,138,881.28	30,282,262,250.15	52.11
Alto	968	774.4	11,284,129.42	8,738,429,824.86	15.04
Muy alto	950	950	5,932,626.48	5,635,995,153.95	9.70
Total	4795	2880.6	104,126,547.66	58,113,007,833.64	100.00

Tabla 7. Agua pluvial perdida de acuerdo con el porcentaje de escorrentía superficial para el año 1997.

Escorrentía	Precipitación acumulada (mm)	Pérdida de agua (mm/m ²)	Superficie (m ²)	Pérdida de agua total	%
Muy bajo	875	175	182,409.66	31,921,691.17	0.05
Bajo	997	398.8	31,668,574.95	12,629,427,690.26	20.54
Medio	997	598.8	50,829,383.04	30,436,634,566.93	49.51
Alto	977	781.6	13,081,646.27	10,224,614,725.10	16.63
Muy alto	977	977	8,346,636.47	8,154,663,832.31	13.26
Total	4823	2931.2	104,108,650.40	61,477,262,505.77	100.00

Tabla 8. Agua pluvial perdida de acuerdo con el porcentaje de escorrentía superficial para el año 2012.

Escorrentía	Precipitación acumulada (mm)	Pérdida de agua (mm/m ²)	Superficie (m ²)	Pérdida de agua total	%
Muy bajo	2258	451.6	802,556.27	362,434,411.40	0.18
Bajo	3358	1343.2	29,829,131.33	40,066,489,204.57	19.84
Medio	3358	2014.8	47,807,553.94	96,322,659,679.26	47.70
Alto	3358	2686.4	16,123,264.66	43,313,538,190.88	21.45
Muy alto	2258	2258	9,688,041.16	21,875,596,948.72	10.83
Total	14590	8754	104,250,547.37	201,940,718,434.83	100.00

Tabla 9. Agua pluvial perdida de acuerdo con el porcentaje de escorrentía superficial para el año 2017.

Escorrentía	Precipitación acumulada (mm)	Pérdida de agua (mm/m ²)	Superficie (m ²)	Pérdida de agua total	%
Muy bajo	1163	232.6	181,193.37	42,145,577.63	0.04
Bajo	1625	650	30,677,154.73	19,940,150,575.18	19.53
Medio	1625	975	49,898,749.21	48,651,280,480.87	47.66
Alto	1625	1300	14,559,764.18	18,927,693,428.48	18.54
Muy alto	1625	1625	8,933,685.88	14,517,239,558.30	14.22
Total	7663	4782.6	104,250,547.37	102,078,509,620.47	100.00

Tabla 10. Agua pluvial perdida de acuerdo con el porcentaje de escorrentía superficial para el año 2022.

Escorrentía	Precipitación acumulada (mm)	Pérdida de agua (mm/m ²)	Superficie (m ²)	Pérdida de agua total	%
Muy bajo	1241	248.2	295,282.24	73,289,052.89	0.09
Bajo	1260	504	28,447,161.01	14,337,369,149.48	17.80
Medio	1260	756	48,094,655.28	36,359,559,393.70	45.14
Alto	1241	992.8	16,198,162.44	16,081,535,669.71	19.97
Muy alto	1221	1221	11,215,286.39	13,693,864,685.21	17.00
Total	6223	3722	104,250,547.37	80,545,617,951.00	100.00

Las posibles causas de los cambios en la escorrentía podrían estar asociados con factores naturales y humanos, así como cambios en los patrones de precipitación, donde las variaciones en los niveles de precipitación pueden afectar la cantidad de agua que fluye sobre

la superficie. Un incremento en la precipitación puede resultar en un mayor volumen de escurrimiento superficial, mientras que un decremento estaría asociado con la disminución. El crecimiento urbano y los cambios en el uso del suelo, la deforestación y la pavimentación aumentan la escorrentía al disminuir la capacidad del suelo para absorber el agua. Las prácticas agrícolas, la compactación del suelo o el uso excesivo de agroquímicos pueden alterar la capacidad del suelo para retener el agua e incrementar la escorrentía.

Con los cambios de uso de suelo se incrementa la escorrentía y por consiguiente, provocar procesos erosivos, incidiendo en la pérdida de nutrientes y la degradación de la calidad del suelo. El exceso de escorrentía puede transportar contaminantes como agroquímicos, desde la superficie hacia acuíferos superficiales cercanos y el acuífero subterráneo del Valle de Toluca, lo que puede impactar negativamente la calidad del agua.

Al fluir mayores volúmenes de agua sobre la superficie -en lugar de infiltrarse-, la recarga de los acuíferos puede verse comprometida, lo que puede influir en la disminución de los niveles de agua subterránea. Los cambios observados en la escorrentía superficial del municipio tienen implicaciones directas en la recarga de los acuíferos. Si la escorrentía se incrementa por influencia de factores como la urbanización o cambios en los patrones de precipitación, entonces es probable una disminución en la recarga de los acuíferos, ya que se infiltran menores volúmenes de agua, situación que influye en la disminución de los niveles de agua subterránea y, en última instancia, afectar la disponibilidad de agua en la región.

Por otro lado, si se implementan medidas para reducir la escorrentía, como técnicas de conservación de suelo y agua y reforestaciones, se puede promover una mayor infiltración de agua en el suelo y, por lo tanto, una mayor recarga de los acuíferos. Esto ayudaría a mantener los niveles de agua subterránea y aseguraría una mayor disponibilidad de agua a largo plazo.

En las siguientes figuras: 25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31 se muestran resultados relacionados con el coeficiente de escorrentía superficial y las isoyetas con el manejo de información de CONAGUA.

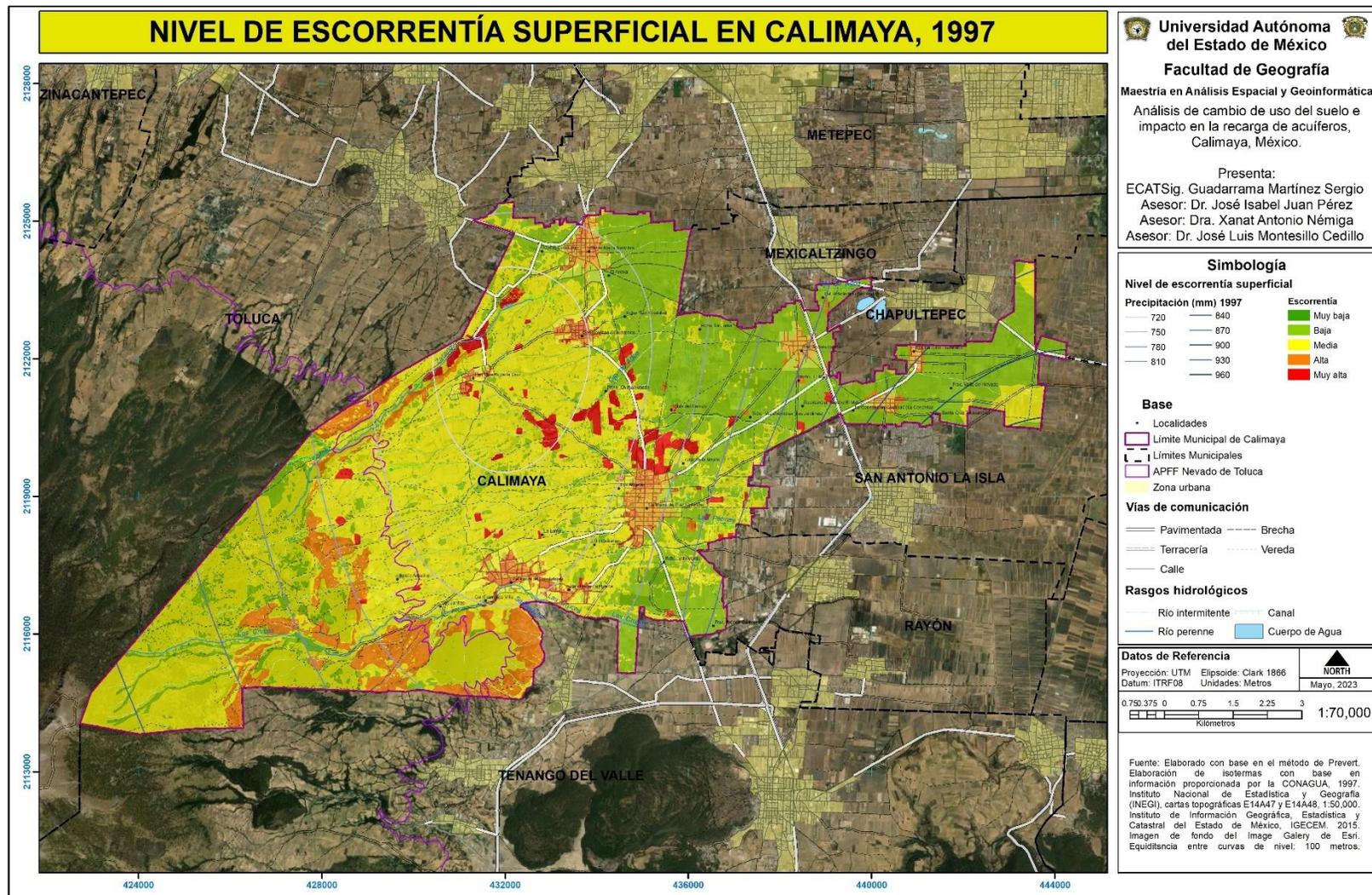


Figura 25: Mapa de nivel de escorrentía superficial en el municipio de Calimaya para el año 1997. Fuente: elaboración propia con base en el uso de suelo de 1997 y el método de Prevert (1998) y Moll (2013).

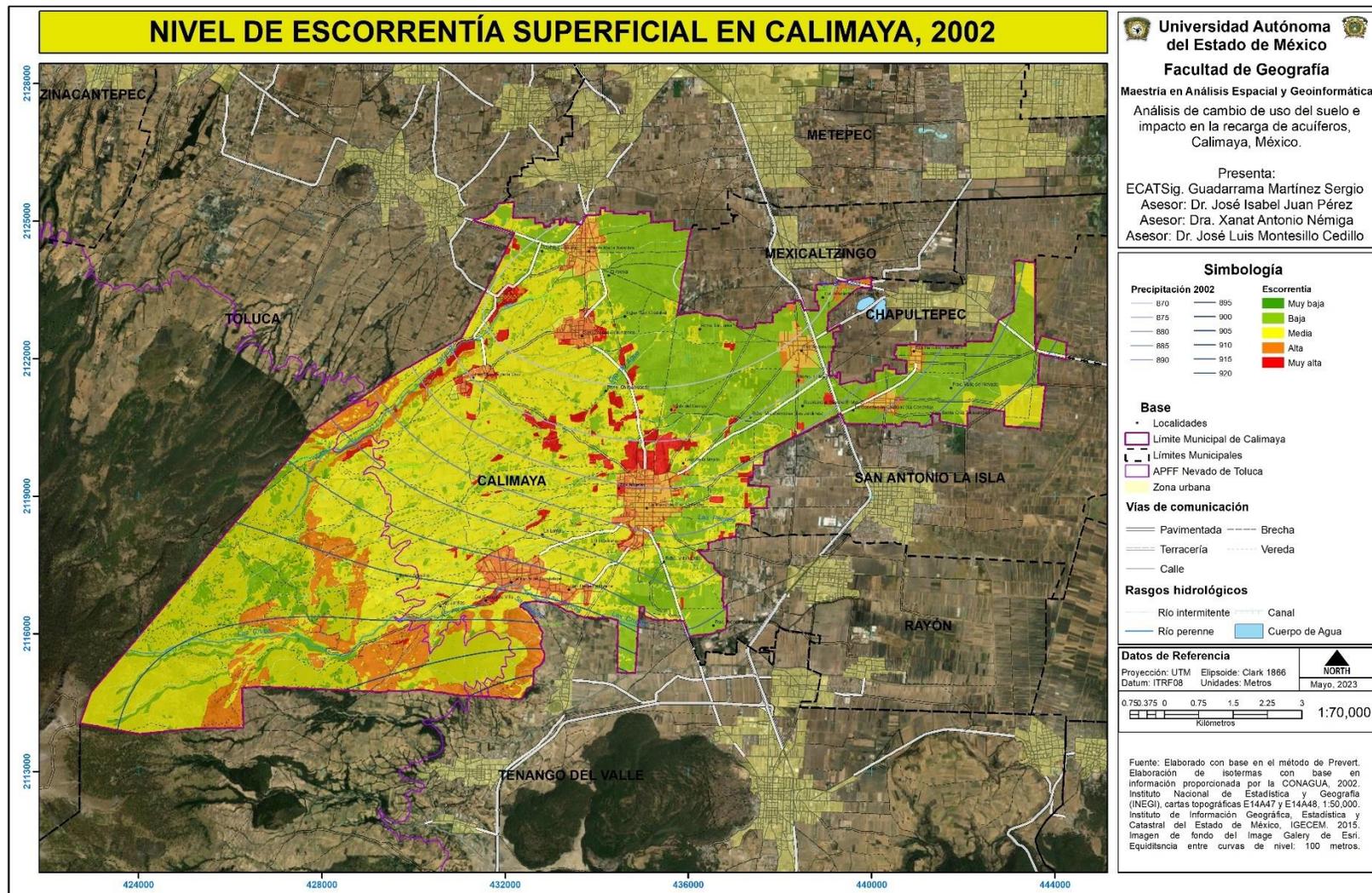


Figura 26: Mapa de nivel de escorrentía superficial en el municipio de Calimaya para el año 2002. Fuente: elaboración propia con base en el uso de suelo de 2002 y el método de Prevert (1998) y Moll (2013).

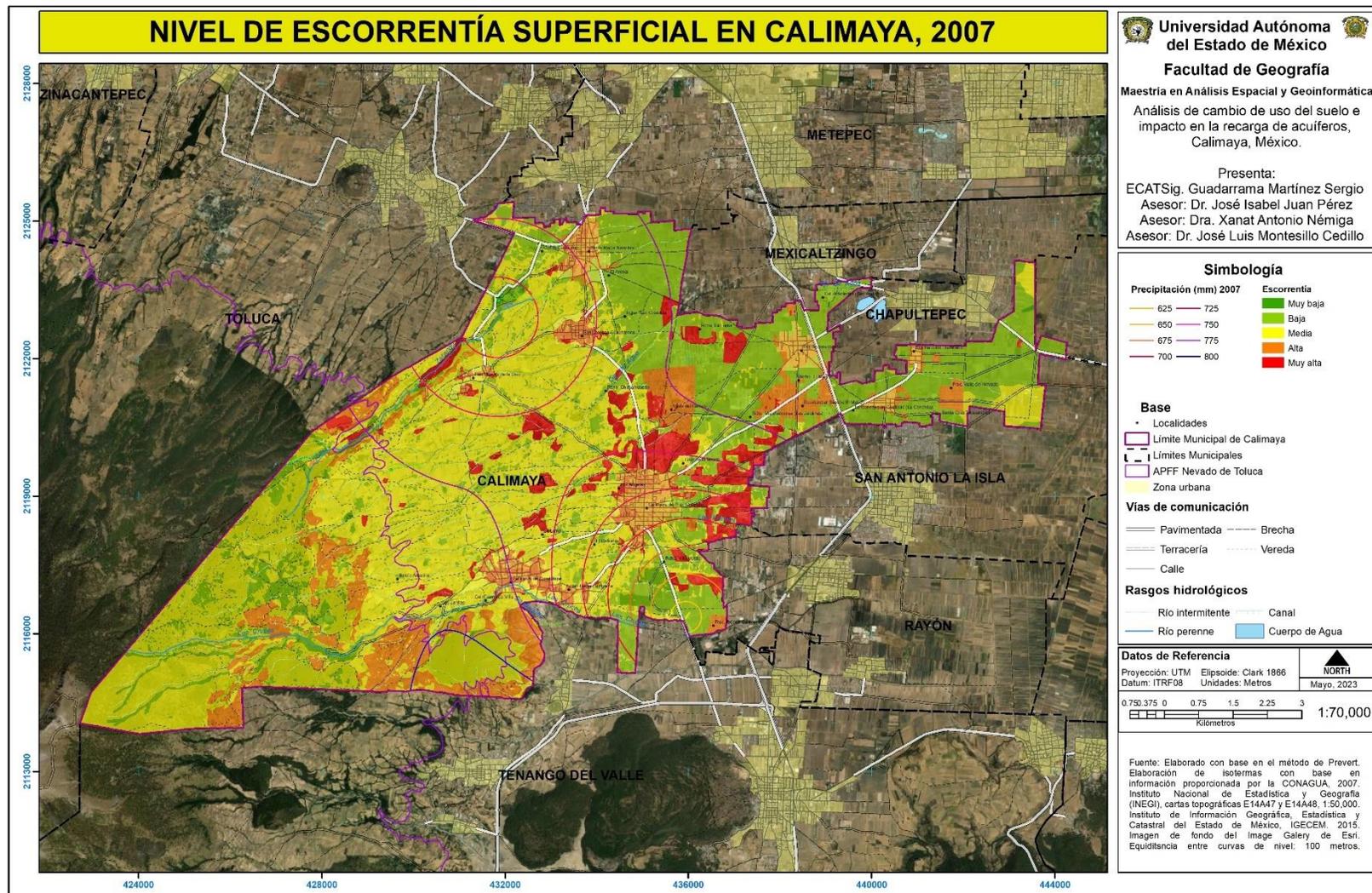


Figura 27: Mapa de nivel de escorrentía superficial en el municipio de Calimaya para el año 2007. Fuente: elaboración propia con base en el uso de suelo de 2007 y el método de Prevert (1998) y Moll (2013).

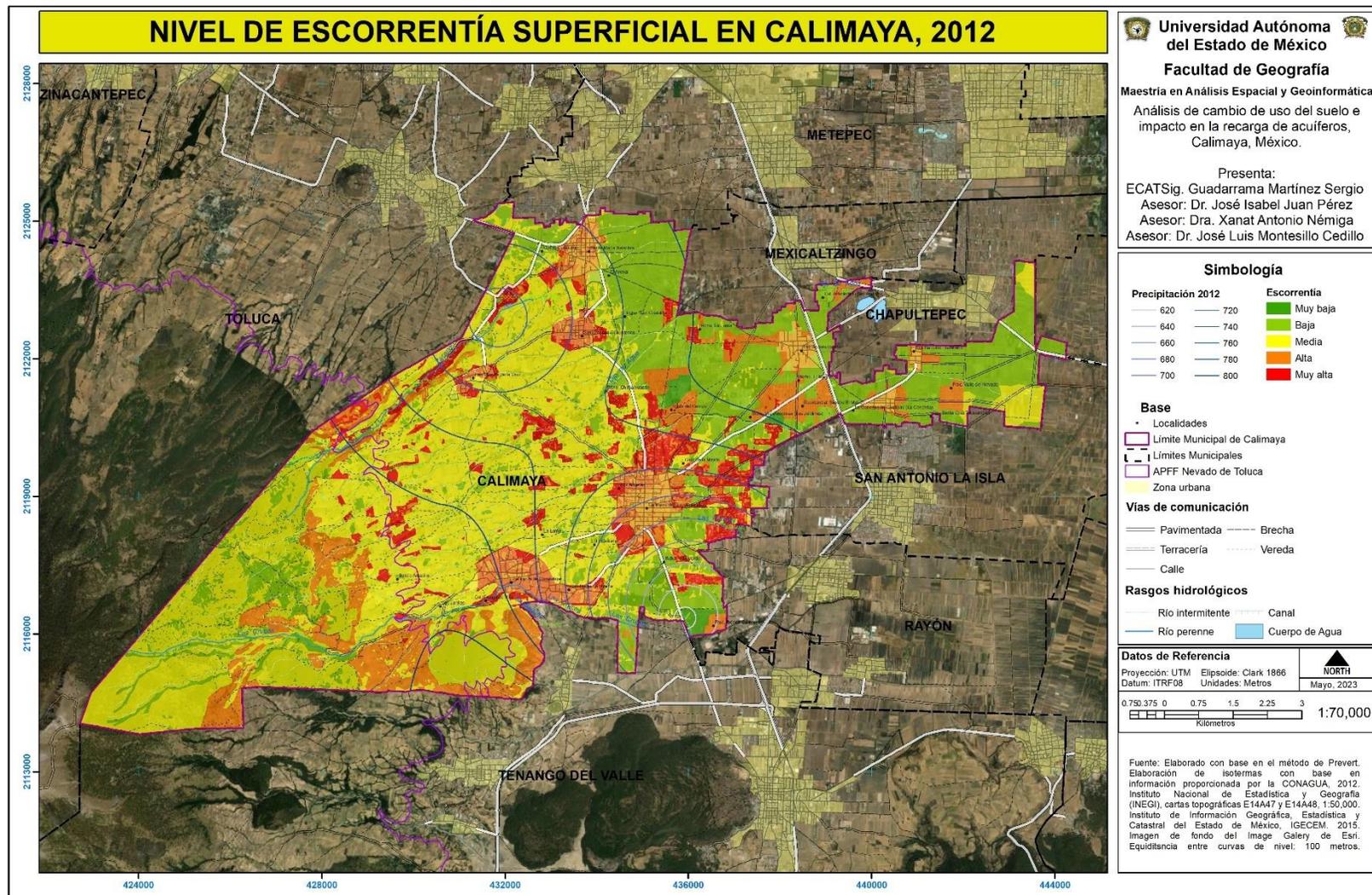


Figura 28: Mapa de nivel de escorrentía superficial en el municipio de Calimaya para el año 2012. Fuente: elaboración propia con base en el uso de suelo de 2012 y el método de Prevert (1998) y Moll (2013).

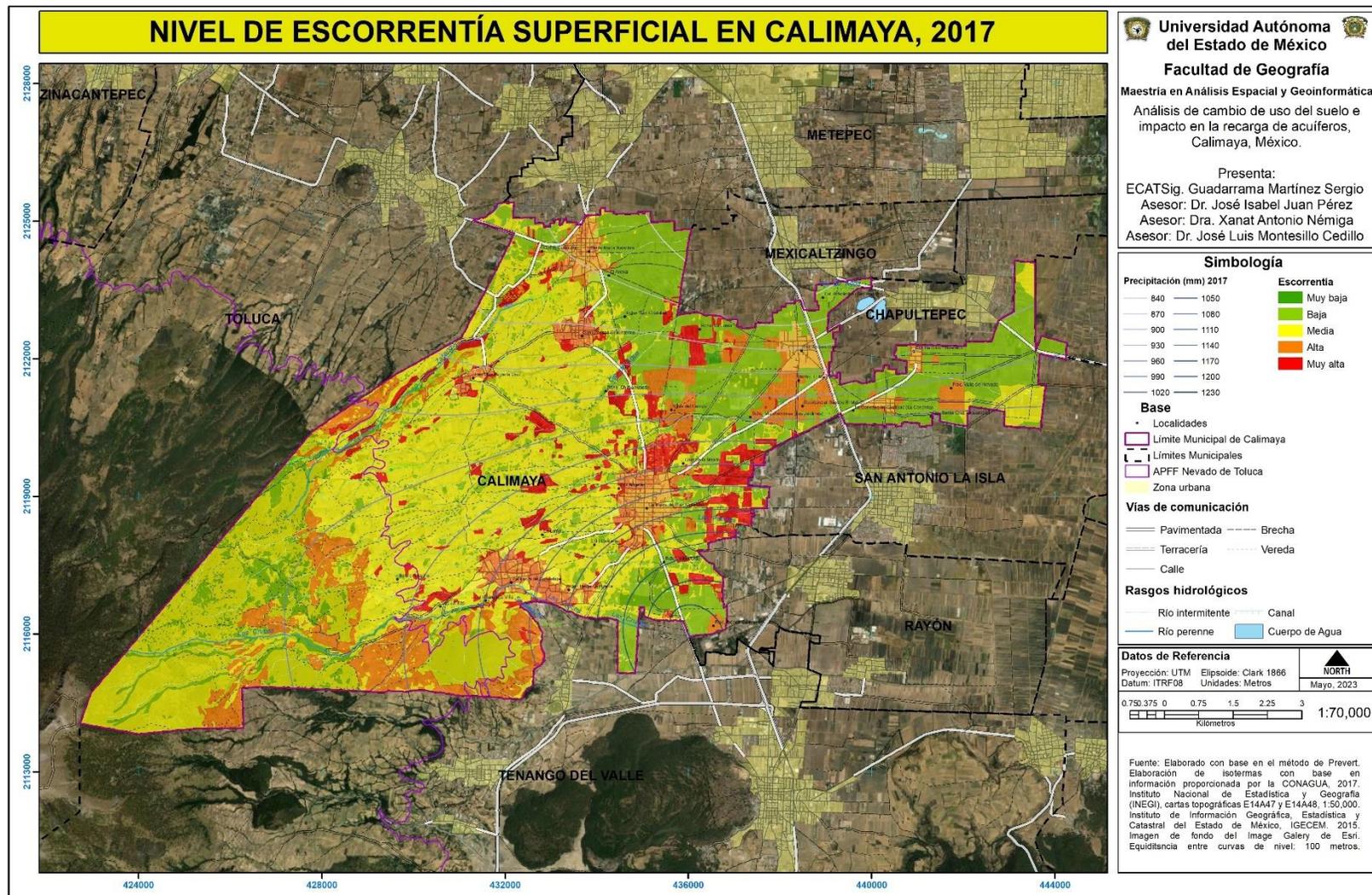


Figura 29: Mapa de nivel de escorrentía superficial en el municipio de Calimaya para el año 2017. Fuente: elaboración propia con base en el uso de suelo de 2017 y el método de Prevert (1998) y Moll (2013).

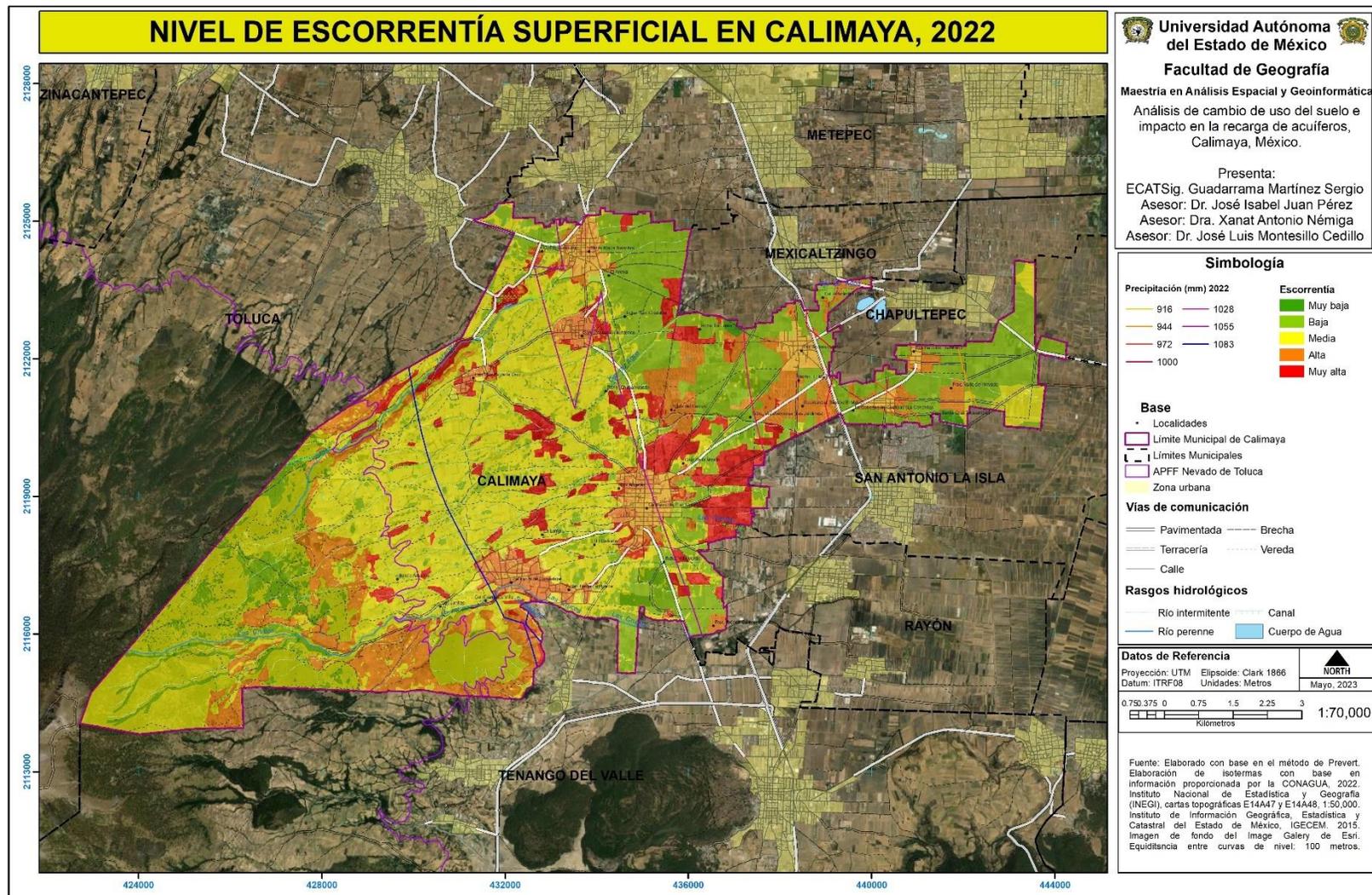


Figura 30: Mapa de nivel de escorrentía superficial en el municipio de Calimaya para el año 2022. Fuente: elaboración propia con base en el uso de suelo de 2022 y el método de Prevert (1998) y Moll (2013).

La utilidad de los mapas obtenidos puede ser importante para los tomadores de decisiones en la adopción de prácticas de planificación sostenible que consideren la conservación de áreas verdes, la gestión del agua de lluvia y la protección de los recursos hídricos subterráneos.

12.3. Resultados del trabajo de campo

Entre 2021 y 2022 se realizaron recorridos (anexo II) por distintas áreas del municipio. Los primeros recorridos tuvieron la finalidad de identificar los procesos de cambio de uso de suelo que estaban ocurriendo actualmente, así como observar algunos de los impactos que se están generando.

En los recorridos de trabajo de campo por el municipio de Calimaya se observó lo siguiente:

- Expansión urbana (figura 31): con el crecimiento demográfico y el desarrollo urbano ha ocurrido una expansión de áreas urbanizadas. Esto ha implicado la conversión de terrenos agrícolas a áreas residenciales (habitacionales), comerciales e industriales.



Figura 31. Despalme de capa de suelo para iniciar con el proceso de construcciones urbanas. Fuente: trabajo de campo.

- Transformación de terrenos agrícolas (figura 32): la agricultura ha sido tradicionalmente una actividad importante. Sin embargo, se observó una disminución de las áreas de cultivo debido a la conversión de terrenos agrícolas en áreas urbanas o industriales. Esto se debe a la presión demográfica y al desarrollo económico de la región.



Figura 32. Zona de minas que originalmente eran terrenos agrícolas. Fuente: trabajo de campo.

- Cambio en el uso de terrenos forestales (figura 33): Calimaya cuenta con áreas forestales significativas, pero se observaron procesos de tala legal e ilegal, generando una disminución de terrenos forestales. La tala para obtener madera o para dar paso a la expansión urbana puede tener un impacto negativo en la biodiversidad y en la capacidad de los bosques para proporcionar servicios ambientales. Se observó la presencia de incendios forestales en límites agrícolas, posiblemente con la intención de incrementar la frontera agrícola (se observó tala de vegetación muerta). La tala observada, en su mayoría era en bosques de cedro blanco, realizada mediante autorizaciones de programas de manejo forestal otorgadas a los Bienes Comunales de Calimaya por parte de PROBOSQUE y CONAFOR (SEMARNAT). Pero por posibles actos de corrupción o actos de ambición, no realizan las actividades de acuerdo con las normas, además de cortar árboles de diferentes especies, dejando a su paso todo el derrame del tronco, que puede servir como combustible para futuros incendios.



Figura 33. Tala realizada mediante programas de manejo forestales. Fuente: trabajo de campo.

- Explotación de recursos naturales (figura 34): se han llevado a cabo actividades de extracción de recursos naturales, como la minería. Esto altera el paisaje, genera impactos ambientales y afecta los ecosistemas locales.



Figura 34. Alteración del paisaje por minería. Fuente: trabajo de campo.

- Uso clandestino de los socavones (figura 35), los cuales se ocupan como tiraderos de residuos sólidos urbanos, así como de material generado por el mantenimiento que se hace en las zonas habitacionales cercanas.



Figura 35. Tiradero clandestino de RSU en socavón abandonado. Fuente: trabajo de campo.

- Algunas minas con licencia de extracción utilizan otras zonas (clandestinas) para extraer material (figura 36), lo transportan y disponen en la zona de mina con licencia, y de ahí extraen y venden el material -simulando como material obtenido de la zona con permiso-.



Figura 36. Mina clandestina de extracción de tepojal, lo transportan a zonas con permiso y de ahí lo venden. Fuente: trabajo de campo.

- Existe afectación a la vegetación adyacente a las minas activas. Las hojas de la vegetación son afectadas por el polvo, impidiendo el proceso de la fotosíntesis y provocando su muerte (figura 37). Además de que, al no respetar perímetro alguno en las orillas con los demás predios, al extraer el material de las orillas, la maquinaria impacta a la vegetación que se encuentre a su paso.



Figura 37. Cedro blanco afectado por el polvo generado de una mina adyacente. Fuente: trabajo de campo.

- En algunos socavones se observa un manejo con fines agrícolas (figura 38), sin embargo, estos cultivos se ven débiles y de crecimiento escaso por la falta de nutrientes (en realidad no es suelo sino arena y grava, residuos de la mina).



- Figura 38. Agricultura en zona donde se extrajo tepojal. Fuente: trabajo de campo.
- Riesgo a asentamientos humanos que se localizan en los límites de los bordes de los socavones generados por la extracción de materiales pétreos (figura 39).



- Figura 39. Bardeado perimetral del fraccionamiento residencial “Villas del Campo” adyacente a la mina “La Palma”. Fuente: trabajo de campo.
- Reconversión agrícola (figura 40): zonas destinadas a la agricultura donde previamente hubo extracción de materiales pétreos y posteriormente, se destinaron a actividades agrícolas.



- Figura 40. Agricultura en zona donde se extrajo tepojal. Fuente: trabajo de campo.
- Reconversión forestal (figura 41): como resultado de la modificación de la categoría del Área Natural Protegida (ANP) Nevado de Toluca, de Parque Nacional a Área de Protección de Flora y Fauna, se implementaron programas de reforestación en todo

el ANP. Estos programas fueron ejecutados por PROBOSQUE y CONAFOR, y se conocieron como programas de "reconversión productiva", cuyo objetivo principal fue brindar alternativas económicas a las personas involucradas en el cultivo de papa, quienes arrendaban terrenos por un período de aproximadamente 2 a 5 años, pagando una tarifa de hasta \$30,000.00 por hectárea. Esta práctica resultaba atractiva para los propietarios de las tierras. En este contexto, los programas de reconversión productiva reunieron recursos económicos de ambas instituciones con el fin de ofrecer incentivos financieros a los propietarios de terrenos agrícolas, con el propósito de que abandonaran las actividades agrícolas y se dedicaran a la siembra de árboles forestales, en consonancia con el uso natural del suelo del ANP. Estas plantaciones forestales podrían destinarse en el futuro tanto a la venta de árboles de navidad como a la venta de madera.



Figura 41. Reconversión forestal. Fuente: trabajo de campo.

- Afectación a acuíferos superficiales (figura 42): Las localidades de Zaragoza de Guadalupe, San Diego la Huerta, San Marcos de la Cruz, Santa María del Monte y Calimaya de Díaz González dependen de acuíferos superficiales para satisfacer las necesidades de agua pública y urbana. Se ha observado en campo y se ha informado por parte de representantes de los comités de agua de Zaragoza y San Diego la Huerta que ha disminuido la recarga de agua de estos acuíferos, incluso algunos se han secado de manera irreversible. Los cambios se atribuyen a las actividades de cambio de uso de suelo que se realizan en la zona de bosques, particularmente en las áreas montañosas. Estas actividades incluyen la deforestación, apertura de nuevas áreas agrícolas y extracción de materiales pétreos.



Figura 42. Representante del comité de agua de Zaragoza indicando hasta donde llegaba hace algunos años el nivel de agua proveniente de acuíferos superficiales aprovechada para uso público. Fuente: trabajo de campo.

La alteración del paisaje ha tenido un impacto negativo en la cantidad y la calidad del agua, debido al uso de agroquímicos en la agricultura. Las localidades que dependen de estos acuíferos carecen de recursos para realizar estudios exhaustivos sobre la calidad del agua que consumen. Como resultado de esto, se enfrentan a problemas de escasez cada vez más frecuentes debido al aumento de la población y a la disminución de agua disponible proveniente de los acuíferos locales, esto los obliga a buscar nuevas fuentes de agua más distantes, lo cual implica mayor costo de mantenimiento y suministro.

Otra actividad importante en trabajo de campo fue el uso de un infiltrómetro casero para determinar el tiempo requerido para la infiltración del agua en el subsuelo (anexo III), considerando los diferentes usos de suelo. Los resultados se muestran en la tabla 11, la cual indica las coordenadas de los puntos de muestreo y las condiciones físico-geográficas asociadas, también se hizo una descripción de las condiciones de los sitios de muestreo.

Con los datos recolectados se generó un mapa utilizando el método de Kriging (figura 43). Este método, basado en la inferencia espacial, permitió estimar los valores de una variable en lugares donde no fue posible hacer muestreos, esto con base en la información proporcionada por las muestras realizadas. En este mapa se visualizan las áreas y el tiempo

de infiltración del agua, es decir, indica las zonas con mayor o menor capacidad de recarga de hacia los acuíferos.

Los resultados de esta actividad son los siguientes:

- Se identificó una mínima filtración de agua en las zonas centrales del municipio, donde se concentran actividades humanas como la minería de arenas y gravas, así como las áreas urbanas más extensas con escasa presencia de áreas verdes. Los suelos presentan estratos comprimidos debido a las actividades recreativas.
- Se encontró una mayor pérdida de agua en las áreas periféricas del municipio, resultado de las actividades agrícolas y mineras. En los suelos arcillosos fue notorio que la absorción del agua era rápida cuando estaban secos, pero al saturarse, el tiempo de filtración se incrementaba. En las zonas agrícolas recientemente intervenidas (donde se realizó el barbecho o surcado utilizando maquinaria), se encontró una compresión del suelo que disminuía la permeabilidad. En contraste, las áreas agrícolas donde no se había intervenido durante un período prolongado permitían una filtración más rápida, especialmente en suelos arenosos.
- La zona nororiental del municipio, donde se ha registrado una menor influencia de actividades mineras y la agricultura es tradicional, conserva los suelos y los estratos geológicos en mejores condiciones, lo que favorece una mayor capacidad de filtración.
- La región occidental del municipio presenta una predominancia de ecosistemas boscosos y pastizales, mayormente de origen natural. A pesar de que enfrenta diversas amenazas, como la deforestación debido a la tala indiscriminada, incendios forestales, expansión de actividades agrícolas y minería de extracción de tepojal, sigue manteniendo el más elevado nivel de capacidad de infiltración de aguas pluviales. Por lo tanto, resulta imperativo explorar alternativas que favorezcan la conservación y una adecuada gestión de los recursos naturales en esta área.

Tabla 11. Datos de los muestreos realizados en trabajo de campo mediante un infiltrómetro casero.

Muestreo	Fecha	Latitud	Longitud	Altitud	LAgua	Tiempo	Edafología	Geología	Geomorfología	Pendiente	Isoyetas	Isotermas	Subcuena	Microcuena	Descripción
M1	11/02/2023	19.188124	-99.54614	2578	5	01:05:31	Feozem háplico	Aluvial	Planicie aluvial	Plana	750	13.5	Zona de inundación	Zona de inundación	Pastizal seco (zacatonal) donde se encuentran evidencias de pastoreo, suelo muy compacto.
M2	11/02/2023	19.182225	- 99.558037	2582	5	00:07:02	Feozem háplico	Aluvial	Planicie aluvial	Plana	750	13.5	Zona de inundación	Zona de inundación	Zona agrícola de maíz, donde aún se encuentran cañas secas en pie.
M3	11/02/2023	19.181251	- 99.574476	2595	5	00:02:23	Feozem háplico	Aluvial	Planicie aluvial	Plana	750	13.5	Agua bendita	Afluente	Zona agrícola de maíz, donde aún se encuentran cañas secas en pie y con presencia de herbáceas verdes.
M4	11/02/2023	19.176809	- 99.585356	2607	5	00:08:43	Cambisol éutrico	Aluvial	Laderas convexas con pendiente suave	Suave	750	12.5	Agua bendita	Afluente	Mina de extracción de arenas ya en abandono desde hace algunos años, sustrato edáfico muy compacto y presencia de gramíneas secas con distribución irregular
M5	11/02/2023	19.179635	- 99.589025	2616	5	00:06:21	Cambisol éutrico	Aluvial	Laderas convexas con pendiente suave	Plana	750	12.5	Agua bendita	Afluente	Área verde urbana. Parque dentro del fraccionamiento Valle de las Fuentes. Presencia pasto alfombra semiseco.
M6	11/02/2023	19.181716	- 99.604026	2653	5	01:26:50	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	750	12.5	Agua bendita	Afluente	Mina de extracción de tepojal, recientemente clausurada y en abandono.
M7	11/02/2023	19.183313	- 99.601725	2649	5	00:03:27	Cambisol éutrico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	750	12.5	Agua bendita	Afluente	Pastizal inducido sin presencia de pastoreo reciente, suelo poco compacto.
M8	11/02/2023	19.185879	- 99.601151	2650	5	00:04:49	Cambisol éutrico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Plana	750	12.5	Agua bendita	Afluente	zona agrícola de maíz con residuos de zacate seco.
M9	11/02/2023	19.193733	-99.59975	2638	5	00:01:43	Cambisol éutrico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	750	12.5	Agua bendita	Ojo de agua	Área verde urbana. Parque dentro del fraccionamiento Hacienda de las Fuentes. Presencia pasto alfombra semiseco.
M10	11/02/2023	19.171305	- 99.611362	2691	5	00:16:43	Regosol éutrico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	750	12.5	Agua bendita	Afluente	Zona con agricultura de temporal (cultivo de maíz), en mina de arena y conglomerados en estado de abandono desde hace algunos años.
M11	11/02/2023	19.161553	- 99.609625	2672	5	00:25:30	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	750	12.5	Las cruces	Afluente	Pastizal inducido con posible pastoreo y con presencia de actividades deportivas y de ocio.
M12	02/03/2023	19.210222	- 99.540966	2574	5	00:03:04	Feozem háplico	Aluvial	Planicie aluvial	Plana	750	13.5	Zona de inundación	Zona de inundación	Zona agrícola con zacate en pie.
M13	02/03/2023	19.192584	- 99.535731	2574	5	00:00:33	Feozem háplico	Aluvial	Planicie aluvial	Plana	750	13.5	Zona de inundación	Zona de inundación	Zona agrícola donde quemaron el zacate que había.
M14	02/03/2023	19.180984	- 99.537735	2574	5	00:04:39	Vertisol pélico	Aluvial	Planicie aluvial	Plana	750	13.5	Zona de inundación	Zona de inundación	Zona agrícola donde barbecharon recientemente.
M15	02/03/2023	19.19986	- 99.579588	2593	5	00:34:43	Feozem háplico	Aluvial	Laderas convexas con pendiente suave	Plana	750	13.5	Zona de inundación	Zona de inundación	Zona agrícola donde barbecharon recientemente.
M16	02/03/2023	19.198178	- 99.586483	2605	5	01:07:55	Cambisol éutrico	Aluvial	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	750	13.5	Agua bendita	Ojo de agua	Zona agrícola con zacate recién cortado.

M17	02/03/2023	19.144522	- 99.602954	2640	5	01:36:11	Feozem háplico	Aluvial	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	750	12.5	Las cruces	Sanabria	Mina de extracción de arenas ya en abandono desde hace algunos años, sustrato edáfico muy compacto y presencia de gramíneas secas con distribución irregular. Presencia de pastoreo.
M18	02/03/2023	19.139978	- 99.609782	2661	5	01:18:36	Feozem háplico	Toba	Planicie aluvial	Ligeramente suave	750	12.5	Las cruces	Sanabria	Pastizal seco (zacatonal) donde se encuentran evidencias de pastoreo y actividades deportivas, suelo muy compacto.
M19	02/03/2023	19.133725	- 99.622286	2697	5	00:09:56	Feozem háplico	Aluvial	Laderas convexas ligeramente disectadas	Ligeramente suave	750	11.5	Las cruces	El Zaguán	Zona agrícola donde primero sacaron el tepojal y recientemente sembraron chícharo.
M20	02/03/2023	19.139694	- 99.630909	2744	5	00:01:11	Litosol	Aluvial	Laderas convexas ligeramente disectadas	Suave	750	10.5	Las cruces	Sanabria	Cauce del río Sanabria con presencia de aguas negras provenientes de las localidades de la parte alta. En la carta topográfica 1:50000 del INEGI este río está considerado como perenne, sin embargo, en campo se observa que ya es un río intermitente, ya que solamente se observa caudal en temporada de lluvia.
M21	02/03/2023	19.147052	- 99.624509	2728	5	00:47:49	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas ligeramente disectadas	Suave	750	11.5	Las cruces	Sanabria	Zona agrícola donde barbecharon recientemente.
M22	21/03/2023	19.144407	-99.6792	3114	5	00:38:05	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Moderada	950	7.5	Agua bendita	Afluente	Zona agrícola donde barbecharon recientemente.
M23	21/03/2023	19.143389	- 99.680982	3136	5	00:03:45	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Moderada	950	7.5	Agua bendita	Afluente	Zona de bosque de cedro reforestado en los 80's en terrazas mecánicas, se observa presencia de deforestación de cedro y después reforestación de <i>Abies religiosa</i> (oyamel)
M24	21/03/2023	19.143649	- 99.684063	3159	5	00:26:12	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Moderada	950	7.5	Agua bendita	Afluente	Bosque de Ailes recién incendiada.
M25	21/03/2023	19.1375	- 99.689357	3215	5	00:57:29	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	1050	7.5	Las cruces	Sanabria	Zona donde era bosque, después fue agrícola, y ahora es nuevamente bosque con fines de venta de árbol navideño (<i>Pinus ayacahuite</i> y <i>Abies religiosa</i>). Se observa un suelo muy compactado.
M26	21/03/2023	19.136069	-99.69037	3211	5	00:04:30	Andosol ócrico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	1050	7.5	Las cruces	Sanabria	Zona donde era bosque, después fue agrícola, y ahora es nuevamente bosque con fines de venta de árbol navideño (<i>Abies religiosa</i>). Se observa un suelo poco conformado, afloran las pumitas.
M27	21/03/2023	19.142113	- 99.694714	3231	5	01:08:16	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Ligeramente suave	1050	7.5	Agua bendita	Afluente	Zona agrícola donde barbecharon recientemente.

M28	21/03/2023	19.1365	- 99.700645	3306	5	00:08:41	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con ligera pendiente	Moderada	1050	6.5	Las cruces	Sanabria	Zona de bosque de cedro reforestado en los 80's en terrazas mecánicas, alta densidad de árboles.
M29	21/03/2023	19.139336	- 99.704829	3336	5	00:32:03	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con ligera pendiente	Ligeramente suave	1050	6.5	Agua bendita	Ojo de agua	Bosque de Ailes y K. Se observa presencia de deforestación selectiva, probablemente para uso doméstico.
M30	21/03/2023	19.131892	- 99.715223	3480	5	00:13:25	Andosol ótrico	Brecha volcánica	Laderas convexas con ligera pendiente	Plana	1050	5.5	Las cruces	Sanabria	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> con algunos cedros y bastante pastizal natural en la base. En una terraza mecánica. Se observan zanjas trincheras y deforestación antigua.
M31	21/03/2023	19.130837	-99.70858	3395	5	00:31:12	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con ligera pendiente	Fuerte	1050	5.5	Las cruces	Sanabria	Zona de reforestación de <i>P. montezumae</i> , con presencia de pastizales. Zona recién quemada.
M32	21/03/2023	19.131578	- 99.681051	3103	5	00:04:22	Litosol	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Moderada	950	7.5	Las cruces	Sanabria	Zona de filtración de agua para manantiales de localidades de Zaragoza, Calimaya (cabecera) y La Huerta. Cauce de río al lado de la piscifactoría.
M33	21/03/2023	19.13699	- 99.667512	3018	5	01:46:14	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Moderada	850	8.5	Las cruces	Sanabria	Mina de tepojal dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.
M34	03/06/2023	19.155471	-99.65511	2911	5	00:37:15	Regosol éutrico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Moderada	850	9.5	Agua bendita	Afluente	Agricultura de chícharo a punto de ser cosechado.
M35	03/06/2023	19.154025	-99.66449	2985	5	00:46:05	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Suave	850	8.5	Agua bendita	Afluente	Agricultura de maíz donde recientemente metieron maquinaria para voltear el surco para que la tierra tape el tallo del maíz y los nutrientes hagan que crezca más rápido.
M36	03/06/2023	19.165862	- 99.674906	3015	5	00:11:21	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Moderada	850	8.5	Agua bendita	Ojo de agua	Cultivo reciente de papa en terreno donde en algún momento se extrajo el tepojal, en algunos puntos del terreno se puede observar tepojal expuesto en vez de suelo arable.
M37	03/06/2023	19.16902	- 99.653776	2859	5	1:31:52	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Moderada	850	9.5	Agua bendita	Ojo de agua	Mina abandonada de extracción de arenas y conglomerados. Se observa la presencia de pastos creciendo además de animales ferales.
M38	03/06/2023	19.182425	- 99.651578	2870	5	00:57:05	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Suave	750	10.5	Agua bendita	Ojo de agua	Agricultura de maíz donde aún no meten maquinaria para voltear el surco. Se observa un suelo seco y comprimido.
M39	03/06/2023	19.184876	- 99.665691	2892	5	00:39:29	Feozem háplico	Aluvial	Laderas convexas fuertemente disectadas	Fuerte	750	9.5	Agua bendita	Zacango	Mina de arena y conglomerados abandonada desde hace muchos años donde el pastizal ha invadido básicamente todo el terreno. Además, se observa la presencia de pastoreo y tepozanes. En la parte alta se observa erosión debido a minas de extracción de pumitas.

M40	04/06/2023	19.17505	-99.67962	2995	5	00:28:19	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Suave	850	8.5	Agua bendita	Zacango	Agricultura de maíz en terreno donde en algún momento se extrajo el tepojal, presencia de erosión en la parte alta debido a la extracción de pumitas. Además, se observan incendios en los bosques fragmentados que se encuentran al rededor del predio.
M41	05/06/2023	19.217297	- 99.649073	2751	5	00:05:23	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas ligeramente disectadas	Plana	750	11.5	Agua bendita	Agua bendita	Agricultura de maíz en suelo donde, por su color, se observa presencia de bastante materia orgánica al ser un suelo obscuro.
M42	06/06/2023	19.210894	- 99.618472	2664	5	00:23:46	Feozem háplico	Aluvial	Laderas convexas con pendiente suave	Plana	750	12.5	Agua bendita	Zacango	Agricultura de maíz con trabajos de maquinaria elaborados hace tiempo, suelo poco comprimido.
M43	07/06/2023	19.20442	- 99.629687	2703	5	00:05:13	Regosol éutrico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Plana	750	12.5	Agua bendita	Ojo de agua	Agricultura de maíz en suelo donde, por su color, se observa presencia de bastante materia orgánica al ser un suelo obscuro. Se observan trabajos de retención de erosión.
M44	08/06/2023	19.180014	- 99.630065	2733	5	01:41:02	Feozem háplico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Suave	750	11.5	Agua bendita	Ojo de agua	Mina de extracción de arena abandonada. Ya hay presencia de pastos.
M45	09/06/2023	19.174825	- 99.683196	3037	5	00:31:43	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Fuerte	850	8.5	Agua bendita	Zacango	Bosque de ailes y encinos fragmentados por incendios y tala clandestina.
M46	10/06/2023	19.167139	- 99.691146	3085	5	00:09:57	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Moderada	950	7.5	Agua bendita	Zacango	Bosque reforestado de <i>Pinus montezumae</i> en zona de pastizales inducidos, se calcula que la reforestación fue de hace aproximadamente 6 años. También se observan ailes y cedros, además de presencia de incendios.
M47	11/06/2023	19.157017	- 99.689049	3156	5	00:05:12	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Suave	950	7.5	Agua bendita	Ojo de agua	Bosque de cedros con presencia de deforestación permisiva por programas de manejo forestal.
M48	12/06/2023	19.156956	- 99.695953	3174	5	00:32:28	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas fuertemente disectadas	Moderada	950	7.5	Agua bendita	Zacango	Bosque de cedros en muy alta densidad.
M49	13/06/2023	19.152833	- 99.702215	3255	5	00:26:32	Andosol húmico	Toba	Laderas convexas con pendiente suave	Moderada	1050	7.5	Agua bendita	Ojo de agua	Bosque de <i>Pinus montezumae</i> en terrazas mecánicas, además existe reforestación de esta especie de pino en zanjas trinchera y presencia de pastizales.
M50	14/06/2023	19.145268	- 99.711864	3372	5	00:05:14	Andosol húmico	Brecha volcánica	Laderas convexas con ligera pendiente	Moderada	1050	6.5	Agua bendita	Zacango	Bosque de <i>Pinus montezumae</i> y ailes en alta densidad, además existe presencia de pastizales naturales.

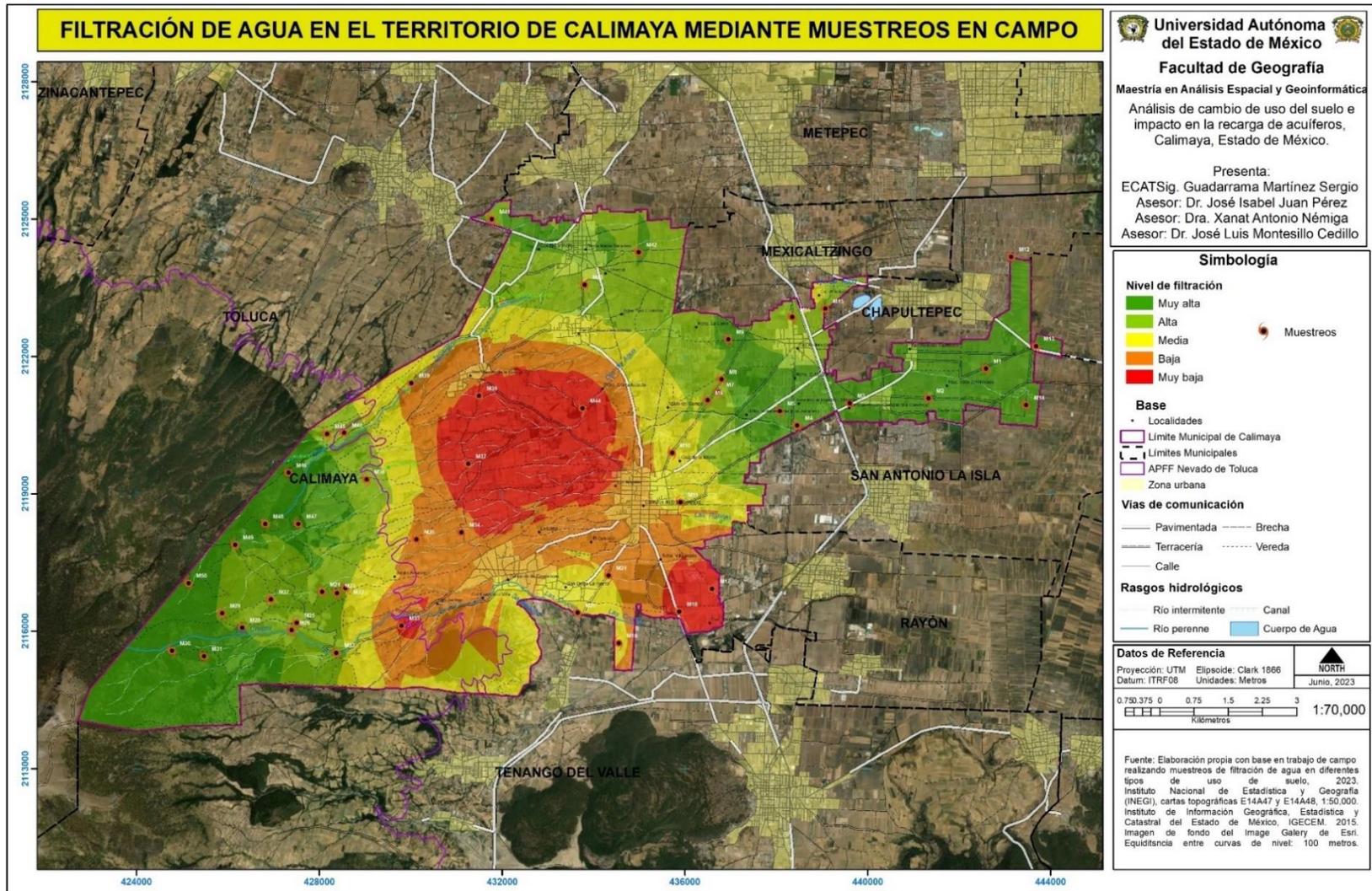


Figura 43: Mapa de filtración de agua mediante infiltrómetros en Calimaya. Fuente elaboración propia con base en el trabajo de campo.

13. DISCUSIÓN

Los resultados de la investigación revelan cambios significativos en el uso del suelo en el municipio de Calimaya, con una disminución notable en la superficie dedicada a usos forestales, agrícolas y de pastizales (naturales e inducidos), mientras que los usos urbanos y las zonas mineras han experimentado un aumento considerable. Estas observaciones se verificaron en campo, siendo muy notorias las áreas agrícolas en proceso de transformación para ser utilizadas como zonas urbanas.

Según el método propuesto por Prevert (1998) y Moll (2013) y que fue fundamental para el análisis de la pérdida de filtración, se ha observado un incremento en la escorrentía superficial en las zonas urbanas y mineras, lo cual fue identificado y determinado mediante el análisis cartográfico y con técnicas aplicadas directamente en los puntos de muestreo. Esto permitió comprobar la veracidad de los datos sobre la pérdida de agua en el territorio municipal.

Entre 1997 y 2022, las zonas urbanas y de extracción de materiales pétreos han experimentado un crecimiento del 300%. De acuerdo con González (2015), la población de Calimaya ha estado involucrada en actividades primarias, incluida la minería, desde la época de la Colonia, situación debida a los depósitos volcanoclásticos provenientes de la actividad eruptiva del Nevado de Toluca. Asimismo, Valencia *et al.* (2022) mencionan un desarrollo significativo de la actividad minera en 1995. En contraste, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), promulgada el 28 de enero de 1988, surgió como respuesta a la creciente preocupación social por detener el deterioro de los recursos naturales fundamentales para el bienestar y calidad de vida de los mexicanos, con el objetivo de proteger el entorno y asegurar un futuro sostenible para las generaciones futuras.

Sin embargo, y a pesar de los impactos ambientales generados por la minería previos a la promulgación de la LGEEPA, no se ha proporcionado una solución adecuada ni eficiente. Hasta la fecha, la falta de implementación y aplicación de esta ley y otras normativas mencionadas en el marco legal, la actividad minera en el municipio continúa generando diversos impactos ambientales, ya que no existe una regulación ni vigilancia efectiva de los procesos que en ella intervienen, así como de los efectos que provocan los vertederos a cielo abierto de residuos sólidos urbanos.

De acuerdo con el Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM), para el año 2020, en el municipio de Calimaya solo se registraron 8 minas autorizadas. Sin embargo, en el año 2022 y mediante los recorridos de trabajo de campo y análisis cartográfico se identificaron 55 zonas “polígonos” de extracción de materiales pétreos, algunos de ellos ya abandonados. Con esto se infiere que más de la mitad de las minas identificadas están operando sin autorización ni licencia “permiso por parte de dependencias municipales o estatales”, lo que lleva a concluir que no se está aplicando la legislación y normas en materia ambiental.

El análisis de los cambios de uso de suelo, obtenido con ortofotos e imágenes satelitales en conjunción con el método de Prevert (1998) y Moll (2013) para cada uno de los años analizados, sobreponiendo los datos de precipitación proporcionados por CONAGUA y con los registros obtenidos directamente en trabajo de campo se demuestran los procesos que están ocurriendo en el municipio, también indican el impacto que está ocasionando los cambios de uso de suelo, principalmente en la recarga de los acuíferos.

La investigación de este proceso, con este enfoque y con la aplicación de los métodos referidos es escasa en el contexto del Estado de México. Como consecuencia, fue necesario realizar una revisión y comparación con estudios previos realizados en otras regiones y países para complementar y enriquecer los resultados obtenidos en esta investigación, sin embargo, no fueron suficientes para establecer discusiones más precisas. Las investigaciones que se mencionan enseguida fueron esenciales para asociar los resultados obtenidos en esta investigación, esto en función de su similitud y del método utilizado.

De acuerdo con el artículo de investigación “*Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile*”, donde Henríquez *et al.*, (2006) evalúa y simula el cambio en el coeficiente de escorrentía superficial para la ciudad de Los Ángeles, Chile, menciona que el cambio de uso de suelo de áreas naturales o rurales a entornos urbanos tiene consecuencias significativas en los patrones hidrológicos, especialmente en lo que respecta a la escorrentía superficial. Durante fuertes precipitaciones, este fenómeno provoca desbordes, inundaciones, erosión y dispersión de contaminantes (Goudie, 1990; Weng, 2001 citados en Henríquez, *et al.*, 2006).

En la ciudad de Los Ángeles, ubicada en la VIII Región del Biobío en Chile, así como en otras ciudades de Chile Central está ocurriendo un rápido crecimiento horizontal de las áreas urbanas, lo cual, en asociación con fuertes precipitaciones invernales concentradas en pocos días, genera impactos ambientales significativos.

Los efectos de las precipitaciones extremas son diversos e incluyen inundaciones en las zonas topográficamente más bajas de la ciudad, destrucción de viviendas con estructuras precarias, colapso de la red de alcantarillado y de drenaje pluvial, así como la erosión de las márgenes de arroyos y canales (Goudie, 1990; Weng, 2001 citados en Henríquez, *et al.*, 2006). El aumento del escurrimiento es particularmente crítico durante las tormentas invernales, cuando la lluvia se concentra en pocas horas. Lo ocurrido en las ciudades de Chile es similar a lo que ocurre en el municipio de Calimaya, aunque su escala de estudio fue a nivel de cuenca y se centró en los impactos generados por cambio de uso de suelo, la evapotranspiración y la escorrentía superficial.

A medida que la urbanización progresa, se observan diversos impactos en el ciclo hidrológico (Kliber, 1982 citado en Henríquez, *et al.*, 2006). En las primeras etapas de urbanización, la remoción de árboles y vegetación natural disminuye la evapotranspiración y la capacidad de interceptación de las precipitaciones por parte de la vegetación, lo que conlleva a un aumento en la sedimentación en los cuerpos de agua debido a una mayor erosión del suelo. A medida que se construyen viviendas, calles y canales, los impactos incluyen la reducción de la infiltración, la disminución del nivel de los acuíferos, el aumento de los flujos de tormenta y la disminución del flujo base durante períodos de sequía. En una etapa posterior, cuando el desarrollo residencial y comercial está completo, el aumento de la impermeabilidad del suelo resulta en una disminución del tiempo de concentración de la escorrentía, lo que se traduce en un aumento abrupto en el pico de descarga poco después del inicio de la lluvia en la cuenca. Finalmente, cuando los sistemas de alcantarillado y drenaje están consolidados en la ciudad, se producen graves problemas de inundación aguas abajo (Kliber, 1982 citado en Henríquez, *et al.*, 2006). La situación que se presentó en las ciudades de Chile, es decir, los efectos que ocasiona el proceso de urbanización son semejantes a lo que ocurre en el municipio de Calimaya, aunque en este caso, existen algunas condiciones ambientales y socioculturales diferentes, esto en virtud de tratarse de una zona donde una de las actividades

más importantes que ha impactado al ciclo hidrológico es la extracción de recursos pétreos en asociación con los cambios de uso del suelo y otras actividades como la agricultura convencional.

Estudios realizados por Hough (1984) han revelado que la reducción de la cobertura arbórea y vegetal en áreas urbanas conlleva una disminución en la evapotranspiración del 40% al 25%, un aumento en la tasa de escorrentía del 10% al 30%, una disminución en el tiempo de retraso entre el inicio de las precipitaciones y la escorrentía, y una disminución en la infiltración subterránea del 50% al 32%. Estos hallazgos confirman que uno de los impactos ambientales más significativos del reemplazo de coberturas naturales por superficies impermeables es el aumento de la escorrentía superficial (Hough, 1984 citado en Henríquez, *et al.*, 2006). Los resultados obtenidos en el estudio realizado en el municipio de Calimaya son similares a los reportados por estos autores. Con la diferencia de que en este caso el espacio geográfico de estudio fue a escala municipal y no se establecieron asociaciones con la evapotranspiración.

El papel de las superficies impermeables es crucial para el funcionamiento de las cuencas urbanas (Dow y DeWalle, 2000 citado en Henríquez, *et al.* 2006). Según Goudie (1990 citado en Henríquez, *et al.* 2006), la cantidad de drenaje urbano que fluye a través de los sistemas de alcantarillado y desagüe pluvial aguas abajo de la ciudad puede ser mucho mayor que en áreas rurales debido a la impermeabilización del suelo y al aumento de la escorrentía en la ciudad. En el contexto del municipio de Calimaya, pero sobre todo en las áreas urbanas y en proceso de urbanización ha ocurrido esta situación, pues los datos de uso de suelo y de índice de escorrentía superficial ha incrementado notablemente.

El aumento de la escorrentía superficial también tiene un impacto significativo en la calidad del agua, especialmente durante tormentas intensas que sobrecargan los sistemas de alcantarillado y mezclan aguas pluviales con aguas residuales altamente contaminadas, lo que representa una seria amenaza para la calidad de los cuerpos de agua receptores (Rogers, 1994 citado en Henríquez, *et al.* 2006).

En resumen, el cambio de uso de suelo de rural a urbano tiene importantes efectos en los componentes hidrológicos y el ambiente. En la ciudad de Los Ángeles, Chile, el rápido

crecimiento urbano combinado con fuertes precipitaciones invernales ha causado impactos ambientales significativos, como inundaciones, erosión y destrucción de viviendas. A medida que la urbanización avanza, se observan cambios en el ciclo hidrológico, como la disminución de la evapotranspiración, la infiltración y el aumento de la escorrentía superficial. La impermeabilización del suelo en áreas urbanas conduce a un mayor escurrimiento y afecta la calidad del agua, especialmente cuando los sistemas de alcantarillado colapsan y se mezclan las aguas residuales y con las de lluvia. El control de las superficies impermeables y la gestión adecuada del drenaje urbano son cruciales para mitigar estos impactos negativos en las cuencas urbanas.

En el artículo “*Modelación espacial de la producción de agua y escurrimiento superficial del agua de lluvia en la zona sur del estado de Puebla, México*” de Díaz *et al.*, (2012), y que consistió en el desarrollo de una propuesta metodológica para delimitar e identificar las microcuencas que reúnen condiciones favorables para implementar obras en beneficio de la recarga de acuíferos en el sur de la Mixteca y Sierra Negra de Puebla; donde también aplican el método de Prevert (1998) y le sobreponen la capa (información) de precipitación histórica de la zona de estudio. Los autores indican que este método puede emplearse en cualquier zona y a cualquier escala de estudio para conocer y definir en tiempo y espacio algunas de las variables fundamentales del ciclo hidrológico, así como para la planeación del manejo integral del agua de lluvia en el nivel de microcuenca. Para el caso de estudio realizado en Calimaya, se utilizó como escala de análisis al municipio, en el cual también hay subcuencas y microcuencas, sin embargo, éstas no fueron consideradas.

Díaz *et al.*, (2012) señalan que el método utilizado servirá de base para estudios relacionados con la recarga de acuíferos, la definición de zonas prioritarias de conservación y el establecimiento de infraestructura hidráulica necesaria para la captación y conducción del agua de lluvia, así como evaluación de la vulnerabilidad o riesgo a fenómenos climatológicos adversos que pudieran presentarse en dos zonas de producción y conducción de agua en el estado de Puebla: la Sierra Negra y la Sierra Mixteca. En el municipio de Calimaya se espera que, con esta investigación, donde se han identificado causas y consecuencias del cambio de uso de suelo y su impacto en la escorrentía superficial, además de las zonas donde se presentan con mayor y menor intensidad, se realicen actividades de conservación y demás

acciones que ayuden a la mitigación de estos impactos, situación vinculada con lo investigado por Díaz *et al.*, (2012).

Por su parte, Treviño *et al.*, (2005), en su artículo de investigación denominado “*Evaluación de la producción de agua usando modelos de análisis geográfico*”, donde calculan el volumen de los escurrimientos superficiales de las cuencas hidrológicas de la parte central de Nuevo León y el centro de Tamaulipas, utilizando para ello, los sistemas de información geográfica, donde se procesó y analizó información referente a la precipitación, distribución de la vegetación, tipos de suelo y pendientes. Los autores concluyeron que en 6,194 km² estudiados, la precipitación oscila entre los 300 y 1,030 mm al año, y el volumen medio escurrido varía entre los 360 y los 536 millones de metros cúbicos anuales por cuenca. Utilizando las mismas variables que Treviño *et al.*, en el año 2022, en el municipio de Calimaya (teniendo una superficie de 104.25 Km²) se perdieron aproximadamente 402 millones de metros cúbicos de agua mediante escorrentía superficial. Al establecer comparaciones entre los resultados de estas dos investigaciones es notorio que a pesar de ser menor la superficie del municipio de Calimaya, la escorrentía es mayor.

El análisis realizado en Nuevo León y Tamaulipas muestra que el volumen calculado se incrementa al aumentar las superficies desprovistas de vegetación sobre suelos de alta permeabilidad en pendientes fuertes; y la cuenca que más aportó agua fue por tener un buen estado de conservación de la vegetación densa. Esto es similar a lo que ocurre en Calimaya, donde hay una mayor filtración de agua en el área de bosques y pastizales naturales y conservados, y una mayor escorrentía superficial en zonas desprovistas de vegetación, ya sea por urbanización o por actividades de extracción de materiales pétreos.

Treviño *et al.*, (2005) concluyen que los modelos espaciales muestran un panorama general para el análisis de los recursos naturales, y el uso de los criterios empleados para calcular parámetros hidrológicos a nivel local aplicados en un ambiente geográfico permite presentar cada uno de ellos por separado, mostrando su distribución y valores estimados, situación semejante a la investigación realizada en Calimaya, donde el análisis espacial ha ayudado a identificar las zonas donde se están presentando impactos, los cambios que se han tenido respecto al uso de suelo y la escorrentía superficial, y tener un valor estimado.

14. CONCLUSIONES

La utilización del método de escorrentía superficial de Prevert y las diversas teorías geográficas utilizadas en el marco teórico de esta investigación, ha brindado una visión integral y holística de los procesos que ocurren en el municipio de Calimaya. Desde la perspectiva de la Geografía cuantitativa los datos obtenidos han sido analizados y procesados de manera objetiva y cuantificable, permitiendo una evaluación precisa y rigurosa de los fenómenos geográficos involucrados.

La aplicación de la Geografía automatizada en asociación con los métodos y técnicas contribuyó al análisis más eficiente de los datos geoespaciales y su visualización, lo que facilitó la identificación de patrones y relaciones complejas que intervienen en la escorrentía superficial, desde luego, en vinculación con múltiples factores geográficos.

La aplicación de los fundamentos de la Geografía del paisaje enriqueció la comprensión de las relaciones entre la dinámica de los componentes del paisaje y la escorrentía superficial, destacando la importancia de las características naturales y antrópicas que influyen de manera directa e indirecta en la redistribución del agua.

Los fundamentos de geografía ambiental permitieron entender cómo la escorrentía superficial puede afectar a los componentes del medio ambiente, identificando áreas vulnerables a la erosión, la contaminación y los impactos ambientales, así mismo, comprender las relaciones entre los procesos de cambio de uso del suelo con las actividades de los habitantes del municipio de Calimaya.

Por último, la aplicación de la teoría y el método de la ecología cultural fue importante, toda vez que aportó conocimientos sobre cómo las actividades humanas y las prácticas culturales pueden influir en la escorrentía superficial y en la gestión del agua, destacando la importancia de la sostenibilidad y la participación comunitaria en la preservación de los recursos hídricos. Con los fundamentos de la ecología cultural fue posible estudiar la relación entre el ambiente, la sociedad y la cultura, sobre todo lo relacionado con las actividades tradicionales, como es la agricultura.

En el contexto de la investigación en Calimaya, la teoría de la Complejidad fue relevante para comprender de manera más holística la dinámica de la escorrentía superficial y cómo el cambio de uso de suelo influye en este proceso; al considerar los cambios en la zona de estudio es fundamental entender cómo las modificaciones en el paisaje pueden afectar la escorrentía superficial y los patrones hidrológicos. La teoría de la complejidad permitió abordar estas interacciones de manera integral, teniendo en cuenta no sólo los aspectos físicos y cuantitativos, sino también los factores culturales, ambientales y sociales involucrados. En virtud de que no existen estudios que hayan explorado explícitamente la relación entre la teoría de la complejidad, el método de escorrentía superficial de Prevert y el cambio de uso de suelo en Calimaya, esta situación representa una oportunidad para futuras investigaciones. Un enfoque interdisciplinario que incorpore la teoría de la complejidad en el análisis de la escorrentía superficial podría enriquecer la comprensión de los procesos hidrológicos en el espacio geográfico de estudio y brindar recomendaciones efectivas para una gestión sostenible del agua y del territorio.

Los métodos de Prevert y Moll permitieron analizar y comprender el flujo de agua y los procesos hidrológicos en el municipio de estudio, lo que es esencial para entender su comportamiento ante eventos de precipitación y su relación con la topografía y la cobertura del suelo. Estos hallazgos pueden ser utilizados como base para tomar decisiones informadas y sostenibles en el manejo del agua y la protección del ambiente. Además, el enfoque multidisciplinario utilizado puede servir como un modelo para futuras investigaciones de análisis espacial que aborden problemáticas complejas y cruciales para el desarrollo sostenible de otras zonas geográficas. Al realizar la comparación con otros estudios se identificó que los datos obtenidos aportan confiabilidad al dar información de lo que está ocurriendo en la realidad en diferentes escalas temporales y cómo es que ha ido evolucionando la pérdida de filtración hacia los acuíferos.

El trabajo de campo donde se realizó un registro de tiempo de filtración en diferentes tipos de uso de suelo proporcionó información esencial sobre la capacidad de retención y absorción del agua en cada punto de muestreo. Esto permitió identificar qué usos de suelo son más permeables y cuáles presentan mayores dificultades para que el agua se infiltre en el suelo, lo que puede influir directamente en la generación de escorrentía y potenciales problemas de

inundación o erosión. Los recorridos en campo permitieron identificar los procesos de cambio de uso de suelo y los impactos ambientales, brindando un panorama más amplio de la dinámica territorial y las transformaciones ocurridas en el municipio. Esto es fundamental para comprender cómo las acciones humanas afectan la hidrología y el ambiente, destacando la importancia de una planificación urbana y rural sostenible. El trabajo de campo fue esencial en la investigación, pues permitió verificar algunos datos obtenidos en trabajo de gabinete. La interacción con las personas locales fue importante, ya que permitió comprender su perspectiva sobre los impactos generados en el territorio, de la misma manera, las tomas fotográficas muestran la realidad.

En conjunto, los resultados de la investigación ofrecen información relevante para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y la conservación del ambiente en Calimaya. La integración de los datos obtenidos del método de escorrentía superficial de Prevert y los trabajos de campo proporciona una base sólida para el diseño de estrategias de manejo del agua y el territorio que sean más respetuosas con el entorno natural y que minimicen los riesgos de inundaciones y otros impactos ambientales negativos. Los resultados pueden ser referentes para futuros estudios en distintas escalas con problemáticas similares, enfatizando la importancia de considerar tanto los aspectos hidrológicos como los procesos de cambio de uso de suelo para lograr una visión más completa y efectiva en la planificación territorial y la conservación del medio ambiente.

La información de escorrentía y uso de suelo que se ha obtenido muestra que la urbanización y la expansión agrícola pueden tener un impacto significativo en la escorrentía, lo que puede afectar la recarga de los acuíferos. La eliminación de la vegetación y la compactación del suelo reducen la capacidad de infiltración del agua, aumentando la escorrentía y disminuyendo la recarga de los acuíferos subterráneos. Además, la construcción de infraestructura urbana, como carreteras, aceras y edificios, puede incrementar la escorrentía, ya que el agua no se infiltra y fluye hacia los sistemas de drenaje.

La escorrentía no sólo puede reducir la recarga de los acuíferos, sino también incrementar la erosión del suelo y la contaminación del agua. Las prácticas de manejo de suelos, como la conservación de la vegetación, la construcción de barreras de infiltración y la implementación

de técnicas de agricultura de conservación, pueden ayudar a mitigar estos efectos negativos. La agricultura de conservación, por ejemplo, implica la reducción del laboreo del suelo y la siembra de cultivos de cobertura para proteger el suelo e incrementar la capacidad de infiltración del agua.

La recarga de los acuíferos es esencial para el suministro de agua potable. La escorrentía puede transportar sedimentos, nutrientes y productos químicos al agua subterránea, lo que puede afectar su calidad y la salud humana. Además, la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos, combinada con una disminución en la recarga por efectos de la escorrentía, puede conducir a una disminución del nivel del agua subterránea y la salinización.

Es necesario un enfoque integral para abordar la escorrentía y la recarga de los acuíferos. Esto implica la implementación de prácticas de manejo del suelo para reducir la escorrentía y aumentar la infiltración, la construcción de infraestructura de drenaje y almacenamiento de agua, y la protección y restauración de los ecosistemas acuáticos. Además, la educación y concientización sobre la importancia de la recarga de los acuíferos y la gestión sostenible del agua también son fundamentales.

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que es urgente la adopción de prácticas de manejo del suelo y de conservación para reducir la escorrentía y aumentar la infiltración. Esto es esencial para garantizar la recarga de los acuíferos y el suministro sostenible de agua. La gestión adecuada del agua es esencial para preservar los recursos hídricos y proteger la salud humana y el ambiente. Por lo tanto, se deben implementar medidas efectivas para promover una gestión sostenible del agua y asegurar la disponibilidad de agua limpia y segura para las generaciones futuras.

15. RECOMENDACIONES

Recomendaciones para futuros investigadores:

- a) Integrar enfoques interdisciplinarios: considerar la interacción de diferentes teorías geográficas y métodos para obtener una comprensión más holística de los fenómenos hidrológicos, sociales y ambientales. La incorporación de la teoría de la complejidad podría enriquecer más la investigación en futuros estudios.
- b) Ampliar la muestra y el alcance: para obtener resultados más representativos, amplía el número de puntos de muestreo y extiende el alcance geográfico de la investigación a diferentes áreas dentro y fuera de Calimaya, lo que permitirá comparar y generalizar hallazgos.
- c) Involucrar a la comunidad local: fomentar la colaboración con la población local, ya que su conocimiento tradicional y experiencia son invaluable para entender los cambios en el uso de suelo y los impactos ambientales. Esto también puede mejorar la aceptación de las recomendaciones resultantes.

Recomendaciones para tomadores de decisiones:

- a) Implementar medidas de manejo del agua y uso de suelo: basándose en los hallazgos de esta investigación, aplicar y promover políticas y acciones que fomenten un manejo sostenible del agua y una planificación territorial adecuada. Esto incluye la protección de áreas con alta retención de agua y el fomento de prácticas agrícolas y urbanas respetuosas con el ambiente.
- b) Promover la participación comunitaria: involucrar a la población local en el diseño e implementación de políticas y programas relacionados con el uso de suelo y recursos hídricos. La participación activa de la comunidad puede garantizar una toma de decisiones más informada y considerar las necesidades y preocupaciones locales.
- c) Monitoreo continuo: establecer sistemas de monitoreo y supervisión para evaluar periódicamente el estado de la escorrentía superficial y los cambios en el uso de suelo.

Esto permitirá realizar ajustes y adaptaciones a las estrategias de gestión de acuerdo con las condiciones cambiantes del entorno.

Recomendaciones para la población en general:

- a) Conciencia ambiental: fomentar la sensibilización sobre la importancia de la conservación de recursos hídricos y del ambiente en general. La adopción de prácticas más sostenibles en el hogar y la comunidad puede tener un impacto positivo en la mitigación de problemas hidrológicos y ambientales.
- b) Participación activa: involucrarse en actividades y programas de conservación y restauración del ambiente local. La colaboración y el apoyo de la población son fundamentales para el éxito de iniciativas encaminadas a proteger el entorno natural.
- c) Información y educación: proporcionar a la población información accesible y educación ambiental sobre la importancia de la gestión sostenible del agua y el territorio. Una población informada es más propensa a tomar decisiones responsables y a promover cambios positivos en su entorno.

Recomendaciones sobre la importancia del trabajo de campo:

- a) Realizar muestreos en diferentes épocas del año: la variabilidad estacional puede influir en los procesos hidrológicos y el uso de suelo. Realizar muestreos en diferentes momentos del año permitirá obtener una imagen más completa de los patrones y tendencias.
- b) Integrar observaciones cualitativas: además de los datos cuantitativos, incorporar observaciones cualitativas durante el trabajo de campo proporciona información rica y contextual sobre la interacción entre la comunidad local y el entorno, lo que puede enriquecer la interpretación de los resultados.
- c) Validar datos satelitales y modelos: el trabajo de campo proporciona datos y observaciones "in situ" que pueden usarse para validar información obtenida a través

de imágenes satelitales y modelos. Esto es esencial para asegurar la precisión de los resultados y su confiabilidad.

Recomendaciones sobre técnicas y otras formas de agricultura sustentable:

a) Fomentar prácticas de agricultura de conservación, como el uso de cobertura vegetal, rotación de cultivos y labranza mínima, para reducir la erosión y mejorar la infiltración del agua en el suelo.

b) Integrar la agroforestería en los sistemas agrícolas, incorporando árboles y cultivos intercalados para mejorar la retención de agua, la biodiversidad y la resiliencia del agroecosistema.

c) Promover el uso de técnicas de riego eficiente, como el riego por goteo o la captación y almacenamiento de agua de lluvia, para optimizar el uso del recurso hídrico y reducir la dependencia de fuentes externas.

d) Impulsar la transición hacia prácticas de agricultura orgánica, evitando el uso de químicos sintéticos y promoviendo la fertilidad del suelo mediante prácticas como la de compostaje y la rotación de cultivos.

e) Fomentar el cultivo de especies nativas y adaptadas a las condiciones locales, lo que puede reducir la necesidad de recursos externos y aumentar la resiliencia del sistema agrícola frente a cambios climáticos.

f) Explorar la aplicación de principios de permacultura en el diseño de sistemas agrícolas, buscando la armonización entre el ser humano, la naturaleza y la producción de alimentos de manera sostenible.

g) Capacitar a los agricultores en técnicas y prácticas de agricultura sustentable, promoviendo la adopción de enfoques respetuosos con el medio ambiente y brindando acceso a información actualizada y prácticas innovadoras.

Recomendaciones sobre el cambio de uso de suelo (procesos, causas e impactos):

- a) Establecer sistemas de monitoreo periódico del cambio de uso de suelo para identificar tendencias y patrones. Esto permitirá comprender las causas subyacentes y tomar medidas preventivas o correctivas a tiempo.
- b) Realizar estudios que analicen las presiones del cambio de uso de suelo, como la expansión urbana, la deforestación o la expansión agrícola. Comprender las fuerzas impulsoras permitirá diseñar estrategias efectivas de gestión del territorio.
- c) Promover una planificación territorial integrada que considere las necesidades de desarrollo, la conservación del medio ambiente y la sostenibilidad. Esto implicará la participación de actores clave, incluyendo gobiernos locales y comunidades, para garantizar una toma de decisiones equitativa y bien informada.
- d) Realizar evaluaciones de impacto ambiental antes de llevar a cabo cambios significativos en el uso de suelo. Estas evaluaciones ayudarán a identificar posibles consecuencias negativas y permitirán implementar medidas de mitigación adecuadas.
- e) Priorizar la restauración de áreas degradadas debido al cambio de uso de suelo, especialmente aquellas que tienen un alto valor ecológico o que son importantes para la conservación de especies nativas y hábitats.
- f) Promover programas de educación y conciencia pública sobre los impactos negativos del cambio de uso de suelo y la importancia de conservar los ecosistemas naturales. Una población informada y consciente es más propensa a apoyar prácticas de desarrollo sostenible.
- g) Implementar políticas y regulaciones que guíen el cambio de uso de suelo de manera responsable y sostenible. El ordenamiento territorial adecuado puede evitar la expansión descontrolada y la degradación del entorno natural.

h) Fortalecer la protección de áreas naturales protegidas, evitando el cambio de uso de suelo en estas zonas para mantener la biodiversidad y los servicios ambientales que brindan.

Estas recomendaciones buscan promover una gestión más responsable del cambio de uso de suelo y sus impactos, con enfoque en la conservación del ambiente, la sostenibilidad y la participación activa de la sociedad para lograr un desarrollo equitativo y respetuoso con el entorno natural. Pretenden fomentar prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes, que sean capaces de enfrentar los desafíos ambientales y sociales actuales, y que a la vez contribuyan a la conservación del entorno natural y la seguridad alimentaria a largo plazo. Promover una gestión más sostenible de los recursos hídricos y del territorio en Calimaya, con la participación activa de la comunidad y la implementación de políticas informadas por la investigación científica.

La implementación de prácticas de manejo del suelo adecuadas y sostenibles en las zonas agrícolas y de pastizales es necesaria para reducir la escorrentía y mejorar la recarga de los acuíferos en el Valle de Toluca. Se pueden utilizar técnicas como la rotación de cultivos, la siembra directa y la incorporación de cubiertas vegetales para evitar la erosión del suelo y mejorar la infiltración del agua.

Es importante promover la conservación y restauración de bosques y áreas verdes, ya que estos desempeñan un papel fundamental en la reducción de la escorrentía y la recarga de los acuíferos. La conservación de las áreas forestales existentes y la plantación de nuevas áreas verdes puede ayudar a mejorar la calidad y cantidad del agua subterránea.

En las zonas urbanas se debe implementar técnicas de manejo del agua de lluvia, como la construcción de techos verdes y sistemas de recolección y tratamiento de agua de lluvia para su uso en actividades no potables. Esto ayudará a reducir la escorrentía en las zonas urbanas y a aumentar la recarga de los acuíferos.

Se deben establecer áreas de conservación de suelos y bosques en las zonas de pendientes pronunciadas para prevenir la erosión y la degradación del suelo. La implementación de

prácticas de conservación del suelo y la promoción de la reforestación en estas áreas puede mejorar la calidad del agua y la recarga de los acuíferos.

Se debe establecer un monitoreo constante de los niveles de escorrentía en el Valle de Toluca para determinar la efectividad de las prácticas de manejo del suelo y el impacto del cambio de uso del suelo en la recarga de los acuíferos. Esto permitirá ajustar y mejorar las estrategias de gestión de agua y suelo en la región.

Es necesario fomentar el uso de tecnologías de conservación de agua en la agricultura, como el riego por goteo y la agricultura de precisión, para reducir el consumo de agua y mejorar la eficiencia del uso del recurso. Esto puede ayudar a reducir la demanda de agua y mejorar la recarga de los acuíferos.

La promoción de la educación ambiental y la concientización sobre la importancia de la conservación de los recursos hídricos puede contribuir a la reducción de la escorrentía y la mejora de la recarga de los acuíferos. La educación puede ser dirigida a agricultores, urbanistas, empresarios y comunidades locales para promover prácticas sostenibles y responsables.

Se debe fomentar la colaboración entre los distintos actores involucrados en la gestión del agua y el suelo en el Valle de Toluca, incluyendo a los gobiernos locales, productores, organizaciones civiles y la comunidad en general. La colaboración puede permitir una gestión más integrada de los recursos y una mejor implementación de las estrategias de gestión del agua y el suelo.

Implementar programas de educación y conciencia ambiental: Es importante que se implementen programas educativos y de conciencia ambiental dirigidos a la población para promover la importancia de la conservación de los recursos naturales y los efectos negativos del cambio de uso de suelo en la recarga de los acuíferos.

Realizar monitoreo constante del agua subterránea: es necesario realizar un monitoreo constante del agua subterránea en el Valle de Toluca, con el fin de detectar y controlar cualquier contaminación y pérdida de calidad de agua, para garantizar la disponibilidad del recurso a largo plazo.

Promover el uso de tecnologías limpias en las industrias: las industrias deben ser incentivadas a implementar tecnologías limpias que reduzcan su impacto ambiental y su consumo de agua, contribuyendo así a la preservación del recurso.

Fortalecer la regulación y vigilancia de las actividades extractivas: es importante fortalecer la regulación y vigilancia de las actividades extractivas, como las mineras, para evitar la contaminación del agua subterránea y la afectación de la recarga de acuíferos.

Fomentar la reforestación y restauración ecológica: se debe fomentar la reforestación y restauración ecológica de áreas que hayan sido deforestadas, ya que esto contribuye a la protección de la biodiversidad y la conservación de los recursos hídricos.

Promover la conservación de áreas naturales protegidas: Es importante promover la conservación de las áreas naturales protegidas que se encuentran en el Valle de Toluca, ya que estas áreas son importantes para la regulación de los ciclos hidrológicos y la recarga de acuíferos.

Fomentar la participación ciudadana: Es fundamental fomentar la participación ciudadana en la toma de decisiones relacionadas con el manejo y conservación de los recursos hídricos en el Valle de Toluca, promoviendo la colaboración entre autoridades, comunidades y organizaciones civiles en la gestión del agua y su protección.

16. BIBLIOGRAFÍA

Acevedo Linares, Antonio (2013). El pensamiento complejo en Edgar Morin. Las 2 Orillas, blog. [fecha de Consulta 17 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.las2orillas.co/el-pensamiento-complejo-en-edgar-morin/#:~:text=Mor%C3%ADn%20define%20la%20complejidad%20como,estrategias%20para%20lograr%20la%20inteligibilidad.>

Aeroterra, ¿Qué es SIG? Sistemas de Información Geográfica. Disponible en: <https://www.aeroterra.com/es-ar/que-es-gis/introduccion>

Anglés H., Marisol, Rovalo O., Montserrat, Tejado G., Mariana. 2021. Manual del Derecho Mexicano. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Jurídicas. México. Serie Doctrina Jurídica, Núm. 915.

Atlas de riesgo de Calimaya, (2012). Calimaya. Autor.

Bertalanffy, L. V., (1976). Teoría general de sistemas. Fondo de cultura económica, México. Publicado por George Braziller, New York.

Bocco, G., Mendoza M., y Masera O., (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Boletín, núm, 44, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Bocco, Gerardo, & Urquijo, Pedro S. (2013). Geografía ambiental: reflexiones teóricas y práctica institucional. Región y Sociedad, XXV (56),75-101.[fecha de Consulta 17 de Enero de 2022]. ISSN: 1870-3925. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10225596001>

Bodek, H. & Schmithüsen, J. (1949). Die Landschaft im logischen System der Geographie. Erdkunde, Bd. 3, 112-120.

Bonfil, P. (1996). Las familias rurales ante las transformaciones socioeconómicas recientes. Estudios Agrarios. Revista de la Procuraduría Agraria.

Buzai, G.D. (2005). Geografía Automatizada, Ciencias de la Información Geográfica y Ciencias Sociales Integradas Espacialmente. Avances cuantitativos para los estudios territoriales del siglo XXI. Fronteras. (Buenos Aires). Año 4, N° 4.

Buzai, G.D. y E. Ruiz (2012). Geotecnósfera. Tecnologías de la Información Geográfica en el contexto global del sistema mundo. Anekumene.

Buzai, G., Cacace, G., & Lanzelotti, S. (2015). Teoría y métodos de la geografía cuantitativa (Primera ed.). Buenos Aires: INIGEO. Recuperado el 30 de octubre de 2021.

Camacho-Sanabria, José Manuel, Juan Pérez, José Isabel, Pineda Jaimes, Noel Bonfilio, Cadena Vargas, Edel Gilberto, Bravo Peña, Luis Carlos, & Sánchez López, Marcela. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. Madera y bosques, 21(1), 93-112. Recuperado en 14 de enero de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000100008&lng=es&tlng=es.

Camacho-Sanabria, Raúl, Camacho-Sanabria, José Manuel, Balderas-Plata, Miguel Ángel, & Sánchez-López, Marcela. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. Madera y bosques, 23(3), 39-60. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331516>

Cárdenas R., María Luisa; Rivera R., José Francisco, (2004). La teoría de la complejidad y su influencia en la escuela. Revista de Teoría y Didáctica de las Ciencias Sociales, núm. 9. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Cruz-Falcón, A, Vázquez-González, R, Ramírez-Hernández, J, Nava-Sánchez, EH, Troyo-Diéguez, E, Rivera-Rosas, J, & Vega-Mayagoitia, JE. (2011). Precipitación y recarga en la cuenca de La Paz, BCS, México. Universidad y ciencia, 27(3), 251-263. Recuperado en 14 de enero de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792011000300002&lng=es&tlng=es.

Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Guajardo Panes, R. A., Barbosa-Moreno, F., Gómez Cárdenas, M., & Uribe Bernal, J. M. (2012). Modelación espacial de la producción de agua

y escurrimiento superficial del agua de lluvia en la zona sur del estado de Puebla, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, III, 69-85.

Dow, C., Dewalle, D., (2000). Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in eastern United States. *Water Resources Research*. N° 36, Vol.7, p. 1835-1844.

Eduardo Alberto Valencia García, José Isabel Juan Pérez y Roy Estrada Olivella (2016): "Recuperación ambiental y bienestar social en México: el caso de Calimaya, estado de México", *Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, n. 25 (febrero 2016). En línea: <http://www.eumed.net/rev/delos/25/calimaya.html>

EHRlich, P. *Population, Resources, Environment*. San Francisco, Freeman, 1970. *The population Bomb*. London, Pan, 1971.

Enríquez-Enríquez, David, Dame-González, Miguel, Mercado-Reyes, Marisa y Blancas-Mosqueda, Marisol. (2016). Diversidad y valor de importancia como herramientas para fundamentar un cambio de uso del suelo en Zacatecas, México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*. Marzo 2016 Vol.2 No.3 18-27. Unidad Académica de Agronomía. Universidad Autónoma de Zacatecas.

Food and Agriculture Organization of the United States (FAO), (2015). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015*. Rome, Italy.

Fernández-Coppel, I. (2011), *Clasificación de Cubiertas con IDRISI*. Consultado en: <https://www.buenastareas.com/ensayos/Forestal-y-Ambiente/1513060.html>

Fernández, D., & Corbelle, E., (2017). Cambios en los usos de suelo en la Península Ibérica: un meta-análisis para el período 1985-2015. *Revista bibliográfica de Geografía y Ciencias sociales*, Universidad de Barcelona, España.

Fernández, M., & Prados, M., (2010). Cambios en las coberturas y usos del suelo en la cuenca del río Guadalfeo (1975-1999). *GeoFocus*. Disponible en www.geofocus.org/articulo7_2010. Consultado el domingo 21 de agosto de 2011.

Fuenzalida, M., Buzai, G., Moreno, A., y García de León, A., (2015). Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones. 1ra ed., Santiago de Chile: Editorial Triángulo.

García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Offset Larios S.A. México D.F. p.46-52.

García, G. (2015). Cambio de uso del suelo y grado de cobertura arbolada en el Ejido Agua Bendita, Municipio de Amanalco, Estado de México: 1989–2012. Tesis de Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática. Toluca, México: Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

García, M., Carreño, F., Mejía, A., (2017). Evolución de los conjuntos urbanos y su influencia en el crecimiento poblacional y el desarrollo de los espacios periurbanos en Calimaya, Estado de México, de 1990 a 2015. Universidad Autónoma del Estado de México, México.

González Becerril, Lidia Alejandra. (2015). Vulnerabilidad física en zonas habitacionales a procesos de remoción en masa asociados a la actividad minera de materiales pétreos, en el municipio de Calimaya, Estado de México. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/82724>

Goudie, A., (1990). The human impact on the natural environment. Oxford: Basil Blackwell.

Harvey, David, 2012, El enigma del capital y las crisis del capitalismo, Akal, Madrid.

Hayles, K., (1998). La evolución del caos. El orden dentro del desorden en las ciencias contemporáneas. Barcelona. Gedisa.

Henríquez, C., Azócar, G., Aguayo, M., (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. Revista de geografía Norte Grande. N° 36.

Hernández, A., Rojas, R., & Sánchez, F., (2013). Cambios en el uso del suelo asociados a la expansión urbana y la planeación en el corregimiento de Pasquilla, zona rural de Bogotá (Colombia). Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía. Bogotá, Colombia.

Historia de Calimaya, Ayuntamiento de Calimaya. Disponible en: <https://calimaya.gob.mx/tu-municipio/historia>

Homem de Abreu Loureiro, Guilherme Amorim, Espinosa Rodríguez, Luis Miguel, Juan Pérez, J. Isabel, Balderas Plata, Miguel Ángel, (2021). Risco de contaminação do solo e da água por substâncias ativas de pesticidas associadas aos cultivos agrícolas de Calimaya, México Central. Revista de Ciências Agroambientais. Brasil.

Hough, M., (1984). City Form and Natural Processes. London: Croom Helm Publishers.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H. y Gisbert Blanquer, J. M. (2007): “Métodos para la determinación del coeficiente de esorrentía”. Universitat Politècnica de València. 7 p. URL: < <http://riunet.upv.es> >

INAFED. (2022) Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Disponible en línea.

Instituto Nacional de Antropología e Historia (consultado el 2022), Ecología Cultural Capítulo 7, 27 de noviembre de 2022. consultado en: <https://www.enah.edu.mx/publicaciones/documentos/120.pdf>

Juan, J. I. (2013). Análisis del cambio de uso de suelo en una Región del Altiplano Mexicano, Retos e Impactos: 1986-2011. Toluca, México: Observatorio iberoamericano del Desarrollo Local y la Economía social, Vol. 7, No.13.

Juan Pérez, J., (2021). Estudio de los procesos de cambio de uso del suelo en México. Fundamentos teóricos y metodológicos. CONACYT Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas. México.

Juan Pérez, J., Magallanes, M., Juárez, R., Ramírez, A., Gutiérrez, G., Pozas, J., García, I., Baró, J., López, A., Vilchis, A., Olvera, J., (2015). Responsabilidad e impacto ambiental en

un territorio del Altiplano Mexicano. Análisis ambiental, sociodemográfico y económico. Eumed.net enciclopedia virtual. México.

Kliber, D., (1982) Urban stormwater hydrology. Washington, DC: American Geophysical Union.

Lambin, E. (1997), Modelling deforestation processes: a review tropical ecosystem environment observations by satellites, European Commission Joint Research Centre-Institute for Remote Sensing Applications- European Space Agency, Luxembourg, TREE Series B., Research Report No. 1.

Larry W. (2011). Water resources engineering. Wiley.

Ley de Aguas Nacionales. Última Reforma DOF 11-05-2022. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

Ley Federal de Responsabilidad Ambiental, Última Reforma DOF 20-05-2021. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

Ley General de Cambio Climático, Última Reforma DOF 11-05-2022. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, Última Reforma DOF 28-04-2022. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

Ley General de Vida Silvestre. Última Reforma DOF 20-05-2021. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Última Reforma DOF 18-01-2021. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

Ley Minera. Última Reforma DOF 20-04-2022. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

López, V., Balderas, M., Chávez, M., Juan, J., Gutiérrez, J., (2014). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. Universidad Autónoma del Estado de México, México.

López-Álvarez, Briseida, Ramos-Leal, José Alfredo, Moran-Ramírez, Janete, Cardona Benavides, Antonio, & Hernández Garcia, Guillermo. (2013). Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 65(1), 9-26. Recuperado en 14 de enero de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222013000100003&lng=es&tlng=es.

Morin, Edgar (2003), Introducción al pensamiento complejo, Barcelona, Gedisa

Orozco, H. E., V. Peña, Franco R., & Pineda, N., (2004), “Atlas Agrario Ejidal del Estado de México”, Cuadernos de Investigación, núm, 34, UAEM, Toluca, México.

Ortiz, Febe & Reyes, Guillermo & Quentin, Emmanuelle & Diaz, Vitali. (2010). Estimación de la recarga en el acuífero del Valle de Toluca y su distribución espacial. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería

Paffen, K.H. (1953). Ökologische Landschaftsgliederung. Erdkunde. Bd. 2. Ders: Die natürlichen landschaften und ihre räumliche Gliederung. Forsch. Z. Dt. Landesk. Bd., 68. Remagen 1953.

Pineda, O. (2011). Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago. Tesis que para obtener el grado de Maestra en Geomática. Centro de investigación en geografía y geomática Ing. Jorge I. Tamayo, A.C. CentroGeo.

Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU), 2019. Calimaya: autor.

Rogers, P., (1994). Hydrology and water quality. En: MEYER, W. & II, B. Change in land use and land cover: A globalperspective. New York: Cambridge University Press. p. 231-257.

Sauer, C. (1925). The morphology of landscape. Univ. Calif. Publ. in Geography, Vol. 2, pp., 19-53.

Secretaría del Medio Ambiente de Gobierno del Estado de México, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, (2008). Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México. Autor.

Segrelles, J., (2013). Conceptos, definiciones y contenidos de la Geografía Económica. Evolución epistemológica de la geografía económica. Fuentes para el estudio de la geografía económica. Departamento de Geografía Humana, Universidad de Alicante, España.

SEMARNAT, 2016. Ordenamientos Ecológicos Expedidos, México. SEMARNAT.

Steward, J. (1955). The concept and method of Cultural ecology. En J. Steward, Evolution and ecology. EE.UU.: University Illinois Pres.

Stora, N. (1994). Cultural Ecology and the Interaction between man and the environmental. En A. Nissinako (ed.) Cultural Ecology. One Theory? (pp. 11- 23). New York: University of Turku.

Talledos S., Edgar, 2014, La geografía: un saber político. Espiral, Estudios sobre Estado y Sociedad. Vol. XXI No. 61. Instituto de Turismo de la Universidad del Mar, Huatulco, Oaxaca.

Tesis P./J. 38, Semanario Judicial de la Federación y su Gaceta, Décima Época, libro I, octubre de 2011, p. 288.

The Professional Geographer. 1983. Vol. 35. (Artículos de R.G.Cromley, J.E.Dobson, A.Kellerman, D.Marble, H.Moellering, D.Peuquet, T.Poike y F.Stetzer).

The Professional Geographer. 1993. Vol. 45. (Artículos de J.Armstrong, J.E.Dobson, M.Goodchild, D.Marble, D.Peuquet y E.Sheppard).

Treviño, E., Salinas, W., Antonio, X., (2005). Evaluación de la producción de agua usando modelos de análisis geográfico. Mapping, ISSN 1131-9100, N° 105, 2005.

Troll, C. (1950). Die geographische Landschaft und ihre Erforschung. *Studium Generale*, 3 Jg., 163-181.

Troll, C. (1973). *Landschaftsökologie als geographisch-synoptische Naturbetrachtung*. Editor Wiss. Buchges.

Valencia, Eduardo A. (2017) *Propuesta de Rehabilitación Ambiental con enfoques de Sustentabilidad y Resiliencia en Calimaya, Estado de México*. Trabajo Terminal de Grado Para obtener el Grado de Maestro en Estudios Sustentables Regionales y Metropolitanos. Universidad Autónoma del Estado de México. México.

Valencia, Eduardo A., Ordaz, Aléxis, Baró, José E., Violeta, Brisa. (2022). Desajustes territoriales asociados a la actividad minera en Calimaya, Estado de México. *Universidad Autónoma del Estado de México. Boletín geológico y minero*, ISSN 0366-0176, Vol. 133, N° 2, 2022, págs. 163-182.

Vivó, Jorge A. (1991). *Geografía Humana y Económica*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México.

Weng, Q., (2001) Modeling Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS. *Environmental Management*. N° 28, Vol. 6, p. 737-748.

Xiaojuan, L., Min X., Chunxiang, C., Ramesh S., Wei, C., and Hongrun, J. (2018). Land-Use/Land-Cover Changes and Their Influence on the Ecosystem in Chengdu City, China during the Period of 1992–2018. *MDPI, Sustainability*. Basilea, Suiza.

17. ANEXO I. DATOS RESULTANTES DE LAS CAPAS VECTORIALES CON EL MÉTODO DE PREVERT Y MOLL

Los procesos vectoriales realizados en el software ArcMap en ponderación con el método de Prevert (1998) complementado con el de Moll (2013), arrojaron las tablas XXX antes de realizar la síntesis de información para una mejor representación cartográfica.

Tabla 12. Uso de suelo y vegetación del año 1997 y coeficiente de escorrentía superficial de Prevert (1998) y Moll (2013).

Uso de suelo y vegetación	Pendiente (%)	Textura	Escorrentía superficial
Agricultura	0 - 5	Arcilloso	0.6
Agricultura	0 - 5	Arenoso	0.3
Agricultura	0 - 5	Limoso	0.5
Agricultura	5 - 10	Arenoso	0.4
Agricultura	5 - 10	Limoso	0.66
Agricultura	10 - 30	Arenoso	0.5
Agricultura	10 - 30	Limoso	0.7
Agricultura	más de 30	Arenoso	0.53
Agricultura	más de 30	Limoso	0.74
Bosque	0 - 5	Arenoso	0.1
Bosque	0 - 5	Limoso	0.3
Bosque	5 - 10	Arenoso	0.25
Bosque	5 - 10	Limoso	0.35
Bosque	10 - 30	Arenoso	0.3
Bosque	10 - 30	Limoso	0.4
Bosque	más de 30	Arenoso	0.32
Bosque	más de 30	Limoso	0.42
Mina	0 - 5	Arenoso	0.8
Mina	0 - 5	Limoso	0.8
Mina	5 - 10	Arenoso	0.87
Mina	5 - 10	Limoso	0.87
Mina	10 - 30	Arenoso	0.87
Mina	10 - 30	Arenoso	0.91
Mina	10 - 30	Limoso	0.91
Mina	más de 30	Arenoso	0.87
Mina	más de 30	Arenoso	0.91
Mina	más de 30	Limoso	0.91
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Arenoso	0.15
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Limoso	0.35
Pastizal natural/inducido	5 - 10	Arenoso	0.3
Pastizal natural/inducido	5 - 10	Limoso	0.4
Pastizal natural/inducido	10 - 30	Arenoso	0.35

Pastizal natural/inducido	10 - 30	Limoso	0.45
Pastizal natural/inducido	más de 30	Arenoso	0.37
Pastizal natural/inducido	más de 30	Limoso	0.47
Vegetación secundaria	0 - 5	Arenoso	0.37
Vegetación secundaria	0 - 5	Limoso	0.37
Vegetación secundaria	5 - 10	Arenoso	0.44
Vegetación secundaria	5 - 10	Limoso	0.44
Vegetación secundaria	10 - 30	Arenoso	0.55
Vegetación secundaria	10 - 30	Limoso	0.55
Vegetación secundaria	más de 30	Arenoso	0.55
Vegetación secundaria	más de 30	Limoso	0.55
Zona urbana	0 - 5	Arenoso	0.75
Zona urbana	5 - 10	Arenoso	0.82
Zona urbana	10 - 30	Arenoso	0.93
Zona urbana	más de 30	Arenoso	0.93

Tabla 13. Uso de suelo y vegetación del año 2002 y coeficiente de escorrentía superficial de Prevert (1998) y Moll (2013).

Uso de suelo y vegetación	Pendiente (%)	Textura	Escorrentía superficial
Agricultura	0 - 5	Arcilloso	0.6
Agricultura	0 - 5	Arenoso	0.3
Agricultura	0 - 5	Limoso	0.5
Agricultura	5 - 10	Arenoso	0.4
Agricultura	5 - 10	Limoso	0.66
Agricultura	10 - 30	Arenoso	0.5
Agricultura	10 - 30	Limoso	0.7
Agricultura	más de 30	Arenoso	0.53
Agricultura	más de 30	Limoso	0.74
Bosque	0 - 5	Arenoso	0.1
Bosque	0 - 5	Limoso	0.3
Bosque	5 - 10	Arenoso	0.25
Bosque	5 - 10	Limoso	0.35
Bosque	10 - 30	Arenoso	0.3
Bosque	10 - 30	Limoso	0.4
Bosque	más de 30	Arenoso	0.32
Bosque	más de 30	Limoso	0.42
Mina	0 - 5	Arenoso	0.8
Mina	0 - 5	Limoso	0.8
Mina	5 - 10	Arenoso	0.87
Mina	5 - 10	Limoso	0.87

Mina	10 - 30	Arenoso	0.91
Mina	10 - 30	Limoso	0.91
Mina	más de 30	Arenoso	0.91
Mina	más de 30	Limoso	0.91
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Arcilloso	0.45
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Arenoso	0.15
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Limoso	0.35
Pastizal natural/inducido	5 - 10	Arenoso	0.3
Pastizal natural/inducido	5 - 10	Limoso	0.4
Pastizal natural/inducido	10 - 30	Arenoso	0.35
Pastizal natural/inducido	10 - 30	Limoso	0.45
Pastizal natural/inducido	más de 30	Arenoso	0.37
Pastizal natural/inducido	más de 30	Limoso	0.47
Zona urbana	0 - 5	Arenoso	0.75
Zona urbana	5 - 10	Arenoso	0.82
Zona urbana	10 - 30	Arenoso	0.93
Zona urbana	más de 30	Arenoso	0.93

Tabla 14. Uso de suelo y vegetación del año 2007 y coeficiente de escorrentía superficial de Prevert (1998) y Moll (2013).

Uso de suelo y vegetación	Pendiente (%)	Textura	Escorrentía superficial
Agricultura	0 - 5	Arcilloso	0.6
Agricultura	0 - 5	Arenoso	0.3
Agricultura	0 - 5	Limoso	0.5
Agricultura	5 - 10	Arenoso	0.4
Agricultura	5 - 10	Limoso	0.66
Agricultura	10 - 30	Arenoso	0.5
Agricultura	10 - 30	Limoso	0.7
Agricultura	más de 30	Arenoso	0.53
Agricultura	más de 30	Limoso	0.74
Forestal	0 - 5	Arenoso	0.1
Forestal	0 - 5	Limoso	0.3
Forestal	5 - 10	Arenoso	0.25
Forestal	5 - 10	Limoso	0.35
Forestal	10 - 30	Arenoso	0.3
Forestal	10 - 30	Limoso	0.4
Forestal	más de 30	Arenoso	0.32
Forestal	más de 30	Limoso	0.42
Mina	0 - 5	Arenoso	0.8
Mina	0 - 5	Limoso	0.8

Mina	5 - 10	Arenoso	0.87
Mina	5 - 10	Limoso	0.87
Mina	10 - 30	Arenoso	0.91
Mina	10 - 30	Limoso	0.91
Mina	más de 30	Arenoso	0.91
Mina	más de 30	Limoso	0.91
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Arenoso	0.15
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Limoso	0.35
Pastizal natural/inducido	5 - 10	Arenoso	0.3
Pastizal natural/inducido	5 - 10	Limoso	0.4
Pastizal natural/inducido	10 - 30	Arenoso	0.35
Pastizal natural/inducido	10 - 30	Limoso	0.45
Pastizal natural/inducido	más de 30	Arenoso	0.37
Pastizal natural/inducido	más de 30	Limoso	0.47
Zona urbana	0 - 5	Arcilloso	0.75
Zona urbana	0 - 5	Arenoso	0.75
Zona urbana	5 - 10	Arenoso	0.82
Zona urbana	10 - 30	Arenoso	0.93
Zona urbana	más de 30	Arenoso	0.93

Tabla 15. Uso de suelo y vegetación del año 2012 y coeficiente de escorrentía superficial de Prevert (1998) y Moll (2013).

Uso de suelo y vegetación	Pendiente (%)	Textura	Escorrentía superficial
Agricultura	0 - 5	Arcilloso	0.6
Agricultura	0 - 5	Arenoso	0.3
Agricultura	0 - 5	Limoso	0.5
Agricultura	5 - 10	Arenoso	0.4
Agricultura	5 - 10	Limoso	0.66
Agricultura	10 - 30	Arenoso	0.5
Agricultura	10 - 30	Limoso	0.7
Agricultura	más de 30	Arenoso	0.53
Agricultura	más de 30	Limoso	0.74
Bosque	0 - 5	Arenoso	0.1
Bosque	0 - 5	Limoso	0.3
Bosque	5 - 10	Arenoso	0.25
Bosque	5 - 10	Limoso	0.35
Bosque	10 - 30	Arenoso	0.3
Bosque	10 - 30	Limoso	0.4
Bosque	más de 30	Arenoso	0.32
Bosque	más de 30	Limoso	0.42

Mina	0 - 5	Arenoso	0.8
Mina	0 - 5	Limoso	0.8
Mina	5 - 10	Arenoso	0.87
Mina	5 - 10	Limoso	0.87
Mina	10 - 30	Arenoso	0.91
Mina	10 - 30	Limoso	0.91
Mina	más de 30	Arenoso	0.91
Mina	más de 30	Limoso	0.91
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Arcilloso	0.45
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Arenoso	0.15
Pastizal natural/inducido	0 - 5	Limoso	0.35
Pastizal natural/inducido	5 - 10	Arenoso	0.3
Pastizal natural/inducido	5 - 10	Limoso	0.4
Pastizal natural/inducido	10 - 30	Arenoso	0.35
Pastizal natural/inducido	10 - 30	Limoso	0.45
Pastizal natural/inducido	más de 30	Arenoso	0.37
Pastizal natural/inducido	más de 30	Limoso	0.47
Zona urbana	0 - 5	Arcilloso	0.75
Zona urbana	0 - 5	Arenoso	0.75
Zona urbana	0 - 5	Limoso	0.75
Zona urbana	5 - 10	Arenoso	0.82
Zona urbana	5 - 10	Limoso	0.82
Zona urbana	10 - 30	Arenoso	0.93
Zona urbana	más de 30	Arenoso	0.93

Tabla 16. Uso de suelo y vegetación del año 2017 y coeficiente de escorrentía superficial de Prevert (1998) y Moll (2013).

Uso de suelo y vegetación	Pendiente (%)	Textura	Escorrentía superficial
Agricultura	0 - 5	Arcilloso	0.6
Agricultura	0 - 5	Arenoso	0.3
Agricultura	0 - 5	Limoso	0.5
Agricultura	5 - 10	Arenoso	0.4
Agricultura	5 - 10	Limoso	0.66
Agricultura	10 - 30	Arenoso	0.5
Agricultura	10 - 30	Limoso	0.7
Agricultura	más de 30	Arenoso	0.53
Agricultura	más de 30	Limoso	0.74
Bosque	0 - 5	Arenoso	0.1
Bosque	0 - 5	Limoso	0.3
Bosque	5 - 10	Arenoso	0.25

Bosque	5 - 10	Limoso	0.35
Bosque	10 - 30	Arenoso	0.3
Bosque	10 - 30	Limoso	0.4
Bosque	más de 30	Arenoso	0.32
Bosque	más de 30	Limoso	0.42
Mina	0 - 5	Arenoso	0.8
Mina	0 - 5	Limoso	0.8
Mina	5 - 10	Arenoso	0.87
Mina	5 - 10	Limoso	0.87
Mina	10 - 30	Arenoso	0.91
Mina	10 - 30	Limoso	0.91
Mina	más de 30	Arenoso	0.91
Mina	más de 30	Limoso	0.91
Pastizal inducido/natural	0 - 5	Arenoso	0.15
Pastizal inducido/natural	0 - 5	Limoso	0.35
Pastizal inducido/natural	5 - 10	Arenoso	0.3
Pastizal inducido/natural	5 - 10	Limoso	0.4
Pastizal inducido/natural	10 - 30	Arenoso	0.35
Pastizal inducido/natural	10 - 30	Limoso	0.45
Pastizal inducido/natural	más de 30	Arenoso	0.37
Pastizal inducido/natural	más de 30	Limoso	0.47
Vegetación secundaria	0 - 5	Arenoso	0.37
Vegetación secundaria	0 - 5	Limoso	0.37
Vegetación secundaria	5 - 10	Arenoso	0.44
Vegetación secundaria	5 - 10	Limoso	0.44
Vegetación secundaria	10 - 30	Arenoso	0.55
Vegetación secundaria	10 - 30	Limoso	0.55
Vegetación secundaria	más de 30	Arenoso	0.55
Vegetación secundaria	más de 30	Limoso	0.55
Zona urbana	0 - 5	Arcilloso	0.75
Zona urbana	0 - 5	Arenoso	0.75
Zona urbana	5 - 10	Arenoso	0.82
Zona urbana	10 - 30	Arenoso	0.93
Zona urbana	más de 30	Arenoso	0.93

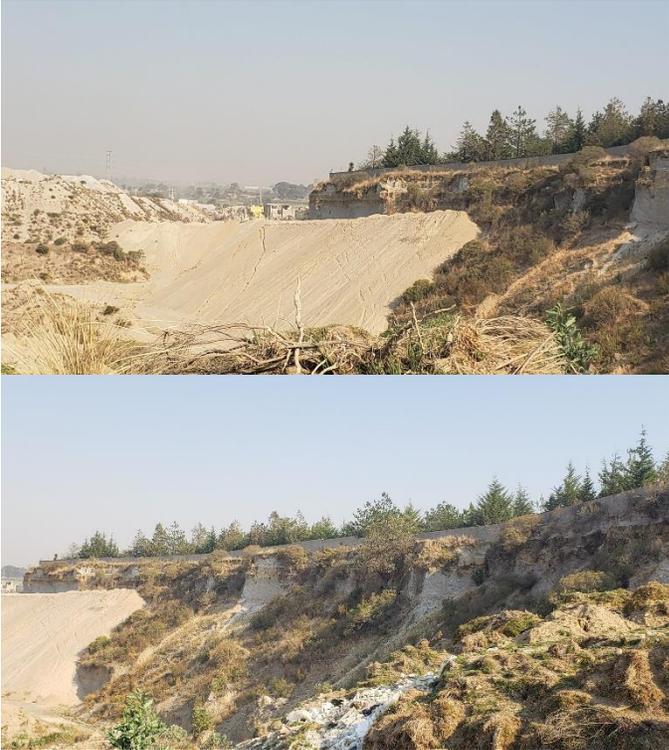
Tabla 17. Uso de suelo y vegetación del año 2022 y coeficiente de escorrentía superficial de Prevert (1998) y Moll (2013).

Uso de suelo y vegetación	Pendiente (%)	Textura	Escorrentía superficial
Agricultura	0 - 5	Arcilloso	0.6
Agricultura	0 - 5	Arenoso	0.3
Agricultura	0 - 5	Limoso	0.5
Agricultura	5 - 10	Arenoso	0.4
Agricultura	5 - 10	Limoso	0.66
Agricultura	10 - 30	Arenoso	0.5
Agricultura	10 - 30	Limoso	0.7
Agricultura	más de 30	Arenoso	0.53
Agricultura	más de 30	Limoso	0.74
Bosque	0 - 5	Arenoso	0.1
Bosque	0 - 5	Limoso	0.3
Bosque	5 - 10	Arenoso	0.25
Bosque	5 - 10	Limoso	0.35
Bosque	10 - 30	Arenoso	0.3
Bosque	10 - 30	Limoso	0.4
Bosque	más de 30	Arenoso	0.32
Bosque	más de 30	Limoso	0.42
Mina	0 - 5	Arenoso	0.8
Mina	0 - 5	Limoso	0.8
Mina	5 - 10	Arenoso	0.87
Mina	5 - 10	Limoso	0.87
Mina	10 - 30	Arenoso	0.91
Mina	10 - 30	Limoso	0.91
Mina	más de 30	Arenoso	0.91
Mina	más de 30	Limoso	0.91
Pastizal inducido/natural	0 - 5	Arcilloso	0.45
Pastizal inducido/natural	0 - 5	Arenoso	0.15
Pastizal inducido/natural	0 - 5	Limoso	0.35
Pastizal inducido/natural	5 - 10	Arenoso	0.3
Pastizal inducido/natural	5 - 10	Limoso	0.4
Pastizal inducido/natural	10 - 30	Arenoso	0.35
Pastizal inducido/natural	10 - 30	Limoso	0.45
Pastizal inducido/natural	más de 30	Arenoso	0.37
Pastizal inducido/natural	más de 30	Limoso	0.47
Zona urbana	0 - 5	Arcilloso	0.75
Zona urbana	0 - 5	Arenoso	0.75
Zona urbana	5 - 10	Arenoso	0.82
Zona urbana	10 - 30	Arenoso	0.86
Zona urbana	más de 30	Arenoso	0.86

**18. ANEXO II. TRABAJO DE CAMPO PARA IDENTIFICAR CAMBIOS DE
USO DE SUELO Y POSIBLES IMPACTOS ACTUALES**

Descripción	Coordenadas		Fotografía
	Latitud	Longitud	
Mina de tepojal activa	436654	2120439	
Mina inactiva	437079	2120704	

<p>Mina inactiva</p>	<p>436988</p>	<p>2120691</p>	
<p>Zona de una mina utilizada como basurero clandestino</p>	<p>435938</p>	<p>2120191</p>	

<p>Barda del fraccionamiento Villas del Campo en el límite con mina</p>	<p>435824</p>	<p>2120249</p>	
<p>Mina La Palma donde extraen el material aún estando las torres de cables de alta tensión</p>			
<p>Mina activa</p>	<p>436453</p>	<p>2119346</p>	

			
Muerte de árboles por el polvo de la mina que se encuentra a un lado	435944	2118760	
Mina inactiva abandonada	436387	2118883	

<p>Mia inactiva abandonada y usada como basurero clandestino</p>	<p>436170</p>	<p>2118812</p>	
<p>Mina activa de tepojal</p>	<p>436436</p>	<p>2120062</p>	
<p>Terreno donde hay agricultura después de extraer el material</p>	<p>434214</p>	<p>2119923</p>	

			
Tiradero de basura del municipio de Calimaya	434201	2119805	 
Tiradero de basura clandestino en una mina abandonada	434844	2119637	

<p>Mina inactiva usada como tiradero de basura clandestino</p>	<p>436970</p>	<p>2120658</p>	
<p>Mina de tepojal activa</p>	<p>436570</p>	<p>2120737</p>	
<p>Mina activa de arena y grava</p>	<p>435159</p>	<p>2119766</p>	
<p>Mina inactiva</p>	<p>434828</p>	<p>2120771</p>	

Mina inactiva	434886	2121174	
Mina inactiva	434754	2121564	
Mina inactiva	431507	2122666	
Mina inactiva	431039	2122362	

Mina inactiva	430758	2121971	
Mina inactiva	430388	2121835	
Mina activa	429950	2121105	
Mina inactiva	429843	2121352	

<p>Mina inactiva de tepojal donde se observa la afectación de esta a la vegetación adyacente</p>	<p>429611</p>	<p>2121355</p>	
<p>Árbol de capulín dentro de una mina abandonada, plagado con muérdago amarillo</p>	<p>429961</p>	<p>2121403</p>	
<p>Mina activa de tepojal donde se ve la afectación a la vegetación</p>	<p>429778</p>	<p>2120978</p>	
<p>Mina de tepojal abandonada y erosionada</p>	<p>430139</p>	<p>2121752</p>	

<p>Afectación al paisaje por la minería</p>	<p>429641</p>	<p>2121302</p>	
<p>Inactiva</p>	<p>429472</p>	<p>2121014</p>	
<p>Afectación a la red de agua por el paso de camiones pesados</p>	<p>430164</p>	<p>2121611</p>	
<p>Mina inactiva de tepojal</p>	<p>429227</p>	<p>2120873</p>	

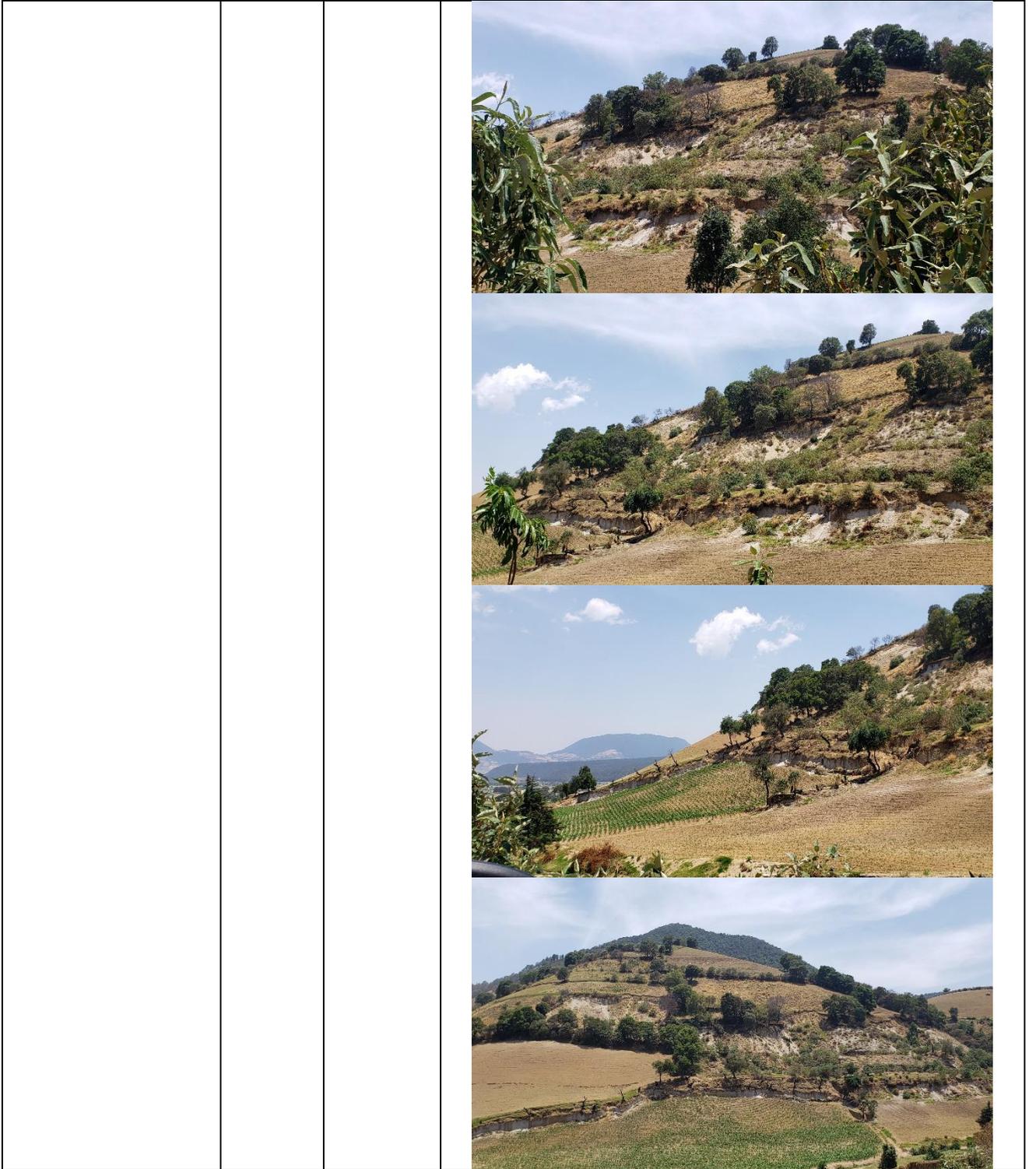
			
Redes de agua que pasan por los terrenos aledaños al camino	430932	2122339	 
Red de tubos que se observa ha sido afectada en su momento por la mina	430526	2121805	

			
<p>Presas de gavión llena y rota en varias partes</p>	431089	2120135	
<p>Mina de tepojal inactiva y lista para labrarse nuevamente</p>	431683	2120117	
<p>Zona donde extrajeran el tepojal y después sembraron, se puede observar que no se tiene una buena producción</p>	431150	2120175	

Mina inactiva	431309	2119588	
Mina activa	432643	2118632	
Mina activa	431854	2118247	

<p>Mina inactiva de tepojal</p>	<p>432870</p>	<p>2118004</p>	 <p>The top photograph shows a wide view of a hillside with exposed, light-colored soil and sparse green vegetation. The middle photograph shows a similar view from a different angle, highlighting the uneven terrain. The bottom photograph shows a close-up of a deep, eroded gully with exposed soil layers and some green plants growing in the foreground.</p>
<p>Zonas con altas pendientes donde se ha extraído tepojal con asentamientos humanos irregulares en la parte baja</p>	<p>432042</p>	<p>2116695</p>	 <p>The photograph shows a steep, eroded hillside with exposed soil and sparse green vegetation. The sky is clear and blue, and there are some trees visible on the right side of the frame.</p>

			
<p>Zonas donde se extrajo el tepojal en laderas con alta pendiente</p>	<p>432173</p>	<p>2116505</p>	



<p>Zona con alta pendiente donde se extrajo el tepojal y después se sembró</p>	<p>432318</p>	<p>2116684</p>	
--	---------------	----------------	---

<p>Mina activa de tepojal</p>	<p>432297</p>	<p>2116417</p>	
<p>Bardeado de piedra bola para detener la corriente del río en temporada de lluvias</p>	<p>432795</p>	<p>2116756</p>	
<p>Mina activa que está afectando a los mantos acuíferos superficiales</p>	<p>430045</p>	<p>2116230</p>	

			
Mina de tepojal y arena arriba de la deportiva de la comunidad de Zaragoza	430717	2117133	
Así se ven las zonas donde ya se extrajo tepojal en su momento y después volvieron a poner el suelo para seguir con agricultura	430191	2117340	
En la parte alta de Calimaya, para donde voltees, ya se ha extraído material	429728	2117127	

			
<p>Mas zonas de agricultura donde se siembra después de extraer el tepojal</p>	<p>429276</p>	<p>2117067</p>	
<p>Camiones de carga bajando con material, lo que indica la actividad minera activa en la zona.</p>	<p>429034</p>	<p>2117018</p>	

			
Zonas con laderas con pendiente alta donde se ha extraído tepojal y al abandono la erosión es evidente.	429342	2117047	
Paisaje de la parte media-alta de Calimaya	429193	2116985	
Mina de tepojal activa en la zona de amortiguamiento del APFF Nevado de Toluca	428942	2116917	

<p>Mina de tepojal activa en la zona de amortiguamiento del APFF Nevado de Toluca</p>	<p>429241</p>	<p>2117019</p>	
<p>Baja producción agrícola por la falta de retención de suelo en zonas donde ya se extrajo tepojal</p>	<p>428891</p>	<p>2117018</p>	
<p>Tala de cedro blanco (<i>Cupressus lusitánica</i>) por aprovechamientos forestales autorizados a los Bienes Comunales de Calimaya</p>	<p>428475</p>	<p>2116927</p>	
<p>Cambio de uso de suelo de forestal a agrícola. Erosión presente debido a la forma en la que se siembra donde el surco lo hacen a favor de la pendiente</p>	<p>427552</p>	<p>2116167</p>	

<p>Más zonas donde se observa presencia de tala</p>	<p>426778</p>	<p>2116170</p>	
<p>Zona donde se observó vegetación forestal quemada, probablemente por las actividades agrícolas que se encuentran al lado</p>	<p>426250</p>	<p>2116188</p>	
<p>Más presencia de tala realizada por las autorizaciones de aprovechamientos forestales, las cuales se observa que no la realizan bien.</p>	<p>427498</p>	<p>2116935</p>	
<p>Incendios provocados para extraer la vegetación y poder incrementar la frontera agrícola</p>	<p>427436</p>	<p>2118187</p>	

			
Más presencia de tala “legal” mal realizada	427579	2118360	
Incendios y tala en zona de bosques del APFF Nevado de Toluca	427426	2118362	
Más presencia de tala, aunque esta parece más selectiva.	427155	2118532	

<p>Más tala donde dejan todos esos residuos que pueden servir como combustible para incendios y ocasionar más daños.</p>	<p>426769</p>	<p>2118609</p>	
<p>En diferentes puntos, personal de los BC de Calimaya has puesto diferentes letreros para tratar de evitar actividades que dañen más los bosques.</p>	<p>426599 426094</p>	<p>2118975 2117880</p>	
<p>A pesar de que existen letreros de que está prohibida la tala clandestina, los mismos BC de Calimaya realizan esta actividad, así como habitantes de las comunidades cercanas</p>	<p>425117</p>	<p>2116194</p>	

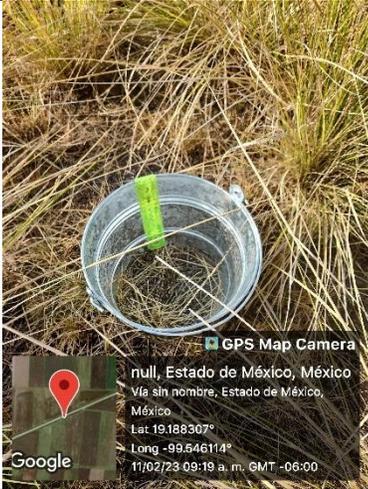
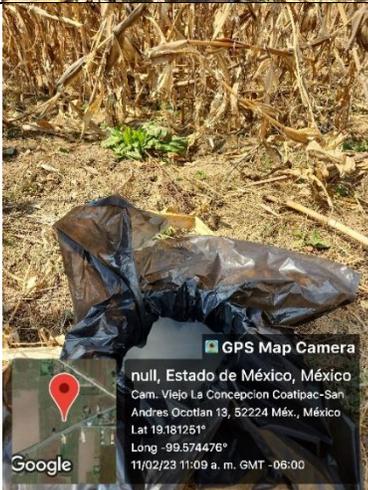
<p>Lugar donde se observa la presencia de <i>Lupinus montanus</i> (garbancillo), el cual es indicador de que en algún momento hubo un incendio en la zona.</p>	<p>425001</p>	<p>2115492</p>	
<p>Agricultura establecida en zona de terrazas mecánicas las cuales su objetivo de realización fue para reforestarlas</p>	<p>425988</p>	<p>2115215</p>	
<p>Zona donde se reforestó hace aproximadamente 5 años y ha sido quemada.</p>	<p>426496</p>	<p>2115245</p>	
<p>Agricultura en un sitio donde se realizó aprovechamiento forestal y después se había reforestado.</p>	<p>426459</p>	<p>2115183</p>	

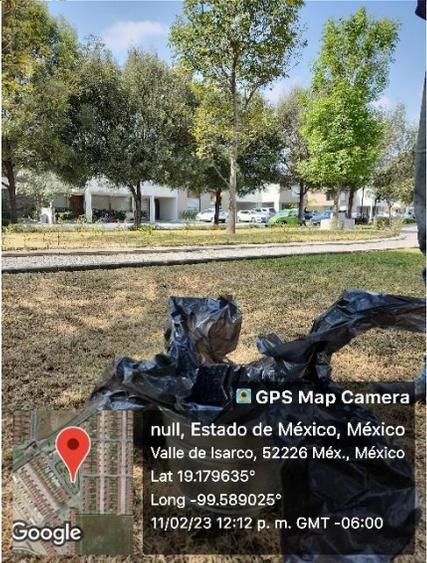
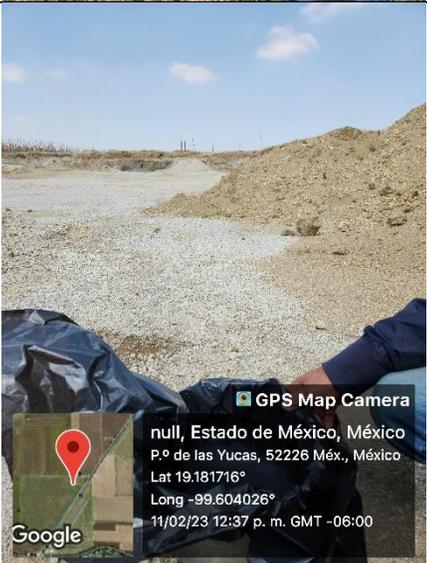
<p>Agricultura de papa en un sitio cercano a manantiales superficiales aprovechados por la localidad de Zaragoza para uso doméstico.</p>	<p>426403</p>	<p>2115349</p>	
<p>Manantiales superficiales aprovechados por la localidad de Zaragoza, Calimaya. Los cuales se menciona por parte de los encargados del comité de agua que ha reducido bastante su capacidad debido a la agricultura y la deforestación.</p>	<p>426416</p>	<p>2115878</p>	
<p>Uno de los encargados del comité de agua de la localidad de zaragoza nos muestra hasta donde llegaba hace algunos años el agua de estos manantiales.</p>	<p>426416</p>	<p>2115878</p>	

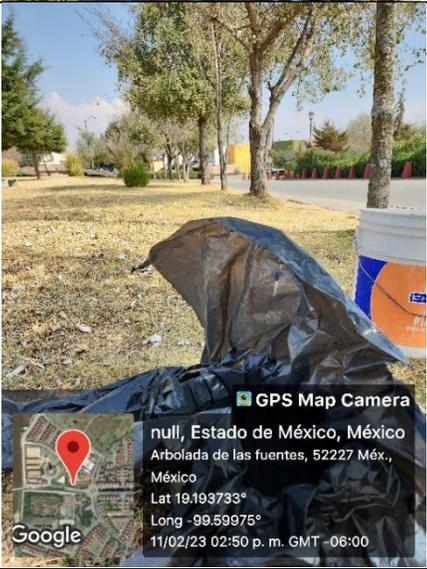
<p>Otro manantial de agua aprovechado por la localidad de Zaragoza para uso doméstico el cual se tapa constantemente debido a la escorrentía y lodo (erosión) ocasionada por la agricultura de papa aledaña al sitio.</p>	<p>426701</p>	<p>2115932</p>	
<p>Botes de agroquímicos tirados cerca de los mantos acuíferos superficiales de uso doméstico, estos los utilizan principalmente en la agricultura de papa y suelen ser altamente contaminantes.</p>	<p>426509</p>	<p>2115330</p>	
<p>Sitio donde se encuentra otro manto acuífero superficial el cual se ve afectado por deslaves debido a las vibraciones ocasionadas por el transporte pesado que utilizan en los cultivos.</p>	<p>426561</p>	<p>2115281</p>	

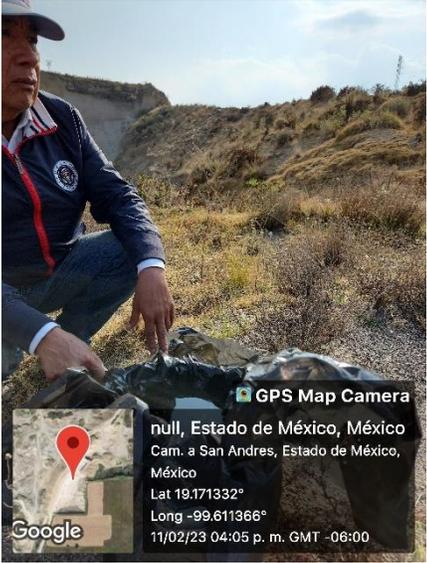
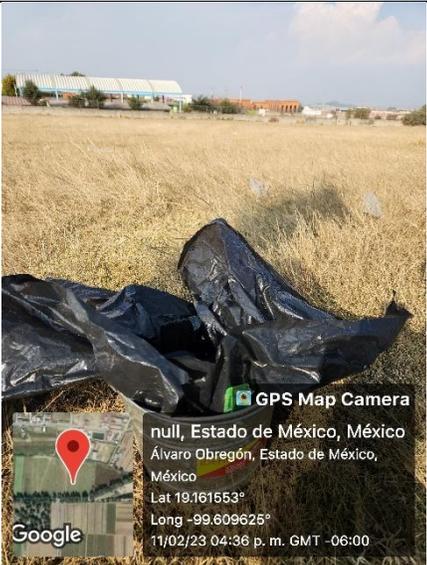
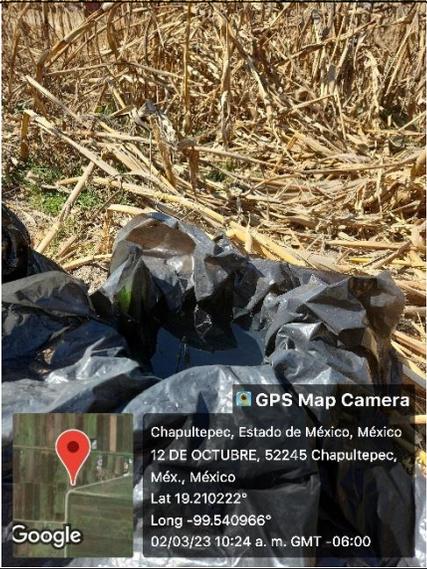
<p>Manto acuífero superficial aprovechado por la localidad de San Diego la Huerta, Calimaya, el cual se ve afectado por deslaves debido a las vibraciones ocasionadas por el transporte pesado que se utilizan en los cultivos.</p>	<p>427146</p>	<p>2115828</p>	
<p>Otro manantial de agua aprovechado por la localidad de San Diego la Huerta para uso doméstico el cual se tapa constantemente debido a la escorrentía y lodo (erosión) ocasionada por la agricultura de papa aledaña al sitio.</p>	<p>426696</p>	<p>2115585</p>	
<p>Tala clandestina en las zonas cercanas a los mantos acuíferos superficiales</p>	<p>427262</p>	<p>2115961</p>	

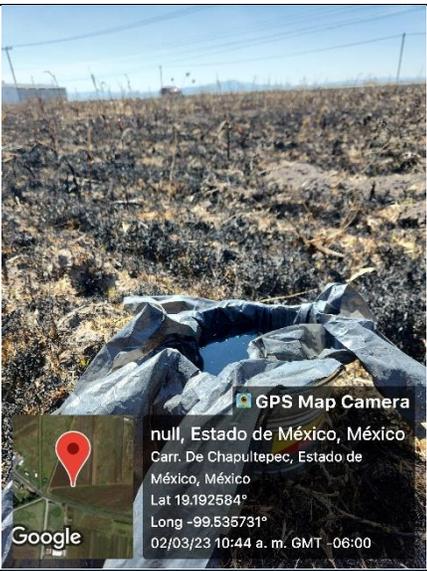
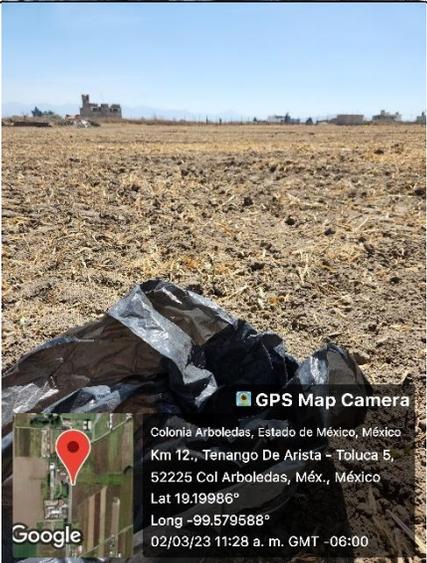
19. ANEXO III. TRABAJO DE CAMPO PARA REALIZAR MUESTREOS DE FILTRACIÓN DE AGUA

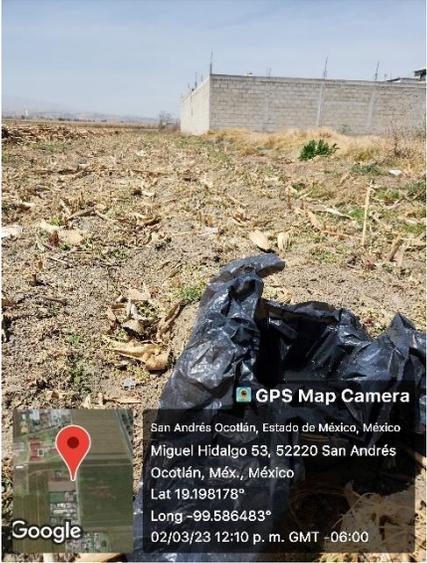
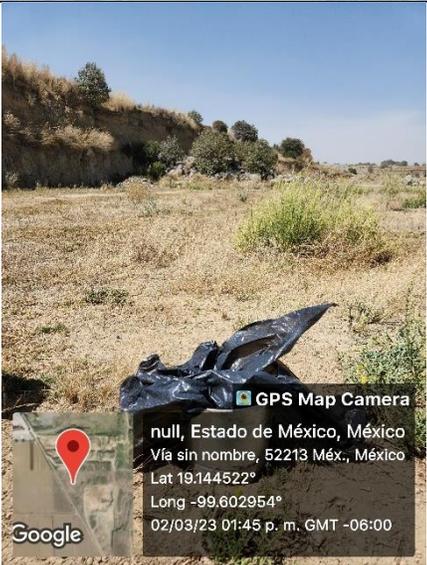
Descripción	Coordenadas		Foto
	Latitud	Longitud	
M1. Pastizal inducido	19.188124	-99.54614	
M2. Agricultura de maíz	19.182225	-99.558037	
M3. Agricultura de maíz	19.181251	-99.574476	

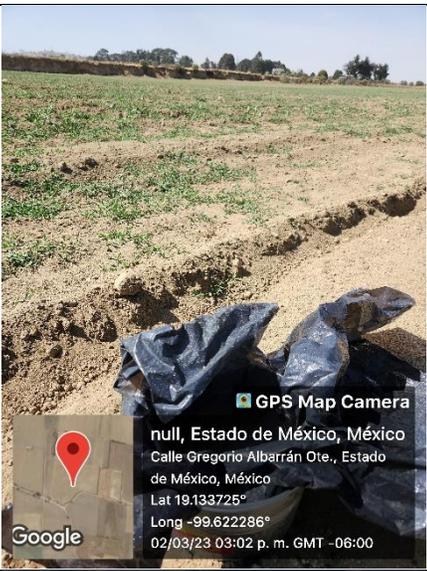
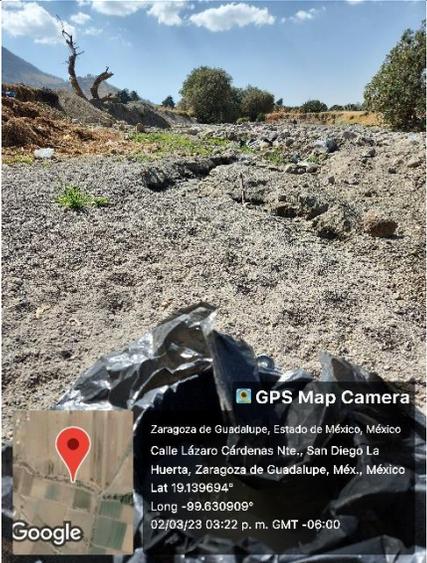
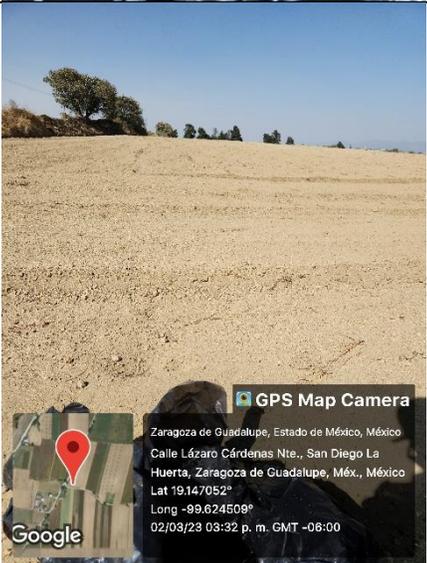
<p>M4. Mina de arena (abandonada)</p>	<p>19.176809</p>	<p>-99.585356</p>	
<p>M5. Área verde urbana</p>	<p>19.179635</p>	<p>-99.589025</p>	
<p>M6. Mina de extracción de tepojal (reciente)</p>	<p>19.181716</p>	<p>-99.604026</p>	

<p>M7. Pastizal inducido</p>	<p>19.183313</p>	<p>-99.601725</p>	
<p>M8. Agricultura</p>	<p>19.185879</p>	<p>-99.601151</p>	
<p>M9. Área verde urbana</p>	<p>19.193733</p>	<p>-99.59975</p>	

<p>M10. Mina de arena y conglomerados (abandonada)</p>	<p>19.171305</p>	<p>-99.611362</p>	
<p>M11. Pastizal inducido</p>	<p>19.161553</p>	<p>-99.609625</p>	
<p>M12. Agricultura de maíz</p>	<p>19.210222</p>	<p>-99.540966</p>	

<p>M13. Agricultura de maíz</p>	<p>19.192584</p>	<p>-99.535731</p>	
<p>M14. Área agrícola</p>	<p>19.180984</p>	<p>-99.537735</p>	
<p>M15. Área agrícola</p>	<p>19.19986</p>	<p>-99.579588</p>	

<p>M16. Área agrícola</p>	<p>19.198178</p>	<p>-99.586483</p>	
<p>M17. Mina de arena y conglomerados (abandonada)</p>	<p>19.144522</p>	<p>-99.602954</p>	
<p>M18. Pastizal natural</p>	<p>19.139978</p>	<p>-99.609782</p>	

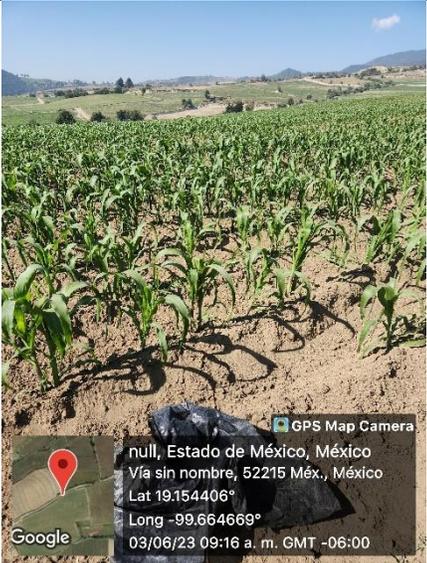
<p>M19. Agricultura de reconversión</p>	<p>19.133725</p>	<p>-99.622286</p>	
<p>M20. Cauce de río</p>	<p>19.139694</p>	<p>-99.630909</p>	
<p>M21. Área agrícola</p>	<p>19.147052</p>	<p>-99.624509</p>	

<p>M22. Área agrícola</p>	<p>19.144407</p>	<p>-99.6792</p>	
<p>M23. Bosque</p>	<p>19.143389</p>	<p>-99.680982</p>	
<p>M24. Bosque incendiado</p>	<p>19.143649</p>	<p>-99.684063</p>	

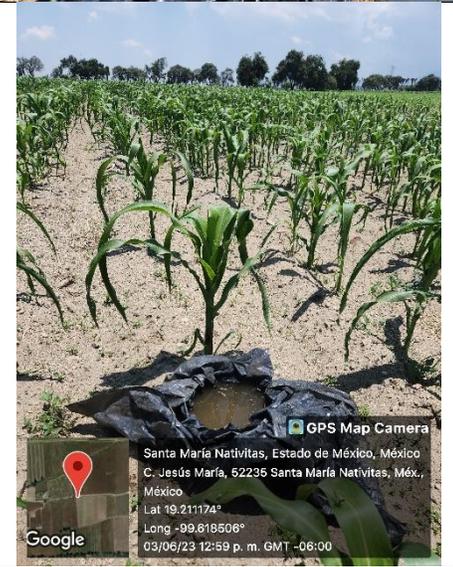
<p>M25. Reconversión bosque</p>	<p>19.1375</p>	<p>-99.689357</p>	
<p>M26. Reconversión bosque</p>	<p>19.136069</p>	<p>-99.69037</p>	
<p>M27. Área agrícola</p>	<p>19.142113</p>	<p>-99.694714</p>	

<p>M28. Bosque de cedros</p>	<p>19.1365</p>	<p>-99.700645</p>	
<p>M29. Bosque de ailes</p>	<p>19.139336</p>	<p>-99.704829</p>	
<p>M30. Bosque de cedros y pinos</p>	<p>19.131892</p>	<p>-99.715223</p>	

<p>M31. Bosque reforestado e incendiado</p>	<p>19.130837</p>	<p>-99.70858</p>	
<p>M32. Cauce de río</p>	<p>19.131578</p>	<p>-99.681051</p>	
<p>M33. Mina de extracción de tepojal</p>	<p>19.13699</p>	<p>-99.667512</p>	

<p>M34. Agricultura de chícharo</p>	<p>19.155471</p>	<p>-99.65511</p>	
<p>M35. Agricultura de Maíz</p>	<p>19.154025</p>	<p>-99.66449</p>	
<p>M36. Área agrícola</p>	<p>19.165862</p>	<p>-99.674906</p>	

<p>M37. Mina de arena y conglomerados (abandonada)</p>	<p>19.16902</p>	<p>-99.653776</p>	
<p>M38. Agricultura de maíz</p>	<p>19.182425</p>	<p>-99.651578</p>	 <p>GPS Map Camera null, Estado de México, México A Zaragoza de Guadalupe 25, 52234 Méx., México Lat: 19.182348° Long: -99.651772° 03/06/23 10:54 a. m. GMT -08:00</p>
<p>M39. Mina de arena y conglomerados (abandonada)</p>	<p>19.184876</p>	<p>-99.665691</p>	

<p>M40. Agricultura de maíz</p>	<p>19.17505</p>	<p>-99.67962</p>	
<p>M41. Agricultura de maíz</p>	<p>19.217297</p>	<p>-99.649073</p>	
<p>M42. Agricultura de maíz</p>	<p>19.210894</p>	<p>-99.618472</p>	 <p>GPS Map Camera Santa María Nativitas, Estado de México, México C. Jesús María, 52235 Santa María Nativitas, Méx., México Lat 19.211174° Long -99.618506° 03/06/23 12:59 p. m. GMT -06:00</p>

<p>M43. Agricultura de maíz</p>	<p>19.20442</p>	<p>-99.629687</p>	
<p>M44. Mina de arena (abandonada)</p>	<p>19.180014</p>	<p>-99.630065</p>	
<p>M45. Bosque incendiado</p>	<p>19.174825</p>	<p>-99.683196</p>	 <p>GPS Map Camera null, Estado de México, México Vía sin nombre, 52234 Méx., México Lat 19.174806° Long -99.683052° 04/06/23 10:07 a. m. GMT -06:00</p>

<p>M46. Bosque y pastizal</p>	<p>19.167139</p>	<p>-99.691146</p>	
<p>M47. Bosque de cedros</p>	<p>19.157017</p>	<p>-99.689049</p>	
<p>M48. Bosque de cedros</p>	<p>19.156956</p>	<p>-99.695953</p>	

<p>M49. Reforestación y pastizal</p>	<p>19.152833</p>	<p>-99.702215</p>	
<p>M50. Bosque de pinos</p>	<p>19.145268</p>	<p>-99.711864</p>	