DOI 10.24275/uama.5809.14008

Casa abierta al tiempo

UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES

Especialización en Economía y Gestión del Agua

Valoración económica de los servicios ecosistémicos hídricos en la cuenca de la Reserva Ecológica de San Miguel Topilejo, CDMX

PRESENTA

Pamela Valery Mora Roldán

Asesores

Dra. Lilia Rodríguez Tapia

Dr. Jorge A. Morales Novelo

Ciudad de México, México

Mayo 2026

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 5
2. MARCO TEÓRICO 7
2.1 Origen de los servicios ecosistémicos 7
2.2 Servicios ecosistémicos 8
2.3 Servicios ecosistémicos hídricos 9
2.3 Infiltración y recarga del acuífero 11
2.4 Instrumentos económicos ambientales: Pago por Servicios Ambientales 13
2.4.1 Antecedentes internacionales 13
2.4.2 Implementación en México 15
2.4.3 Programas de PSA en la zona de estudio 15
2.4.4 Programas vigentes de PSA en la cuenca 16
2.5 Valoración económica de los servicios ecosistémicos hídricos 18
2.6 Métodos de valoración económica de los servicios ecosistémicos hídricos 21
3. METODOLOGÍA 26
3.1 Enfoque metodológico 26
3.2 Etapas metodológicas 26
i) Caracterización biofísica de la cuenca 27
ii) Integración de información hidrológica mediante el uso de resultados previos y modelación con InVEST para estimar la producción anual de agua. 30
iii) Clasificación de coberturas 30
iv) Aplicación del costo evitado 31
v) Comparación de los valores obtenidos con los esquemas actuales de Pago por 32
Servicios Ambientales. 32
4. Resultados 32
4.1 Producción anual de agua en la cuenca de San Miguel Topilejo 32
4.2 Valoración económica del servicio ecosistémico hídrico 35
4.3 Valor económico del servicio hídrico por unidad de superficie 35
4.4 Valor económico del servicio hídrico por tipo de cobertura vegetal 36

5. Discusión 39
5.1 Relevancia de las coberturas forestales en la provisión del servicio ecosistémico hídrico 39
5.2 El rol del pastizal de volcán en la infiltración 39
5.3 Influencia de la agricultura y el matorral en la producción hídrica 40
5.4 Gestión hídrica de la cuenca de San Miguel Topilejo 41
5.5 Implicaciones económicas de los servicios hídricos en la política ambiental 42
6. Conclusiones 44
BIBLIOGRAFÍA 47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Problemáticas hídricas en el acuífero Metropolitano del Valle de México. Fuente: SINA, 2024 10
Figura 2. Ciclo hidrológico y proceso de infiltración hacia el acuífero. Fuente: Adaptado de CONAGUA (2016). 11
Figura 3. Evolución de los programas de Pago por Servicios Ambientales en México. 16
Figura 4. Localización de la cuenca hidrológica de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Ciudad de México. Elaboración propia. 27
Figura 5. Suelo de conservación CDMX Fuente: Elaboración propia con datos del Atlas Geográfico del Suelo de Conservación PAOT (2012) 28
Figura 6. Distribución espacial de las pendientes del terreno en la cuenca de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Ciudad de México. Elaboración propia. . 29
Figura 7. Resultados previos del volumen de infiltración para cada tipo de cobertura vegetal 31
Figura 8. Modelo conceptual hídrico por InVEST, el cual estima la disponibilidad de agua a partir de la interacción entre precipitación, evapotranspiración, características del suelo y cobertura vegetal, permitiendo estimar la recarga hídrica. 33
Figura 9. Mapa del valor económico del servicio ecosistémico hídrico en la cuenca de San Miguel Topilejo, calculado con base en la producción anual de agua modelada con InVEST y un precio de 8 $/m³. Los valores se expresan a nivel de pixel (30 × 30 m). 38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Capacidad de infiltración de acuerdo con el tipo de vegetación..... 13
Cuadro 2. Métodos de valoración económica de servicios ecosistémicos hídricos 22
Cuadro 3.. Estudios de valoración económica de los servicios hídricos y Pago por Servicios ambientales. 26
Cuadro 4. Producción anual de agua por tipo de cobertura vegetal en la cuenca SMT 34
Cuadro 5. Valoración económica del servicio hídrico de producción de agua en la cuenca de San Miguel Topilejo. 35
Cuadro 6. Valoración económica del servicio ecosistémico hídrico por hectárea en la cuenca de San Miguel Topilejo. 36
Cuadro 7. Valor económico anual del servicio ecosistémico hídrico de infiltración por tipo de cobertura vegetal en la cuenca de San Miguel Topilejo. 37
Cuadro 8. Comparación entre incentivos de PSA y valor económico del servicio hídrico.. 42

RESUMEN

La Ciudad de México enfrenta una creciente problemática hídrica vinculada a la sobreexplotación del acuífero, el crecimiento urbano y el cambio de uso de suelo, lo que ha intensificado la necesidad de conservar las zonas de recarga localizadas en el Suelo de Conservación. En este escenario, la cuenca de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo se reconoce como un espacio estratégico para la infiltración y recarga del acuífero del Valle de México, gracias a sus condiciones geológicas, topográficas y de cobertura vegetal.

La investigación tuvo como propósito valorar económicamente los servicios ecosistémicos hídricos asociados a la infiltración de agua de lluvia y la recarga del acuífero en esta cuenca. Para ello se aplicó un enfoque cuantitativo apoyado en análisis espacial, modelación hidrológica y métodos de valoración económica. La estimación biofísica del volumen de agua se realizó con el modelo InVEST, considerando variables como precipitación, evapotranspiración, cobertura vegetal y propiedades del suelo, además de clasificar las coberturas según su contribución al proceso de infiltración. Posteriormente, se aplicó el método de costo evitado con distintos escenarios de precio del agua para estimar el valor económico del servicio.

Los resultados indican que la cuenca produce aproximadamente 184.6 millones de m^3 de agua al año, siendo las coberturas forestales las que aportan la mayor parte del servicio de infiltración. La valoración económica arrojó un rango anual entre 922.9 y 1,845.9 millones de pesos, cifra que contrasta significativamente con los montos asignados en los programas de Pago por Servicios Ambientales. Esta diferencia evidencia la necesidad de fortalecer los instrumentos de política ambiental y reconocer de manera más justa la función hidrológica de las zonas de conservación.

En conclusión, la conservación de la cuenca de San Miguel Topilejo no solo representa una acción ambiental, sino también una estrategia fundamental para garantizar la sostenibilidad hídrica y económica de la Ciudad de México.

Palabras clave: servicios ecosistémicos hídricos, infiltración, recarga del acuífero, valoración económica, costo evitado, San Miguel Topilejo, Ciudad de México

1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México enfrenta una crisis hídrica que se agudiza con el paso del tiempo debido al crecimiento poblacional, la expansión urbana y los efectos del cambio climático. Cabe destacar que una de las principales fuentes de abastecimiento hídrico de la capital es el agua subterránea, la cual ha sido sobreexplotada para cubrir las necesidades de abastecimiento de la población la extracción intensiva mediante pozos ha provocado hundimientos en distintas zonas de la metrópoli (SACMEX, 2019).

Lo anterior muestra de manera general el papel fundamental que juega el agua subterránea en la vida de los habitantes de la Ciudad. No obstante, la mayor parte de las políticas públicas están orientadas a una pequeña proporción del problema de la crisis del agua como regulación de su uso o construcción de infraestructura para la extracción, aprovechamiento, potabilización o tratamiento.

Para que el agua subterránea se encuentre contenida en los acuíferos o cuencas, tuvo que haber pasado por diversos procesos del ciclo hidrológico, tales como la precipitación, evaporación, evapotranspiración y filtración. Estos componentes forman parte de los servicios ecosistémicos hídricos.

Dado que el proceso de recarga del acuífero es fundamental para la disponibilidad de agua subterránea, resulta necesario valorar económicamente los servicios ecosistémicos que permiten dicha recarga, particularmente la infiltración. La infiltración constituye uno de los procesos fundamentales para la recarga de los acuíferos. Esta función va a depender de la interacción de varios factores biofísicos como la temperatura, precipitación, clima, altitud, orografía, geología, tipo de suelo y por último de la vegetación. La cual se encuentra altamente vulnerable al cambio de uso de suelo.

El sur de Ciudad de México cuenta con zonas importantes de biodiversidad y recarga hídrica, caracterizadas por brindar una amplia variedad de servicios ecosistémicos hídricos a la población, gracias a los ecosistemas volcánicos que son favorecedores para la infiltración y por ende la recarga del acuífero. A pesar de ello, gran parte de las acciones orientadas al

aseguramiento hídrico de la capital continúan enfocándose principalmente en infraestructura y extracción de agua, dejando en segundo plano la conservación de los ecosistemas forestales que hacen posible la recarga del acuífero.

Como parte de los antecedentes hay una investigación previa denominada *"Identificación de áreas prioritarias para el servicio hídrico de infiltración en la Reserva Ecológica Comunitaria San Miguel Topilejo, CDMX"* se han establecido las zonas importantes a conservar por la alta tasa de infiltración de acuerdo con la vegetación, tipo de suelo y roca y orografía en la cuenca de la Reserva Ecológica Comunitaria San Miguel Topilejo. Sin embargo, para que estos resultados puedan servir como base en la elaboración de instrumentos de política ambiental, es necesario aplicar métricas económicas que permitan establecer un valor económico a la presencia de la vegetación en dicho lugar.

PROBLEMÁTICA

En la Ciudad de México hay pocos estudios donde se aborde y reconozca el valor económico de los servicios ecosistémicos hídricos implicados en el proceso de la infiltración y el costo económico de la producción de agua en zonas de recarga hídrica. La ausencia de una valoración económica que respalde la importancia ecosistémica de la cuenca de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo para los programas de manejo, la hace vulnerable a cambios de uso del suelo desmedidos.

JUSTIFICACIÓN

La asignación de un valor económico a los servicios ecosistémicos hídricos que intervienen en la recarga de acuíferos permite visibilizar su importancia, priorizar su conservación y respaldar la toma de decisiones en materia de gestión del agua y del territorio. Esta valoración traduce en términos monetarios la función ecológica de procesos como la infiltración y, al mismo tiempo, evidencia el costo real de perder vegetación en zonas críticas de recarga, lo que comprometería la disponibilidad futura del agua en gran parte de la Metrópoli.

Actualmente, estos servicios ecosistémicos son bienes naturales poco valorados o desconocidos por la ciudadanía, y por ende rara vez se consideran de forma prioritaria en las políticas de protección de bosques y del agua. Esta falta de reconocimiento aumenta la vulnerabilidad de las zonas de recarga ante presiones como el cambio de uso de suelo y la degradación ambiental.

Contar con una valoración económica sólida permitirá diseñar instrumentos concretos de gestión, como esquemas de pago por servicios ambientales, compensaciones por cambio de uso de suelo y programas de manejo sustentable de bosques. Además, esta investigación se vincula con objetivos y compromisos internacionales y nacionales, como el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), así como con las estrategias orientadas a la sustentabilidad hídrica de la Ciudad de México.

OBJETIVO GENERAL

- Valorar económicamente el servicio ecosistémico hídrico de infiltración asociado a la recarga del acuífero en la cuenca de la Reserva Ecológica de San Miguel Topilejo, Ciudad de México.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Estimar el valor económico de la producción anual de agua en función de las coberturas vegetales presentes en la cuenca.
- Analizar la variación del valor económico del servicio hídrico ante cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Origen de los servicios ecosistémicos

El término y el estudio de los servicios ecosistémicos comienza a emplearse a partir de la segunda mitad del siglo XX en las convenciones internacionales sobre el medio ambiente en respuesta a una creciente preocupación sobre el acelerado deterioro ambiental y sus impactos en el bienestar humano. Además, en las cumbres sobre medio ambiente, comienzan a reconocer que los ecosistémicas tienen un valor intrínseco que brindan beneficios importantes para la sociedad, como la regulación del clima, la polinización, la provisión de alimentos y la recarga de los acuíferos.

En la Conferencia sobre el Medio Humano de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) celebrada en Estocolmo en 1972 es donde se reconoció la necesidad de proteger los recursos naturales. Seguido en 1978 se publica el Informe Brundtland, donde se formula el concepto de desarrollo sostenible, como eje rector satisfacer las necesidades del presente en el

ámbito económico, ambiental y social sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades (World Commission on Environment and Development, 1987).

El valor de los ecosistemas cada vez iba tomando mayor importancia en las reuniones ambientales, tal fue el caso de la que se celebró en Río de Janeiro en 1992 denominada Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, donde se promovieron el uso de instrumentos económicos para la conservación de los recursos naturales y los ecosistemas. Más adelante se formalizó el término de servicios ecosistémicos por la evaluación de los Ecosistemas del Milenio, definiéndose como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas incluyendo los servicios de provisión, regulación, soporte y cultural. Seguido se implementó la iniciativa The Economics of Ecosystems and Biodiversity, basada en la necesidad de asignar un valor económico a los servicios ecosistémicos para procurar y promover su conservación (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

2.2 Servicios ecosistémicos

Las definiciones de los servicios ecosistémicos han sido abordadas desde distintas disciplinas generando diversas definiciones y enfoques teóricos. Por lo tanto, podemos definir a los servicios ecosistémicos como los beneficios que los ecosistemas proporcionan a la sociedad, permitiendo la supervivencia humana, y el bienestar económico, social y cultural (MEA, 2005).

Los servicios ecosistémicos los podemos clasificar en cuatro categorías de acuerdo con MEA (2025).

- Servicios de regulación: Procesos que regulan fenómenos naturales, tales como la regulación del clima, la polinización o la filtración de agua.
- Servicios de provisión: Productos obtenidos directamente de los ecosistemas como alimentos, medicamentos, agua dulce o madera.
- Servicios de soporte: Relacionados con funciones ecológicas que hacen posible la existencia de los demás servicios, como el ciclo de nutrientes, ciclo hidrológico o formación de suelos.
- Servicios culturales: Son los beneficios intangibles que se relacionan con la recreación, patrimonio natural, el valor espiritual y cultural de los ecosistemas.

El enfoque de valoración económica promueve la visibilización de los servicios ecosistémicos en la toma de decisiones al asignarles un valor monetario que permita integrarlos en planes de gestión ambiental y políticas públicas.

2.3 Servicios ecosistémicos hídricos

Los servicios ecosistémicos hídricos forman parte de una categoría específica de servicios asociados al funcionamiento del ciclo del agua y son todos aquellos beneficios y recursos que proveen los ecosistemas en relación con el ciclo del agua los cuales van a permitir su almacenamiento, purificación, disponibilidad, consumo y uso para la actividades y sobrevivencia humana (Cervantes et al., 2021).

Los servicios ecosistémicos en torno al agua son esenciales para la regulación de escorrentías, prevención de inundaciones, disponibilidad hídrica subterránea (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Así mismo pueden ser considerados como la capacidad que tienen los ecosistemas para hacer el acopio del agua de lluvia y liberar el recurso hídrico en temporada seca (Cervantes et al., 2021).

Dentro de los servicios ecosistémicos, los hídricos ocupan un papel fundamental, debido a que garantizan el acceso al agua en cantidad y calidad necesaria para diferentes usos humanos y ecológicos. Algunos ejemplos son:

- Producción de agua (precipitación, escorrentía e infiltración)
- Filtración y purificación por medio de la vegetación y los suelos
- La infiltración y recarga de acuíferos
- Los ecosistemas contribuyen a disminuir inundaciones, captar agua en temporada de lluvias y liberarla gradualmente en períodos de sequía.

Por lo tanto, el cuidado de los servicios ecosistémicos hídricos proporcionados por el Suelo de Conservación son esenciales en zonas conurbadas y urbanas como la Ciudad de México, donde la sobreexplotación del acuífero del Valle de México (Figura 1) es un problema persistente que se agudiza con el pasar del tiempo.

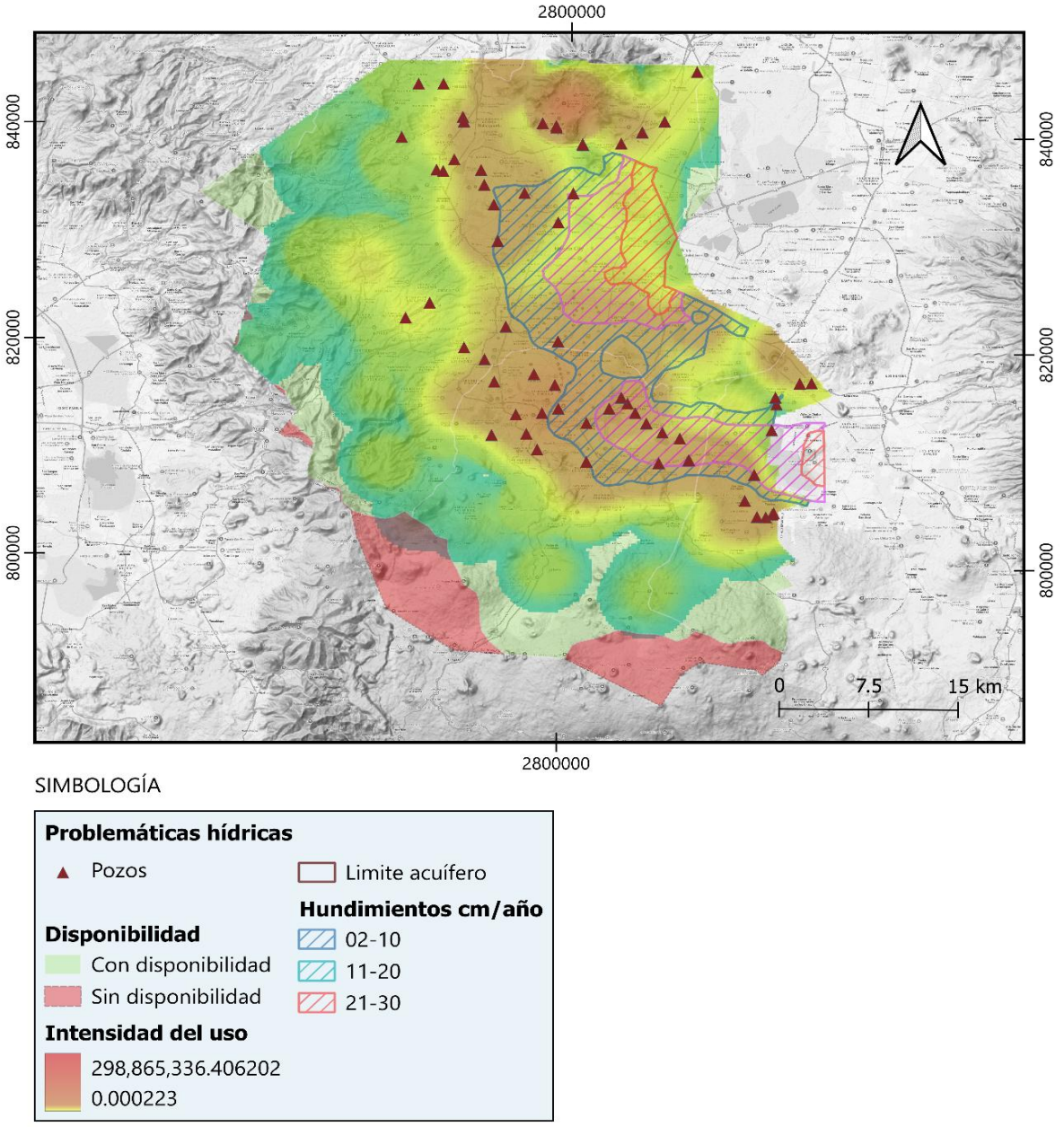

Figura 1. Problemáticas hídricas en el acuífero Metropolitano del Valle de México. Fuente: SINA, 2024

Por ello, la conservación de los ecosistemas forestales en zonas periurbanas adquiere relevancia no solo desde un punto de vista ecológico, sino también económico al contribuir a la sostenibilidad del sistema de abastecimiento de agua.

2.4 Infiltración y recarga del acuífero

Los ecosistemas boscosos desempeñan un rol importante en la regulación hidrológica porque promueven la infiltración del agua, reduciendo la escorrentía superficial, facilitando la recarga del acuífero.

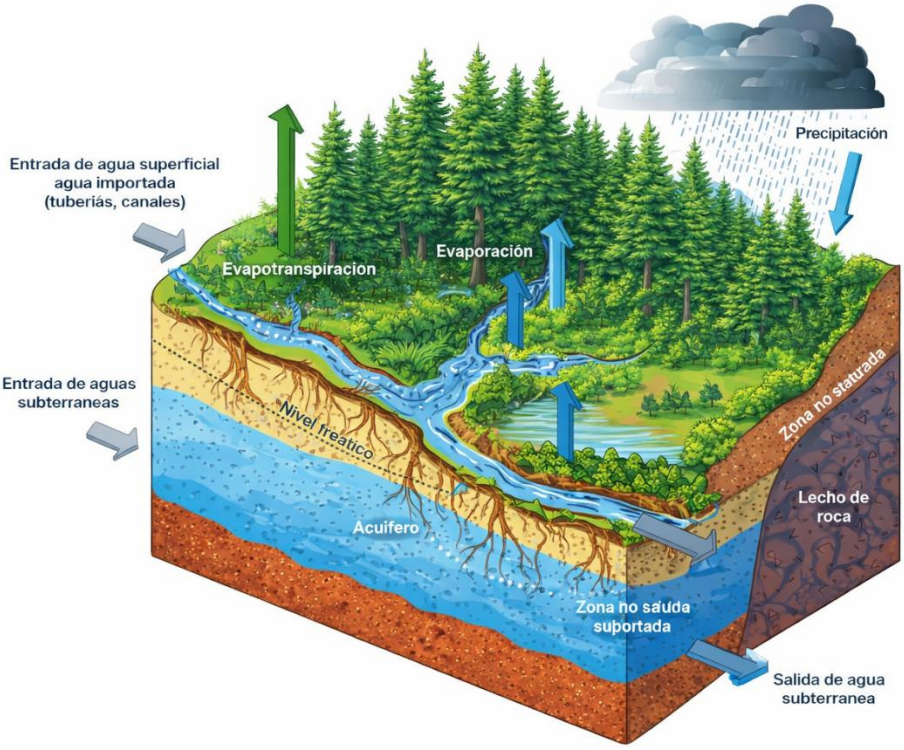

Figura 2. Ciclo hidrológico y proceso de infiltración hacia el acuífero. Fuente: Adaptado de CONAGUA (2016).

Lo anterior, no sería posible sin la presencia de la cobertura vegetal, raíces, hojarasca que mejoran la estructura del suelo, aumentando a su vez la capacidad de retención e infiltración del agua de las precipitaciones. Siendo los bosques lugares estratégicos como zonas de recarga hídrica, en particular en las regiones montañosas (Bruijnzeel, 2004).

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua de las precipitaciones penetra en el suelo y recarga los acuíferos subterráneos (Figura 2) dependiendo de la interacción de varios factores como:

- Biofísicos: temperatura, precipitación, evapotranspiración, altitud, orografía, pendiente, tipo de suelo y geología.
- Bióticos: tipos de vegetación, debido a que facilita la retención de la humedad y penetración del agua.
- Antrópicos: el cambio de uso de suelo y la urbanización disminuyen la capacidad de infiltración y aumentan la escorrentía superficial.

Por lo tanto, uno de los servicios ecosistémicos hídricos más relevantes es la infiltración en los ecosistemas de montañas porque brindan de agua potable a más del 50% de la población mundial (Cervantes et al., 2021). A pesar de su relevancia, los estudios sobre los ecosistemas de montaña y la provisión de los servicios ecosistémicos hídricos siguen siendo escasos pese a ser esenciales para poder llevar a cabo acciones de conservación y planificación en áreas prioritarias para el aporte hídrico.

La conservación de los servicios ecosistémicos hídricos en el caso de la Ciudad de México es de vital importancia porque abastecen de agua a los pobladores por medio de las corrientes superficiales que se generan en temporadas de lluvias en la Sierra de las Cruces y al Sur de la Ciudad donde hay una elevada infiltración (Palma et al.,1999).

Algunos de los estudios hidrológicos (INEGI, 2020; CONAGUA, 2021; Carabias et al., 2017) demuestran que el volumen de infiltración anual va a variar significativamente según el tipo de cobertura vegetal. Como referencia están las zonas federales conservadas del Ajusco, vecino de Topilejo, donde los valores promedio de infiltración son de 1,800 y 2,500 m3/ha/año. Con base en estos estudios, se puede observar que la capacidad de infiltración varía de manera importante según el tipo de cobertura vegetal, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Capacidad de infiltración de acuerdo con el tipo de vegetación

Tipo de cobertura	Infiltración promedio	Rango (m^3/ha/año)
Bosque conservado (pino-encino, oyamel)	Alta	1,800 – 2,500 m^3/ha/año
Bosque degradado	Media	800 – 1,500 m^3/ha/año
Pastizal o agrícola	Baja	300 – 800 m^3/ha/año
Zona urbana o sellada	Muy baja	0 – 100 m^3/ha/año

En el caso particular de Topilejo, que conserva amplias zonas boscosas con pendientes favorables y suelos permeables, se considera representativo un valor promedio de 2,000 m^3/ha/año de infiltración (Carabias et al., 2017; INEGI, 2020).

2.5 Instrumentos económicos ambientales: Pago por Servicios Ambientales

2.5.1 Antecedentes internacionales

Como parte de las acciones que ha tomado el gobierno y actores sociales ante el acelerado deterioro de los territorios en las periferias de los bosques con las zonas urbanas se basan en la formulación y aplicación de programas de política ambiental que tienen la intención de preservar y conservar los recursos naturales y ecosistemas (Moreno y Perevochtchikova, 2021).

El origen de los programas e instrumentos de política ambiental surgen de acuerdos internacionales, en especial del Informe Brundtland en 1987 y la Conferencia de Río de Janeiro en 1992, donde se reconoció que los servicios ecosistémicos (biodiversidad, agua potable, captura de carbono etc.) son limitados y requieren de mecanismos de gestión que incentiven su conservación. Para el cumplimento de dichos objetivos, se promovió el uso de herramientas basadas en otorgar incentivos o estímulos económicos o en especie por parte de la parte interesada (Moreno y Perevochtchikova, 2021).

Parte de los apoyos que se brindan para la restauración, preservación y conservación de los bosques y ecosistemas en general, pueden provenir de entidades privadas, gubernamentales

a colectivos, organizaciones o actores sociales para el desarrollo de proyectos sustentables. También puede haber recompensas por preservar alguna especie en peligro de extinción. Así mismo, se brindan permisos para promover actividades productivas como la producción orgánica de alimentos o actividades recreativas.

Uno de los esquemas de conservación más populares son los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) considerados un enfoque de conservación que busca generar incentivos financieros para los propietarios o poseedores de tierras que mantienen o mejoran la provisión de servicios ecosistémicos. De acuerdo con Wunder (2005), un PSA se define como una transacción voluntaria en la que un servicio ambiental es comprado por al menos un beneficiario, siempre y cuando el proveedor garantice su mantenimiento bajo condiciones previamente establecidas.

El esquema de PSA reconoce que diversos servicios ecosistémicos no son valorados adecuadamente por el mercado, lo que puede provocar su acelerada degradación. Por ello, establece compensaciones económicas a cambio de acciones de conservación, restauración y manejo sostenible.

El primer país en América latina donde se implementó el primer PSA fue Costa Rica, por medio del otorgamiento de incentivos económicos a propietarios de los bosques por conservarlos o reforestarlos, el financiamiento provenía de los impuestos aplicados a los combustibles fósiles y apoyo internacional. Posteriormente, los demás países de Latinoamérica fueron desarrollando esquemas piloto para la conservación de cuencas hidrográficas, corredores de biodiversidad y bosques (Winder 2005).

Los PSA tenían principios básicos de operación como:

- Condicionalidad: Si se llevaron a cabo acciones de conservación o manejo del servicio ecosistémico se realiza el pago, de otra manera puede cancelarse.
- Voluntariedad: Los acuerdos serán el resultado de la negociación, más no de la imposición. Además, los propietarios de las tierras deciden integrarse al programa por voluntad propia y comprometerse e involucrarse con las prácticas de conservación.
- Servicio bien definido: Agua, belleza escénica, biodiversidad, captura de carbono.
- Existencia de un comprador: Parte interesada en el bien, dispuesta a pagar.
- Existencia de un proveedor: Propietarios de tierras o comunidades

2.5.2 Implementación en México

Concretamente en México, el esquema de PSA comenzó a tomar rumbo por medio de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), el cual se basó en la conservación de servicios ambientales hidrológicos, por medio del reconocimiento de la importancia que tienen los bosques, vegetación de las cuencas y zonas de recarga para el ciclo hidrológico. Sin embargo, los montos de compensación asignados más que valorar económicamente el servicio, se basan en criterios administrativos y presupuestales (CONAFOR, 2021).

Más adelante el esquema de Pago por Servicios Ambientales (PSA) se focalizó en temas del agua en 2003, denominándose Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), en respuesta a la acelerada tasa de deforestación de los bosques y la necesidad de proteger los sitios prioritarios para la recarga de acuíferos que proveen de agua a la población. Por medio del PSAH el gobierno federal brinda incentivos monetarios a los dueños de las tierras participantes a cambio de proteger los recursos forestales que se encuentran en las cuencas hidrográficas (Muñoz et al., 2008).

A partir de la creación de los PSA y PSAH en México, la tasa de deforestación o cambio de uso de suelo ha disminuido gracias a la contribución de las zonas que participan en este programa. Sin embargo, el éxito del programa lo determina la zona o región y cantidad de los incentivos ofrecidos, además del estado de deterioro en que se encuentre la zona.

2.5.3 Programas de PSA en la zona de estudio

En el caso de la Ciudad de México, particularmente las zonas boscosas del Suelo de Conservación como las regiones de San Miguel Topilejo y el Ajusco han sido reconocidas importantes y estratégicas para la recarga del acuífero del Valle de México (Carabias et al.,2017). A pesar de su importancia, los montos monetarios que se han asignado por la conservación de los servicios hidrológicos no corresponden a su valor real, por lo que requieren una valoración a escala local.

Los instrumentos económicos enfocados a la conservación de los servicios ecosistémicos han evolucionado en México durante las últimas décadas. La siguiente Figura 3 muestra una síntesis de los principales programas que se han llevado a cabo a nivel nacional por medio de la incorporación de incentivos económicos para la conservación de ecosistemas estratégicos.

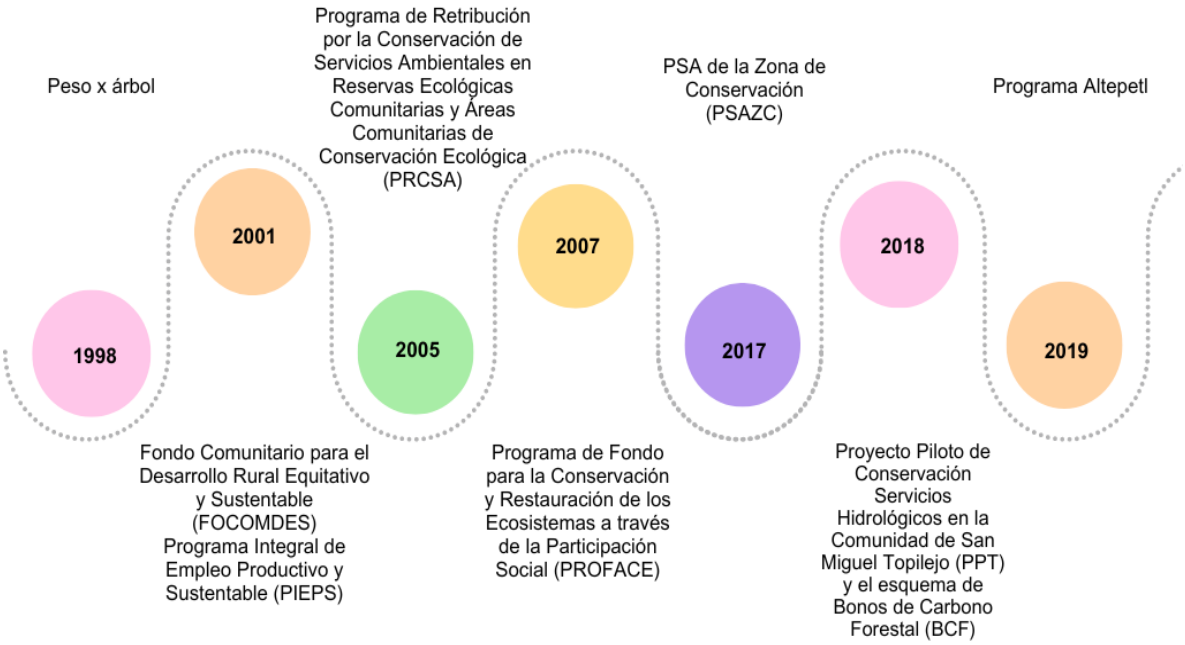

Figura 3. Evolución de los programas de Pago por Servicios Ambientales en México.

2.5.4 Programas vigentes de PSA en la cuenca

- Programa de Pago por Servicios Ambientales de la CONAFOR (2024-2025), que otorga incentivos a propietarios forestales en cuencas prioritarias con montos promedio entre $300 y $800 pesos por hectárea al año (CONAFOR, 2022). Cabe señalar que el PSA no paga como tal el servicio de infiltración, sino la cobertura vegetal en general que promueve ese servicio.
- Algunas de las actividades a las cuales se destina presupuesto, son las siguientes:
- Brigadas y monitoreo comunitario
- Equipo de seguridad básica
- Herramientas (machetes, palas, bombas de aspersión, etc.)
- Patrullajes para disminuir y evitar la tala clandestina (alta incidencia)
- Monitoreo fitosanitario
- Limpieza y poda de arbolado enfermo
- Construcción de brechas cortafuego
- Talleres de educación ambiental en la comunidad
- Asambleas

Informes técnicos

- Pagos a brigadistas ($400-600/ha/año)

Las actividades mencionadas tienen un costo total aproximado de 1,150-2,050 pesos por hectárea al año.

- Programa Altépetl Bienestar implementado por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), dirigido al Suelo de Conservación de la CDMX, considerando a la comunidad de San Miguel Topilejo, donde en años recientes se han otorgado apoyos destinados a la conservación de servicios hidrológicos y forestales (SEDEMA, 2023).
- Convenio Alcaldía Tlalpan-CONAFOR (2025), mediante el cual se implementó un esquema local de PSA con una inversión de 7.7 millones de pesos para conservar más de mil hectáreas de bosques importantes para el servicio hídrico de infiltración y recarga el acuífero (Tlalpan, 2025).

El área natural protegida donde se encuentra la cuenca de San Miguel Topilejo no cuenta con algún apoyo económico o cooperación internacional específica para el servicio hídrico de infiltración o pago por servicios ambientales. Ahora bien, si hay participación de ONG´s o esfuerzos internacionales que influyen indirectamente en el cuidado de los recursos naturales de los bosques y por ende inciden en la recarga del acuífero. Algunos de estos apoyos provienen de las siguientes organizaciones:

- The Nature Conservancy: Es una organización internacional que participa de manera activa en temas relacionados con la conservación de cuencas y restauración ecológica. En México tiene diversos proyectos enfocados en el manejo agroecológico, restauración del bosque de coníferas, capacitación comunitaria y conservación y gestión de cuencas hidrológicas prioritarias focalizados en la zona de la Sierra Chichinautzin (TNC,2018). No obstante, los proyectos no mejoran la recarga del acuífero o la infiltración de manera directa, pero la restauración de la cobertura vegetal sí promueve la retención de agua para la infiltración.
- Isla Urbana es un proyecto enfocado a la captación de agua de lluvia por medio de la instalación de sistemas que resguardan el agua de lluvia en viviendas y escuelas con la finalidad de no depender del agua de la red y la accesibilidad al recurso hídrico (Isla

Urbana & Oxfam, 2020). Si bien, no es un proyecto destinado a la infiltración, reduce la demanda del agua subterránea, conservando al acuífero generando condiciones para que lleve a cabo su recarga natural.

- Neolpharma es una empresa farmacéutica que lleva a cabo jornadas de reforestación de los bosques de San Miguel Topilejo como parte de la responsabilidad social empresarial, desarrollando actividades de plantación de especies nativas, monitoreo de las especies de la reforestación y mantenimiento (Neolpharma, 2023). No obstante, estas actividades no están relacionadas con instrumentos de pago por servicios hídricos, ayudan a beneficiar de manera indirecta la continuación del ciclo hidrológico con el aumento y restauración de la cobertura vegetal, en zonas prioritarias para la recarga del acuífero.
- El PSA de la CONAFOR opera compensando a las comunidades y ejidos por conservar la cobertura forestal, áreas importantes para la infiltración y recarga del acuífero. Tales pagos fluctúan entre 300 a 1,500 pesos por hectárea al año.

En resumen, el único programa que actúa de manera directa en el pago por servicios ambientales, entre ellos el servicio hidrológico es el Programa Federal de Pagos por Servicios Ambientales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2021).

2.6 Valoración económica de los servicios ecosistémicos hídricos

La valoración económica de los servicios ecosistémicos hidrológicos e infiltración hídrica ha ido tomando mayor relevancia en la literatura internacional y a su vez a nivel nacional ha ido creciendo poco a poco con el paso del tiempo y necesidades de conservar los recursos hídricos. Los siguientes estudios son parteaguas importantes para la comprensión de los métodos empleados en otros estudios, los valores económicos calculados y la justificación y decisión de aplicar la metodología de costo evitado para ecosistemas de bosques de montaña como lo es la cuenca de San Miguel Topilejo.

En el ámbito internacional, la literatura que podemos encontrar sobre la valoración económica del agua y servicios hidrológicos son los realizados por Brouwer & Pearce (2005), donde hicieron un análisis de costo-beneficio y la metodología de costo evitado que les permitió documentar el valor real de los procesos ecológicos que sostienen el suministro de agua. Otro ejemplo sobre el valor económico de la infiltración fue desarrollado por Hein (2007), el cual realizó una valoración monetaria de la infiltración en cuencas europeas mediante costos de

reposición y costos evitados, demostrando que el costo de la recarga natural está infravalorado en comparación con el costo de proveer agua con infraestructura artificial.

Un artículo llevado por Mastrorillo et al. 2018, destaca cómo el uso del suelo afecta los procesos eco hidrológicos provocando inundaciones y sequías en la región de Calabria Italia. El estudio se basó en un análisis cuantitativo estimando el valor económico de los servicios ecosistémicos por medio del método del costo evitado. Demostrando cómo las variaciones en el estado de las áreas forestales tienen una fuerte influencia considerable en el balance hídrico y por ende en el valor económico.

Un importante análisis relacionado con la valoración del agua superficial y subterránea de una cuenca en Canadá es el que llevó a cabo Aziz et al. (2025). Destacando la importancia del agua subterránea y su papel en temporadas de sequías además de proponer una metodología que mejore su gestión.

En Latinoamérica hay estudios importantes para vincular el valor de la infiltración con los esquemas de PSAH como el de Pagiola (2008) y de Rojas y Aylward (2003), los cuales demostraron como la conservación de los bosques de montañas y tropicales son más rentables que el incremento de las actividades agropecuarias, sobre todo si el agua de las grandes ciudades depende fuertemente de servicio de infiltración y recarga. Lo anterior sentó las bases conceptuales y metodológicas para que fueran adoptadas en países como México, Costa Rica, Brasil, Ecuador y Colombia

En el caso de México cada vez hay más investigaciones sobre la valoración económica de la infiltración y otros servicios hidrológicos, particularmente en cuencas forestales. Tal es el caso de un trabajo importante que valora el servicio hídrico de infiltración es el que realizó Hernández Reyes (2018) basado en una valoración económica sobre la infiltración en la Sierra Madre de Chiapas por medio del método de costo evitado. Estimando el volumen de infiltración en función de la cobertura forestal, permitiendo asignar un valor económico a este servicio tomando como referencia el precio unitario del agua. Estos resultados permitieron destacar la importancia que tiene la conservación del bosque para garantizar la recarga hídrica.

Los estudios sobre la infiltración y disponibilidad de agua subterránea en México han ido aumentando con el tiempo, tal ejemplo es el desarrollado por Sosa y colaboradores (2024), donde

cuantificaron el valor de los servicios ecosistémicos derivados del agua subterránea en una región árida del noreste de México. Utilizaron métodos de mercado simulados como el de costo evitado y valoración contingente. Las estimaciones económicas que se llevaron a cabo en este estudio reflejan un valor total de 883.5 dólares anuales, mientras que el valor unitario por volumen es 0.43 dólares por m^3 equivalente a 7.3 pesos mexicanos por m^3.

La mayor parte de la literatura disponible sobre la valoración económica de los servicios ecosistémicos hídricos en México y particularmente en el Suelo de Conservación o conexión con la Sierra Chichinautizin, se han enfocado en resaltar la importancia que tienen estas zonas para el abastecimiento hídrico de la Ciudad de México sin establecer un valor monetario por unidades del área de manera explícita.

Los estudios que se han realizado alrededor del área natural de San Miguel Topilejo, se enfocan mayormente a la cuantificación y análisis biofísico de la infiltración o cuestiones socioeconómicas en torno al agua, como el estudio realizado en el Ajusco por Perevochtchikova y Rojo (2015), el cual se basa en el ámbito socioeconómico por medio de encuestas realizadas a miembros de la comunidad sobre la percepción que tienen acerca del esquema de PSA, resultando que los pagos que se otorgan a los bosques, no son suficientes para su conservación y mantenimiento.

Por otro lado, hay un estudio que se realizó en las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Toluca y Cuernavaca realizado por López y Mesa (2017). El cual se basó en estimar los costos de reemplazar el agua subterránea, de los acuíferos sobreexplotados, donde se diseñaron alternativas que combinan medidas de reducción de las fugas en la Ciudad de México, llegando a la conclusión de que por cada dólar que se invierta en la reparación de fugas, se reducen los costos de reemplazo entre 1.9 a 8.4 dólares, generando un costo total de 0.06 dólares por metro cúbico.

Por otra parte, hay una tesis de maestría enfocada a la valoración económica de los servicios ambientales hidrológicos San Miguel Topilejo y Santo Tomas Ajusco (Martínez Jiménez, 2015). Se desarrolla en zonas aledañas a la zona de estudio de San Miguel Topilejo. En esta publicación se realizó un ejercicio de valoración económica a los habitantes de dichas comunidades por medio de la aplicación de cuestionarios empleando la valoración contingente, además del método de costo de oportunidad para valorar económicamente los servicios

ambientales que brinda el bosque a la Ciudad de México, llegando a la conclusión de que las cifras propuestas por la comunidad (5,298/ha al año), son superiores a las establecidas por la Comisión Nacional Forestal en su esquema de Pagos por Servicios Ambientales (360$/ha/año).

Dentro de los estudios que han calculado el valor económico del servicio ecosistémico de infiltración hídrica basados en el valor económico del agua se encuentra el libro de Valoración de servicios ecosistémicos en Áreas Naturales Protegidas Federales de México, donde se llevó a cabo la estimación del valor de la infiltración multiplicando el volumen infiltrado por el precio aproximado del agua en la Ciudad de México que es de 5 pesos por metro cúbico. Lo anterior se estimó a través del costo monetario de la extracción de agua subterránea (Rodríguez Tapia y Revollo Fernández, 2015).

2.7 Métodos de valoración económica de los servicios ecosistémicos hídricos

La asignación de un valor monetario a los servicios ecosistémicos se puede abordar de distintos enfoques dependiendo del bien o beneficio ambiental o social que se analice. En el caso de los servicios ecosistémicos hídricos, los métodos más utilizados se basan en precios de mercado, costos evitados, valoración contingente, costos de oportunidad y precios hedónicos (Groot et al.,2012; TEEB, 2010).

El cuadro 2 hace una síntesis de los principales métodos, su aplicación en servicios hídricos, ventajas y limitaciones:

Método	**Aplicación y servicios hídricos**	**Ventajas**	**Limitantes**
Costo evitado	Valora infiltración y recarga de acuíferos según costo de provisión artificial de agua	Reconoce funciones naturales de los ecosistemas y evita inversiones elevadas en infraestructura.	Requiere estimaciones confiables de costos futuros y escenarios de sustitución
Valoración contingente	Por medio de encuestas se conoce la disposición a pagar por conservar o mejorar servicios hídricos.	Es útil para diseñar tarifas diferenciales y esquemas de pago voluntario	Requiere levantamientos de campo; resultados sensibles al diseño de la encuesta.
Costo de	Calcula ingresos	Evidencia presiones	Su empleo es

oportunidad	perdidos por conservar ecosistemas en lugar de destinarlos a la agricultura o urbanización	económicas locales y justifica compensaciones	complejo en contextos con múltiples usos y valores sociales no monetarios.
Precios hedónicos	Relaciona la disponibilidad de agua subterránea con los precios de la productividad agrícola	Captura efectos indirectos en mercados inmobiliarios y agrícolas	Requiere bases de datos robustas; está limitado en zonas periurbanas con mercados informales.
Transferencia de beneficios	Aplica valores de estudios previos en contextos similares.	Rápida y económica; útil cuando no hay datos locales	Depende de la similitud entre el estudio original y el área analizada.
Costo de reposición	Sustituye recarga natural con obras como presas de infiltración o sistemas de captación de agua de lluvia	Permite dimensionar el valor en términos de inversión necesaria	Se puede sobrestimar si no se consideran externalidades o eficiencias de las obras

Cuadro 2. Métodos de valoración económica de servicios ecosistémicos hídricos

La anterior, muestra de manera resumida cada enfoque responde a una lógica de valoración. A continuación, se presentan los métodos más relevantes y su relación con los servicios ecosistémicos hídricos:

Costo evitado

El método de costo evitado permite conocer el valor económico de un servicio ecosistémico a partir de los costos que la sociedad estaría dispuesta a pagar si dicho servicio no existiera o fuera necesario sustituirlo por medio de infraestructura o tecnología. Reconoce que los ecosistemas brindan funciones naturales que, en ausencia de estos algunos tendrían que ser reemplazadas a través de inversiones económicas para garantizar la provisión de los servicios ambientales (Rodríguez Tapia y Revollo Fernández, 2015).

Método del costo de reposición

Permite evaluar el costo de reponer la recarga natural por medio de infraestructura que genere funciones similares como: pozos de inyección de para recarga artificial, presas de infiltración y captación, infraestructura o sistemas de almacenamiento de agua de lluvia etc. Dicho método es útil para dimensionar el valor del servicio en términos de la inversión requerida.

Costo de oportunidad

La estimación del valor económico del servicio hídrico está en función del ingreso que una comunidad o ejido deja de obtener al conservar el bosque en lugar de darle otros usos que impactan en mayor proporción el medio ambiente por cambio de uso de suelo como la agricultura, ganadería o urbanización. Dicha metodología ha sido empleada en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México Carabias et al. (2017) para dimensionar las presiones económicas que enfrentan las comunidades locales y justificar la necesidad de mecanismos de compensación.

Precios hedónicos

Valora la infiltración indirectamente a través de su influencia en variables económicas como la disponibilidad de agua, la productividad agrícola o los precios de la tierra. Si bien no ha sido ampliamente utilizado en el contexto de Topilejo o demás zonas forestales periurbanas debido a la falta de bases de datos formales y a la complejidad del mercado de tierras en el Suelo de Conservación, sí existen ejemplos en cuencas del Valle de Bravo, en investigaciones de la Universidad Autónoma del Estado de México y en estudios latinoamericanos donde la recarga del acuífero influye en el precio de bienes inmobiliarios.

Valoración contingente (disposición a pagar)

Se basa en encuestas sobre la disposición a pagar de los usuarios, se ha utilizado en investigaciones relacionadas con la disponibilidad hídrica urbana, especialmente en estudios impulsados por el Fondo de Agua de la Ciudad de México y organizaciones como TNC (TNC, 2018). Si bien este método es útil para diseñar tarifas diferenciales o esquemas de pago voluntario, requiere levantamientos de campo que no forman parte del alcance de la presente investigación.

Método de transferencia de beneficios

Basado en la aplicación de valores económicos calculados en estudios previos. Este enfoque es de utilidad cuando no hay datos para llevar a cabo alguna valoración primaria como el servicio ecosistémico hídrico de infiltración. Lo cual permite hacer una aproximación al costo monetario de los servicios a partir de investigaciones que se hayan realizado en un entorno con características semejantes (Rodríguez Tapia y Revollo Fernández, 2015).

Modelos hidrológicos

Por último, hay diversos estudios donde han utilizado modelos hidrológicos como SWAT, WEAP e InVEST (Brouwer & Pearce, 2005), (Hein, 2007), (Ortiz & Pérez, 2015) permitiendo calcular el volumen de infiltración y la recarga del acuífero en función de diferentes escenarios de cambio de uso de suelo por deforestación, sequías crecimiento de la población o urbanización. Una vez contando con esos datos hídricos, se combinan con métodos económicos como el costo evitado o costo de reposición para obtener una valoración monetaria de los servicios hídricos.

2.8 Estado del arte

Con la finalidad de identificar los principales enfoques metodológicos y rangos de valoración económica de los recursos hídricos, se hizo una revisión de diversos estudios a nivel nacional e internacional. En el Cuadro 3 se presenta una síntesis de investigaciones relevantes que abordan la valoración de la infiltración, recarga de acuíferos y esquemas de pago por servicios ambientales.

Autor y año	**Lugar de estudio**	**Servicio hídrico valorado**	**Método de valoración**	**Valor monetario/equivalencia en pesos mexicanos**
Perevochtchikova y Rojo (2015)	Ajusco, CDMX	PSA hidrológico	Análisis socioeconómico	Superior a lo establecido por PSA

López y Mesa (2017).	Centro de México	Recarga del acuífero	Costo evitado	0.6 dólares/m3 ≈ 10.61 MXN/ m^3
Martínez Jiménez (2015).	San Miguel y Santo Tomás Ajusco (CDMX).	Suministro del agua y regulación del ciclo hídrico.	Valoración contingente y de costo de oportunidad.	9,455/ha en el año de inicio y 5,298/ha los años siguientes
Mastrorilli et al,. 2018	Cuencas al sur de Italia	Servicios hidrológicos: provisión de agua, regulación de flujo y erosión.	Costo evitado	0.71 €/m^3 ≈ 8.34 MXN/m^3
Aziz et al.,2025	Ontario Canadá	Agua superficial y subterránea (infiltración).	Modelación hidrogeológica	CAD 0.26/m^3 ≈ 3.36 MXN/m^3
Hernández Reyes, 2018	Sierra Madre de Chiapas	Infiltración	Costo evitado	8 MXN/m^3
Sosa et al.,2024	Norte de México	Agua subterránea	Costo evitado Valoración contingente	7.3 MXN/ m^3

Rodríguez Tapia y Revollo Fernadez, 2015	Áreas Naturales Protegidas, México	Agua subterránea e infiltración	Costo evitado	5 MXN/ m^3

Cuadro 3.. Estudios de valoración económica de los servicios hídricos y Pago por Servicios ambientales.

Se puede apreciar que la mayoría de los estudios emplean el método de costo evitado para estimar el costo de los servicios hídricos, en especial los que están asociados con la infiltración y recarga del acuífero. Asimismo, los valores reportados varían dependiendo del contexto geográfico, disponibilidad de datos y metodología utilizados. En el caso de México, todavía son limitados los estudios que asignan un valor monetario directo por unidad de superficie, lo que refuerza la necesidad de realizar investigaciones a escala local.

3. METODOLOGÍA

3.1 Enfoque metodológico

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con apoyo cualitativo, integrando herramientas de análisis espacial, modelación hidrológica y valoración económica.
La valoración económica de los servicios ecosistémicos hídricos es una herramienta importante para documentar en términos monetarios los beneficios que generan los procesos biofísicos como la infiltración natural y recarga del acuífero. Este enfoque es relevante en contextos urbanizados como el de la Ciudad de México, donde la expansión urbana y el cambio de uso de suelo representan un escenario crítico para la seguridad hídrica nacional.

3.2 Etapas metodológicas

La investigación se desarrolló en cinco etapas:

i) Caracterización biofísica de la cuenca

La cuenca hidrológica de San Miguel Topilejo está localizada al sur de la Alcaldía Tlalpan (Figura 4). Geográficamente en las coordenadas 19°09' y 19°15' de latitud norte y 99°10' y 99°17' de longitud oeste (INEGI, 2020).

El gradiente altitudinal oscila entre los 1890 y 3450 m.s.n.m. La temperatura promedio anual es de 14°C y el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano con una precipitación promedio anual que varía entre 800 a 1,200 mm (INEGI,2020).

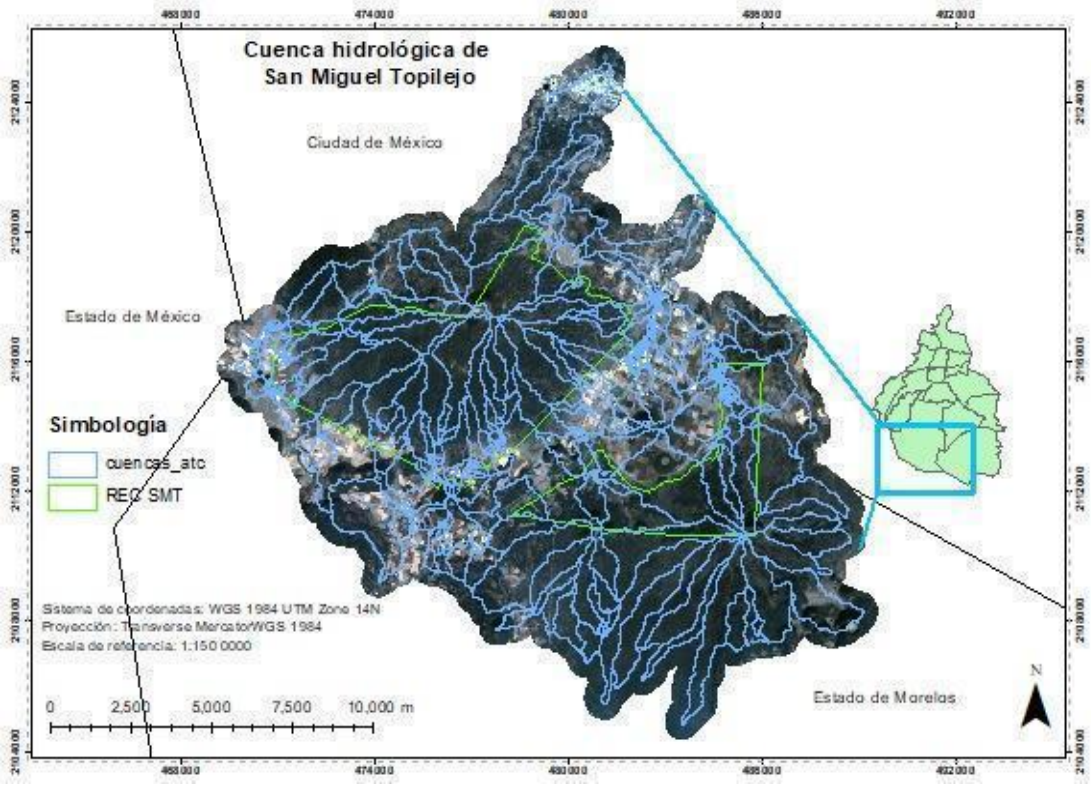

Figura 4. Localización de la cuenca hidrológica de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Ciudad de México. Elaboración propia.

La cuenca hidrológica comprende la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo y forma parte del Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

El Suelo de Conservación donde se ubica la cuenca hidrológica abarca el 58% del territorio de la Ciudad de México (Figura 5), el cual presenta una amplia provisión de servicios ecosistémicos como la captación de carbono, regulación del clima y los relacionados con la

regulación del ciclo hidrológico como la captación de agua de lluvia a través de los bosques para la recarga del acuífero (SEDEMA, 2019).

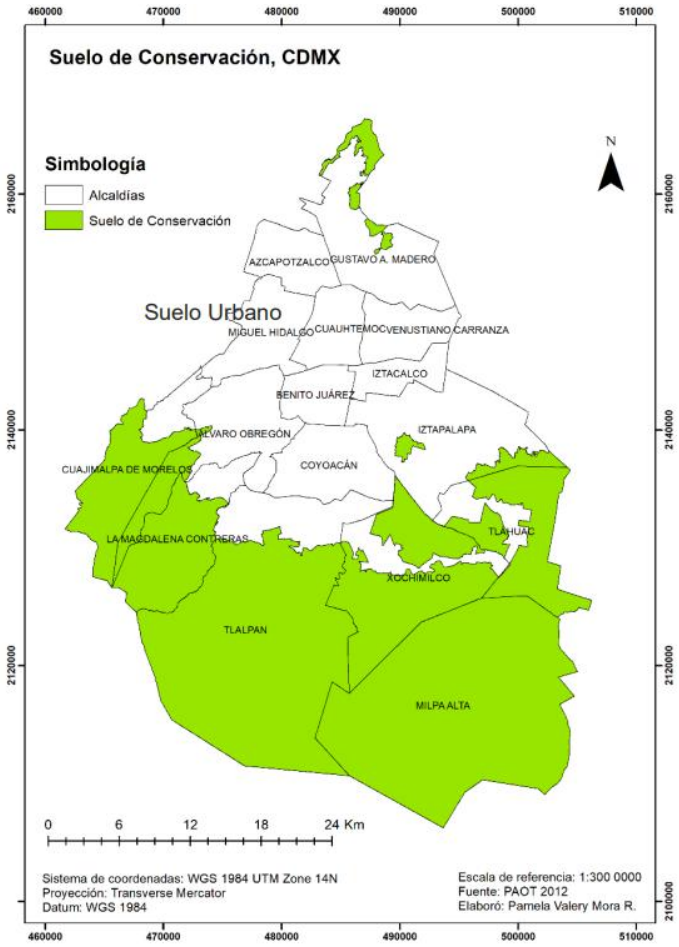

Figura 5. Suelo de conservación CDMX Fuente: Elaboración propia con datos del Atlas Geográfico del Suelo de Conservación PAOT (2012)

Otro aspecto importante de la zona de estudio es que la geología perteneciente a la Sierra Chichinautizin, se caracteriza por la presencia de material volcánico como basaltos, andesitas y depósitos piroclásticos altamente permeables, además la topografía del sitio se caracteriza por presentar un relieve montañoso asociado a los ecosistemas de montaña, generando variaciones importantes en las pendientes del terreno, desde las que tienen una inclinación moderada a pronunciada (Figura 6) promoviendo el proceso de infiltración de agua de lluvia al subsuelo.

Así mismo, junto con las características de la vegetación, hacen que esta zona funcione como una zona importante de recarga del acuífero del Valle de México, el cual forma parte de una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para la Ciudad de México y zonas conurbadas (CONAGUA, 2021).

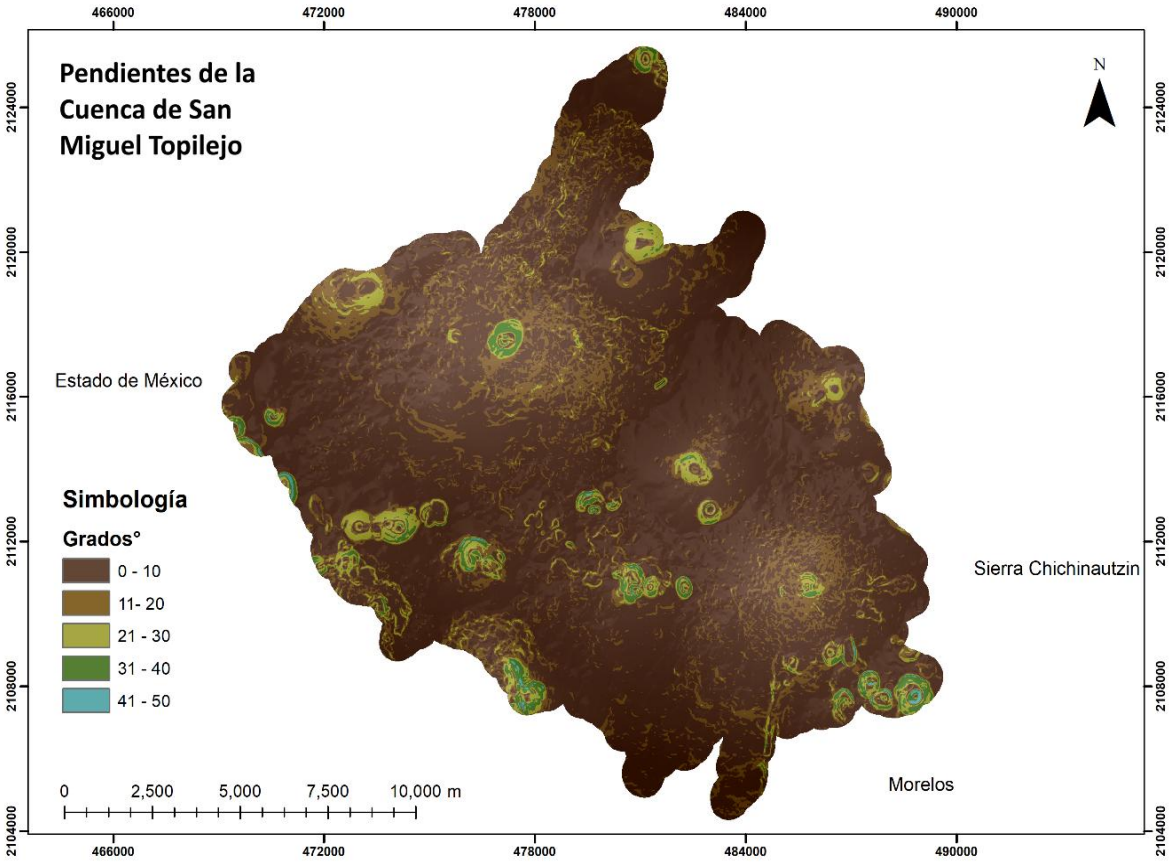

Figura 6. Distribución espacial de las pendientes del terreno en la cuenca de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Ciudad de México. Elaboración propia.

La vegetación del lugar presenta ecosistemas de bosque templado el cual presenta dos especies predominantes de coníferas tales como pino (*Pinus spp*.), encino (*Quercus spp*), y oyamel (*Abies religiosa*). La vegetación mencionada ayuda a la infiltración de agua de las precipitaciones por la estructura del dosel, presencia de raíces que disminuyen la erosión del suelo, así como la acumulación de hojarasca que conserva la humedad del suelo (INEGI, 2020; CONAFOR, 2018).

Por otro lado, además de las zonas forestales en la región hay zonas agrícolas y pastizales producto de las actividades productivas rurales, que influyen de manera directa en los procesos hidrológicos de la cuenca de San Miguel Topilejo. El tipo de suelo que predomina en la zona es el andosol que se originó a partir de cenizas volcánicas y en menor proporción hay cambisoles y feozems producto de las actividades agrícolas del lugar (INEGI, 2020).

ii) Integración de información hidrológica mediante el uso de resultados previos y modelación con InVEST para estimar la producción anual de agua.

Se emplearon resultados previos de elaboración propia de modelación hidrológica obtenidos mediante el modelo InVEST en la investigación *"Identificación de áreas prioritarias para el servicio hídrico de infiltración en la Reserva Ecológica Comunitaria San Miguel Topilejo, CDMX*" los cuales estiman la producción anual de agua considerando la interacción entre: precipitación, temperatura, evapotranspiración, cobertura vegetal, propiedades del suelo y topografía

iii) Clasificación de coberturas

Se clasificaron las coberturas de uso de suelo, bosque de coníferas, pastizal, agricultura y matorral (Figura 7) y se cuantificó su contribución al volumen total de agua (Figura 8).
Permitiendo identificar zonas prioritarias de contribución hídrica al acuífero y relacionar los resultados biofísicos con su importancia económica y ambiental.

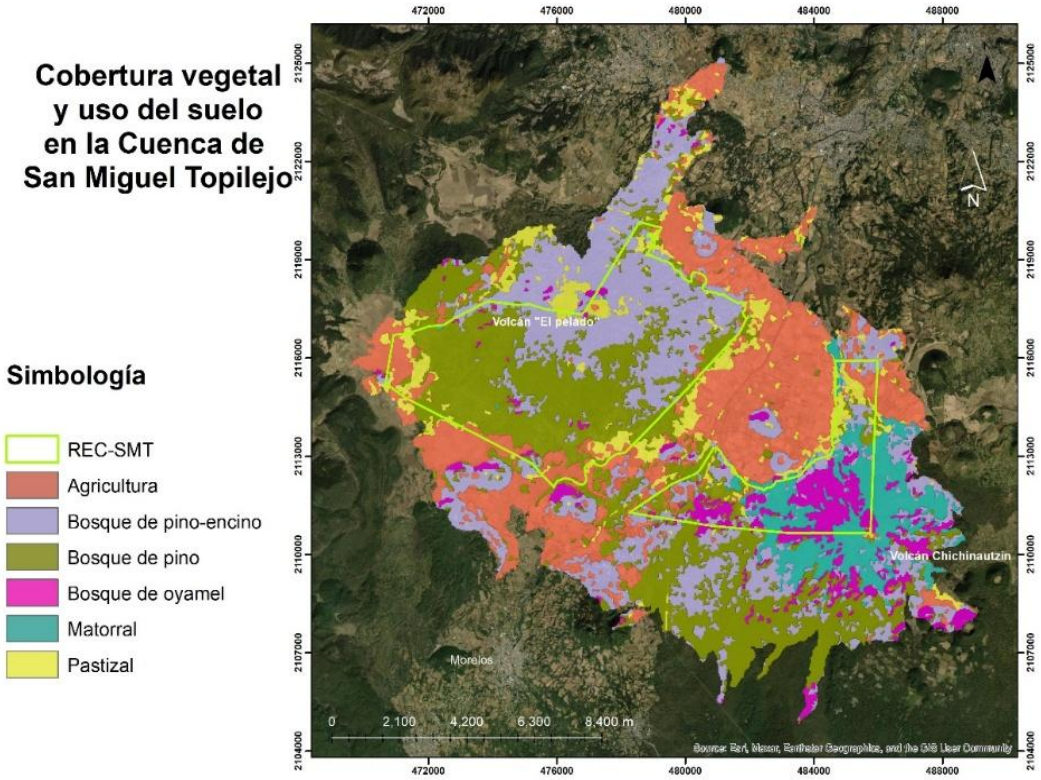

Figura 7. Clasificación de la vegetación y uso de suelo

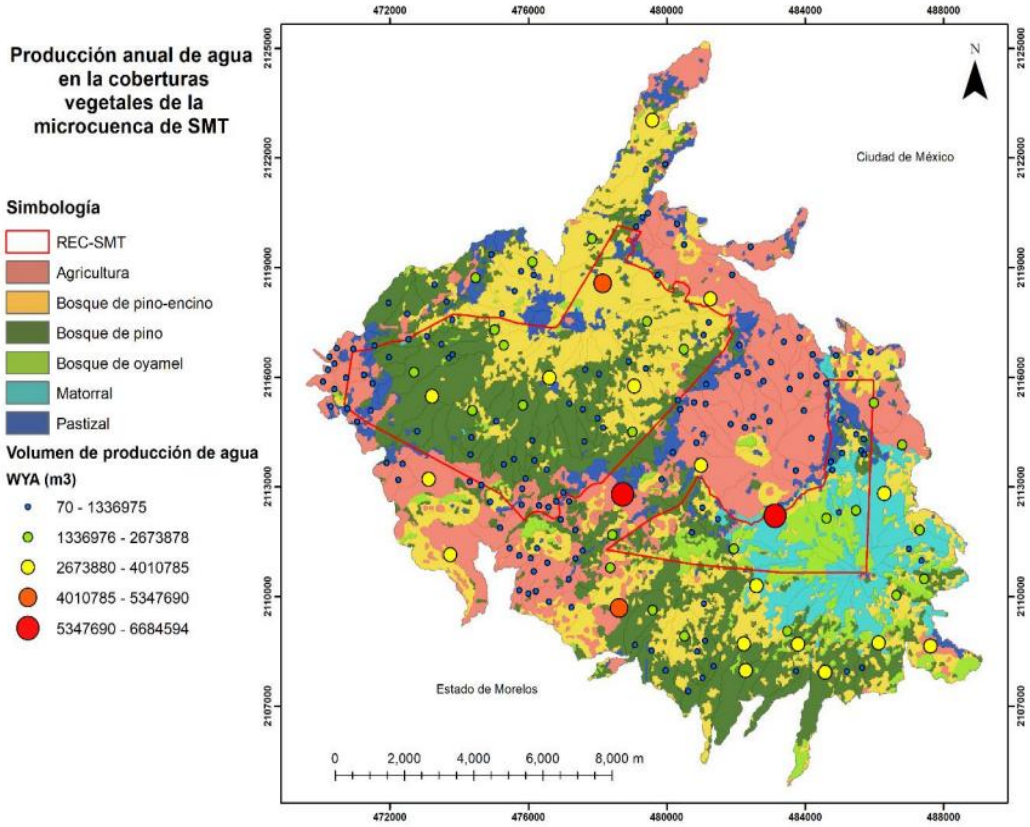

Figura 8. Resultados previos del volumen de infiltración para cada tipo de cobertura vegetal

iv) Aplicación del costo evitado

Se aplicó el método de costo evitado, el cual estima el valor del servicio ecosistémico en función del costo que implicaría sustituirlo mediante infraestructura hidráulica.

Se utilizaron tres escenarios de precio del agua:

- Bajo: $5/ m³
- Medio: $8/m³
- Alto: $10/m³

Los valores están basados en costos de extracción, tratamiento y distribución reportados por CONAGUA (2021) y SACMEX (2023).

La valoración se realizó mediante la fórmula:

$$V = Q \times P$$

Donde:

- V= valor económico (MXN/año)
- Q=volumen de agua (m^3/año)
- P=precio del agua (MXN/ m^3)

El valor por hectárea se obtuvo dividiendo el valor total entre la superficie de la cuenca (18,130.7 ha).

v) Comparación de los valores obtenidos con los esquemas actuales de Pago por Servicios Ambientales.

Se analizaron los programas de Pago por Servicios Ambientales (PSA), incluyendo:

- CONAFOR
- Altépetl Bienestar (CDMX)

Se compararon dichos montos de compensación con los valores económicos estimados en este estudio mediante el método de costo evitado, con el fin de evaluar su eficiencia económica y pertinencia como instrumento de política ambiental.

4. Resultados

4.1 Producción anual de agua en la cuenca de San Miguel Topilejo

Con base al análisis espacial propio realizado en la cuenca de San Miguel Topilejo, se calculó el volumen anual de agua mediante el uso y generación de información cartográfica, variables biofísicas y modelación hidrológica con el modelo InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), (Figura 9). Los resultados se presentan a nivel cuantitativo y espacial, permitiendo identificar las zonas con mayor y menor aporte hídrico disponible para la infiltración y recarga del acuífero.

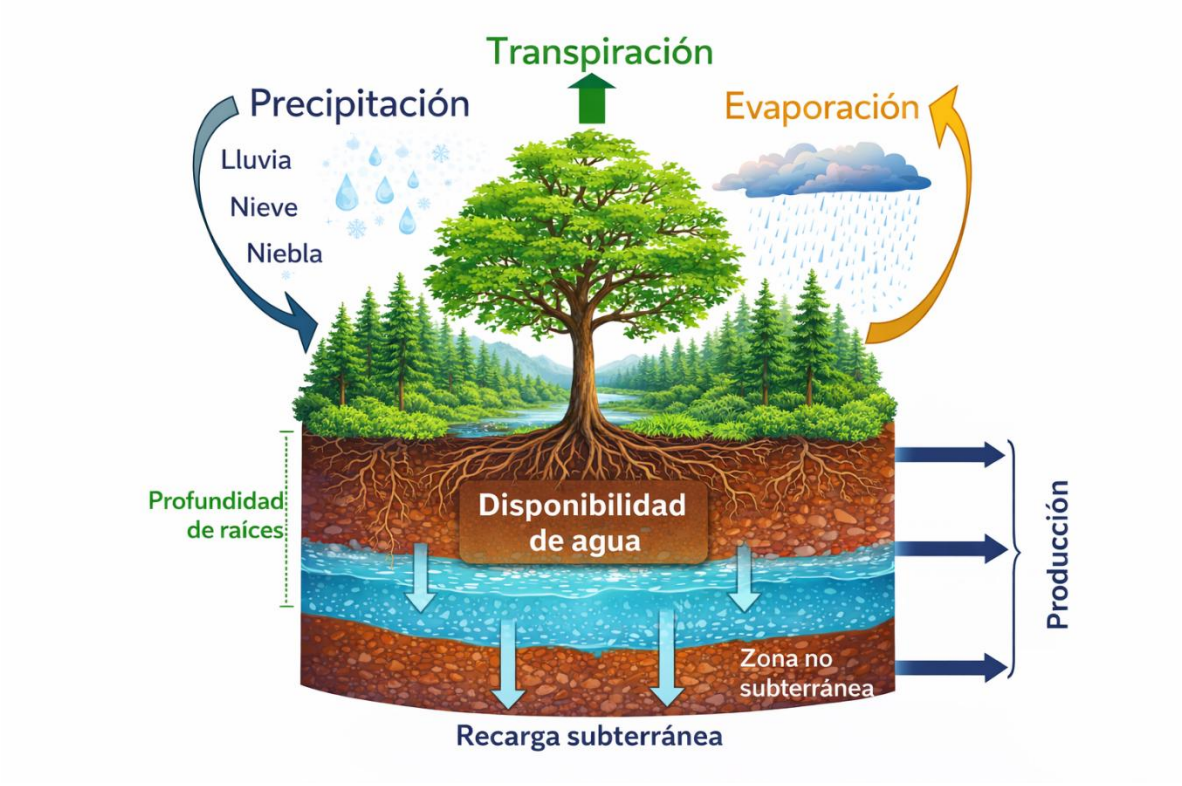

Figura 9. Modelo conceptual hídrico por InVEST, el cual estima la disponibilidad de agua a partir de la interacción entre precipitación, evapotranspiración, características del suelo y cobertura vegetal, permitiendo estimar la recarga hídrica.

El volumen total anual de producción de agua en la cuenca se obtuvo mediante la suma del campo "*wyield_vol*" generado por el modelo InVEST para cada unidad espacial de análisis dentro de la cuenca. Este procedimiento permitió obtener un volumen total estimado de 184.6 millones de m^3/año Figura 9.

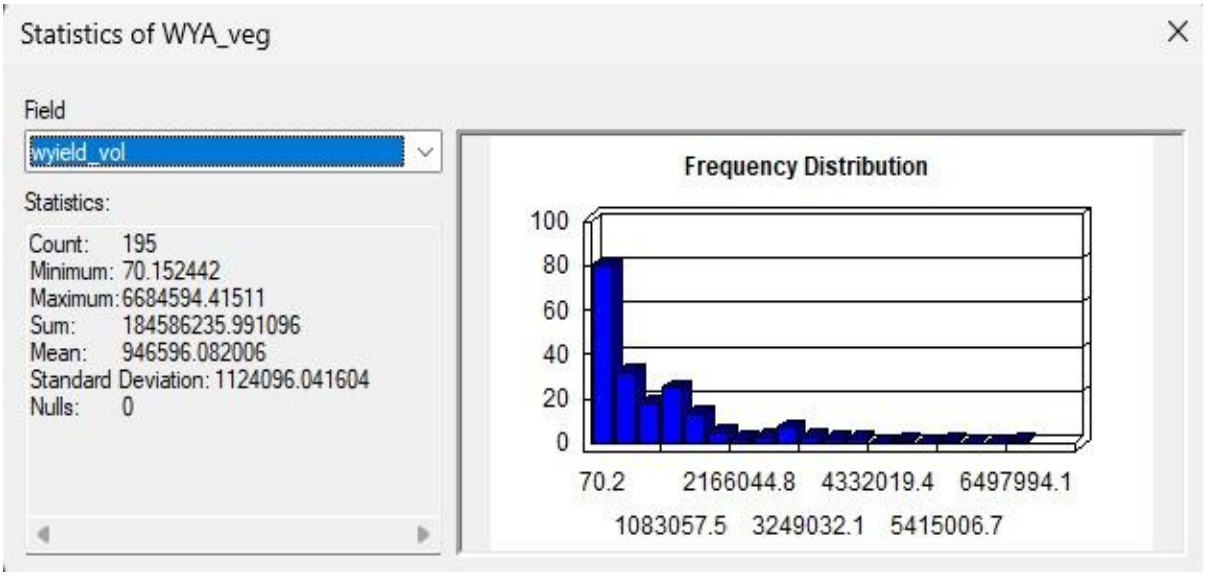

Figura 10. Estadísticos del campo "wyield_vol" obtenidos en ArcGIS a partir de los polígonos de la cuenca hidrológica modelados con InVEST. Elaboración propia.

Dicho valor representa la disponibilidad anual de agua asociada a la interacción entre precipitación, evapotranspiración, cobertura vegetal y propiedades del suelo.

Los mayores volúmenes de infiltración se localizan en las zonas con cobertura forestal conservada, principalmente en los bosques de oyamel y pino-encino ubicados en las partes altas de la cuenca. Estas coberturas vegetales favorecen la entrada de agua al subsuelo por la presencia de raíces profundas, hojarasca y suelos con alta capacidad de retención de humedad.

En cambio, las zonas con cobertura agrícola y áreas urbanizadas presentan menores valores de producción de agua, evidenciando el efecto del cambio de uso de suelo sobre la capacidad de infiltración (Cuadro 4).

Cuadro 4. Producción anual de agua por tipo de cobertura vegetal en la cuenca SMT

Cobertura vegetal o uso del suelo	Cobertura vegetal o uso del suelo en la cuenca SMT	Producción anual de agua (m^3)
Agricultura	22%	21 084 094.7
Bosque de pino-encino	18%	52 212 354.6
Bosque de pino	34%	45 551 524.2
Bosque de oyamel	7%	30 622 680.85

Matorral	4%	6 271 606.2
Pastizal	15%	27 340 677.7
Total	100%	184,586,938.2

Nota: El porcentaje corresponde a la superficie ocupada por cada cobertura vegetal dentro de la cuenca y no necesariamente a su contribución proporcional al volumen de agua.

4.2 Valoración económica del servicio ecosistémico hídrico

Con base en el volumen estimado, se llevó a cabo la valoración económica del servicio ecosistémico hídrico mediante el método de costo evitado, considerando tres escenarios de precio del agua: bajo ($5/m³), medio ($8/m³) y alto ($10/m³).

Los resultados se presentan en el Cuadro 5, donde se puede observar que el valor económico anual del servicio ecosistémico oscila entre 922.9 y 1,845.9 millones de pesos anuales, dependiendo del escenario de precio considerado.

Cuadro 5. Valoración económica del servicio hídrico de producción de agua en la cuenca de San Miguel Topilejo.

Escenario	Precio ($/m³)	Volumen (m³/año)	Valor económico anual (MXN)
Bajo	5	184,586,235	922,931,175
Medio	8	184,586,235	1,476,689,880
Alto	10	184,586,235	1,845,862,350

4.3 Valor económico del servicio hídrico por unidad de superficie

El valor por hectárea se obtuvo dividiendo el valor monetario total estimado entre la superficie total de la cuenca de San Miguel Topilejo (18,130.7 ha), con la finalidad de expresar el beneficio económico del servicio ecosistémico hídrico en términos territoriales comparables.

Los resultados muestran que el valor económico del servicio hídrico oscila entre 50,905 y 101,809 pesos por hectárea al año, dependiendo del escenario de precio considerado. Particularmente, el escenario medio de 8 pesos por metro cúbico presenta un valor aproximado de 81,444 pesos por hectárea al año (Cuadro 6).

Cuadro 6. Valoración económica del servicio ecosistémico hídrico por hectárea en la cuenca de San Miguel Topilejo.

Escenario	Valor total (MXN)	Área (ha)	Valor por ha (MXN/ha/año)
Bajo	922,931,175	18,130.7	50,905
Medio	1,476,689,880	18,130.7	81,444
Alto	1,845,862,350	18,130.7	101,809

4.4 Valor económico del servicio hídrico por tipo de cobertura vegetal

Con el objetivo de identificar la contribución de agua de cada tipo de cobertura vegetal al servicio ecosistema hídrico, se llevó a cabo el cálculo de la producción anual de agua para cada categoría de uso del suelo presente en la cuenca de la Reserva Ecológica de San Miguel Topilejo mediante el modelo InVEST.

Los resultados arrojan que las coberturas forestales son las que más aportan los volúmenes de agua dentro de la cuenca, y son el bosque de pino-encino con una contribución de 52.2 millones de m3/año, seguido del bosque de pino con 45.5 millones de m3/año y el bosque de oyamel con 30.6 millones de m3/año.

El pastizal natural lleva a cabo una contribución importante de agua para la infiltración con 27.3 millones de m^3/año, los cuales están asociados a la alta permeabilidad de los suelos volcánicos. En contraste, las zonas agrícolas generan alrededor de 21.1 millones de m^3/ año, mientras el matorral genera una menor proporción de agua de 6.3 millones de m^3 al año.

En resumen, se puede observar que las coberturas forestales y los pastizales juegan un papel indispensable para la provisión del servicio ecosistémico hídrico y en los procesos de recarga del acuífero del Valle de México.

El volumen de agua estimado para cada cobertura vegetal se utilizó para calcular el valor económico del servicio hídrico mediante el método de costo evitado, considerando tres escenarios de precio por metro cúbico: 5, 8 y 10 pesos mexicanos (Cuadro 7). El escenario medio de 8 pesos por metro cúbico se considera representativo debido a que se encuentra dentro

del rango de costos de extracción, tratamiento y distribución de agua reportados por CONAGUA (2021) y SACMEX (2023).

Cuadro 7. Valor económico anual del servicio ecosistémico hídrico de infiltración por tipo de cobertura vegetal en la cuenca de San Miguel Topilejo.

Cobertura vegetal o uso del suelo	Producción anual de agua (m3/año)	Valor económico ($5/m3)	Valor económico ($8/m3)	Valor económico ($10/m3)	Prioridad de conservación
Bosque de pino-encino	52,212,354.64	261,061,773	417,698,837	522,123,546	Muy alta
Bosque de pino	45,551,524.28	227,757,621	364,412,194	455,515,243	Alta
Bosque de oyamel	30,622,680.85	153,113,404	244,981,447	306,226,809	Muy alta
Pastizal	27,340,677.77	27,340,677.77	218,725,422	273,406,778	Alta
Agricultura	21,084,094.77	21,084,094.77	168,672,758	210,840,948	Media
Matorral	6,271,606.28	31,358,031	50,172,850	62,716,063	Media

El bosque de pino-encino presentó el de mayor valor económico anual con un estimado de 417.7 millones de pesos en el escenario medio, seguido del bosque de pino con 364.4 millones de pesos y el bosque de oyamel con un costo de 244.9 millones de pesos.

En cuanto al pastizal, presentó un valor monetario de 218.7 millones de pesos anuales en el escenario medio, resaltando su importancia dentro del sistema hidrológico de la cuenca por su contribución en los procesos de infiltración.

Por otra parte, las áreas agrícolas generan un valor económico aproximado de 168.7 millones de pesos, mientras que el matorral presenta el menor valor económico de las coberturas de 50.2 millones de pesos anuales en el escenario medio.

De acuerdo con la distribución espacial del valor económico del servicio hídrico (Figura 9), el bosque de oyamel y el bosque de pino-encino concentran los valores más elevados dentro de la cuenca, lo que refleja su alta importancia en los procesos de infiltración y recarga del acuífero.

Por lo tanto, se identifican como coberturas de muy alta prioridad de conservación debido a su contribución tanto biofísica como económica al servicio ecosistémico hídrico. Lo anterior evidencia la importancia de conservar las zonas forestales de la cuenca para mantener la provisión de agua en la región sur de la Ciudad de México.

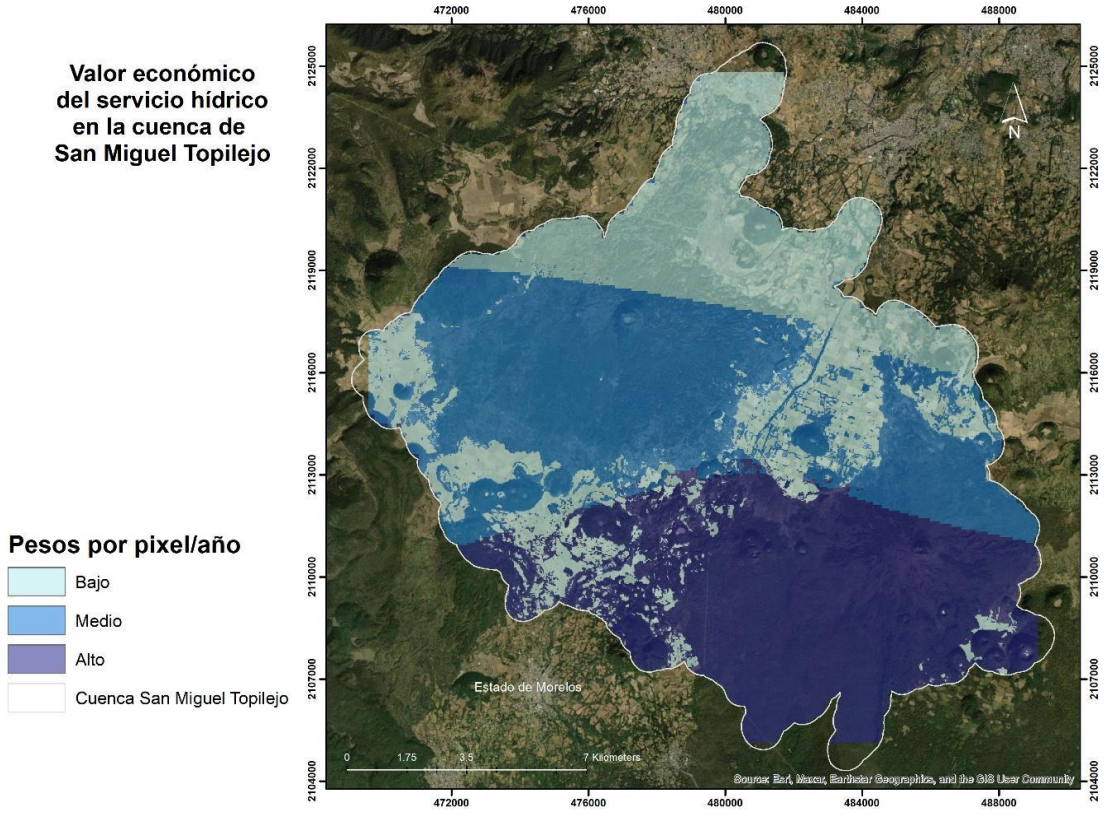

Figura 11. Mapa del valor económico del servicio ecosistémico hídrico en la cuenca de San Miguel Topilejo, calculado con base en la producción anual de agua modelada con InVEST y un precio de 8 $/m³. Los valores se expresan a nivel de pixel (30 × 30 m).

5. Discusión

5.1 Relevancia de las coberturas forestales en la provisión del servicio ecosistémico hídrico

Los resultados obtenidos muestran que las coberturas de coníferas, en particular las pertenecientes al bosque de pino-encino, bosque de pino y bosque de oyamel, contribuyen en mayor medida a la producción de agua dentro de la cuenca de San Miguel Topilejo. Este patrón coincide con diversos estudios (Bruijnzeel, 2004; Calder, 2002; Brauman et al., 2007), donde se resalta el papel que juegan los bosques templados en la regulación del ciclo hidrológico, al promover procesos de infiltración, reducir la escorrentía superficial y conservar la humedad del suelo.

La relevancia de estos ecosistemas de origen volcánico puede explicarse por la interacción entre la cobertura vegetal, la estructura del suelo y las condiciones climáticas, factores que inciden en procesos como la recarga de acuíferos y el almacenamiento de agua en el suelo (Brown et al., 2005; Ilstedt et al., 2007).

Desde el enfoque económico, estos procesos biofísicos se traducen en beneficios económicos asociados a la provisión de agua. Es decir, las coberturas forestales que presentan mayores volúmenes de infiltración generan también un mayor valor económico, al contribuir a la disponibilidad de agua que, de otra manera, tendría que obtenerse mediante procesos de extracción, tratamiento o importación de agua, lo que implicaría mayores costos para la sociedad.

Conforme a los resultados obtenidos en este estudio, donde las coberturas forestales concentran los mayores volúmenes de producción anual de agua, es posible inferir que dichas áreas representan zonas estratégicas para la provisión de agua de la cuenca. Esto refuerza la importancia de su conservación no solo desde el punto de vista ecológico, sino también como una medida costo-beneficio para garantizar el abastecimiento de agua en contextos urbanos y periurbanos como la Ciudad de México.

5.2 El rol del pastizal de volcán en la infiltración

El pastizal natural desempeña un papel relevante en la producción anual de agua dentro de la cuenca, al contribuir en los procesos de infiltración y recarga hídrica. Este comportamiento

se explica principalmente por la elevada permeabilidad de los suelos volcánicos de la región, que facilitan tanto el almacenamiento como la penetración del agua de lluvia.

Aunque con frecuencia el pastizal recibe menor atención en comparación con los ecosistemas forestales, los resultados evidencian que esta cobertura vegetal aporta de manera significativa al sostenimiento del servicio hídrico en la cuenca. Investigaciones previas han demostrado que, bajo condiciones de baja compactación y con una cobertura adecuada, los pastizales mantienen tasas destacables de infiltración y reducen la escorrentía superficial (Herrick et al., 2005; Yates et al., 2000).

5.3 Influencia de la agricultura y el matorral en la producción hídrica

El análisis muestra que las coberturas de uso agrícola y matorral tienen un menor aporte a la producción anual de agua en la microcuenca en comparación con las coberturas de bosque de coníferas y el pastizal natural. Este comportamiento se relaciona con modificaciones en las propiedades físicas del suelo como consecuencia de las actividades antropogénicas, como la compactación, reducción de materia orgánica, cambio en el uso del suelo, influyendo directamente en la capacidad de infiltración (Lal, 1998; Bronick y Lal, 2005).

En áreas destinadas a la agricultura, el uso de maquinaria, la reducción de la vegetación y la exposición directa del suelo a la lluvia disminuyen la infiltración y favorecen la escorrentía y la erosión. La literatura señala que la conversión de ecosistemas naturales en sistemas agrícolas intensivos altera los flujos hidrológicos y limita la capacidad de regulación del paisaje (Foley et al., 2005; Brauman et al., 2007).

Por otra parte, el análisis muestra una menor eficiencia en la provisión de agua, lo cual se relaciona con su baja densidad de cobertura y escasa acumulación de materia orgánica en comparación con los ecosistemas forestales. Se ha documentado que la estructura de la vegetación influye en la interceptación de lluvia, infiltración y retención de humedad del suelo (Calder, 2002; Bruijnzeel, 2004).

Desde una perspectiva económica, las coberturas con menor capacidad de infiltración generan también beneficios reducidos en relación con el servicio hídrico, ya que los cambios en el uso del suelo pueden limitar la función de regulación del agua. En otras palabras, una menor

eficiencia hidrológica se traduce en una disminución de los beneficios económicos vinculados a la provisión del recurso, lo que puede interpretarse como una pérdida de capital natural.

La transformación de ecosistemas naturales implica externalidades negativas o costos indirectos asociados a la pérdida de servicios ecosistémicos (Costanza et al., 1997; TEEB, 2010), lo que genera un aumento en los costos asociados al abastecimiento de agua, por infraestructura hidráulica o extracción de fuentes más profundas o importación de agua desde otras cuencas.

5.4 Gestión hídrica de la cuenca de San Miguel Topilejo

Los datos resultantes evidencian que la cuenca de San Miguel Topilejo desempeña un papel primordial en la provisión de servicios hídricos, en particular los relacionados con la infiltración y recarga de acuíferos. La identificación de coberturas vegetales con mayor contribución anual de agua, como el bosque de pino-encino, el bosque de oyamel y el bosque de pino, permite identificar zonas estratégicas para la conservación del recurso hídrico al sur de la Ciudad de México.

Los hallazgos evidencian que la conservación de coberturas forestales no solo tiene implicaciones ecológicas, sino también económicas, debido al valor asociado a la provisión de agua. Diversos estudios han señalado que la conservación de los bosques favorece la infiltración y puede representar una alternativa costo-efectiva en comparación con soluciones basadas exclusivamente en infraestructura hidráulica, particularmente en contextos con constante demanda de agua (Costanza et al., 1997; Brauman et al., 2007; TEEB, 2010).

En el caso de cuenca del Valle de México, donde el abastecimiento de agua enfrenta presiones derivadas del crecimiento urbano, la sobreexplotación de acuíferos y la variabilidad climática, la protección de zonas de recarga hídrica adquiere una relevancia estratégica. La literatura ha señalado que los cambios de uso de suelo pueden modificar la capacidad de regulación hidrológica de las cuencas, afectando la disponibilidad de agua a lo largo plazo (Foley et al., 2005; MEA, 2005).

En este sentido, los resultados del presente estudio aportan evidencia sobre la importancia de integrar el enfoque de servicios ecosistémicos en la planificación territorial, con la finalidad de promover estrategias de conservación y protección que contribuyan a mantener

la provisión del recurso hídrico. La identificación de coberturas vegetales prioritarias para la infiltración puede apoyar el diseño y mejoramiento de políticas de manejo sostenible de la cuenca, programas de conservación y mecanismos de compensación ambiental como el Pago de Servicios Ambientales.

5.5 Implicaciones económicas de los servicios hídricos en la política ambiental

Desde el ámbito económico, los presentes hallazgos toman relevancia al compararse con los montos actualmente asignados en programas de Pago por Servicios Ambientales (PSA). De acuerdo con la revisión realizada en la sección metodológica, los apoyos otorgados por programas como CONAFOR y Altépetl Bienestar oscilan entre 300 y 800 pesos por hectárea al año, mientras que los costos asociados a las actividades de conservación pueden alcanzar entre 1,150 y 2,050 pesos por hectárea al año. Esta diferencia indica que los incentivos económicos actuales son limitados en relación con el valor potencial del servicio hídrico que proporcionan los bosques de la cuenca (Cuadro 8). A grandes rasgos, los pagos actuales representan menos del 2% del valor económico estimado del servicio hídrico.

Cuadro 8. Comparación entre incentivos de PSA y valor económico del servicio hídrico

Concepto	Rango (MXN/ha/año)	Fuente / Base
Pago por Servicios Ambientales (CONAFOR)	300 – 800	CONAFOR (2022–2024)
Programas locales (Altépetl Bienestar, CDMX)	~1,000 – 2,000	SEDEMA (2023)
Valor económico estimado (este estudio)	50,905 – 101,809	Escenarios de valoración (5–10 $/m³)

En este sentido los valores económicos estimados en el presente estudio oscilan entre 922.9 y 1,875.9 millones de pesos anuales, señalando que la contribución económica del servicio ecosistémico hídrico es mayor a los montos establecidos en los instrumentos de política pública.

Asimismo, el análisis espacial del valor económico del servicio ecosistémico de producción hídrica permitió identificar la distribución territorial de dichos beneficios dentro de la cuenca. El mapa muestra que las zonas con mayor valor monetario están localizadas en las áreas forestales de la parte alta, en especial en las coberturas de pino, pino-encino y oyamel, mientras que las zonas agrícolas y con mayor intervención o impacto presentan valores menores. Este patrón espacial apoya la idea de priorizar estas superficies en los esquemas de conservación y asignación de incentivos económicos.

Adicionalmente, cabe señalar que una gran parte de la provisión de agua dentro de la cuenca se concentra en la región asociada al sistema volcánico Chichinautzin, caracterizado por la presencia de materiales altamente permeables que favorecen la entrada de agua al subsuelo. Esta condición geológica, en conjunto con la cobertura forestal predominante, explica los altos valores de producción hídrica y, en consecuencia, del valor económico del servicio ecosistémico en estas zonas. Por lo tanto, la región volcánica no solo representa un área clave desde el punto de vista hidrológico, sino también una zona estratégica en términos económicos para la provisión del recurso hídrico en la Ciudad de México.

No obstante, al contrastar los resultados con los esquemas vigentes de Pago por Servicios Ambientales (PSA), se evidencia una marcada discrepancia: los incentivos económicos por hectárea no corresponden al verdadero valor de los beneficios que los ecosistemas generan en términos de infiltración y recarga hídrica. Desde la óptica de la economía ambiental, esta subvaloración refleja que dichos aportes no están siendo incorporados de manera adecuada en los instrumentos de política pública, lo que deriva en estímulos insuficientes para promover la conservación de las coberturas forestales.

Aunque los programas de PSA representan un avance importante en materia de conservación, los incentivos actuales aún no consideran de manera específica la contribución hidrológica de cada cobertura vegetal.

Es importante destacar que los servicios hídricos en general se encuentran sujetos a presiones derivadas del cambio de uso de suelo, tala ilegal, incendios forestales, y la expansión urbana amenazan los bosques del Suelo de Conservación de la Ciudad de México (Merlín-Uribe et al., 2013). Por lo tanto, la cobertura vegetal no solo implica la pérdida de biodiversidad, sino una importante disminución en la capacidad de recarga del acuífero, lo que a largo plazo

representa un aumento en los costos económicos asociados al abastecimiento de agua mediante infraestructura hidráulica o una fuerte dependencia a fuentes externas, así como un aumento en la sobreexplotación de fuentes subterráneas.

Por esta razón es necesario incorporar criterios hidrológicos en los esquemas de PSA ya que contribuiría a mejorar la eficiencia en la asignación de recursos, fortaleciendo la protección de áreas prioritarias para la recarga del acuífero que abastece a la Ciudad de México.

6. Conclusiones

El presente estudio permitió integrar de manera rigurosa el análisis biofísico y económico del servicio ecosistémico hídrico en la cuenca de San Miguel Topilejo, evidenciando su relevancia estratégica dentro del sistema hidrológico del Valle de México. A partir de la modelación hidrológica y el análisis espacial, se estimó un volumen anual de producción de agua de 184.6 millones de m^3, lo que confirma el papel de la cuenca como una zona clave de infiltración y recarga del acuífero metropolitano, indispensable para la seguridad hídrica de la Ciudad de México.

Los datos indican que la provisión del servicio hídrico presenta una distribución heterogénea, determinada principalmente por el tipo de cobertura vegetal y las características biofísicas del territorio. En este sentido, las coberturas forestales, particularmente los bosques de pino, pino-encino y oyamel concentran los mayores valores de producción de agua, reforzando su papel como áreas prioritarias para la regulación hidrológica. Asimismo, el pastizal natural mostró una contribución relevante, lo que sugiere que bajo condiciones edáficas favorables puede desempeñar un papel complementario en los procesos de infiltración, ampliando el espectro de coberturas que aportan al servicio ecosistémico.

Desde la perspectiva económica, la valoración del servicio hídrico mediante el método de costo evitado permitió estimar un valor anual que oscila entre 922.9 y 1,845.9 millones de pesos, con un valor representativo de 1.48 mil millones de pesos bajo el escenario medio. Esta magnitud evidencia que los beneficios económicos asociados a la infiltración y recarga hídrica son considerablemente altos, lo que contrasta con su limitada incorporación en los instrumentos actuales de gestión del recurso hídrico.

A nivel territorial, el valor económico estimado alcanza hasta 101,809 pesos por hectárea al año, lo que demuestra que los ecosistemas forestales poseen no solo una relevancia ecológica, sino también un valor económico significativo. Este hallazgo permite reinterpretar la conservación de los ecosistemas no como un costo, sino como una inversión que genera beneficios ambientales y económicos a largo plazo.

En términos de costo-beneficio, conservar la cobertura forestal resulta más rentable que sustituir el servicio mediante infraestructura hidráulica, extracción más profunda, transporte, tratamiento o importación del recurso cuyos costos marginales serían crecientes y mucho más elevados para los habitantes de la ciudad.

La comparación con los montos asignados en los programas de Pago por Servicios Ambientales (PSA) revela una brecha considerable entre el valor real del servicio hídrico y las compensaciones económicas otorgadas. Mientras los PSA ofrecen incentivos relativamente bajos por hectárea (300 y 800 pesos/ha/año), los valores estimados en este estudio muestran que el servicio de infiltración posee un valor económico mucho mayor (~80,000 pesos/ ha/año). Esta diferencia refleja una ineficiencia en la asignación de recursos públicos, que limita la capacidad de los programas para generar incentivos efectivos de conservación y pone en evidencia la necesidad de replantear los esquemas actuales para reflejar adecuadamente la magnitud de los beneficios generados.

Desde un enfoque de economía ambiental, esta subvaloración implica que los servicios ecosistémicos no están siendo internalizados en los mercados ni en la política pública, lo que genera fallas de mercado y riesgos financieros asociados a la degradación ambiental.

En el contexto del Valle de México, donde la sobreexplotación del acuífero, la disminución en la disponibilidad de agua y los fenómenos de hundimiento son problemáticas críticas, esta situación se traduce en costos de oportunidad elevados. Cada hectárea perdida de cobertura forestal representa no solo un deterioro ecológico, sino también una pérdida económica que podría evitarse mediante acciones adecuadas de manejo y protección

En este sentido, la conservación de la cuenca de San Miguel Topilejo puede ser entendida como un mecanismo de gestión del agua basada en la naturaleza capaz de funcionar como un seguro económico y ambiental, que reduce riesgos futuros y garantiza beneficios

sostenidos. Por lo tanto, mantener las zonas de infiltración funciona como una forma de reducir costos, evitar inversiones mayores en infraestructura y disminuir riesgos asociados a la escasez de agua en el largo plazo.

Además, los resultados permiten visibilizar la necesidad de fortalecer la integración de herramientas de valoración económica en la gestión ambiental, ya que estas permiten traducir los beneficios ecológicos en términos monetarios comprensibles para los tomadores de decisiones.

La información generada puede servir como insumo para el diseño de políticas públicas más eficientes, particularmente en el ajuste de los esquemas de PSA, promoviendo incentivos económicos acordes con el valor real del servicio hídrico y priorizando aquellas zonas con mayor aporte a la recarga del acuífero.

En conclusión, la cuenca de San Miguel Topilejo representa un área de alto valor ecológico y un activo económico clave para la provisión de agua en la Ciudad de México. Su conservación debe ser entendida como una estrategia fundamental de sostenibilidad hídrica, económica y financiera, consolidando la visión de que invertir en ecosistemas es invertir en el futuro hídrico y económico de la región.

La evidencia presentada refuerza la idea de que la gestión ambiental no debe limitarse a la protección ecológica, sino que debe incorporar de manera explícita la dimensión económica, reconociendo que los ecosistemas son capital natural cuya conservación garantiza beneficios tangibles y sostenibles para la sociedad en el largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aziz, M., Park, Y. J., & Rudolph, D. L. (2025). Economic valuation of subsurface water contributions to watershed ecosystem services using a fully integrated groundwater–surface-water model. Hydrology and Earth System Sciences, 29, 1549–1567. https://doi.org/10.5194/hess-29-1549-2025
- Bradford, J. B., Schlaepfer, D. R., Lauenroth, W. K., & Palmquist, K. A. (2019). Robust ecological drought responses in drylands of the western United States. Global Change Biology, 25(1), 13–27. https://doi.org/10.1111/gcb.14490
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K., & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. Annual Review of Environment and Resources, 32, 67–98. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. Geoderma, 124(1–2), 3–22.
- Brouwer, R., & Pearce, D. (2005). Cost-benefit analysis and water resources management. Water Resources Development, 21(1), 1–19. https://doi.org/10.1080/0790062042000313279
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems & Environment, 104(1), 185–228. https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015
- Calder, I. R. (2002). Forests and hydrological services: Reconciling public and science perceptions. Land Use and Water Resources Research, 2(2), 1–12.
- Carabias, J., Arriaga, V., Cervantes, V., & Galindo, L. M. (2017). El suelo de conservación de la Ciudad de México: importancia ecológica y servicios ecosistémicos. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, UNAM.

- Carabias, J., Toledo, V. M., & Cetto, A. M. (2017). Valoración económica de servicios hidrológicos en zonas forestales del Ajusco. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ecología.
- Cervantes, R., Sánchez, J. M., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J. R., Locatelli, B., & Bonnesoeur, V. (2021). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. Ecología Aplicada, 20(2), 137–146.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Estadísticas del agua en México 2021. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional Forestal. (2018). Servicios ambientales hidrológicos y conservación de bosques en México. CONAFOR.
- Comisión Nacional Forestal. (2021). Reglas de Operación del Programa de Pago por Servicios Ambientales. CONAFOR.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2022). Reglas de operación del Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 387, 253–260. https://doi.org/10.1038/387253a0
- de Groot, R. S., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodríguez, L., ten Brink, P., & van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. Ecosystem Services, 1(1), 50–61. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005
- Dirección de Economía Ambiental y de Recursos Naturales. (2019). Meta-análisis sobre valoración económica de los servicios ecosistémicos de México. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/512028/Meta_analisis_DEARN_2019_vf.pdf

- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., Chapin, F., Coe, M., Daily, G., Gibbs, H., Helkowski, J., Holloway, T., Howard, E., Kucharik, C., Monfreda, C., Patz, J., Prentice, I., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2005). Global consequences of land use. Science, 309(5734), 570–574. https://doi.org/10.1126/science.1111772
- Groot, R. S., Fisher, B., Christie, M., Aronson, J., Braat, L., Gowdy, J., & Portela, R. (2012). Integrating the ecological and economic dimensions in ecosystem service valuation. En P. Kumar (Ed.), The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations (pp. 9–40). Routledge.
- Hein, L. (2007). Economic valuation of water infiltration services in catchments. Ecological Economics, 63(2–3), 209–218.
- Hernández Reyes, T. (2018). Valoración económica del servicio ecosistémico infiltración de agua en la Sierra Madre de Chiapas, México [Tesis de especialidad, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM. https://ru.dgb.unam.mx/bitstreams/524f7d97-7d3a-43be-88f8-3d9891278964/download
- Herrick, J. E., Van Zee, J. W., Havstad, K. M., Burkett, L. M., & Whitford, W. G. (2005). Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems. USDA-ARS Jornada Experimental Range.
- Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E., & Murdiyarso, D. (2007). The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. Forest Ecology and Management, 251(1–2), 45–51. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.014
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Estudios hidrológicos y de infiltración en la Cuenca del Valle de México. INEGI.

- Isla Urbana, & Oxfam México. (2020). Agua para la resiliencia: Sistemas de captación de lluvia en zonas rurales y periurbanas. Isla Urbana.
- Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. Critical Reviews in Plant Sciences, 17(4), 319–464.
- Laterra, P., Jobbágy, E. G., & Paruelo, J. M. (Eds.). (2011). Valoración de servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA.
- López-Morales, C. A., & Mesa-Jurado, M. A. (2017). Valuation of hidden water ecosystem services: The replacement cost of the aquifer system in Central Mexico. Water, 9(8), 571.
- Ludwig, J. A., Wilcox, B. P., Breshears, D. D., Tongway, D. J., & Imeson, A. C. (2005). Vegetation patches and runoff–erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. Ecology, 86(2), 288–297. https://doi.org/10.1890/03-0569
- Mastrorilli, M., Rana, G., Verdiani, G., Tedeschi, G., Fumai, A., & Russo, G. (2018). Economic Evaluation of Hydrological Ecosystem Services in Mediterranean River Basins. Water, 10(3), 241. https://doi.org/10.3390/w10030241
- Merlín-Uribe, Y., González-Esquivel, C., Contreras-Hernández, A., Zambrano, L., & Moreno-Casasola, P. (2013). Environmental and socio-economic sustainability of chinampas in Xochimilco. Journal of Environmental Management, 120, 79–87.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press.
- Moreno, A., & Perevochtchikova, M. (2021). *Diagnóstico de inversiones en programas de conservación ambiental en la Ciudad de México, 2000–2018*. *Madera y Bosques, 27*(3).
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J. M., & Braña, J. (2008). Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. Ecological Economics, 65(4), 725–736.

- Neolpharma. (2023). Reporte de sostenibilidad 2023. Neolpharma.
- Ortiz, M., & Pérez, E. (2015). Valoración económica de los servicios hidrológicos en la cuenca de Valle de Bravo. Investigación Ambiental, 7(1), 48–63.
- Pagiola, S. (2008). Payments for environmental services in Costa Rica. Ecological Economics, 65(4), 712–724. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.033
- Palma, M., Silke, C., Bocco, G., & Velázquez, A. (1999). Caracterización abiótica de la región de montaña del sur de la Cuenca de México. En A. Velázquez & F. Romero (Eds.), Biodiversidad de la región de montaña del sur de la Cuenca de México: bases para el ordenamiento ecológico. Universidad Autónoma Metropolitana, Secretaría del Medio Ambiente.
- Perevochtchikova, M., & Rojo-Negrete, I. A. (2015). The perceptions about payment schemes for ecosystem services: Study case of the San Miguel and Santo Tomás Ajusco community, Mexico. Ecosystem Services, 14, 27–36.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT). (2012). *Atlas geográfico del suelo de conservación de la Ciudad de México*. PAOT.
- Rodríguez Tapia, L., & Revollo Fernández, D. A. (Coords.). (2015). Valoración de servicios ecosistémicos en Áreas Naturales Protegidas federales de México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas / Universidad Autónoma Metropolitana.
- Rojas, J., & Aylward, B. (2003). What is the value of infiltration services? A case study from Costa Rica. Journal of Sustainable Forestry, 17(1–2), 77–104. https://doi.org/10.1300/J091v17n01_05
- SACMEX. (2019). Cumbre fondos de agua. No hay nada que perder. https://www.fondosdeagua.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latinamerica/aguas.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2019). Programa General de Ordenamiento Ecológico del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. SEDEMA.

- Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). (2023). Costos de operación, tratamiento y distribución de agua potable en la Ciudad de México. Gobierno de la Ciudad de México.
- Sosa-Rodríguez, F., Martínez-González, C., & Torres-Rodríguez, M. (2024). Valuing hydrological ecosystem services provided by groundwater in a dryland region in the Northwest of Mexico. Water, 17(15), 2221. https://doi.org/10.3390/w17152221
- TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). (2010). The economics of ecosystems and biodiversity: Ecological and economic foundations. Earthscan.
- The Nature Conservancy (TNC). (2018). Restauración de bosques y conservación de cuencas prioritarias en México. TNC México.
- Wilcox, B. P., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2003). Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance. Ecological Monographs, 73(2), 223–239.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press.
- Wunder, S. (2005). Payments for environmental services: Some nuts and bolts (Occasional Paper No. 42). Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Yates, C. J., Norton, D. A., & Hobbs, R. J. (2000). Grazing effects on plant cover, soil and microclimate in fragmented woodlands in south-western Australia: Implications for restoration. Austral Ecology, 25(1), 36–47.