



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MAESTRIA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y
DE LOS RECURSOS NATURALES

VALORACIÓN DEL RENDIMIENTO HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RIO CAJONOS

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

JESSICA FELIPE PÉREZ

Bajo la supervisión de: **Dr. Juan Hernández Ortiz**



APROBADA

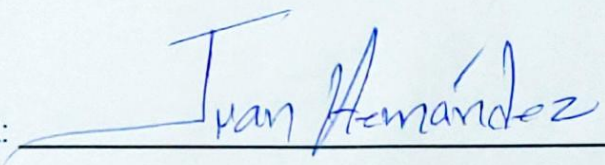


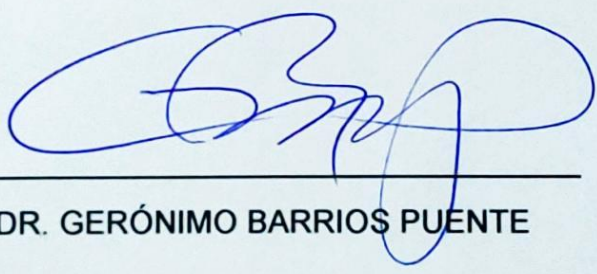
Chapingo, Estado de México, noviembre de 2023

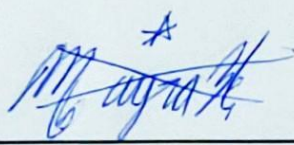
VALORACIÓN DEL RENDIMIENTO HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RIO CAJONOS

Tesis realizada por **Jessica Felipe Pérez**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES

DIRECTOR: 
DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTIZ

ASESOR: 
DR. GERÓNIMO BARRIOS PUENTE

ASESOR: 
M. C. MAYRA CLEMENTINA ZAMORA ELIZALDE

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	v
Agradecimientos	vi
DEDICATORIAS	vii
Datos biográficos	viii
Resumen general.....	ix
General abstract	x
1. Introducción general	11
1.1 Objetivos.....	13
1.2 Objetivo general.....	13
1.3 Objetivos específicos	13
2. Revisión de literatura	13
2.1 Valoración económica de los servicios ecosistémicos	13
2.2 Métodos de valoración económica	15
2.3 Método costo de reemplazo.....	17
2.4 Métodos de valoración del recurso hídrico.	17
2.5 Cuencas hidrológicas y la importancia del recurso hídrico	18
2.5.1 Modelos de balance hídrico	19
2.6 Sistemas de información geográfica en la valoración de servicios ecosistémicos.....	21
2.7 Modelo Seasonal Water Yield (SWY)	22
2.7.1 Aplicaciones del modelo rendimiento estacional de agua	23
2.8 Literatura citada	24
3. VALORACIÓN ECONÓMICA DEL RENDIMIENTO HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RIO CAJONOS, OAXACA.....	28
3.1 Resumen	28
3.2 Abstract.....	29

3.3	Introducción	30
3.4	Materiales y métodos.....	31
3.4.1	Área de estudio	31
3.4.2	Método de costo de remplazo	34
3.4.3	Modelo de balance hídrico	35
3.4.4	Características biofísicas de la cuenca del rio Cajonos	40
3.5	Resultados y discusión	43
3.6	Conclusiones	47
3.7	Literatura citada	48
4.	Conclusiones generales.....	52

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Municipios ubicados en la cuenca.....	33
Cuadro 2. Información requerida por el modelo SWY.....	39
Cuadro 3. Valores de Coeficiente de cultivo Kc	40
Cuadro 4. Asignación de valores de CN	41
Cuadro 5. Asignación de grupo hidrológico a los suelos presentes en la cuenca	42
Cuadro 6. Estaciones meteorológicas	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Los cuatro pasos para la valoración de los servicios ecosistémicos .	14
Figura 2. Métodos de valoración económica ambiental.	16
Figura 3. Ubicación de la cuenca del Rio Cajonos.....	32
Figura 4. Recarga local de la cuenca.....	44
Figura 5. Valor económico del agua.....	45

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) y a mi país, por el apoyo recibido para la realización de mis estudios en la Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y a la División de Ciencias Económico-Administrativas (DICEA), por aceptarme y prepararme como Maestra en Ciencias y sobre todo apoyarme en cada momento en mis estudios.

A la coordinación del posgrado de la Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales y a todos mis profesores por sus enseñanzas, consejos y disposición para mi formación profesional y personal.

Al Dr. Juan Hernández Ortiz por su confianza, paciencia y apoyo en las mejoras de la realización de esta investigación.

Al Dr. Gerónimo Barrios Puente, por su disposición y apoyo para el desarrollo de este proyecto.

A la M. C. Mayra Clementina Zamora Elizalde por su gran apoyo, orientación para el mejor enfoque en la elaboración de este proyecto, por compartirme de sus conocimientos y experiencias y sobre todo por su gran amistad.

A mis amigos, Abisaí, Juan, Paulina por su compañía y apoyo incondicional durante mi formación en la maestría, a Hugo por animarme a iniciar este posgrado, a Daniel, Dalia y Citlalli por sus consejos, ánimos y sobre todo su gran apoyo en los momentos más complicados, a la Sra. Minerva por siempre estar al pendiente.

DEDICATORIAS

A mi abuelita Hermelinda, quien ha sido mi fortaleza desde que tengo memoria, a ella le debo mis logros y éxitos académicos y personales, ha sido la mejor persona que el universo pudo ponerme en la vida, le agradezco infinitamente por su inmenso cariño, cuidado, por nunca dejarme sola y seguir siendo mi motivación.

A mis hermanas Hianiza y Navani, por siempre impulsarme a seguir luchando por mis metas y sueños, por ser las mejores hermanas, porque se que en ustedes siempre tendré un apoyo incondicional, por siempre enseñarme a ser una mujer fuerte e independiente.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Jessica Felipe Pérez

Fecha de nacimiento: 02 de septiembre de 1994

Lugar de nacimiento: Iztapalapa, Ciudad de México.

CURP: FEPJ940902MDFLRS05

Profesión: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

Cédula profesional: 12711126

Formación académica

2009-2012 Educación media superior en “Preparatoria Agrícola” - Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

2012-2017 Licenciatura en Departamento de Enseñanza e Investigación en Suelos - Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

2021-2023 Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales en División de Ciencias Económico – Administrativas - Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

RESUMEN GENERAL

VALORACIÓN DEL RENDIMIENTO HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RIO CAJONOS ¹

La Valoración Económica del recurso hídrico permite declarar en términos monetarios el beneficio que se recibe de este servicio ecosistémico, además de proporcionar información a considerar para la toma de decisiones en el manejo y gestión del recurso para un aprovechamiento de una manera sustentable.

En el caso de la cuenca del Río Cajonos, considerado una zona de suma importancia por su gran capacidad de captación de agua, fue necesario realizar una valoración económica de este recurso vital. Por ello el objetivo de este estudio fue estimar el Valor Económico del agua de la cuenca del Río Cajonos, Oaxaca, México. mediante el método costo de reemplazo. Se usó como herramienta de apoyo para la determinación del rendimiento hídrico de la cuenca el modelo Seasonal Water Yield de InVEST, este modelo permitió estimar la recarga local de la cuenca.

Se obtuvo una recarga local de hasta 1625 mm en toda la cuenca, además se pudo ubicar las zonas de menor y mayor recarga, se identificó las características que definen la diferencia de recarga en cada zona. Se estimó un valor económico del recurso hídrico dentro de la cuenca obteniendo un rango monetario de 1,164.92 USD/m³ a 3,485.77 USD/m³.

Palabras clave: cuenca hidrográficas, método del costo de remplazo, rendimiento hídrico estacional, SIG, valoración económica

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Jessica Felipe Pérez

Director de tesis: Juan Hernández Ortiz

GENERAL ABSTRACT

VALUATION OF THE WATER YIELD OF THE CAJONOS RIVER BASIN ¹

The economic valuation of the water resource allows declaring in monetary terms the benefit received from this ecosystem service, in addition to providing information to be considered for decision making in the management and management of the resource for a sustainable use.

In the case of the Cajonos River basin, considered an area of great importance due to its great water catchment capacity, it was necessary to carry out an economic valuation of this vital resource. Therefore, the objective of this study was to estimate the economic value of water in the Cajonos River basin, Oaxaca, Mexico, using the replacement cost method. The Seasonal Water Yield model of InVEST was used as a support tool for the determination of the water yield of the basin; this model allowed estimating the local recharge of the basin.

A local recharge of up to 1625 mm was obtained for the entire basin, and it was also possible to locate the zones with the lowest and highest recharge, and the characteristics that define the difference in recharge in each zone were identified. An economic value of the water resource within the basin was estimated, obtaining a monetary range of 1,164.92 USD/m³ to 3,485.77 USD/m³.

Key words: Watersheds, replacement cost method, seasonal water yield, GIS, economic valuation

¹ Thesis: Master of Science in Agricultural Economics and Natural Resources, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Jessica Felipe Pérez

Advisor: Juan Hernández Ortiz

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La valoración económica de los servicios ecosistémicos permite complementar el análisis cualitativo del estado del ecosistema, mediante un análisis cuantitativo que expresa en términos monetarios los beneficios o daños que se genera en el aprovechamiento de los recursos naturales; a su vez esto contribuye en la toma de decisiones respecto a la importancia y el aprovechamiento sustentable de los bienes y servicios producidos por los ecosistemas (Moreno, 2020). De acuerdo con Requejo et al. (2021), es importante declarar los beneficios que recibimos de los servicios ecosistémicos, además de cuantificarlos en términos monetarios porque permite demostrar que es posible que los ecosistemas con un manejo adecuado se pueden generar recursos económicos, para que se cuiden y aprovechen de una manera sostenible.

Se ha desarrollado de manera amplia el enfoque de la valoración económica, mediante la utilización de diferentes metodologías o técnicas de estimación, dependiendo de los diferentes tipos de servicios ecosistémicos (Morales, 2021).

Uno de los servicios de mayor importancia que provee los ecosistemas es el recurso hídrico, recurso vital para el bienestar y desarrollo humano. No obstante, muchas veces se ha visto afectado por el deterioro de las cuencas hidrográficas, por contaminación o por el incremento de la población (Cruz & Rivera, 2003). Sin embargo, a partir de la valoración económica de los bienes y servicios hidrológicos es posible conseguir a establecer propuestas para su manejo y conservación (Delgado et al., 2019).

Gaspari et al. (2015) mencionan que, para la planificación y gestión integral del recurso hídrico, la modelización geoespacial del rendimiento hídrico con su distribución en el territorio puede ser útil. El avance tecnológico de los SIG han resultado una herramienta de gran utilidad, ya que permiten la modelación del proceso hidrológico de una cuenca considerando la gran complejidad que implica este proceso (Scordo et al., 2018).

Además, Grêt-Regamey, et al. (2008) recomiendan y confirma emplear SIG en la modelación de los procesos ecosistémicos, sobre todo en las regiones montañosas, donde se requiere una consideración especial por los patrones espaciales que se generan por la compleja topografía y los diversos ecosistemas que se presentan.

La cuenca del río Cajonos forma parte de la región terrestre prioritaria Sierra de Juárez, que a su vez pertenece a la Sierra Norte de Oaxaca, la cual se considera una región con una compleja fisiografía que alberga una gran diversidad de ecosistemas, bosques de pinos, encinos, mesófilo de montaña y selvas (Alvarez-Arteaga et al., 2013). Debido a su diversidad biológica se considera una zona de gran importancia por su gran aportación en servicios ecosistémicos, sobre todo por su gran capacidad de captación de agua, que es posible por la fuerte precipitación que alimenta a la zona y que finalmente contribuye al cauce del río Papaloapan, considerado también uno de los de mayor importancia en el país (Merino, 2008). Esta región a pesar de ser una zona de gran importancia en la captación de agua para la región del Papaloapan es escasa la información que se tiene con respecto a la valoración económica de los recursos ecosistémicos, en especial del recurso hídrico; por ello la necesidad de generar información relevante. Bajo este contexto, el objetivo de esta investigación fue estimar el Valor Económico del agua de la cuenca del Río Cajonos, Oaxaca, México mediante el método costo de reemplazo a fin de contribuir a que los pobladores y tomadores de decisiones de tener una visión más completa de la importancia que representa el servicio hídrico de la cuenca para la gestión y aprovechamiento sustentable del recurso hídrico.

El presente estudio se desarrolla en tres capítulos, en el primer capítulo se describe una introducción general de la importancia de la valoración económica del recursos hídrico; en el segundo capítulo se incluye una revisión de literatura respecto a los temas valoración económica del servicio hídrico y lo referente al modelo de apoyo implementado para el cálculo del rendimiento hídrico de la

cuenca de estudio; y en el capítulo tres se presenta el desarrollo del artículo que se originó a partir de esta investigación.

1.1 Objetivos

1.2 Objetivo general

Estimar el Valor Económico del agua de la cuenca del Río Cajonos, Oaxaca, México, mediante el método costo de reemplazo a fin de apoyar en la gestión, conservación y aprovechamiento sustentable del recurso hídrico.

1.3 Objetivos específicos

1. Diagnosticar el estado biofísico de la cuenca del Río Cajonos, orientado a la valoración del recurso hídrico.
2. Estimar el balance hídrico de la cuenca mediante el modelo Seasonal Water Yield de InVEST.
3. Valorar Económicamente el agua de la cuenca a través del método costo de reemplazo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Valoración económica de los servicios ecosistémicos

Uno de los primeros y más importantes acercamientos sobre la valoración de bienes y servicios ambientales fue el trabajo llamado *The value of the world's ecosystem services and natural capital* de Costanza y colaboradores (1997), donde a pesar de diversos debates acerca de cómo se presentó la información, o las implicaciones que tenía un trabajo de tal magnitud fue pionero y además presentó cifras del estado de los servicios ecosistémicos a nivel mundial (Díaz & López, 2021).

En la valoración de los servicios ecosistémicos, es relevante considerar el nivel de escala a que se realizan los estudios de valoración, Hein et al. (2006) explicó la importancia de considerar la escala cuando se aplica el análisis y la valoración

de los diferentes servicios para apoyar la formulación de políticas, ya que a distintas escalas espaciales el interés en los servicios ecosistémicos puede variar. El estudio de los servicios ecosistémicos desde un enfoque de valoración económica ayuda a proporcionar información esencial para la creación de políticas destinadas a la conservación y manejo sustentable de los recursos naturales (Ojeda et al., 2022).

Complementando a la forma de valorar los servicios ecosistémicos, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** describe los cuatro pasos principales para la valoración de los servicios ecosistémicos, se consideran tres servicios y cuatro tipos de valor, que se recomienda se aplique a los ecosistemas naturales por la importancia de los servicios de regulación y culturales, que este tipo de ecosistemas brindan a la humanidad (Hein et al., 2006).

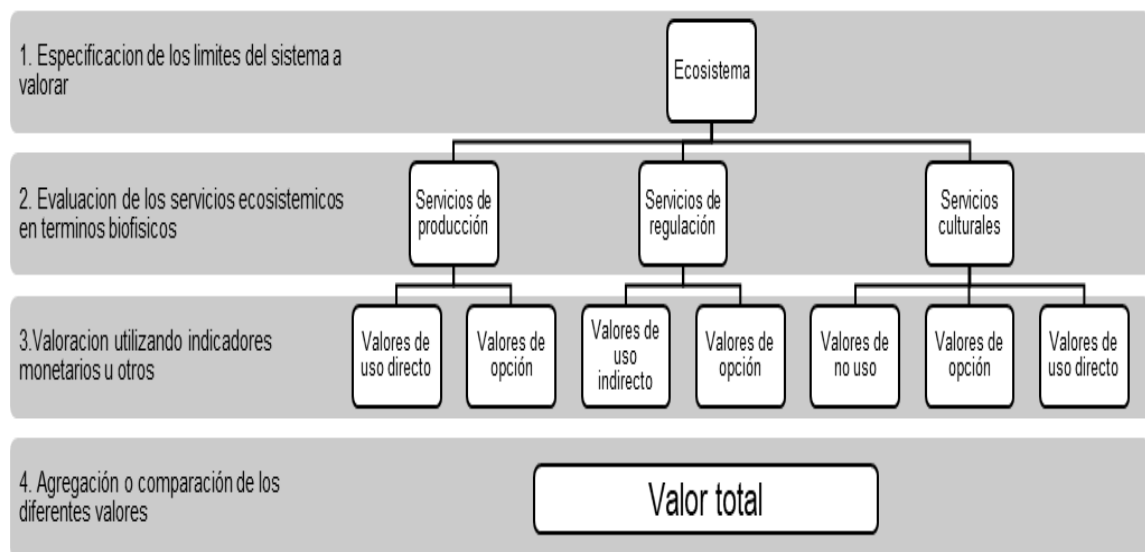


Figura 1. Los cuatro pasos para la valoración de los servicios ecosistémicos
Fuente: Hein et al. (2006)

Millenium Ecosystem Assesment (2003), presenta la clasificación de los servicios ecosistémicos considerando las características de los ecosistemas además de las políticas publicas y privadas de la siguiente manera:

1. Servicios de provisionamiento: proporcionan el sustento esencial para el desarrollo de la vida humana, son tangibles.

2. Servicios de regulación: son los que mediante los procesos e interacciones del componente biótico y abiótico de los ecosistemas regulan las condiciones del ambiente en donde la población realiza sus actividades productivas.
3. Servicios culturales: pueden brindar beneficios de tipo recreativos, educacionales, espirituales, dependen de la percepción humana.
4. Servicios de soporte: son los procesos que ocurren en los ecosistemas que aseguran el su funcionamiento y resiliencia.

Disciplinas como la economía ambiental han buscado la manera de valorar económicamente los servicios ecosistémicos para integrarlos en el análisis económico y asegurar su uso eficiente y sostenible (Ramírez et al., 2023).

La valoración económica de los ecosistemas suele resultar en un tarea inmensa y nunca completa, por lo que se debe considerar el enfoque en un componente o en alguno de sus múltiples beneficios (Cotler et al., 2011). Por lo tanto, para no omitir los beneficios que nos otorgan los ecosistemas, es necesario evaluar cada uno de los servicios que nos brindan para así poder visualizar los beneficios que otorgan a la población (Grêt-Regamey, et al., 2008).

Uno de los servicios ecosistémicos de mayor relevancia es el recurso hídrico, el cual es esencial para el desarrollo humano, pero que presenta el problema del valor que se le otorga (Cardenas, 2022). Dada la importancia de este servicio ecosistémico Gaspari et al. (2021), indica que el clima, la cobertura de la tierra, los cambios de uso de suelos, los procesos dinámicos y características biofísicas de una cuenca hídrica son los factores de los cuales depende el servicio ecosistémico de provisión hídrica.

2.2 Métodos de valoración económica

En el ámbito económico, la valoración económica es un técnica teórico que se usa para dar un valor monetario a los bienes y servicios ecosistémicos, ya sea que estos tengan o no un precio en el mercado (Azqueta, 2007). Para facilitar la tarea de la valoración económica, se hace uso del enfoque del Valor Económico

Total (VET), en la que se recomienda desagregar cualquier impacto ambiental en componentes de valor individuales (Dixon & Pagiola, 1998).

De los cuatro tipos de valor otorgados a los múltiples beneficios que proporcionan los ecosistemas Osorio y Correa (2004), mencionan los valores de uso, compuesto por el uso directo (dados por el uso tangible, como el agua, madera, alimentos), los valores de uso indirecto (conservación de suelos, recarga de acuíferos, control biológico) y los valores de opción, que son la preferencia de un individuo por conservarlo ya que la pérdida del mismo supone una pérdida en su bienestar (conservación de hábitats).

Por otro lado, los valores de no uso o bien llamados valores de legado o de existencia, son los que se consideran que solo por su existencia son valiosos y se protegen para que las futuras generaciones tengan acceso a ellas (Báez-Quñones, 2018; Osorio & Correa, 2004).

Dixon y Pagiola (1998) proponen para cada categoría de valor que se adopte una serie de metodologías específicas a aplicar, la cual depende de cada situación y de la disponibilidad de datos. Así mismo, Báez-Quñones (2018) presenta las técnicas de valor más utilizadas en la valoración económica ambiental bajo el concepto de valor (Figura 2).

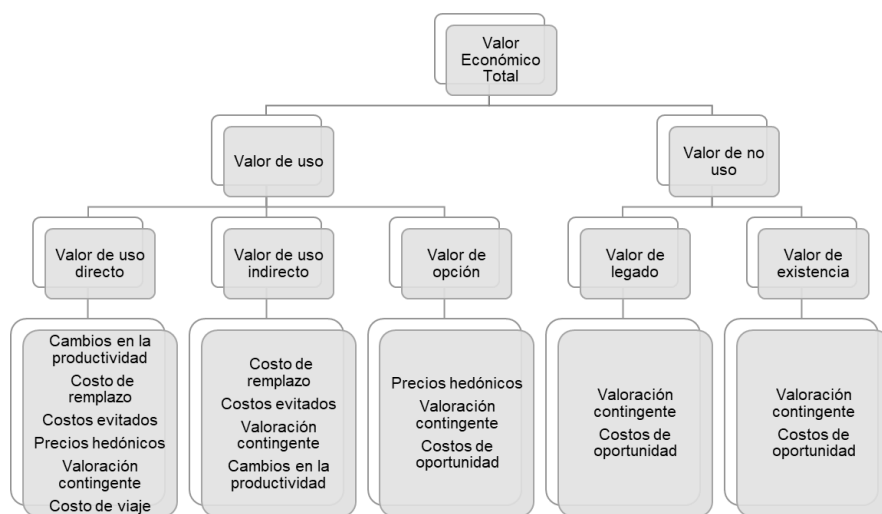


Figura 2. Métodos de valoración económica ambiental.
Fuente: Elaborado de acuerdo con Báez-Quñones (2018).

2.3 Método costo de reemplazo

El método de costo de reemplazo se basa en la estimación contable o ingenieril de los costos de reemplazo o restauración del daño potencial que pudiera ocurrir debido a la ausencia del estado natural de un bien o servicio (Dixon & Pagiola, 1998). La aplicación de este método busca estimar el valor de los beneficios ambientales que se pudieran perder o alterar por la gestión humana, mediante el costo de restaurar o devolver al ecosistema su estado natural (Pérez y Rojas, 2008). Al obtener como resultado del método un costo de reemplazar el daño ambiental ya sea por el uso inadecuado o por situaciones externas, es posible determinar el establecimiento de medidas para prevenir, mitigar, o evitar el daño (Casallas et al., 2017).

En América Latina, en México el método de costo de reemplazo ha sido empleado para valorar la degradación del suelo por la pérdida de los macronutrientes *in situ* de los suelos agrícolas (Cotler et al. 2011); en Colombia se estimó el valor del control de la erosión de suelos mediante el costo de reemplazo (Consultoría Colombiana S. A., 2018); en el caso de ambos casos fue posible obtener un valor para el recurso ecosistémico analizado mediante los costos que implica poder recuperar o restaurar la degradación que había sufrido.

2.4 Métodos de valoración del recurso hídrico.

La Valoración Económica del recurso hídrico se ha estudiado en diversos países entre los que se encuentran Perú, en donde Requejo-La Torre et al. (2021) en el área de conservación Municipal “Asociación Hídrica Aguajal Renacal, Alto Mayo”, obtuvo el valor económico del agua por el valor de uso indirecto, en turismo, mediante el pago promedio de paseo en canoa, y el costo del uso de agua en la producción de arroz, obteniendo por año el monto de S/40,000 por turismo y por la producción de arroz fue de S/149,998.80.

Por otra parte en Costa Rica, Cordero y Castro (2001), calcularon el valor de recuperación, basado en los costos de reemplazo, para las actividades de

reforestación con el fin de recuperar y conservar las microcuencas de Heredia, consideradas áreas prioritarias por la provisión de agua y obtuvieron un valor de recuperación de 4.89 colones/m³ de agua.

Además en Chile, Oyarzún et al. (2005) estudió el rendimiento hídrico de dos cuencas de la Ecorregión del Bosque Lluvioso Valdiviano, realizando la comparación de una cuenca con bosque nativo y la otra con plantaciones exóticas, en la que la segunda cuenca presentaba bajos rendimientos en provisión de agua; se realizó la valoración económica de la provisión de agua en la cuenca, mediante el método de cambio de productividad, demostrando que por cada ha que se transformaba de bosque nativo a otro uso competitivo limitaba la provisión de agua fresca en la región, y obtuvieron un valor anual del servicio ecosistémico de \$ 74,971 por ha.

Y en Álamos Sonora, se realizó la valoración económica del agua, considerado un recurso escaso en la zona, mediante el método de valoración contingente se obtuvo que la disponibilidad a pagar por las comunidades en general fue de \$94.27/persona, aunque destacó la comunidad Güirocaba que tuvo la mayor disposición a pagar por la cantidad de \$1000.00/persona (Ramírez et al., 2023).

2.5 Cuencas hidrológicas y la importancia del recurso hídrico

La cuenca hidrográfica es la unidad territorial delimitada por una línea imaginaria que pasa sobre la topografía del lugar denominada parteaguas. El agua que precipita en el área se reúne y escurre a un punto determinado, puede escurrir y desembocar en el cauce principal o pueden ser diversas escorrentías que se juntan en un río, lago o mar. Las escorrentías que agrupan cuerpos de agua sin contacto con el mar se les llama cuencas endorreicas, y las que desembocan al mar son cuencas exorreicas (González et al., 2016).

Las cuencas hidrográficas se deben analizar como una unidad básica en la planificación del desarrollo de las poblaciones, ya que además de proporcionar diversos beneficios ambientales a la población, provee uno de los recursos más

importantes, el agua que representa la base de la vida en nuestro planeta (Quintero, 2021).

La institución encargada de la gestión y administración de este recurso vital en México es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tienen como uno de sus principales objetivos, el acceso al recurso hídrico de manera ordenada, además de contar con la calidad adecuada y en cantidad suficiente (CONAGUA, 2022).

En las zonas rurales es bien sabido que sus actividades de subsistencia se basan y dependen del uso de los recursos naturales con los que disponen, pero muchas veces las estrategias que implementan las poblaciones no garantizan la permanencia a largo plazo de los beneficios que se obtienen de los ecosistemas. Es así como existe la necesidad de hacer notar a estas poblaciones del papel que juegan para salvaguardar la naturaleza, que no solo les provee a ellos de beneficios sino al resto de la población nacional y hasta mundial en mayor o menor medida. Así mismo, es necesario que reciban marcos legales y gubernamentales para el cuidado y protección de sus territorios, así como de los servicios ecosistémicos que ofrecen las mismas, esto para evitar que un manejo inadecuado de los recursos naturales llegue a condicionar el desarrollo o provocar conflictos humanos (Sandoval et al., 2016).

2.5.1 Modelos de balance hídrico

La necesidad de modelar los procesos que ocurren dentro de las cuencas hidrográficas que permitan a la toma de decisiones de administradores y gobiernos para la mejora y cuidado de los bienes que se reciben, se ha vuelto cada vez más importante, sobre todo en las zonas rurales donde la información es escasa ha limitado el estudio de los ecosistemas.

SEMARNAT (2013) considera a las cuencas hidrográficas como una dimensión espacial y temporal fundamental para la adaptación a los diversos cambios climáticos, y para ello se les debe entender como la unidad básica para la planeación y el manejo de los recursos naturales. Por ello para entender espacialmente el ciclo hidrológico es necesario el conocimiento y la delimitación

de las cuencas hidrográficas que permita conocer el sistema de corrientes que influyen en la calidad y cantidad de agua disponible.

Debido a la complejidad de los procesos hidrológicos resultan difícil la modelación, esto por los factores que influyen y que además varían de manera espacial y global, se debe considerar las condiciones climáticas, las características del suelo, el tipo de cobertura del suelo y las características topográficas (Canqiang et al., 2012). El evaluar estos servicios ecosistémicos de forma detallada generalmente se ve limitada por la falta de información ambiental disponible, y además resulta aún más costoso la recolección de datos en campo, por lo tanto se ha visto que para estos tipos de análisis los métodos más usados se basan en el uso de técnicas de modelación simple en las que los índices de vegetación espectral, información topográfica y coberturas de suelo son las variables más usadas (Martinez-Harms & Balbanera, 2012).

Por su parte, Santillan et al. (2013), menciona que se ha hecho más recurrente el uso de métodos de balance hídrico para estimar la capacidad de captación de agua y los flujos existentes dentro de la cuenca, y determinar los periodos donde se presentan los procesos hidrológicos, ya que en ciertas regiones la disponibilidad de agua depende esta capacidad de captación que tiene cada cuenca. En relación con lo anterior, los Balances Hídricos Climáticos (BHC), son aquellos que consideran variables de tipo climatológicas de un cierto periodo de tiempo, la precipitación y temperatura para realizar la estimación del balance. Como el caso del balance hídrico propuesto por Thornthwaite y Mather (1957), que se define como un método directo, la cual además de utilizar datos climáticos considera la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, esto como una referencia de la reserva de agua que puede retener (Santillan et al., 2013).

Una manera alternativa de estimar el agua aprovechable en las cuencas tomando en cuenta las coberturas vegetales existentes actualmente en la zona son los modelos de simulación hidrológica, los cuales representan de manera simplificada el proceso que ocurre en el área de drenaje (Grêt-Regamey, et al.,

2008). Actualmente se tiene disponible una diversa cantidad de modelos que ayudan a representar los procesos de una cuenca y con el uso de los resultados hacen posible las adecuadas decisiones para la gestión más acertada del recurso agua, entre los que se encuentran: HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), Kinneros (Kinematic Runoff and Erosion Model) y SWAT (Soil and Water Assessment Tools) (Sánchez-Galindo, 2017).

2.6 Sistemas de información geográfica en la valoración de servicios ecosistémicos

Los Sistemas de Información Geográficos (SIG) son muy útiles en la modelación de procesos ecosistémicos, debido a la capacidad que tienen de incorporar las complejidades de las dimensiones espaciales involucradas en regiones montañosas que cuentan con topografía compleja y en los casos en que los gradientes ambientales distintivos requieren mayor consideración por los patrones espaciales (Grêt-Regamey, et al., 2008).

Los SIG en los últimos años ha hecho posible el desarrollo de los modelos que incluyan estos factores complejos que se desarrollan en las cuencas hidrográficas, ejemplo de ellos son: la herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT), el Modelo integrado de Suelos y Aguas (SWIM) y el Sistema integrado de Modelado Hidrológico de Penn State para Suelos y Aguas (PHIM); aunque estos modelos requieren datos muy específicos que en muchas regiones no se cuenta con ello (Scordo et al., 2018).

Para la evaluación de los servicios ecosistémicos se han generado diversos modelos, entre ellos el conjunto de modelos de software libre y código abierto InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem and Tradeoffs), lanzado en 2006, por un conjunto de instituciones liderado por The Natural Capital Project (Nat Cap), World Wildlife Fund (WWF), Universidad de Minnesota y Universidad de Stanford. Este modelo permite determinar los cambios o las variaciones que surgen en los ecosistemas y que pueden alterar los beneficios que estos ofrecen, además

permite la visualización en mapas de dichos cambios o en su caso la cuantificación de estos ecosistemas (Sharp et al., 2023).

2.7 Modelo Seasonal Water Yield (SWY)

Natural Capital Project desarrolla modelos que cuantifican y mapean los valores de los servicios ecosistémicos terrestres, de agua dulce y marinos, para que dichos resultados sean considerados en la toma de decisiones; ya que estos servicios al ser muy importantes para el desarrollo humano muchas veces no se conoce el valor que estos representan y sufren una rápida degradación y agotamiento (Sharp et al., 2023).

InvEST de Natural Capital Project (2023) agrupa sus modelos en cuatro categorías, 1) servicios de apoyo, 2) servicios finales, 3) herramientas para facilitar el análisis de los servicios ecosistémicos y 4) herramientas de apoyo. Dentro de los modelos disponibles, los más usados son: rendimiento anual de agua, almacenamiento y secuestro de carbono, producción de cultivos, calidad de hábitat, relación de suministro de nutrientes, tasa de suministro de sedimentos, rendimiento hídrico estacional.

El modelo de rendimiento estacional de agua analiza como base la cuenca hidrográfica mediante un proceso de SIG mediante la influencia de la cobertura vegetal y los tipos de suelos presentes en una determinada cuenca.

El modelo de rendimiento estacional de agua de InVEST calcula el balance hídrico a escala de píxeles que llama parcelas, tomando como hipótesis que el balance hídrico sucede en la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración, considerando la cobertura y el uso que se tiene del suelo, además de sus propiedades físicas para retener agua, y da como resultados un conjunto de tres índices de flujo: la esorrentía superficial o flujo rápido (QF), el flujo base real (B) y la recarga directa (L) (Sharp et al., 2023).

El modelo requiere datos como modelos de elevación digital (DEM), datos climáticos, uso de suelo y vegetación, y edafológicos.

2.7.1 Aplicaciones del modelo rendimiento estacional de agua

El modelo se ha aplicado a diversos estudios entre los que destacan: el estudio de Halder et al. (2022), quienes aplicaron el modelo SWY de InVest en la cuenca del río Shali, India, encontrando que la producción de agua en la cuenca depende sumamente de la cantidad de precipitación y de los patrones de uso de la tierra del área, además de corroborar que el desempeño del modelo fue significativo.

Raji et al. (2021) por su parte, realizaron el balance hídrico de la cuenca Sokoto-Rima en Nigeria con el modelo SWY, con un ecosistema árido; como apoyo para la planificación y la gestión eficaz del escaso del recurso hídrico existente en la zona. Los resultados del modelo mostraron la sensibilidad a los cambios en los valores de los parámetros alfa, beta y gamma, también reportó el impacto de la sensibilidad de la cubierta terrestre, el clima, y los factores hidrogeológicos en la disponibilidad de agua dulce y en la gestión de los recursos hídricos.

Además, Gashaw et al. (2022) evaluaron el desempeño de los modelos Water Yield y Seasonal Water Yield, en la cuenca hidrográfica del Gumara en el alto Nilo Azul, y reportaron que las medidas de rendimiento alcanzadas por los modelos empleados son aptas para utilizarse en la planificación y gestión de los recursos hídricos, donde los datos son empíricos debido a la escases de información que se tiene en la región.

Mientras que Hamel et al. (2020), aplicaron el modelo en cuencas de Perú y Myanmar para después comparar los resultados con datos observados y otros modelos hidrológicos aplicados en el lugar de estudio, y obtuvieron una correlación adecuada del flujo base con un modelo establecido en la cuenca de Perú; en el caso de Myanmar el modelo mostro un desempeño satisfactorio representando las variaciones hídricas que se tienen mes a mes

A manera de comparación del modelo antecesor al rendimiento hídrico estacional Pérez (2018), aplicó el modelo Water Yield a través del programa de análisis de servicios ecosistémicos InVEST v3.3.3 y describió que el modelo estima las diferentes aportaciones de agua desde todo el conjunto del territorio (cuencas),

la cual también toma en cuenta los cambios en los patrones de uso del suelo y su efecto al rendimiento hídrico superficial, pero que no considera el subsuelo y flujo base de agua (factor que en el caso del modelo SWY si calcula), estima la disponibilidad de agua en la diferencia entre el agua precipitada y las pérdidas totales por evapotranspiración, los datos que considera el modelo están sujetos a un análisis espacial mediante álgebra de datos de mapas ráster y así determinar la cantidad de agua que fluye por cada pixel, considerando la relación anterior, el agua que no es evaporada es el agua que resulta disponible.

2.8 Literatura citada

- Alvarez-Arteaga, G., Garcia, N., Krasilnikov, P., & Garcia-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47(2), 171–180.
- Azqueta, D. (2007). *Introducción a la economía ambiental* (Segunda). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.
- Báez-Quñones, N. (2018). Valoración económica del medio ambiente y su aplicación en el sector ganadero cubano. *Pastos y Forrajes*, 41(3), 161–169.
- Canqiang, Z., Wenhua, L., Biao, Z., & Moucheng, L. (2012). Water yield of Xitiaoqi river basin based on InVEST modeling. *Journal of Resources and Ecology*, 3(1), 50–54.
- Cardenas, E. (2022). Desabasto de agua potable en algunas colonias del área metropolitana de Guadalajara: incumplimientos y consecuencias políticas. *Opera*, 31, 71–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.18601/16578651.n31.05>
- Casallas, Y. A., López, M. O., & Diaz, C. E. (2017). *Criterios técnicos para el uso de herramientas económicas en los proyectos, obras o actividades objeto de licenciamiento ambiental* (p. 155). MINAMBIENTE.
- CONAGUA. (2022). Estadísticas del agua en México 2021. Fondo para la comunicación y la educación ambiental, A.C.
- Consultoría Colombiana S. A. (2018). *Estudio De Impacto Ambiental Del Proyecto La Virginia Alférez*. https://www.grupoenergiabogota.com/.../Cap_5.1Evaluación Ambiental.pdf
- Cordero, D., & Castro, E. (2001). Pago por servicio ambiental hídrico; el caso de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH SA). *Revista Forestal Centroamericana*, 10(36), 41–45.
- Cotler, H., López, C. A., & Martínez-Trinidad, S. (2011). ¿Cuánto nos cuesta la

- erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México. *Investigación Ambiental*, 3(2), 18–30.
- Cruz, F. J., & Rivera, S. (2003). Valoración Económica del recurso hídrico para determinar el pago por servicios ambientales en la cuenca del río Calan, Siguatepeque, Honduras. *ESNACIFOR*, 15(2).
- Delgado, M. S., Martínez-Fresneda, M., & Villaruel, A. (2019). Valoración económica del servicio limnológico de la laguna Magdalena-Atillo, Riobamba-Ecuador. *Enfoque UTE*, 10(2), 1–16.
- Díaz, E. I., & López, L. F. (2021). Del por qué valorar hacia el para quién valorar, una reflexión a más de 20 años de la propuesta de Robert Costanza y su equipo. *Revista En-Contexto*, 9(15), 121–139. <https://doi.org/10.53995/23463279.900>
- Dixon, J., & Pagiola, S. (1998). Análisis Económico y Evaluación Ambiental. *Environmental Assessment Sourcebook*, 23, 1–17.
- Gashaw, T., Worqlul, A. W., Dile, Y. T., Sahle, M., Adem, A. A., Bantider, A., Teixeira, Z., Alamirew, T., Meshesha, D. T., & Bayable, G. (2022). Evaluating InVEST model for simulating annual and seasonal water yield in data-scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: implications for water resource planners and managers. *Sustainable Water Resources Management*, 8(5), 170. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00757-3>
- Gaspari, F., Diaz Gomez, A., Delgado, M., & Senisterra, G. (2015). Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense. Argentina. *Revista de La Facultad de Agronomía- La Plata*, 114(Núm. Esp. 1 Agricultura Familiar, Agroecología y Territorio), 214–221.
- Gaspari, F. J., Gómez, A. R. D., & Medina, F. A. M. (2021). Spatial variability of water yield under land use and cover change and rainfall scenarios in the upper basin of the Río Sauce Chico, Argentina. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(1), 74–112. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-01-03>
- González, M. G., Retamoza, J. G., Albores, R. H., Guerrero, & A., A. (2016). Gestión integral de cuencas hidrográficas: una alternativa a la sustentabilidad de los recursos hídricos en México. *Revista de Ciencias de La UNICACH*, 10(1), 91–98.
- Grêt-Regamey, A., Bebi, P., Bishop, i. D., & A., S. W. (2008). Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region. *Journal of Environmental Management*, 89(3), 197–208.
- Grêt-Regamey, A., Walz, A., & Bebi, P. (2008). Valuing ecosystem services for sustainable landscape planning in Alpine regions. *Mountain Research and Development*, 28(2), 156–165. <http://www.jstor.org/stable/25164206>.
- Halder, S., Das, S., & Basu, S. (2022). Estimation of seasonal water yield using

- InVEST model: a case study from West Bengal, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(14), 1293. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10551-2>
- Hamel, P., Valencia, J., Schmitt, R., Shrestha, M., Piman, T., Sharp, R. P., Francesconi, W., & Guswa, A. J. (2020). Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar. *Journal of Environmental Management*, 270, 110792. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110792>
- Hein, L., Van Koppen, K., De Groot, R. S., & Van Ierland, E. C. (2006). Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 57(2), 209–228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.04.005>
- Martinez-Harms, M. J., & Balbanera, P. (2012). Methods for mapping ecosystem service supply: a review. *International Journal of Biodiversity Science*, 8, 17–25. <https://doi.org/10.1080/21513732.2012.663792>
- Merino, L. (2008). Conservación comunitaria en la cuenca alta del Papaloapan, Sierra Norte de Oaxaca. *Nueva Antropología*, 21(68), 37–49.
- Morales, J. (2021). Diagnóstico del servicio ambiental de provision hídrica en las comunidades indígenas de la parroquia Lumbaqui, Ecuador. *Revista Agrollania de Ciencia y Tecnología*, 20, 89–98.
- Moreno, M. L. (2020). *Guía metodológica para la identificación y valoración de los bienes y servicios que brinda la biodiversidad y los recursos naturales* (p. 188). Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible (CINPE).
- Ojeda, J. G., Amarilla, S. M., & Villalba, L. J. (2022). Variación del stock de carbono en plantaciones forestales y bosques nativos de la Ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná, Paraguay. *Investig. Agrar.*, 24(1), 53–60. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.18004/investig.agrar.2022.junio.2401701>
- Osorio, J. D., & Correa, F. (2004). Valoración Económica de costos ambientales: marco conceptual y métodos de estimación. *Semestre Económico*, 159–193.
- Oyarzún, C. E., Nahuelhual, L., & Núñez, D. (2005). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo*, 20(3), 88–95.
- Pérez, M. A., & Rojas, J. H. (2008). *Hacia el Desarrollo Sostenible en Colombia* (p. 63).
- Pérez, P. (2018). Consecuencias del cambio climático en la disponibilidad de agua en el sureste de la península ibérica. evaluación del modelo hidrológico invest en escenarios futuros. *Papeles de Geografía*, 64, 26–42. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2018/323771>
- Project, N. C. (2023). *InVEST 3.14.0*. Stanford University, University of

Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences.

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

- Quintero, L. (2021). Valoración ambiental del agua en el Municipio Libertador del estado Mérida. *Actualidad Contable Faces*, 24(42), 175–194. <https://doi.org/https://doi.org/10.53766/ACCON/2021.42.07>
- Raji, S. A., Odunuga, S., & Fasona, M. (2021). Spatial Appraisal of Seasonal Water Yield of the Sokoto-Rima Basin. Sakarya. *University Journal of Science*, 25(4), 950–968. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.800302>
- Ramírez, A., Castillo, I., Calderón, M., Duffus, D., & Pirela, A. (2023). Valoración económica y disponibilidad a pagar por el agua en comunidades rurales. *Económicas CUC*, 44(1), 83–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.17981/econcuc.44.1.2023.Econ.5>
- Requejo-La Torre, M., Rodríguez-Lichtenheldt, J. R., Gonzales-Castillo, J. R., Sánchez-Medina, G. A., & Morey, E. J. (2021). Valoración económica ambiental con fines turísticos del Área de Conservación Municipal “Asociación Hídrica Aguajal Renacal Alto Mayo”. *Revista de Economía e Sociología Rura*, 59(4), 1–20.
- Sánchez-Galindo, M. (2017). *Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT*. VIII, 141–156. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>
- Sandoval, F., Valdivia, R., Cuevas, C., Hernández, J., & Medellín-Azuara, J. Hernández, A. (2016). Valoración económica del agua potable en la delegación Iztapalapa, D. F. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(6), 1467–1475. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v7i6.207>
- Santillan, E., Davila-Vazquez, G., Anda, J., & Díaz, J. de Jesus. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México. *Revista Ambiente & Agua*, 8(3), 104–117. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1147>
- Scordo, F., Lavender, T. M., Seitz, C., Perillo, V. L., Rusak, J. A., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2018). Modeling Water Yield: Assessing the role of site and region-specific attributes in determining model performance of the InVEST Seasonal Water Yield Model. *Water (Switzerland)*, 10(11), 1–42. <https://doi.org/10.3390/w10111496>
- Sharp, R. H., Tallis, T., Ricketts, A., Guerry, S., Wood, R., Chaplin-Kramer, E. Nelson, D., & Ennaanay, S. (2023). *InVEST 3.14.0. User's Guide. The Natural Capital Project*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

3. VALORACIÓN ECONÓMICA DEL RENDIMIENTO HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RIO CAJONOS, OAXACA

ECONOMIC VALUATION OF THE WATER YIELD OF THE CAJONOS RIVER BASIN, OAXACA

3.1 Resumen

Uno de los servicios ecosistémicos de mayor importancia para el desarrollo de las poblaciones y en general de los seres vivos es el recurso hídrico, por ello es necesario su estudio en temas de valoración económica como del funcionamiento físico dentro de la cuenca en la que se desarrolla el proceso hidrológico. La cuenca del Río Cajonos, se ubica dentro de una zona de suma importancia por su gran diversidad biológica y sobre todo por su inmensa capacidad de captación de agua, fue necesario realizar la valoración económica correspondiente para otorgar a los tomadores de decisiones herramientas para la adecuada gestión del recurso, para ello se usó como herramienta de apoyo el modelo Seasonal Water Yield de InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem and Tradeoffs) para estimar la recarga local que se tiene en la cuenca.

Con la estimación del modelo Seasonal Water Yield, se obtuvo una recarga local de hasta 2,166 mm en toda la cuenca, además se identificó las características biofísicas de las zonas de menor y mayor recarga. Con los datos de la recarga local se pudo estimar un valor económico del recurso hídrico en las diferentes áreas de la cuenca, se obtuvo un rango monetario de 1,164.92 USD/m³ a 3,485.77 USD/m³.

Palabras clave: Cuencas hidrográficas, rendimiento hídrico estacional, SIG, Valoración Económica.

3.2 Abstract

One of the most important ecosystem services for the development of populations and living beings in general is the water resource, which is why it is necessary to study it in terms of economic valuation and physical functioning within the basin where the hydrological process takes place. The Cajonos River basin is located within an area of great importance for its great biological diversity and above all for its immense water catchment capacity, it was necessary to carry out the corresponding economic valuation to provide decision makers with tools for the proper management of the resource, The Seasonal Water Yield model of InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem and Tradeoffs) was used as a support tool to estimate local recharge in the basin.

With the estimation of the Seasonal Water Yield model, a local recharge of up to 2,166 mm was obtained for the entire basin, in addition to identifying the biophysical characteristics of the areas with the lowest and highest recharge. With the local recharge data, it was possible to estimate an economic value of the water resource in the different areas of the basin, obtaining a monetary range of 1,164.92 USD/m³ to 3,485.77 USD/m³.

Key words: Watersheds, seasonal water yield, GIS, economic valuation.

3.3 Introducción

En los últimos años se ha generado una rápida evolución en el área de la economía ambiental mediante investigaciones más significativas con respecto a la valoración de los servicios ecosistémicos esto debido a la necesidad de evaluar económicamente la calidad del medio ambiente y los efectos que generan en el bienestar de la vida de las personas, (Grêt-Regamey, et al., 2008). Con este enfoque la valoración económica de los servicios ecosistémicos tiene por objetivo emitir mensajes claros a los tomadores de decisiones con respecto a la importancia de los bienes y servicios que brindan los ecosistemas, mediante la utilización de diferentes metodologías y técnicas de estimación para los diferentes tipos de servicios (Morales, 2021).

La valoración económica de los ecosistemas en su totalidad puede resultar una tarea inmensa y nunca completa, por ello se debe considerar la evaluación de cada uno de los bienes y servicios de manera separada, para visualizar los múltiples beneficios que el ecosistema otorga a la población (Cotler et al., 2011; Grêt-Regamey, Walz, et al., 2008)

Uno de los servicios ecosistémicos de mayor relevancia es el recurso hídrico, el cual es esencial para el desarrollo humano, pero que presenta el problema del valor que se le otorga (Cardenas, 2022). En muchas regiones del mundo la disponibilidad de agua aprovechable para las poblaciones depende de la capacidad de captación de agua de la cuenca en la que se ubiquen (Santillan et al., 2013), así mismo la provisión de agua como parte del bienestar de comunidades o como parte del desarrollo agrícola es uno de los servicios de mayor importancia en las áreas de conservación de una cuenca (Morales, 2021). Por lo tanto, las cuencas hidrográficas se deben analizar como una unidad básica en la planificación del desarrollo de las poblaciones, ya que además de proporcionar diversos beneficios ambientales a la población, provee uno de los recursos más importantes, el agua, que representa la base de la vida en nuestro planeta (Quintero, 2021).

En relación a esto, los sistemas de información geográfica (SIG), a lo largo de su desarrollo y uso, mediante el almacenamiento, selección y análisis de información espacial, ha contribuido en modelación de sistemas (Aceves-Quesada et al., 2006). La aplicación de modelos hidrológicos mediante SIG que tenga la capacidad de estimar con buena precisión la disponibilidad de agua en la cuenca, son importantes para una mejor planificación y gestión de los recursos hídricos (Pereira et al., 2016). Una manera de estimar la capacidad de captación de agua en una cuenca es mediante el uso de modelos hidrológicos que permitan calcular el balance hídrico que sucede dentro de la cuenca (Santillan et al., 2013).

La cuenca del río Cajonos, ubicado en la Sierra Norte de Oaxaca, se caracteriza por la diversidad de ecosistemas que alberga en su territorio, además de contar con una gran capacidad de captación de agua, sin embargo, es de suma importancia para el bienestar social precisar el valor del servicio ecosistémico que ofrece la cuenca (Merino, 2008). Por lo tanto, es indispensable analizar la condición de conservación de la cuenca y los ecosistemas naturales e intervenidos que proveen el servicio hídrico, con el fin de diseñar e implementar estrategias o acciones necesarias para cubrir la demanda de agua para una creciente población (Cantú et al., 2018).

En relación con lo anterior, en la cuenca del río Cajonos hace falta estudios que permitan definir el valor económico de cada servicio ecosistémico que se tiene en el territorio, por ello, el presente estudio tuvo como objetivo estimar el valor económico del rendimiento hídrico que tiene la cuenca, mediante el método costo de remplazo, utilizando como herramienta de apoyo para el cálculo del rendimiento hídrico el modelo Seasonal Water Yield.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Área de estudio

La cuenca de estudio se localiza al norte del estado de Oaxaca dentro de la región hidrológico- administrativa (RHA) X - Golfo Centro, que a su vez se

encuentra en la cuenca 28 Papaloapan (CONAGUA, 2022). La cuenca se encuentra en marcada entre las coordenadas geográficas: 16°58'52.1" y 17°40'33.4" latitud norte y 96°18'54.7" y 96°7'42.4" latitud oeste. Tiene una área de 2,313.24 km², con un rango altitudinal de 120 a 3000 m.s.n.m.

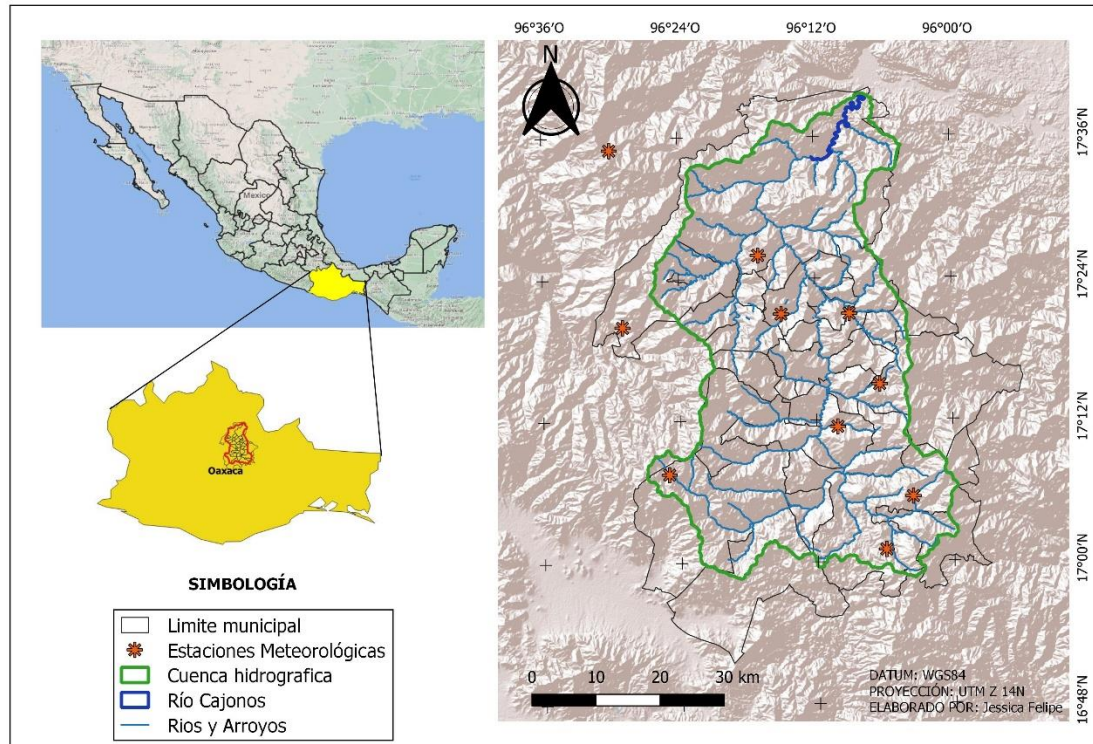


Figura 3. Ubicación de la cuenca del Río Cajonos
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los datos reportados por (INEGI, 2021) la cuenca cuenta con cinco tipos de importantes ecosistemas, bosque de pino cubre el 30% del territorio, bosque mesófilo de montaña cubre el 29%, bosque de encino cubre el 16 %, la agricultura cubre el 10 % presente en mayor medida en la parte media y alta de la cuenca y ha desplazado la vegetación natural de los bosques de pino, y mesófilo de montaña, selva alta perennifolia abarca el 9 % de la cuenca y se distribuye en la parte baja, los asentamientos humanos se componen de pequeñas comunidades dispersas a lo largo de la cuenca representando solo el 2% del territorio.

La cuenca Cajonos se caracteriza por la presencia de una gran red de flujos perenes de acuerdo con el informe de la red hidrográfica del INEGI (2010), reporta la presencia de 32 arroyos y 26 ríos. Esta cuenca alberga un total de 37 municipios (Cuadro 1), estos pertenecen principalmente al distrito de Villa Alta; los indígenas Zapotecos constituyen la mayoría de la población (INPI, 2020) y la agricultura tradicional tiene gran importancia en esta región (Merino, 2008).

Cuadro 1. Municipios ubicados en la cuenca

Clave municipio	Nombre del municipio	Clave municipio	Nombre del municipio
457	Santiago Camotlán	442	Santa María Yalina
42	Ixtlán de Juárez	257	San Melchor Betaza
222	San Juan Yaeé	473	Santiago Laxopa
156	San Ildefonso Villa Alta	120	San Bartolomé Zoogocho
335	San Pedro Yaneri	114	San Baltazar Yatzachi el Bajo
471	Santiago Lalopa	38	Villa Hidalgo
223	San Juan Yatzona	503	Santiago Zochila
280	Villa Talea de Castro	60	Mixistlán de la Reforma
541	Tanetze de Zaragoza	138	San Francisco Cajonos
432	Santa María Temascalapa	437	Santa María Tlahuitoltepec
288	San Miguel Yotao	246	San Mateo Cajonos
514	Santo Domingo Roayaga	303	San Pedro Cajonos
128	San Cristóbal Lachirioag	299	San Pablo Yaganiza
201	San Juan Juquila Vijanos	522	Santo Domingo Xagacía
216	San Juan Tabaá	560	Villa Díaz Ordaz
554	Totontepec Villa de Morelos	337	San Pedro y San Pablo Ayutla
100	San Andrés Yaá	506	Santo Domingo Albarradas
97	San Andrés Solaga	31	Tamazulápam del Espíritu Santo
		298	San Pablo Villa de Mitla

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2010).

Los climas presentes en la zona de estudio según la clasificación Koppen modificado por (García, 1998), son: templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, clima semifrío, con temperatura media anual entre 5°C y 12°C, semicálido subhúmedo con temperatura media anual mayor de 18°C, semiárido cálido con temperatura media anual mayor de 22°C, y Cálido húmedo, con temperatura media anual mayor de 22°.

3.4.2 Método de costo de remplazo

Para la valoración del agua en la cuenca de estudio, se siguió la metodología utilizada en el estudio realizada por Lara et al. (2018) en la sierra madre de Chiapas.

Para la aplicación del método de costo de reemplazo se deben cumplir tres condiciones (Hein, 2011).

- a) El servicio ecosistémico debe ser reemplazado por una tecnología alternativa que provea el mismo beneficio
- b) El sustituto propuesto debe ser de menor costo
- c) La alternativa tecnológica podrá ser usada en la ausencia del servicio ecosistémico.

Las lagunas de infiltración cumplen las tres condiciones antes mencionadas, pero al igual que en el caso de estudio de Lara et al. (2018), en la cuenca de estudio no resultarían factibles por ser una zona montañosa, por lo tanto, se optó por los pozos de infiltración, aun sin ser los de menor costo.

Se considero la cotización para la construcción de un pozo de inyección profunda, reportada por Vanegas (2018), fue necesario deflactar el precio de 2017 para 2023, con la siguiente formula:

$$P_{2023} = P_{2017} \left(\frac{IPP_{2023}}{IPP_{2017}} \right)$$

P_{2023} precio deflactado para el año 2023

P_{2017} precio en 2017 a ajustar

IPP_t índice de precios al productor para el año t

Se utilizó el índice de precios al productor (sector construcción, materiales, alquiler de maquinaria y remuneraciones), Base: Julio 2019=100 (INEGI, 2023) .

Se descontó al tiempo de vida del proyecto, es decir del pozo. el tiempo de vida de este tipo de pozo de infiltración es de 25 a 50 años, para este estudio se usó

el año máximo de vida útil para determinar el valor neto de la tecnología de remplazo. El descuento se calculó con la fórmula:

$$VN = \frac{PP}{(1+d)^t}$$

Donde:

PP es el precio unitario del pozo de infiltración

d es la tasa de descuento

t es el año

VN es el valor neto

La tasa de descuento utilizada fue la tasa de descuento social para proyectos públicos de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (2021). Es necesario la estandarización de la capacidad física de infiltración para tener las estimaciones en USD/m³ por año.

3.4.3 Modelo de balance hídrico

Se calcularon los índices: flujo rápido QF, recarga local (L) y flujo base (Bsum), a partir de la metodología de (Natural Capital Project, 2023)

Flujo rápido QF

Este parámetro se calculó considerando el número de curva (NC), los eventos de lluvia mensuales que cae sobre el paisaje, donde las propiedades del suelo y del uso del suelo y vegetación determinaran la cantidad de lluvia que escurrirá sobre la superficie (QF) y la que se infiltra en el suelo definido como recarga local (L) que a su vez aporta al flujo base (Qb). El modelo primero calcula el flujo rápido (QF) mensual de cada parcela o píxel, basándose en la estimación de la escorrentía directa mensual en función de la precipitación mensual y el número de eventos de lluvia por periodo.

La escorrentía mensual $QF_{i,m}$ se define con la siguiente distribución exponencial:

$$QF_{i,m} = n_m x \left((a_{i,m} - S_i) \exp \left(-\frac{0.2S_i}{a_{i,m}} \right) + \frac{S_i^2}{a_{i,m}} \exp \left(\frac{0.8S_i}{a_{i,m}} \right) E_1 \left(\frac{S_i}{a_{i,m}} \right) \right) x (25.4)$$

Donde:

$a_{i,m}$ es la lámina media del evento de lluvia en el píxel i en el mes m en pulgadas:

$$a_{i,m} = \frac{n_{i,m}}{P_{i,m}} x 25.4$$

$n_{i,m}$ es el numero de eventos de lluvia en el píxel i en el mes m

$P_{i,m}$ es la lámina de precipitación mensual para el píxel i en el mes m

S_i es un parámetro que expresa la capacidad potencial de lluvia que puede retener la parcela y que a su vez depende del número de curva en pulgadas.

El número de curva es una forma sencilla de captar las propiedades del suelo y la cubierta del terreno, se produce mayor escorrentía cuanto más alto es el valor NC, cuando los suelos son arcillosos y la cobertura vegetal es escasa, esto no permiten la infiltración y favorece el escurrimiento.

E_1 es la función integral exponencial función del tiempo t .

Cuando las parcelas se ubican en una corriente de la cuenca el modelo determina que el escurrimiento superficial es igual a la precipitación, por lo tanto, no existe infiltración.

$$QF_{stream,m} = P_{stream,m}$$

El flujo anual (QF_i), se calcula con la suma de los valores mensuales:

$$QF_i = \sum_{m=1}^{12} QF_{i,m}$$

Recarga local (L)

El modelo calcula la recarga local de un píxel, que es la contribución potencial al flujo base, en una escala de tiempo anual, pero con los datos de la disponibilidad de agua mensual que no es evapotranspirada. Este balance hídrico simplificado

no toma en cuenta el riego o extracciones de agua, esta condición no resulta importante para nuestra zona de estudio. Ya que no existen estas cuestiones. La recarga local puede ser negativa si una parcela no recibe la suficiente precipitación para satisfacer la evapotranspiración que requiere la cobertura vegetal.

$$L_i = P_i - QF_i - ATE_i$$

P_i es la precipitación anual en la parcela i

QF_i es el escurrimiento superficial en la parcela i

ATE_i evapotranspiración reala en la parcela i

Evapotranspiración mensual $ATE_{i,m}$

$$ATE_{i,m} = \min(PET_{i,m}; P_{i,m} - QF_{i,m} + \alpha_m \beta_i L_{sum.avail,i}$$

$PET_{i,m}$ es la evapotranspiración potencial en el píxel i en el mes m

$$PET_{i,m} = Kc_{i,m} \times ET_{o,i,m}$$

$L_{sum.avail,i}$ es la contribución del área ubicada pendiente arriba,

α_m es la fracción de recarga anual media, de la pendiente arriba disponible para el mes m . este parámetro por defecto es 1/12.

β_i es la fracción de subsidio, caracteriza el flujo subsuperficial, define el porcentaje de subsidio de aguas arriba disponible para un píxel pendiente abajo para evapotranspiración, por defecto es 1. El parámetro toma valores que oscilan entre 0 y 1. Su ajuste define el agua disponible dependiendo de la topografía local, una posición cóncava o una posición convexa del paisaje.

$Kc_{i,m}$ es el coeficiente de cultivo mensual para el uso y cobertura del suelo en la parcela i en el mes m

$ET_{o,i,m}$ es la evapotranspiración referencia de la parcela i para el mes m

Recarga total (Q_b) es el promedio de las recargas de cada parcela de la cuenca, considerando los valores positivos y negativos.

$$Q_b = \frac{\sum_{k \in (\text{pixeles en la cuenca})} L_k}{n_{\text{pixeles en la cuenca}}}$$

Contribución relativa de cada píxel a la recarga total $V_{R,i}$

$$V_{R,i} = \frac{L_i}{Q_b \times n_{\text{pixeles en la cuenca}}}$$

Flujo base (Bsum)

El cálculo de este índice representa la contribución real de un píxel al flujo base, el agua que llega a la corriente. Pero si la recarga local es negativa, entonces la parcela no contribuyo al flujo base, entonces Bsum es igual a cero. Por otro lado, si L es mayor que cero entonces Bsum es una función de la cantidad de flujo que sale del píxel y de la contribución relativa a la recarga de ese pixel, que se calcula de forma recursiva a partir del pixel adyacente a la corriente Bsum (Hamel et al., 2020).

$$B_{sum,i} = L_{sum,i} \times \sum_{j \in (\text{pixeles a las que vierte el pixel } i)} \left(P_{ij} \times \left(1 - \frac{L_{avail,j}}{L_{sum,avail,j}} \right) \times \frac{B_{sum,j}}{L_{sum,j} - L_j} \right)$$

Si j es un píxel sobre la corriente se empleará la siguiente ecuación

$$B_{sum,i} = L_{sum,i} \times \sum_{j \in (\text{pixeles a las que vierte el pixel } i)} (P_{ij})$$

En la salida de la cuenca o en cualquier parcela adyacente a un cuerpo de agua, la suma de la generación de flujo base sobre todas las parcelas aguas arriba es igual a la suma de la generación local sobre las mismas parcelas ya que no hay más oportunidad para que flujo lento se consuma antes de llegar a la corriente:

$$B_{sum,outlet} = L_{sum,outlet}$$

$L_{sum,i}$ es la recarga acumulada aguas arriba:

$$L_{sum,i} = L_i + \sum_{j(\text{todos los pixeles a las que vierte el pixel } i)} L_{sum,j} \times P_{ij}$$

El caudal base, puede derivarse directamente de la proporción del caudal base acumulativo que sale de la celda i, con respecto a la recarga disponible a la recarga acumulativa aguas arriba.

$$B_i = \max\left(B_{sum,i} \times \frac{L_i}{L_{sum,i}}, 0\right)$$

3.4.3.1 Recopilación de datos

Los datos necesarios para calcular el balance hídrico mediante el modelo SWY de InVEST (Cuadro 2).

Cuadro 2. Información requerida por el modelo SWY

Datos de entrada	Fuente	Características
Capa ráster de Uso y cobertura de suelo.	INEGI Serie VII 2021	Escala 1:250,000
Tabla biofísica	Kc Allen et al. 2016 CN Hernández, 2014	Tabulado Tabulado
Modelo de elevación digital	CEM 3.0 INEGI	15 m
Vectorial del área de la cuenca	SIATL (Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrográficas)	1:50,000
Capa ráster de grupos hidrológicos del suelo	- INEGI SERIE II 2007 - Hernández, 2014	Escala 1:250,000
Capas ráster de precipitación, evapotranspiración y eventos de lluvia mensual	- Normales Climatológicas Servicio Meteorológico Nacional - ETo Calculator	1981-2010

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4 Características biofísicas de la cuenca del río Cajonos

A continuación, se reportan los parámetros y características biofísicas que describen la cuenca del río Cajonos.

Con la capa de Uso y Cobertura del Suelo, la capa vectorial (.shp) se obtuvo del Geoportal de la CONABIO (Serie VII: 2021) que posteriormente se convirtió a formato Geotiff (.tif) en el que se le asignó un número de identificación para cada categoría, a partir de esta capa se procedió a generar los datos biofísicos requeridos para la modelación del balance hídrico.

Los valores de coeficiente de cultivo K_c describe la evapotranspiración que sucede en cada tipo de cobertura vegetal presente en la cuenca, los valores varían en cada mes del año, por lo que en el cuadro 3 se tiene para cada clase de uso de suelo su correspondiente número de identificación en la columna contigua, las columnas siguientes deben contener los valores del coeficiente de cultivo (K_c) para los diferentes uso y cobertura del suelo para cada mes, se establecieron a partir de la información disponible por la FAO (Allen et al., 2006).

Cuadro 3. Valores de Coeficiente de cultivo K_c

Descripción	ID	K_c 1	K_c 2	K_c 3	K_c 4	K_c 5	K_c 6	K_c 7	K_c 8	K_c 9	K_c 10	K_c 11	K_c 12
Bosque de encino	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1.2	1.2	1.2	1	1	0.5
Agricultura	2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	1	1	0.9	0.8	0.5	0.3
Bosque de pino	3	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1.2	1.2	1.2	1	1	0.5
Bosque mesófilo de montaña	4	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1.2	1.2	1.2	1	1	0.5
Pastizal	5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1	1.1	1.1	1	0.9	0.5	0.4
Selva alta perennifolia	6	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1.2	1.2	1.2	1	1	0.5
Selva baja caducifolia	7	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1.2	1.2	1.2	1	1	0.5
Asentamientos humanos	8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cuerpos de agua	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia con datos de (Allen et al., 2006)

En continuación con la información requerida para la tabla biofísica, se asigna los valores de número de curva (CN), el cual combina la cobertura de suelo y el tipo

de suelo hidrológico, para asignar un valor para cada clase, los valores muy altos indica un potencial de escorrentía más alto y viceversa.

Estos valores fueron establecidos por los reportados por (Hernández, 2014) que aplico la metodología TR-55 “Hidrología urbana para cuencas pequeñas” para determinar los valores de CN de la República Mexicana.

Cuadro 4. Asignación de valores de CN

Clasificación INEGI	Tipo de vegetación INEGI uso	Numero de curva por grupo de suelo			
		A	B	C	D
Áreas forestales	Selva alta perennifolia				
	Selva baja caducifolia				
	Bosque de pino	30	55	70	77
	Bosque de encino				
	Bosque mesófilo de montaña				
Vegetación inducida-	Pastizal inducido	68	79	86	89
Cultivos	Agricultura de temporal	60	72	80	83
Zonas urbanas	Localidad	52	70	80	84
Cuerpos de agua	Ríos y arroyos	98	98	98	98

Fuente: Elaboración propia con datos de Hernández (2014).

Fue necesario agrupar los suelos en clases hidrológicas, considerando la información edafológica oficial (INEGI, 2007), con la clasificación usada por la FAO y las características texturales de cada tipo de suelos, se realizó la clasificación de suelos presentes en la cuenca (cuadro 5), mediante la clasificación realizada por Hernández, 2014 para los tipos de suelos presentes en México.

Al término de la reclasificación de los tipos de suelos al grupo hidrológico al que pertenecen, se asignó valores numéricos 1, 2, 3, 4 correspondientes a los grupo de suelos A, B, C, D respectivamente, para posteriormente convertir la capa a archivo ráster.

Cuadro 5. Asignación de grupo hidrológico a los suelos presentes en la cuenca

Tipo de suelo (INEGI)	Grupo de suelo según el USDA por textura		
	Gruesa	Media	Fina
Acrisol	B	B	C
Cambisol	B	B	C
Fluvisol	A	B	C
Leptosol	A	B	C
Luvisol	B	B	C
Phaeozem	A	B	C
Regosol	A	B	C
Umbisol	A	B	C

Fuente: Elaboración propia con datos Hernández (2014).

Para el análisis de precipitación y evapotranspiración mensual de la cuenca se utilizó los datos reportados por el servicio meteorológico nacional en las normales climatológicas de 1981-2010 de 11 estaciones presentes dentro y fuera de la cuenca Cuadro 6.

Cuadro 6. Estaciones meteorológicas

Clave Estación	Nombre	Altitud	Latitud	Longitud
20023	Cuajimoloyas	2,853.0	17.1250	-96.4167
20007	Ayutla	2,056.0	17.0167	-96.0997
20504	Tlahuitoltepec	1,223.0	17.0914	-96.0594
20314	Yalalag	1,191.0	17.1906	-96.1689
20385	Totontepec	1,645.0	17.2500	-96.1067
20177	San Ildelfonso	1,268.0	17.3500	-96.1500
20145	Talea de castro	1,607.0	17.3500	-96.2500
20183	San Juan Yaee	1,440.0	17.4331	-96.2831
20175	Valle nacional	82.0	17.7831	-96.3167
20273	Humo chico	2,012.0	17.5831	-96.5000
20041	Ixtlán de Juárez	2,312.0	17.3331	-96.4831

Fuente: Elaboración propia con datos de (SMN, 2021)

En el caso específico de datos de evapotranspiración faltantes, se usó de Eto calculator 3.1, es un software desarrollado por la (FAO, 2009) la calculadora evalúa la evapotranspiración mediante datos meteorológicos y la ecuación de

Penman-Monteith. Con los datos completos de precipitación y evapotranspiración por mes en cada estación se procedió a realizar los mapas ráster mensuales de cada parámetro para ello se usó la herramienta Kriging universal del software Qgis 3.22.8, obteniendo las dos carpetas que el programa requiere.

Concluida la caracterización biofísica de la cuenca y con los resultados del modelo se realizó el cálculo del valor monetario del servicio ecosistémico, fue necesario el tratamiento de los datos en el software Qgis, realizando como primer paso el cálculo del volumen de agua presente en cada parcela ya que el modelo realiza las estimaciones a nivel de píxel, por lo tanto, el cálculo se hizo considerando las dimensiones de pixeles del modelo de elevación digital que son con las que reporta resultados el modelo implementado.

3.5 Resultados y discusión

El servicio ecosistémico de infiltración de agua se ilustra en la figura 4, a pesar de que los valores totales de la recarga local van de 0 a 2166.8 mm, los valores más representativos son del rango 541.7 a 1625 mm. La zona de mayor recarga se presenta en la zona baja de la cuenca, esto es concordante con la gran importancia del tipo de vegetación presente en la zona, con presencia de selva alta perennifolia, mesófilo de montaña, ecosistemas de gran diversidad biológica, además de poseer de 4 a 5 estratos de vegetación, arboles frondosos con raíces que alcanzan gran profundidad los que influye considerablemente en la infiltración del agua, aunado a esto, la precipitación reportada en las estaciones meteorológicas presentes en esta cuenca va de 2500 a 3000 mm anuales, por lo tanto, es mayor la cantidad de agua que recibe la cuenca en esta zona.

La región con menor capacidad de recarga, al revisar la condición hidrológica de suelos que se clasificó en la preparación de las capas para el modelo, se puede notar la presencia de suelos poco permeables, además de la vegetación con menor densidad, y con mayor presencia de áreas agrícolas, destaca también áreas de pastizal cultivado utilizadas como áreas de pastoreo, se realizó una corroboración del área mediante Google Earth y se corrobora la escasa

vegetación en el área, ya que a pesar de contar con presencia de pinos, el área se ve considerablemente degradada.

Finalmente, el modelo determinó en las pequeñas comunidades presentes en la cuenca, y sobre todo las que se ubican en la parte baja, se reportan con una recarga máxima, esto se debe a la escasa vegetación presente en el área de población y eso no implica una mayor evapotranspiración. Además de ubicarse en zonas con un grado menor pendiente lo cual no genera un rápido escurrimiento, y así permite mayor infiltración, pero también este tipo de resultados nos permiten visualizar que en casos extremos de lluvia y con escasa vegetación las poblaciones pueden sufrir de deslaves y/o inundaciones, caso contrario a las comunidades presentes en la parte alta de la cuenca, que además de recibir una menor cantidad de precipitación y la cantidad de vegetación también es escasa sobre todo en la zona de selva baja caducifolia, el tipo de suelo y topografía considerado mediante la capa de modelo de elevación digital, el agua que recibe la zona es más fácil su escurrimiento que el aporte en la recarga hídrica.

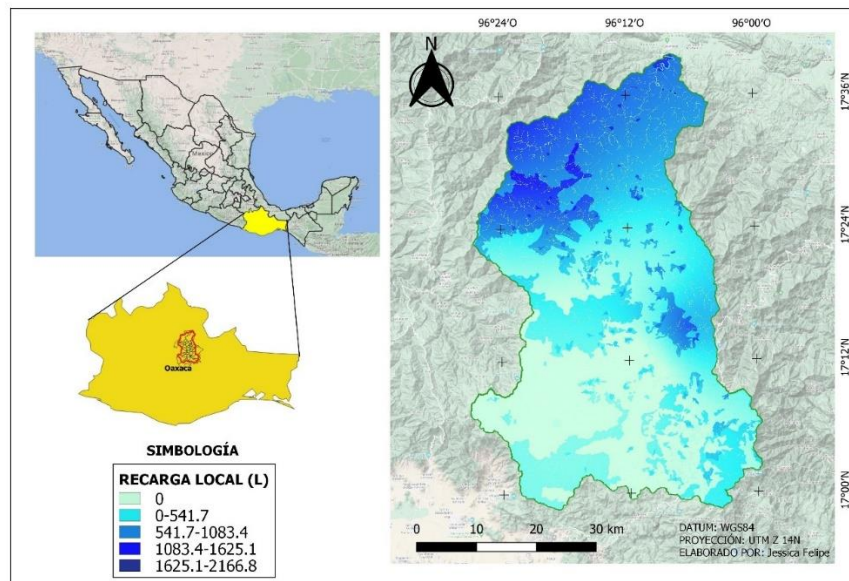


Figura 4. Recarga local de la cuenca
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los cálculos del volumen de agua que retiene cada parcela con valores más representativos son de 110 a 332 m³ anuales. CONAGUA (2020) reporta un gasto medio anual de 256.47 m³/s y un volumen anual de 8,099.58 m³ anuales de la estación B28143 ubicada en Playa Vicente, Veracruz, estación hidrometeorológica más cercana al área de estudio, en la que parte del caudal que registra pertenece el caudal de la cuenca del río Cajonos, por lo tanto, los resultados obtenidos, por el modelo empleado están dentro de los datos oficiales reportados por CONAGUA.

Para el cálculo del valor monetario del agua infiltrada en la cuenca se obtuvo que de 1,164.92 a 3,485.77 USD/m³ son el valor económico más representativo que describe este servicio ecosistémico figura 5, además se puede notar que los ecosistemas de selva alta perennifolia y el bosque mesófilo de montaña son los que mayor participación tienen en este resultado.

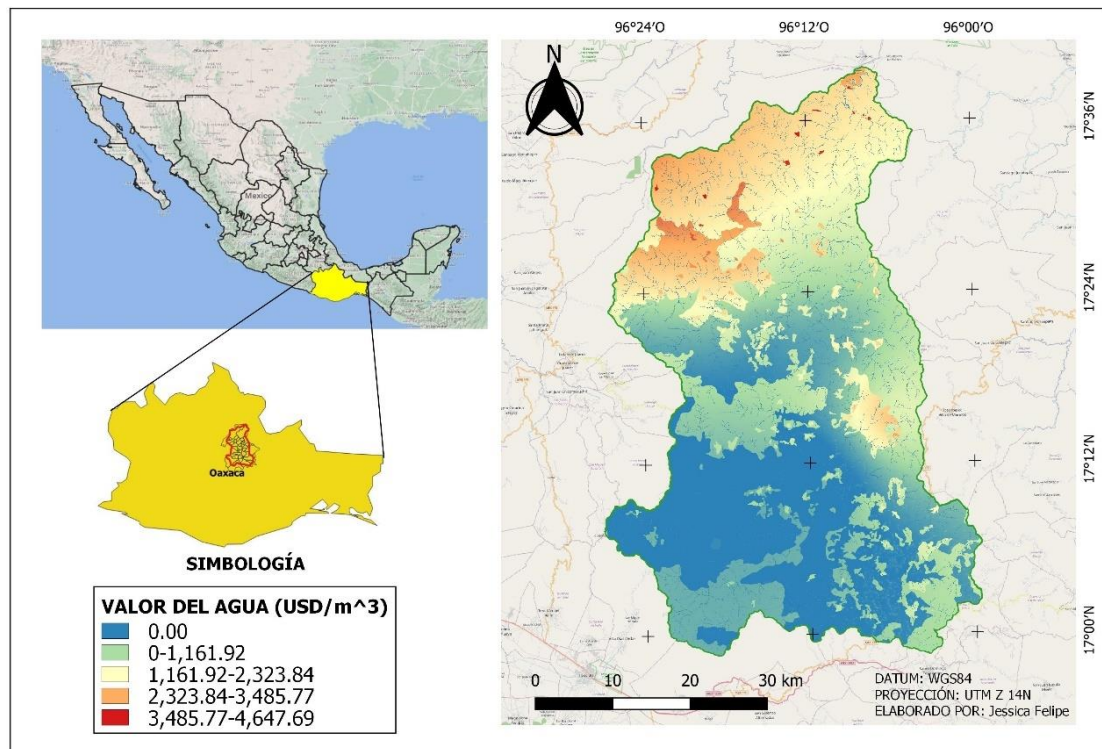


Figura 5. Valor económico del agua
Fuente: Elaboración propia con resultados del modelo SWY

Haciendo una comparación del monto monetario que el programa de pagos por servicios ambientales (CONAFOR, 2021) otorga a solo algunos municipios pertenecientes a la cuenca cuadro 7, se puede decir que en promedio se otorga \$648.20 ha/año, 37.66 USD/ha/año al tipo de cambio actual, cantidad que difícilmente representa el valor de los recursos ecosistémicos presentes en la cuenca, incluido el recurso hídrico.

Cuadro 7. Pago por servicios ambientales

Municipio	Superficie asignada (hectáreas)	Monto total Asignado (por 5 años)
Santiago Camotlán	791.00	\$2,933,529.00
San Juan Yatzona	1,848.00	\$5,873,360.00
Santa María Temaxcalapa	474.00	\$1,402,874.00
Santa María Tlahuitoltepec	1,710.00	\$7,049,234.00
Villa Díaz Ordaz	952.00	\$1,457,800.00

Fuente: Elaboración propia con datos CONAFOR, 2021.

La estimación del valor obtenido para la cuenca del Río Cajonos, difiere del valor que se ha obtenido para otras cuencas, ya que hay diferencias en el aspecto específico que se ha evaluado y en el método que se ha seguido, no obstante, el valor obtenido es comparable con las siguientes investigaciones.

Se realizó la valoración del recurso hídrico en las cuencas Savegre con una extensión de 64,864 has, Reventazón-Parismina con una extensión de 279,565.8 has y Pejibaye con una extensión de 21,975 has, en Costa Rica, realizada por Reyes et al. (2002), se aplicó el método costos de reemplazo combinando con el método costos de mantenimiento para obtener un Valor del Recurso Hídrico (VRH) por hectárea más integral, considerando como costos de reemplazo, el costo de oportunidad de la sustitución de la actividad agropecuaria dominante en el bosque y el costo de establecimiento de plantaciones forestales en las áreas agropecuarias. Además de considerar los costos de mantenimiento y protección de bosques y finalmente los costos en educación ambiental. Se obtuvo como resultado para la cuenca del Río Reventazón un valor económico promedio de

158 US\$/ha/año. Para la microcuenca del río Pejibaye un promedio de 207 US\$/ha/año. Para la cuenca del río Savegre, un promedio de 162 US\$/ha/año.

Cabe destacar que el cálculo de la disponibilidad de agua presente en las cuencas analizadas se basó solamente en la diferencia de agua precipitada menos la evapotranspirada, sin considerar las características topográficas y características físicas del suelo como en este estudio.

Lara et al. (2018) realizaron la valoración económica de los servicios ecosistémicos del complejo de Áreas Naturales Protegidas de la Sierra Madre de Chiapas con una superficie de 409,596 ha. La Valoración económica para el servicio ecosistémico de infiltración hídrica, fue por el método costo de reemplazo, mediante pozos de infiltración, obteniendo como resultados un rango de 1634.3 USD/ha hasta 6,420.3 USD/ha estos datos dependen también al igual que este estudio de la capacidad de infiltración que tiene cada área analizada.

Oyarzún et al. (2005) demostró en su estudio que existe una reducción importante en el rendimiento hídrico de una cuenca con plantaciones exóticas comparada con una cuenca de bosque nativo, lo que enfatiza la importancia del desarrollo de estrategias de manejo para mantener e incrementar los bienes y servicios que ofrecen los ecosistemas naturales y nativos como el caso de la cuenca del río Cajonos, su gran diversidad de ecosistemas le otorga características únicas en biodiversidad y en capacidad de captura de agua, por lo tanto es indispensable reconocer la importancia de cada uno de los ecosistemas sobre todo de su contribución en la capacidad de infiltración del agua.

3.6 Conclusiones

La Valoración Económica espacial que se generó en este estudio se obtuvo como valor monetario representativo para el agua infiltrada en la cuenca 1,164.92 a 3,485.77 USD/m³ servirá de apoyo a los tomadores de decisiones de la región para visualizar de una manera sencilla las áreas que más importancia tienen por la capacidad de captación de agua, y por otro lado poner mayor atención a las zonas con menor grado de infiltración ya que son zonas con un manejo

inconveniente, ya sea por la degradación de la vegetación o por las actividades agropecuarias en las que no se cuenta con el manejo adecuado.

La valoración del recurso hídrico permite manifestar la importancia que se le debe otorgar a este servicio ecosistémico. Servirá como herramienta técnica para orientar a los administradores y/o tomadores de decisiones en la región a la gestión y ordenamiento territorial, ya que el manejo del agua, suelo y vegetación en forma coordinada y con las condiciones requeridas de la situación local de uso del suelo, permitirá que las actividades humanas se realicen bajo los términos de mayor cuidado y protección de los ecosistemas, mejorando la productividad de dichos servicios además de considerar el planteo de indicadores para el monitoreo y control para el uso sustentable del agua.

Los resultados de este proyecto no buscan poner un precio a la naturaleza, se busca que sirva como referencia a las comunidades, para que sigan haciendo un buen uso de sus bosques y recurso hídrico, también se espera que sea el punto de partida para considerar los programas de conservación.

3.7 Literatura citada

Aceves-Quesada, F., López-Blanco, J., & Martin del Pozzo, A. L. (2006).

Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México.

Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23(2), 113–124.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Roma: FAO (ed.)). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>

Cantú, C., Uvalle, J., González, F., & Herrera, B. (2018). Evaluación del grado de conservación de las cuencas hidrográficas de Nuevo León, México.

Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(50).

<https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.263>

Cardenas, E. (2022). Desabasto de agua potable en algunas colonias del área

- metropolitana de Guadalajara: incumplimientos y consecuencias políticas. *Opera*, 31, 71–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.18601/16578651.n31.05>
- CONAFOR. (2021). *Acciones y Programas: Apoyos CONAFOR*.
<https://www.gob.mx/conafor/acciones-y-programas/apoyos-conafor>
- CONAGUA. (2022). *Estadísticas del agua en México 2021*.
- Cotler, H., López, C. A., & Martínez-Trinidad, S. (2011). ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México. *Investigación Ambiental*, 3(2), 18–30.
- FAO. (2009). *ETo calculator version 3.1*. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/es/>
- García, E. (1998). “Climas” (clasificación de Köppen, modificado por García) (p. Escala 1:1000000). CONABIO Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Grêt-Regamey, A., Walz, A., & Bebi, P. (2008). Valuing ecosystem services for sustainable landscape planning in Alpine regions. *Mountain Research and Development*, 28(2), 156–165. <http://www.jstor.org/stable/25164206>.
- Hamel, P., Valencia, J., Schmitt, R., Shrestha, M., Piman, T., Sharp, R. P., Francesconi, W., & Guswa, A. J. (2020). Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar. *Journal of Environmental Management*, 270, 110792.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110792>
- Hein, L. (2011). Economic benefits generated by protected areas: The case of the Hoge Veluwe Forest, the Netherlands. *Ecology and Society*, 16(2).
<https://doi.org/10.5751/ES-04119-160213>
- Hernández, F. (2014). Obtención del número de curva (NC) para la República Mexicana mediante el uso de sistemas de información geográfica, aplicando la metodología del TR-55. *Universidad Nacional Autónoma de México*, 98.

www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3244/1/Tesis.pdf

INEGI. (2010). *Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica escala 1:50 000*. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/Doc.pdf

INEGI Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (n.d.). *Índice Nacional de Precios Productor (INPP). Base julio 2019*.
inegi.org.mx/app/indicesdeprecios/Estructura.aspx?idEstructura=1120015000400020&ST=Materiales, alquiler de maquinaria y remuneraciones de la construcción

INEGI Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2021). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional)*.
<http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s7gw.html>

INPI. (2020). *Atlas de los pueblos indígenas de México*.
<https://atlas.inpi.gob.mx/>

Lara, J. A., Aguilar, A., Galeana, J. M., Guevara, A. E., Jiménez, A. D. & Núñez, J. M. (2018). Valoración económica de servicios ecosistémicos en el complejo de Áreas Naturales Protegidas de la Sierra Madre de Chiapas, *Centro Geo, CONAHCYT*.

Merino, L. (2008). Conservación comunitaria en la cuenca alta del Papaloapan, Sierra Norte de Oaxaca. *Nueva Antropología*, 21(68), 37–49.

Morales, J. (2021). Diagnóstico del servicio ambiental de provision hídrica en las comunidades indígenas de la parroquia Lumbaqui, Ecuador. *Revista Agrollania de Ciencia y Tecnología*, 20, 89–98.

Natural Capital Project. (2023). *InVEST 3.14.0. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences*.
<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

- Oyarzún, C. E., Nahuelhual, L., & Núñez, D. (2005). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo*, 20(3), 88–95.
- Pereira, D., Martinez, M. A., Pruski, F. F., & da Silva, D. D. (2016). Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 7, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>
- Quintero, L. (2021). Valoración ambiental del agua en el Municipio Libertador del estado Mérida. *Actualidad Contable Faces*, 24(42), 175–194. <https://doi.org/https://doi.org/10.53766/ACCON/2021.42.07>
- Reyes, V., Fallas, J., Miranda, M., Segura, O., & Sanchez, R. (2002). Parámetros para la valoración del servicio ambiental hídrico brindado por los bosques y plantaciones de Costa Rica. *Serie Documentos de Trabajo, FONAFIFO*.
- Santillan, E., Davila-Vazquez, G., Anda, J., & Díaz, J. de Jesus. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México. *Revista Ambiente & Agua*, 8(3), 104–117. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1147>
- SMN. (2021). *Información Estadística Climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Vanegas-Espinosa, L. I. (2018). Pozos de inyección profunda_Recarga artificial de acuíferos con aguas pluviales y disminución de inundaciones en el AMG. Universidad Jesuita de Guadalajara.

4. CONCLUSIONES GENERALES

La estimación económica realizada en el área, resulta ser una valoración pionera de este tipo para la cuenca completa, al igual que los datos de infiltración, puede ser usada por los actores sociales de la región y seguir en el estudio de este tipo, se considera de gran importancia seguir con la valoración de cada uno de los diversos servicios ecosistémicos que aporta la región.

Los resultados presentados forman la base para una línea de investigación pionera que se debe desarrollar en la región, sobre todo en estudios de valoración económica de los diversos servicios ecosistémicos que la cuenca ofrece, además de desarrollar nuevas estrategia de aprovechamiento y planificación territorial de la región.

Con la realización de la valoración económica, resulta imprescindible poder internalizar los valores económicos del servicio ecosistémico analizado en sistemas formales de mercado, uno de ellos podría ser el pago por servicios ambientales hidrológicos.

Para la cuenca se recomendaría actividades económicas alternativas a la agricultura convencional, esto para el desarrollo económico de las comunidades, ya que con las características de los ecosistemas con mayor biodiversidad y mejor conservados del territorio nacional, es posible seguir con los modelos de empresas comunitarias de la sierra norte de Oaxaca, implementando la producción forestal, la recolección y producción de hongos, la producción de resina, granjas piscícolas, potabilizadoras de agua, venta de servicios ambientales y actividades turísticas.

Se recomienda hacer una Valoración Económica Total considerando todos los servicios presentes en la cuenca, utilizando diversas metodologías y que los resultados estén disponibles para la creación de estrategias de gestión y aprovechamiento de los recursos con fines de conservación.